



Bundesinstitut
für Sportwissenschaft



Wir helfen
dem Sport

Dominic Gehring · Christoph Künzel · Jakob Ketterer ·
Roland Blechschmied · Urs Granacher

Expertise zum Einfluss von Sportböden und Sportschuhen auf akute Verletzungen im Teamsport

Analyse von Epidemiologie, Biomechanik und Versicherungsdaten



Dominic Gehring · Christoph Künzel · Jakob Ketterer ·
Roland Blechschmied · Urs Granacher

Expertise zum Einfluss von Sportböden und Sportschuhen auf akute Verletzungen im Teamsport

Analyse von Epidemiologie, Biomechanik und Versicherungsdaten

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über „<https://portal.dnb.de>“ abrufbar.

Impressum

Herausgeber

Bundesinstitut für Sportwissenschaft | BISp
Graurheindorfer Straße 198 · 53117 Bonn
publikation@bisp.de
www.bisp.de

Ansprechperson

Katharina Schorr
katharina.schorr@bisp.de
Tel.: +49 228 99 640 9062

Dr. Jutta Katthage
jutta.katthage@bisp.de
Tel.: +49 228 99 640 9026

Stand

November 2025

Erscheinungsjahr

2026

Gehring, Dominic; Künzel, Christoph; Ketterer, Jakob; Blechschmied, Roland; Granacher, Urs

Expertise zum Einfluss von Sportböden und Sportschuhen auf akute Verletzungen im Teamsport

Analyse von Epidemiologie, Biomechanik und Versicherungsdaten

ISBN 978-3-96523-133-7

DOI <https://doi.org/10.4126/FRL01-006511254>

AZ 080609/24

Gestaltung

MedienMélange: Kommunikation!
Goetheallee 6, 22765 Hamburg

Bildnachweis

Umschlagfoto: majorosl | gettyimages.de

Inhaltsverzeichnis



Inhalt

Abkürzungsverzeichnis	8
1 Einleitung und Forschungsproblematik	9
1.1 Problemstellung	10
1.2 Theoretischer Hintergrund	11
1.3 Zielstellung der Expertise	13
2 Systematischer Literaturüberblick mit Meta-Analyse zum Einfluss unterschiedlicher Sportbodenbeläge auf das Verletzungsrisiko im Teamsport	15
2.1 Einleitung	16
2.2 Methodik	17
2.2.1 Einschlusskriterien für diese Übersichtsarbeit	17
2.2.2 Literatursuche/Suchstrategie	17
2.2.3 Studienwahl	18
2.2.4 Datenextraktion	18
2.2.5 Syntheseansätze	18
2.2.6 Meta-Analyse	18
2.2.7 Systematischer Überblick mit Scoping-Ansatz	19
2.3 Ergebnisse	19
2.3.1 Ergebnisse der systematischen Literaturrecherche	19
2.3.2 Meta-Analyse (Naturrasen vs. Kunststoffrasen)	21
2.3.3 Qualitative Analyse zum Vergleich von Naturrasen und Kunststoffrasen	28
2.3.4 Qualitative Analyse zum Vergleich weiterer Sportböden	30
2.4 Diskussion	33
2.4.1 Vergleich Naturrasen vs. Kunststoffrasen	33
2.4.2 Vergleich weiterer Sportböden	35
2.4.3 Limitationen der Analyse	36
2.4.4 Schlussfolgerungen für Praxis und Forschung	37
2.5 Geschlechtsspezifische Analysen	38
2.5.1 Vergleich Naturrasen vs. Kunststoffrasen	38
2.5.2 Vergleich von Hallenböden	39
2.5.3 Fazit	39
3 Scoping Review zum Einfluss unterschiedlicher Konstruktionsmerkmale von Sportschuhen auf das Verletzungsrisiko im Teamsport.	41
3.1 Einleitung	42
3.2 Methodik	42
3.2.1 Einschlusskriterien für diese Übersichtsarbeit	42
3.2.2 Literatursuche/Suchstrategie	43
3.2.3 Studienwahl	43
3.2.4 Datenextraktion	43
3.3 Ergebnisse	43
3.3.1 Ergebnisse der systematischen Literaturrecherche	43
3.3.2 Einfluss der Traktion von Sportschuhen auf das Verletzungsrisiko im Teamsport	45
3.3.3 Einfluss der Stollenkonfiguration von Sportschuhen auf das Verletzungsrisiko im Teamsport ..	47
3.3.4 Einfluss von Dämpfungssystemen in Sportschuhen auf das Verletzungsrisiko im Teamsport ...	48
3.4 Diskussion	48

3.4.1	Einfluss der Traktion und der Stollenkonfiguration von Sportschuhen auf das Verletzungsrisiko im Teamsport	49
3.4.2	Einfluss von Dämpfungssystemen in Sportschuhen auf das Verletzungsrisiko im Teamsport ...	50
3.5	Praktische Implikationen	51
3.6	Geschlechtsspezifische Analyse	52
4	Narrativer Überblick zur Interaktion von Sportböden und Sportschuhen auf verletzungsbezogene biomechanische Parameter von Athletinnen und Athleten	53
4.1	Einleitung	54
4.2	Wirkungen von Traktionseigenschaften auf verletzungsassoziierte biomechanische Parameter	54
4.3	Einfluss der Stollenkonfiguration auf die Traktion	57
4.4	Einfluss der Dämpfungseigenschaften auf biomechanische Belastungen	59
4.5	Einfluss der Schafthöhe auf biomechanische Belastungen	60
4.6	Einfluss der Biegesteifigkeit auf biomechanische Belastungen	61
5	Verletzungsgeschehen im professionellen Sport und im Breitensport anhand von Versicherungsdaten	63
5.1	Fußball	65
5.1.1	Analyse von Verletzungen im professionellen Sport	65
5.1.2	Analyse der Verletzungen im Breitensport anhand der Daten der Stiftung Sicherheit im Sport	66
5.2	Basketball	68
5.2.1	Analyse von Verletzungen im professionellen Sport	68
5.2.2	Analyse der Verletzungen im Breitensport	69
5.3	Handball	70
5.3.1	Analyse von Verletzungen im professionellen Sport	70
5.3.2	Analyse der Verletzungen im Breitensport anhand der Daten der Stiftung Sicherheit im Sport ...	72
5.4	Diskussion	74
5.4.1	Relevanz der Schuh-Sportboden-Interaktion bei Knie- und Sprunggelenkverletzungen	74
5.4.2	Nicht-Kontakt-Verletzungen durch strukturelle Überbelastung	74
5.4.3	Subjektiver Einfluss der Bodenbeschaffenheit am Verletzungsgeschehen im Breitensport ...	74
5.5	Praktische Implikation	75
6	Zusammenfassung und Implikationen für Praxis und Forschung	77
6.1	Zusammenfassung der wesentlichen Befunde	78
6.2	Einfluss geschlechtsspezifischer Unterschiede auf das Verletzungsrisiko	79
6.3	Analyse der Versichertendatenbanken	80
6.4	Praxisempfehlungen	81
6.5	Implikationen für die Normung	81
6.6	Implikationen für zukünftige Forschung	82
	Danksagung	85
	Literatur	87

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AT	Kunststoffrasen (artificial turf)
BASE	Bielefeld Academic Search Engine
BISp	Bundesinstitut für Sportwissenschaft
CI	Konfidenzintervall (confidence interval)
DIN	Deutsches Institut für Normung
FIBA	Fédération Internationale de Basketball
FIFA	Fédération Internationale de Football Association
IFAB	International Football Association Board
IHF	International Handball Federation
IRR	Inzidenzratenverhältnisse (Incidence Rate Ratios)
NCAA	National Collegiate Athletic Association
NG	Naturrasen (natural grass)
NKV	Nicht-Kontakt-Verletzungen
OR	Chancenverhältnis (odds ratio)
PECO	Population, Exposure, Comparator, Outcome
PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
RR	Relatives Risiko
UEFA	Union of European Football Associations
VBG	Verwaltungs-Berufsgenossenschaft
VKB	Vorderes Kreuzband

1 Einleitung und Forschungsproblematik

1.1 Problemstellung

Teamsportarten wie Fußball, Handball, Basketball oder Hockey sind weltweit sowohl im Breiten- als auch im Spitzensport verbreitet. Sie bieten durch Faktoren wie soziale Interaktion, koordinative Anforderungen und körperliche Trainingsanpassungen mannigfaltige Vorteile für Leistungsfähigkeit und Gesundheit (Herzog, 2018). Regelmäßige sportliche Aktivität trägt zudem nachweislich zu einem gesünderen und längeren Leben bei (Miller et al., 2016). Gleichzeitig ist Sport jedoch mit einem inhärenten Verletzungsrisiko verbunden. Es ist evident, dass die Ausübung von Teamsportarten, insbesondere bei hoher Exposition im Training und Wettkampf, mit Risiken für muskuloskelettale Verletzungen einhergeht, wie etwa Rupturen des vorderen Kreuzbandes (VKB) (Chia et al., 2022), Sprunggelenkdistorsionen (Fong et al., 2007) oder muskulären Verletzungen der Oberschenkelrückseite (Maniar et al., 2023). Angesichts der hohen Inzidenz und teils erheblichen Schwere dieser Verletzungen erscheint es dringend erforderlich, sowohl verhaltensbezogene (z. B. Training) als auch verhältnispräventive Maßnahmen (z. B. Gestaltung von Sportböden und Sportschuhen) zu entwickeln und umzusetzen. Solche verletzungspräventiven Ansätze setzen jedoch ein tiefgehendes Verständnis der Ätiologie voraus. Demnach gilt es, Verletzungsrisikofaktoren sowie die zugrundeliegenden Verletzungsmechanismen zu identifizieren. Hinsichtlich der Verletzungsmechanismen sind vor allem *Nicht-Kontakt-Verletzungen (NKV)* und indirekte Kontaktverletzungen von Interesse, da sie im Amateurbereich mehr als die Hälfte und im semi- sowie professionellen Bereich etwa ein Drittel aller Verletzungen ausmachen und im Vergleich zu direkten Kontaktverletzungen grundsätzlich als vermeidbarer gelten (Szymiski et al., 2022). NKV haben darüber hinaus auch eine besondere Relevanz, da sie einen Großteil der schweren Verletzungen im Teamsport, wie derjenigen des VKB, verursachen (Chia et al., 2022). So entfallen beispielsweise im professionellen Sport über 80 % der Achillessehnenrupturen auf NKV (Della Villa et al., 2022). Muskuläre Verletzungen

wie Zerrungen oder Muskelfaserrisse treten sogar nahezu ausschließlich ohne direkte äußere Einwirkung auf (Ekstrand et al., 2011).

Im Unterschied zu Kontaktverletzungen kann auf die zugrundeliegenden Faktoren von NKV in verstärktem Ausmaß Einfluss genommen werden. Während Tritte oder Kollisionen mit anderen Spielerinnen und Spielern oft außerhalb der Kontrolle der Athletinnen und Athleten liegen, hängen NKV auch von Faktoren ab, die potenziell veränderbar sind. Dementsprechend ist die Vermeidung von NKV zunehmend in den Fokus sowohl der Wissenschaft als auch der Sportpraxis gerückt, da hier durch präventive Maßnahmen und optimierte Bedingungen das Verletzungsrisiko gesenkt werden kann. Die Risikofaktoren können in internale (personenbezogene) und externale (umweltbezogene) Verletzungsrisikofaktoren sowie modifizierbare und nicht modifizierbare unterteilt werden. Im Fokus internaler Risikofaktoren stehen oftmals durch Training modifizierbare Komponenten wie Kraft, Gleichgewicht oder Agilität. Nicht modifizierbare externale Risikofaktoren umfassen die Sportart, das Spielniveau, die Spielposition oder das Wetter. Veränderbare externale Risikofaktoren sind der Untergrund, auf dem die Sportart ausgeübt wird, sowie der zur Ausübung der Sportart genutzte Sportschuh (Myklebust et al., 2001; Olsen et al., 2003).

Gerade im Teamsport stellt sich die Frage, welche Rolle die veränderbaren externalen Risikofaktoren Sportböden und Sportschuhe bei der Entstehung von Verletzungen der unteren Extremitäten spielen. Die Interaktion von Sportböden und Sportschuhen mit den Athletinnen und Athleten bestimmt die mechanische Belastung auf den Bewegungsapparat. Mit dem Aufsetzen des Fußes beziehungsweise Schuhs auf dem Boden wirken Kräfte zwischen den beiden Systemen Mensch und Untergrund, welche je nach Bewegungsdynamik ein Vielfaches der Körpermasse betragen können (Jones et al., 2016). In Kombination mit Faktoren wie situativer Bewegungsausführung und körperlicher Leistungsfähigkeit können external und internal wirkende

Kräfte dazu führen, dass bei verletzungsassoziierten Bewegungen wie schnellen Richtungswechseln oder Landungen die Belastungstoleranz von Gewebestrukturen (z.B. Sehnen, Bändern oder Muskeln) überschritten wird und sich folglich Verletzungen der unteren Extremitäten ereignen (Kalkhoven et al., 2020).

Wenngleich diverse Rahmenbedingungen für den Bau von Sportböden im Innen- und Außenbereich existieren, erschweren die mannigfaltigen Kombinationsmöglichkeiten aus unterschiedlichen Sportböden und Sportschuhen sowie eine stetige technologische Weiterentwicklung eine Bewertung des Einflusses beider Faktoren auf die Epidemiologie und Ätiologie von NKV im Teamsport. Vor diesem Hintergrund ist es das Ziel der vorliegenden Expertise, durch systematische literatur- und datenbasierte Untersuchungen den Einfluss von Sportböden und Sportschuhen auf NKV zu untersuchen. Auf dieser Grundlage werden abschließend Forschungsbedarfe identifiziert und, sofern möglich, fundierte Empfehlungen für die Gestaltung von Sportböden und die Entwicklung von Sportschuhen für eine effektive Reduzierung des Risikos von NKV in Teamsportarten abgeleitet.

1.2 Theoretischer Hintergrund

NKV treten in Teamsportarten sowohl im Training als auch im Wettkampf mit Inzidenzen von 2,4 bis 45,0 Verletzungen pro 1000 Stunden vergleichsweise häufig auf (Zech et al., 2022). Epidemiologische Erhebungen von Unfallversicherungsträgern aus Deutschland zeigen, dass in vielen Teamsportarten – sowohl im Breiten- als auch im Leistungs- und Spitzensport – vor allem Kniegelenk, Sprunggelenk und Oberschenkel zu den am häufigsten betroffenen Körperregionen zählen (Henke et al., 2014; Klein et al., 2022). Das insgesamt hohe Verletzungsrisiko im Teamsport ist unter anderem auf die ausgeprägte Bewegungsdynamik und die komplexen Spielsituationen im Teamsport zurückzuführen, die besonders hohe Anforderungen an die

Athletinnen und Athleten hinsichtlich der situationsgerechten Bewegungsausführung und der Kontrolle von externalen Kräften stellen (Boden & Sheehan, 2022; Gokeler et al., 2021; Serner et al., 2019). Mit dem Aufsetzen des Fußes auf den Boden werden abrupt hohe Kräfte in den Körper eingeleitet, die durch passive Strukturen wie Knochen und Bänder sowie durch komplexe neuromuskuläre Mechanismen kompensiert werden müssen. Läuft dieser neuromuskuläre Steuerungsvorgang unzureichend ab, können vor allem Verletzungen der unteren Extremitäten die Folge sein. Akute Verletzungen treten häufig während dynamischer Aktionen wie Landungen, Abbrems- oder Beschleunigungsvorgängen oder schnellen Richtungswechseln auf. Diese Bewegungen erfolgen oft unter hohem Zeitdruck (z.B. Pressing-Situationen) und Präzisionsdruck (z.B. Passspiel) und erfordern schnelle Entscheidungen und hiermit verbunden erhebliche neurokognitive Leistungen (Gokeler et al., 2021; Lucarno et al., 2021; Olsen et al., 2004; Serner et al., 2019). Neben reinen NKV sind im Teamsport auch indirekte Kontaktverletzungen relevant, bei denen zwar ein Körperkontakt mit einem Mit- oder Gegenspieler erfolgt, dieser Kontakt jedoch nicht unmittelbar an der verletzten Körperregion stattfindet. Ein solcher Kontakt kann das intendierte und feed-forward-gesteuerte Bewegungsmuster stören und somit Verletzungen begünstigen. Sowohl bei NKV als auch bei indirekten Kontaktverletzungen spielen biomechanische Faktoren eine entscheidende Rolle. Hierzu zählen beispielsweise die spezifischen mechanischen Eigenschaften der verletzten Struktur, Bewegungen in proximalen und distalen Gelenksegmenten (etwa das Fußaufsatzverhalten) sowie die neuromuskuläre Ansteuerung (Hewett & Myer, 2011; Lysdal et al., 2022; Serner et al., 2019).

Die Ätiologie von Sportverletzungen ist multifaktoriell. Dementsprechend konnten Autorinnen und Autoren verschiedener Forschungsarbeiten internale Risikofaktoren für NKV identifizieren, darunter die Körpermasse, das Alter, Geschlecht, vorherige Verletzungen, sowie Defizite

in der Muskelkraft und Leistung bei diversen Funktionstests (z.B. dem *Star Excursion Balance Test* oder *Single Leg Hop Test*) als Maß für die neuromuskuläre Leistungsfähigkeit (Bisciotti et al., 2019; Collings et al., 2021; Dolan et al., 2023; Zech et al., 2022). Ein integraler Bestandteil von Verletzungsmechanismen im Teamsport ist die Interaktion von Athletinnen und Athleten mit ihrem Sportschuh und dem Untergrund während der Standphase. Dementsprechend können dem Sportboden und dem getragenen Sportschuh als modifizierbare externale Risikofaktoren zentrale Rollen zukommen, wenn es um die Prävention von Verletzungen geht. Vor diesem Hintergrund ist es bedeutsam, den aktuellen Forschungsstand bezüglich NKV im Hinblick auf die Nutzung unterschiedlicher Sportböden und Sportschuhe zu betrachten. Für den Bau und die Ausstattung von Sportstätten, sowohl in der Halle als auch im Freien, existieren Normen des *Deutschen Instituts für Normung (DIN)*, die physikalisch-mechanische Eigenschaften von Sportbodenbelägen festlegen. Maßgeblich für Hallensportböden für Gerätturnen, Sportspiele und Mehrzwecknutzung ist die *DIN 18032-2*, für Sportflächen mit Rasendecke die *DIN 18035-4*, für Tennenflächen die *DIN 18035-5*, für Kunststoffflächen die *DIN 18035-6* sowie für Kunststofffrasensysteme und Kunststofffrasenflächen die *DIN 18035-7* und *DIN EN 15330-1*. Diese Normen regeln Kenngrößen wie den Kraftabbau (Stoßdämpfung), das Verformungsverhalten, das Gleit- bzw. Reibungsverhalten, die Härte oder die Ebenheit von Böden. Ziel dieser Vorgaben ist es unter anderem, die mechanischen Belastungen für die Sportlerinnen und Sportler zu reduzieren und eine sichere sportliche Bewegungsausführung zu gewährleisten. Die Vorgaben zum Einsatz von Sportschuhen sind hiermit verknüpft und werden maßgeblich von den nationalen und internationalen Sportverbänden (z.B. *FIFA*, *UEFA*, *FIBA*, *IHF*) sowie den zugehörigen Kommissionen (z.B. *International Football Association Board*, *IFAB*) in den jeweiligen Spiel- und Durchführungsbestimmungen geregelt. Trotz dieser Regularien verfügen die Sportschuhhersteller über einen beträchtlichen Gestaltungsspielraum, etwa hinsichtlich der Konfiguration der Außensohle, einschließlich der Anordnung und Form von Stollen bei Fußballschuhen.

Einen einheitlichen Industriestandard für die mechanischen Eigenschaften von Sportschuhen gibt es bislang nicht. Angesichts der stetig voranschreitenden technologischen Entwicklung von Sportböden und Sportschuhen stellt sich daher die Frage, inwieweit bestehende Normen und Regularien evidenzbasiert sind und ob sie entsprechend dem aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnisstand angepasst werden müssen.

Der Einfluss von Sportböden, Sportschuhen und deren Interaktion auf Verletzungen ist seit Dekaden ein zentraler Forschungsgegenstand. Während der letzten Jahre aggregierten unterschiedliche Autorinnen und Autoren die Befunde von Originalarbeiten, um in Form von Meta-Analysen statistisch abgesicherte Aussagen zum Verletzungsrisiko auf unterschiedlichen Sportböden zu treffen. Thomson et al. (2015) untersuchten in ihrer Meta-Analyse den Zusammenhang der Schuh-Sportboden-Interaktion und Verletzungen der unteren Extremitäten im American Football. Weitere Konstruktionsmerkmale von Sportschuhen, die in der Fachliteratur epidemiologisch hinsichtlich ihres Einflusses auf das Verletzungsrisiko untersucht wurden, sind Dämpfungselemente bei Basketballschuhen (z.B. Curtis et al., 2008; McKay et al., 2001; Moré-Pacheco et al., 2019), Schuhtraktion im American Football (z.B. Wannop et al., 2013) und Schuhfraktion im Handball, Basketball und Badminton (z.B. Lysdal et al., 2021), die Schafthöhe bei Schuhen im American Football (z.B. Iacovelli et al., 2013) sowie Stollenkonfigurationen im Fußball (z.B. Iraqui-Rato & Cuesta-Barriuso, 2024; O’Kane et al., 2016) und American Football (z.B. Iacovelli et al., 2013). Ein Literaturüberblick aus dem Jahr 2017 in der Sportart Fußball zeigte jedoch auch, dass andere verletzungsassoziierte mechanische Faktoren wie Längsbiegesteifigkeit oder Torsion bislang nur unzureichend untersucht wurden und demzufolge noch erheblicher Forschungsbedarf besteht (Kulesa et al., 2017).

Neben dem Schuhwerk wird auch der Sportboden als Risikofaktor für NKV diskutiert. So werfen etwa verschiedene Rasentypen wie Natur-, Kunst- oder Hybridrasen und deren unterschiedliche Entwicklungsstufen die Frage auf, welchen Einfluss sie auf das Verletzungsgeschehen haben.

Vor allem wurden Verletzungen im Kontext von auf Rasen- vs. Kunststoffrasenflächen ausgetragenen Teamsportarten epidemiologisch untersucht und mittlerweile in mehreren Meta-Analysen aufgegriffen (z.B. Kuitunen et al., 2023).

Experimentelle Arbeiten belegen, dass Eigenschaften von Kunststoffrasenflächen wie die Faserdichte, die Faserlänge, die Zusammensetzung und Verdichtung des Füllstoffs und sogar das Alter der Kunststoffrasenfläche einen Einfluss auf die Gelenkbelastung haben können (Schrier et al., 2022; Wannop et al., 2019). Im Zusammenhang mit auf flächenelastischen Böden ausgetragenen Teamsportarten wurden in der Vergangenheit ebenfalls empirische Untersuchungen durchgeführt. Beispielsweise analysierten Arbeitsgruppen, (i) inwieweit durch die Steifigkeit von Schuh und Boden die Achillessehnenbelastung beeinflusst werden kann (Firminger et al., 2019), (ii) ob durch eine Reduzierung der Friktion zwischen Schuh und Untergrund Sprunggelenkdistorsionen vermieden werden können (Lysdal et al., 2021) oder (iii) ob sich Verletzungsraten zwischen Parkettböden und synthetischen Böden (z.B. Linoleum, Polyvinylchlorid, Polyurethan) unterscheiden (Olsen et al., 2003; Pasanen et al., 2008).

Im Kontext der zentralen Fragestellung hinsichtlich der Wirkung von Sportböden, Sportschuhen und deren Interaktion auf Verletzungsraten im Teamsport sollten schließlich geschlechtsspezifische Faktoren berücksichtigt werden. Nicht nur bei Rupturen des VKB, sondern auch für andere Verletzungstypen ist Evidenz für geschlechtsspezifische Unterschiede in den Verletzungsraten und -mechanismen vorhanden (Stojanović et al., 2023; Zech et al., 2022). Obwohl diese Differenzen primär intrinsischen Ursachen zugeschrieben werden (etwa anatomischen, hormonellen oder neuromuskulären Unterschieden), legen aktuelle Befunde dar, dass auch externe Faktoren eine Rolle spielen können (z.B. Xiao et al., 2022).

1.3 Zielstellung der Expertise

Das Ziel der vorliegenden Expertise ist es, im Rahmen eines ganzheitlichen Ansatzes den Einfluss der beiden Faktoren Sportboden und Sportschuh auf NKV im Teamsport zu untersuchen. Dazu werden zum einen die wissenschaftliche Fachliteratur und zum anderen die Datenbanken von Versicherungen im deutschen Spitzen- und Breitensport analysiert. Durch diese komplementären Ansätze soll die komplexe Wechselwirkung zwischen Konstruktionsmerkmalen von Sportboden und Sportschuh sowie deren Einfluss auf das Verletzungsrisiko verstanden werden. Zur Sicherung der Vergleichbarkeit und Aussagekraft fokussiert die Expertise ausschließlich akute Verletzungen als Endpunkte. Akute Verletzungen sind zeitlich eindeutig und können einer Exposition (Training/Wettkampf) klar zugeschrieben werden, wodurch sich valide epidemiologische Kennzahlen ableiten und zwischen Boden- und Schuhbedingungen vergleichen lassen. Chronische Verletzungen entstehen durch kumulative Beanspruchung, werden in der Primärliteratur heterogen definiert und lassen sich im Mannschaftssport schwer mit den Eigenschaften von Sportboden und Sportschuh in Verbindung bringen. Zudem berücksichtigt die Versichertendatenbank im Spitzensport ausschließlich als Arbeitsunfall anerkannte Akutverletzungen. Ausfallzeiten durch chronische Beschwerden bleiben hierbei erhebungsmethodisch unberücksichtigt.

Grundsätzlich sollen in dieser Expertise folgende zentrale Fragestellungen beantwortet werden:

F1. Inwiefern beeinflussen unterschiedliche Sportbodenbeläge das Risiko von Verletzungen in Teamsportarten?

Zur Beantwortung dieser Frage wird ein systematischer Literaturüberblick mit Meta-Analyse von epidemiologischen Studien durchgeführt. Da NKV in der Literatur häufig nicht separat ausgewiesen werden, wird das Gesamtverletzungsrisiko in Abhängigkeit vom Bodenbelag analysiert. Es wird dabei angenommen, dass relative Unterschiede im Gesamtverletzungsrisiko auch auf Unterschiede im NKV-Risiko

hinweisen, da Kontaktverletzungen bei gleichbleibender Sportart über die Vergleichsgruppen hinweg gleichverteilt sind.

F2. Inwiefern beeinflussen Konstruktionsmerkmale von Sportschuhen das Risiko von Verletzungen in Teamsportarten?

Zur Beantwortung dieser Frage wird ein systematischer Literaturüberblick von epidemiologischen Studien durchgeführt. Es wird ebenfalls das Gesamtverletzungsrisiko in Abhängigkeit von Konstruktionsmerkmalen bzw. Eigenschaften von Sportschuhen analysiert, da NKV in der Literatur nicht separat betrachtet werden.

F3. Wie wirken sich die Eigenschaften von Sportböden und Sportschuhen und ihre Interaktion auf den Verletzungsmechanismus von Nicht-Kontakt-Verletzungen aus?

Zur Beantwortung dieser Frage wird ein narrativer Literaturüberblick nach systematischer Literatursuche von biomechanischen Studien durchgeführt, die sich explizit mit den Mechanismen von NKV befassen.

F4. Inwieweit beeinflussen geschlechtsspezifische Unterschiede das Verletzungsrisiko unter Berücksichtigung der Interaktion von Mensch, Sportschuh und Sportboden?

Geschlechtsspezifische Unterschiede werden im Rahmen der Forschungsfragen F1 bis F3 als Variable berücksichtigt und analysiert. Anschließend erfolgt eine zusammenfassende Betrachtung der geschlechtsspezifischen Einflüsse.

Auf Grundlage dieser Fragen sollten konkrete Implikationen für zukünftige Forschungsarbeiten abgeleitet und, sofern möglich, praxisrelevante Empfehlungen für die Entwicklung von Sportschuhen und Sportböden ausgesprochen werden. Damit sollten Ansatzpunkte identifiziert werden, wie durch Berücksichtigung dieser Faktoren die Verhältnisprävention von NKV im Teamsport verbessert werden kann.

2 Systematischer Literaturüberblick mit Meta-Analyse zum Einfluss unterschiedlicher Sportbodenbeläge auf das Verletzungsrisiko im Teamsport

2.1 Einleitung

Verletzungen stellen in Mannschaftssportarten (z.B. Fußball, Handball, Basketball) ein häufiges und relevantes Problem dar, das zu beträchtlichen Ausfallzeiten der Athletinnen und Athleten und im schlimmsten Fall zu einem vorzeitigen Karriereende führen kann. Während intrinsische Risikofaktoren wie Alter, Geschlecht oder die individuelle Verletzungsvorgeschichte nur begrenzt beeinflussbar sind, rücken modifizierbare externe Risikofaktoren zunehmend in den Fokus der präventiven Forschung. Entsprechend wird in sportwissenschaftlichen Fragestellungen zunehmend die Rolle von Art und Beschaffenheit des Sportbodenbelags im Zusammenhang mit dem Verletzungsgeschehen in Training und Wettkampf untersucht.

Studienergebnisse deuten darauf hin, dass die Konstruktion von Sportböden ein Risikofaktor für nicht-kontaktbedingte Verletzungen im Teamsport darstellen kann (O’Kane et al., 2016). Die Vielfalt an verfügbaren Bodenarten – etwa Naturrasen und verschiedene Generationen von Kunststoffrasen oder unterschiedliche Hallenbodenbeläge – unterscheidet sich teils in ihren Eigenschaften wie Kraftabbau, Drehwiderstand oder Gleitverhalten. Diese Eigenschaften könnten das Verletzungsrisiko von Spielerinnen und Spielern maßgeblich beeinflussen, insbesondere bei schnellen Richtungswechseln, Sprints oder Landungen, wie sie im Teamsport häufig vorkommen (Wannop et al., 2019).

Im Rahmen dieser literaturbasierten Expertise wurde ein systematischer Überblick mit Meta-Analyse zu den Effekten verschiedener Sportbodenbeläge auf das Verletzungsrisiko im Mannschaftssport erstellt. Auf Grundlage einer systematischen Literaturanalyse und auf Basis epidemiologischer Daten sind die Ziele dieser Arbeit:

- 1. Untersuchung des Einflusses verschiedener Bodenarten auf das Verletzungsrisiko von Spielerinnen und Spielern in Teamsportarten.
- 2. Identifikation von Forschungslücken zum Einfluss von Sportböden auf das Verletzungsgeschehen von Spielerinnen und Spielern in Teamsportarten.

Diese Übersicht liefert Sportwissenschaftlerinnen und Sportwissenschaftlern, Trainerinnen und Trainern, Athletinnen und Athleten und Entscheidungstragenden in Vereinen, Verbänden und Kommunen eine fundierte Grundlage für die Auswahl geeigneter Spielflächen, um daraus Ableitungen für geeignete und wirkungsvolle Präventionsstrategien zu ziehen. Darüber hinaus werden Empfehlungen gemacht, um das komplexe Forschungsfeld bestehend aus vielen Freiheitsgraden evidenzbasiert weiterzuentwickeln.

Tab. 1: Einschlusskriterien hinsichtlich des PECO-Schemas (Population, Exposure, Comparator, Outcome)

Kategorie	Einschlusskriterium	Ausschlusskriterium
Population	Mannschaftssportarten	2 vs. 2 Sportarten; Eishockey
Exposure	Vergleich von unterschiedlichen Sportbodenbelägen	Eisflächen
Comparator	Anderer Bodenbelag (z. B. Natur- vs. Kunststoffrasen)	Kein Vergleich vorhanden; keine Kontrollbedingung
Zielparameter – Verletzungen	Akute Verletzungen	Chronische Verletzungen
Zielparameter – Epidemiologie	Epidemiologische Kennzahlen zur Quantifizierung des Verletzungsrisikos und von Verletzungsraten	Keine epidemiologischen Kennzahlen berichtet

2.2 Methodik

2.2.1 Einschlusskriterien für diese Übersichtsarbeit

Im Rahmen dieser Expertise wurde eine systematische Literatursuche durchgeführt, um das Verletzungsrisiko in Abhängigkeit von Sportbodenbelägen evidenzbasiert zu analysieren. Je nach Datenlage erfolgte entweder eine quantitative Auswertung in Form einer Meta-Analyse für den Vergleich Naturrasen vs. Kunststoffrasen oder eine qualitative Einordnung im Sinne eines Scoping Reviews bei heterogener Literaturlage. Zur Aufnahme von Originalarbeiten und Konferenzbeiträgen in diese systematische Übersichtsarbeit mussten die in Tabelle 1 aufgeführten Ein- und Ausschlusskriterien erfüllt werden.

Berücksichtigt wurden ausschließlich Originalarbeiten in deutscher oder englischer Sprache. Eingeschlossen wurden Studien, welche die Inzidenz von Sportverletzungen als primären Endpunkt untersuchten. Studien, die lediglich Häufigkeitsverteilungen von Verletzungen oder Prävalenzen berichteten, wurden ausgeschlossen. Ebenfalls ausgeschlossen wurden Publikationen, die sich mit dem Vergleich von Naturrasen und Kunststoffrasen beschäftigen und deren Beobachtungszeitraum die Jahre vor 2000 beinhaltet,

da sich Kunststoffrasensysteme z.B. durch die Nutzung von Füllstoffen seither erheblich weiterentwickelt haben.

Zur Minimierung potenzieller Ergebnisverzerrung mussten die berichteten Inzidenzen eindeutig entweder der Trainings- oder der Wettkampffexposition zugeordnet werden können. Da das Verletzungsrisiko im Wettkampf typischerweise deutlich höher ist als im Training (King et al., 2022) und sich darüber hinaus die Nutzung der jeweiligen Untergründe (z.B. Naturrasen vs. Kunststoffrasen) zwischen Training und Wettkampf erheblich unterscheiden kann, ist eine gepoolte Analyse beider Expositionsarten (Training und Wettkampf) nicht zielführend. Andernfalls könnte es bei einer aggregierten Betrachtung zu Scheinassoziationen zwischen Sportboden und Verletzungsrisiko kommen, die allein durch eine ungleiche Verteilung der Exposition im Trainings- bzw. Wettkampfkontext bedingt wären.

2.2.2 Literatursuche/Suchstrategie

Die systematische Literaturrecherche orientierte sich an den Empfehlungen des *Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions* (Higgins et al., 2024) und den *PRISMA-2020* Richtlinien (Page et al., 2021). Die Recherche wurde in den Datenbanken *PubMed*, *Web of Science*

Tab. 2: Suchstrategie gemäß PECO-Schema

PECO	Kategorie	Schlüsselwörter und Verknüpfungen
P	Sportarten	(„team sport“ OR „teamsport“ OR „field hockey“ OR soccer OR football OR handball OR basketball OR rugby OR volleyball OR lacrosse OR futsal OR netball OR „ultimate frisbee“)
E & C	Sportboden	(surface* OR turf OR grass OR floor OR court OR pitch)
O1	Verletzung	(injury OR injuries OR trauma OR tear* OR rupture* OR sprain* OR fracture*)
O2	Epidemiologie	(epidemiology OR incidence OR prevalence OR severity OR risk OR ratio)

und BASE (jeweils Stand November 2024) sowie spezifisch in der Fachzeitschrift *Footwear Science* (Stand Februar 2025) durchgeführt. In Anlehnung an das PECO-Schema wurde für die Suche eine Kombination von relevanten Schlüsselwörtern für das Thema Sportboden und Verletzungsrisiko/-rate verwendet, welche mittels der Operatoren „AND“ zwischen den Kategorien und „OR“ innerhalb der Kategorien logisch verknüpft wurden (Tabelle 2). Darüber hinaus wurde in den Literaturverzeichnissen der inkludierten Studien recherchiert, um weitere potenzielle Quellen zu extrahieren.

2.2.3 Studienwahl

Die Auswahl geeigneter Studien erfolgte in einem mehrstufigen Verfahren unter Berücksichtigung der zuvor definierten Ein- und Ausschlusskriterien. In einem ersten Schritt erfolgte eine Vorauswahl an Studien anhand ihrer Titel und Zusammenfassungen (*Abstracts*). Die Sichtung der Studien wurde von zwei Gutachtern unabhängig voneinander vorgenommen. Unstimmigkeiten hinsichtlich der Eignung von Studien wurden im Konsensverfahren durch Diskussion und unter Einbeziehung weiterer Kollegen gelöst. In einem nächsten Schritt wurden die Volltextversionen der als potenziell relevant eingestuften Publikationen hinsichtlich der definierten Ein- und Ausschlusskriterien auf ihre Eignung überprüft. Nur Studien, die alle Einschlusskriterien erfüllten, wurden für die weitere Analyse berücksichtigt.

2.2.4 Datenextraktion

Die relevanten Informationen der Primärstudien wurden unter Verwendung standardisierter Auswertebögen extrahiert (Tabelle 3).

2.2.5 Syntheseansätze

Die Auswertung der eingeschlossenen Studien erfolgte abhängig von Art, Umfang und Qualität der vorliegenden Daten entweder meta-analytisch oder in Form einer qualitativen Synthese im Sinne eines systematischen Überblicks mit Scoping-Ansatz. Die Auswahl des Syntheseansatzes orientierte sich an der jeweiligen Fragestellung sowie der Anzahl methodisch vergleichbarer Studien. In der nachfolgenden Untergliederung werden die jeweiligen methodischen Zugänge detailliert beschrieben.

2.2.6 Meta-Analyse

Für die meta-analytische Auswertung von Verletzungsinzidenzen wurden ausschließlich Fragestellungen berücksichtigt, zu denen mindestens fünf methodisch vergleichbare Studien verfügbar waren. Die Analyse wurde getrennt für Trainings- und Wettkampfdaten durchgeführt, da das Verletzungsrisiko in systematischer Abhängigkeit zur Exposition variiert. Konferenzbeiträge (graue Literatur) wurden von der Meta-Analyse ausgeschlossen. Identifizierte Volltexte wurden ergänzend händisch analysiert (*cross-referencing*).

Tab. 3: Struktur der Datenextraktion

Kategorie	Extrahierte Informationen
Population	Anzahl der Probandinnen und Probanden, Geschlecht, Alter, Sportart, Expertiseniveau
Exposure & Kontrolle	Untersuchte Sportbodenbeläge
Endpunkt	Art und Definition des Verletzungsrisikos
Ergebnisse	Verletzungsrisiko in Abhängigkeit vom untersuchten Sportbodenbelag
Weitere Merkmale	Studienfinanzierung

Eine grundlegende Voraussetzung für die Aufnahme in die Meta-Analyse war die Angabe der Anzahl an Verletzungen in Relation zur Expositionszeit. Falls Expositionszeit und Inzidenzrate angegeben waren, wurde die absolute Zahl der Verletzungen berechnet; umgekehrt wurde über die Angabe von Verletzungsanzahl und Inzidenz die entsprechende Expositionszeit ermittelt. Die Expositionszeit wurde entweder in Stunden, als Anzahl von Spielen oder Trainingseinheiten oder als sogenannte Spielerinnen- und Spielern-Expositionen ausgewiesen.

Zur Quantifizierung des Zusammenhangs zwischen Sportbodenbelag und Verletzungsrisiko wurden nach der folgenden Formel Inzidenzratenverhältnisse (*Incidence Rate Ratios, IRR*) zwischen Naturrasen (NG: *natural grass*) und Kunststoffrasen (AT: *artificial turf*) berechnet (Labrecque et al., 2021).

$$IRR = \frac{\left(\frac{\text{Anzahl Verletzungen}_{NG}}{\text{Expositionszeit}_{NG}} \right)}{\left(\frac{\text{Anzahl Verletzungen}_{AT}}{\text{Expositionszeit}_{AT}} \right)}$$

Die gepoolten IRRs sowie deren 95 %-Konfidenzintervalle (95 %-CI) wurden in R (Version 4.3.2) mit der Funktion *metagen()* aus dem Paket *meta* (Version 8.1.0) berechnet. Ein IRR < 1 weist auf eine niedrigere Verletzungsrate, ein IRR > 1 auf eine höhere Verletzungsrate auf Naturrasen im Vergleich zu Kunststoffrasen hin. Aufgrund der erwarteten Heterogenität zwischen den eingeschlossenen Studien – etwa im Hinblick auf Sportart, Leistungsniveau, Alter oder Geschlecht der untersuchten Populationen – wurde durchgängig ein *Random-Effects-Modell* angewendet. Darüber hinaus wurden Subgruppenanalysen nach Sportart durchgeführt. Eine Interpretation der Ergebnisse erfolgte nur bei mindestens fünf eingeschlossenen Studien pro Kategorie.

Die statistische Heterogenität wurde anhand der I^2 -Statistik quantifiziert und in *Forest-Plots* visualisiert. Zur Bewertung einer möglichen Publikationsverzerrung wurden *Funnel-Plots* erstellt und *Egger's Tests* berechnet.

2.2.7 Systematischer Überblick mit Scoping-Ansatz

In Fällen, in denen eine Meta-Analyse aufgrund einer unzureichenden Anzahl methodisch vergleichbarer Studien oder fehlender Angaben zu Verletzungsanzahl und Expositionszeit nicht möglich war, wurde eine qualitative Synthese im Sinne eines systematischen Überblicks mit Scoping-Ansatz durchgeführt. Dieser methodische Zugang ermöglichte es, thematisch relevante Studien systematisch zu beschreiben, vergleichend einzuordnen und gegebenenfalls Muster zu identifizieren. Eingeschlossen wurden dabei auch Studien, die ausschließlich Inzidenzen, IRRs oder relative Risiken (RRs) berichteten, ohne differenzierte Angaben zur Anzahl der Verletzungen in Relation zur Expositionszeit zu machen. Die Ergebnisse wurden entsprechend ihrer inhaltlichen Relevanz gruppiert und entlang der Dimensionen Bodenart, Sportart und Verletzungstyp strukturiert dargestellt.

2.3 Ergebnisse

2.3.1 Ergebnisse der systematischen Literaturrecherche

Die systematische Literaturrecherche ergab insgesamt 3.089 Treffer. Nach Entfernung von 1.315 Duplikaten verblieben 1.774 Publikationen für die finale Sichtung der einzuschließen Studien. Basierend auf Titel und Zusammenfassungen (Abstracts) wurden 123 Studien für die Volltextanalyse ausgewählt (Abbildung 1). Bei zehn dieser Arbeiten konnte trotz mehrfacher Kontaktversuche mit den Korrespondenzautorinnen und -autoren kein Volltext beschafft werden.

Von den verbliebenen 113 Studien wurden 65 ausgeschlossen, entweder aufgrund der im Vorfeld definierten Ein- und Ausschlusskriterien, insbesondere fehlender Angaben zu Inzidenzen in Abhängigkeit von den bespielten Sportböden, oder aufgrund unvollständiger Ergebnisberichterstattung oder fehlender Originaldaten.

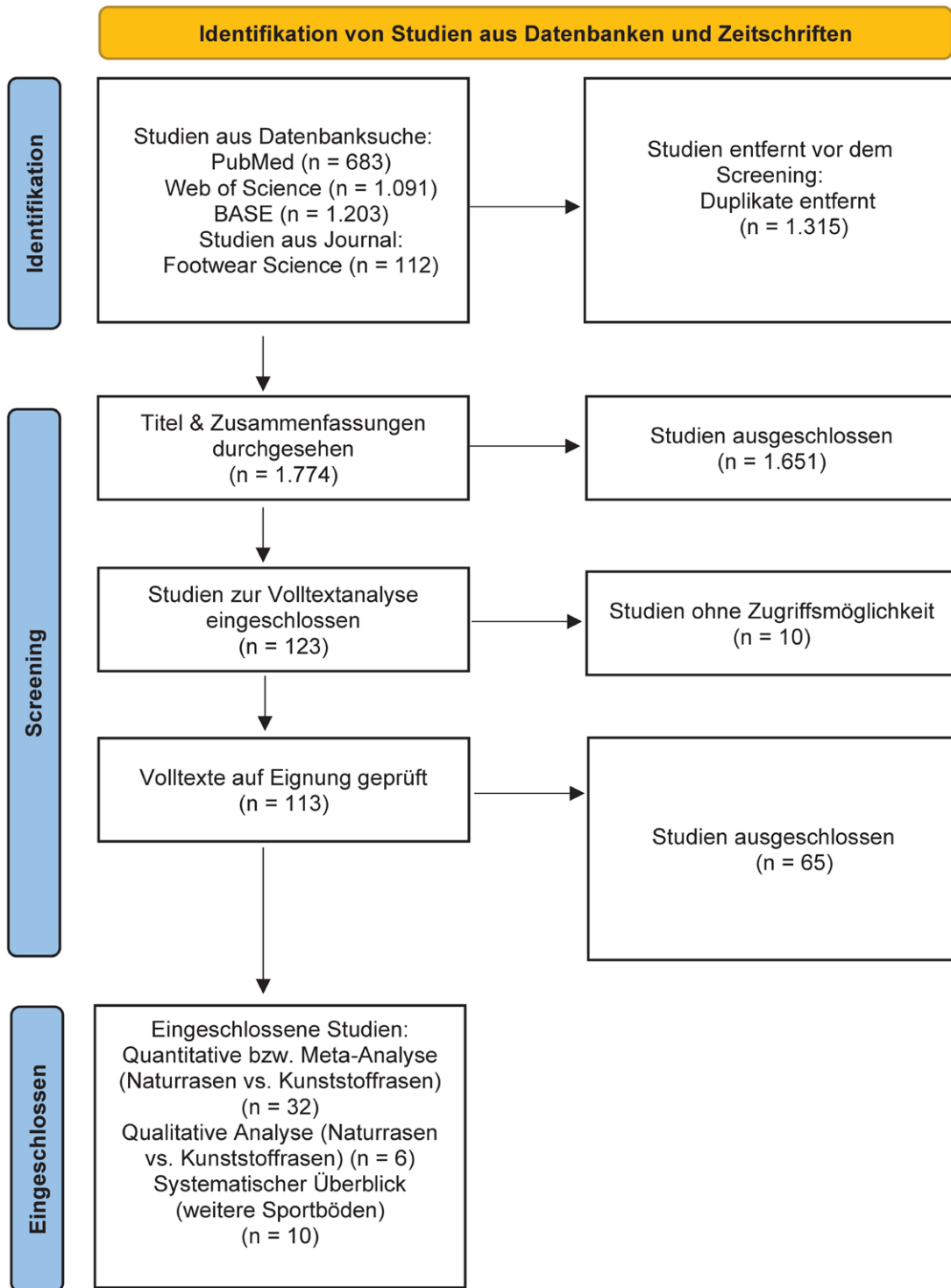


Abb. 1: PRISMA-Flussdiagramm

Insgesamt erfüllten 48 Studien die Einschlusskriterien und wurden in die Analyse integriert. Davon befassten sich 38 Studien mit dem Vergleich von Naturrasen und Kunststoffrasen in den Sportarten Fußball, American Football,

Rugby und Ultimate Frisbee. Drei Studien untersuchten unterschiedliche Konfigurationen von Kunststoffrasensystemen im American Football. Zwei Studien verglichen synthetische mit hölzernen Hallenböden in den Sportarten Floorball

und Handball. Jeweils eine Studie widmete sich dem Vergleich von (a) Hartplätzen mit Kunststoffrasenplätzen, (b) verschiedenen Rasensorten, (c) Zementböden mit synthetischen Hallenböden, (d) unterschiedlichen Spielfeldqualitäten sowie (e) verschiedenen Härtegraden des Untergrunds in den Sportarten Fußball, Australian Football, Rugby und Netball.

2.3.2 Meta-Analyse (Naturrasen vs. Kunststoffrasen)

Für den Vergleich des Verletzungsrisikos auf Naturrasen vs. Kunststoffrasen erfüllten letztlich 38 Studien die Einschlusskriterien. Davon eigneten sich 32 für eine quantitative Synthese im Rahmen der Meta-Analyse, während die verbleibenden sechs Studien in einem systematischen Überblick mit Scoping-Ansatz beschrieben wurden.

2.3.2.1 Publikationsverzerrung

Die erste, übergeordnete Analyse untersuchte die Inzidenzen allgemeiner Verletzungen im Wettkampf auf Naturrasen im Vergleich zu Kunststoffrasen. Insgesamt wurden hierfür 21 Studien eingeschlossen.

Der gepoolte IRR ergab keinen signifikanten Unterschied zwischen den Verletzungsinzidenzen auf Kunststoffrasen und Naturrasen, jedoch bei hoher Heterogenität ($I^2 = 75\%$). Der zugehörige Funnel-Plot zeigte eine deutliche Asymmetrie (Abbildung 2), was auf das Vorliegen einer systematischen Verzerrung hinweist. Der Egger's Test bestätigte diesen Befund mit einem signifikanten Ergebnis ($z = -2,62$; $p = 0,0109$) und lieferte damit einen statistischen Hinweis auf eine Publikationsverzerrung. Auch innerhalb der Subgruppenanalyse für die Sportart Fußball blieb die Heterogenität hoch ($I^2 = 74,7\%$).

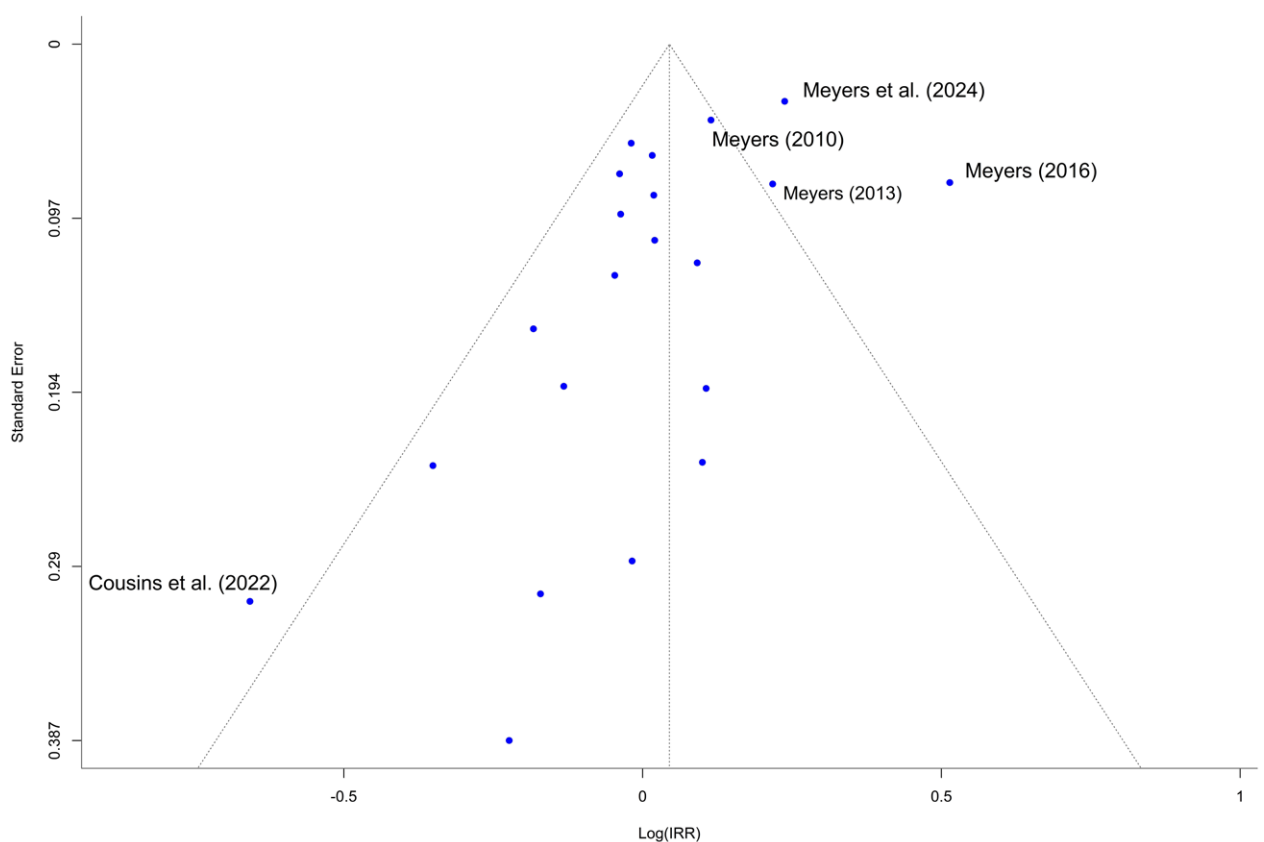


Abb. 2: Funnel-Plot mit den industriefinanzierten Studien der Arbeitsgruppe um Meyers. Die weitere Studie außerhalb des Funnel-Plots von Cousins et al. zeigte keine methodischen Auffälligkeiten. IRR: Inzidenzratenverhältnis.

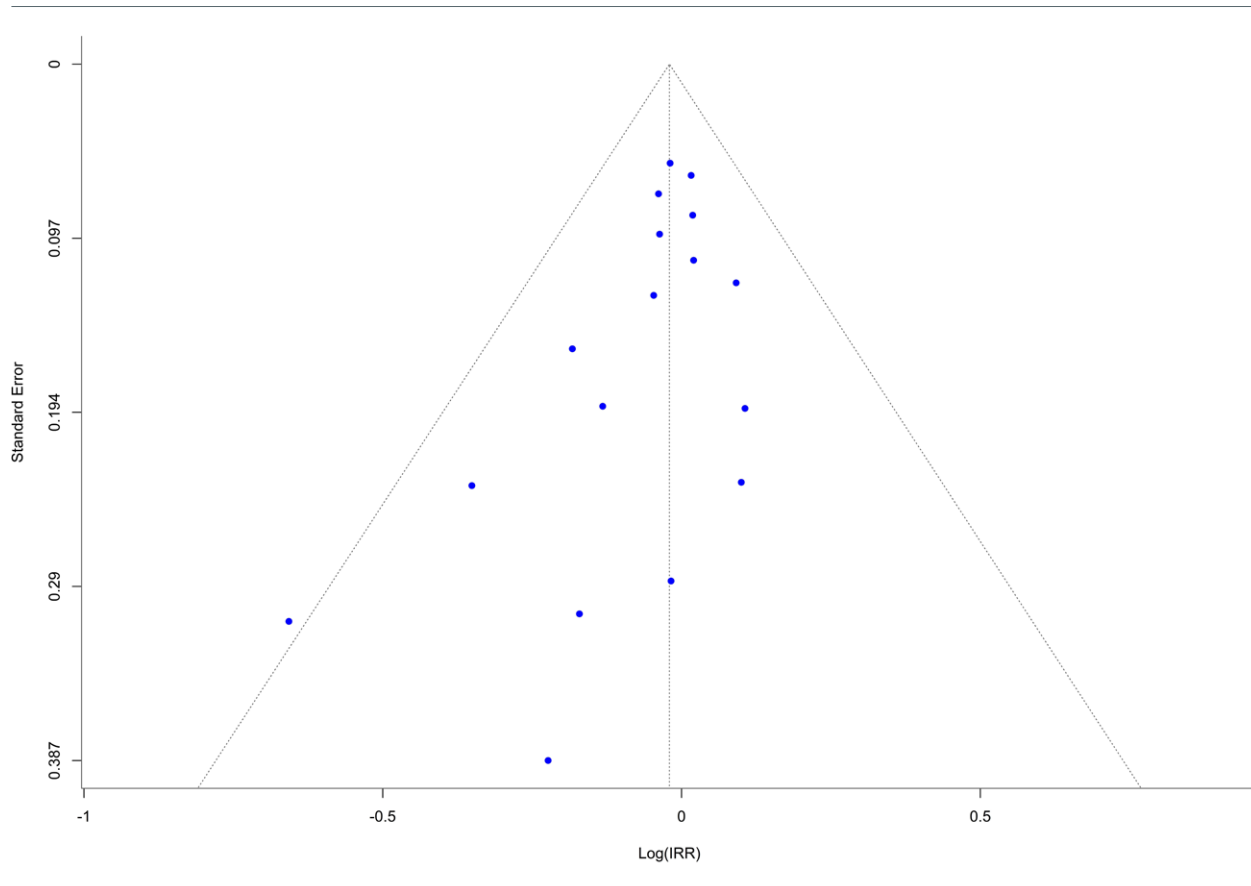


Abb. 3: Funnel-Plot ohne die industriefinanzierten Studien der Arbeitsgruppe um Meyers. Die Studie unten links außerhalb des Funnel-Plots zeigte keine methodischen Auffälligkeiten. IRR: Inzidenzratenverhältnis.

Eine mögliche Erklärung für diese Verzerrung liegt in der Finanzierungslage einzelner Studien: Auffällig war, dass zwei Studien aus dem American Football und zwei der Studien aus dem Fußball von dem Erstautor Meyers stammen und von einem Kunststoffrasenhersteller finanziert wurden. Diese vier Studien berichten durchgehend eine niedrigere Verletzungsinzidenz auf Kunststoffrasen und wichen in ihrer Tendenz systematisch vom Trend der übrigen Studien ab.

Um die Robustheit der Ergebnisse zu prüfen, wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, bei der diese vier Studien ausgeschlossen wurden. Der gepoolte IRR ergab weiterhin keinen signifikanten Unterschied zwischen den Verletzungsinzidenzen auf Kunststoffrasen und Naturrasen. Jedoch zeigte sich eine Reduktion der Heterogenität auf $I^2 = 0\%$, was auf eine hohe methodische Übereinstimmung der verbleibenden Studien hinweist. Zudem zeigte der Funnel-Plot (Abbildung 3) keine Asymmetrie, und der Egger's

Test ergab mit $z = -1,51$ und $p = 0,13$ keinen statistischen Hinweis auf das Vorliegen einer Publikationsverzerrung.

Auf Basis dieser Befunde wurde entschieden, die von einem Kunststoffrasenhersteller finanzierten und von Meyers et al. publizierten Studien auch aus allen weiteren Analysen auszuschließen, um potenzielle Verzerrungen durch Industriesponsoring zu vermeiden. Die Studie von Cousins et al. zeigte im Funnel-Plot ebenfalls eine auffällige Abweichung (Abbildung 3). Da jedoch keine methodischen Auffälligkeiten identifiziert werden konnten, wurde diese Studie in die Analysen einbezogen. Nach dem Ausschluss der industriefinanzierten Studien konnten im Rahmen der metaanalytischen Auswertung folgende Fragestellungen untersucht werden:

- › Gesamtverletzungen im Wettkampf
- › Gesamtverletzungen im Training
- › Verletzungen der unteren Extremitäten im Wettkampf
- › Knieverletzungen im Wettkampf
- › Vordere Kreuzbandrupturen im Wettkampf
- › Sprunggelenkverletzungen im Wettkampf
- › Distorsionen des Sprunggelenks im Wettkampf

2.3.2.2 Gesamtverletzungen im Wettkampf und Training

In der ersten Analyse wurde die Inzidenz aller Verletzungen bei Wettkämpfen auf Naturrasen im Vergleich zu Kunststoffrasen untersucht (Abbildung 4). Insgesamt wurden 17 Studien aus den Sportarten Rugby Union, Fußball und Ultimate Frisbee in die Meta-Analyse eingeschlossen.

Das gepoolte IRR über alle Sportarten hinweg lag bei 0,98 (95 %-CI: 0,93 – 1,03) und weist somit auf keinen signifikanten Unterschied im Verletzungsrisiko zwischen den beiden Bodenarten hin. Auch die Subgruppenanalysen nach Sportart ergaben keine signifikanten Unterschiede: Für Rugby Union mit sechs eingeschlossenen Studien wurde ein IRR von 0,97 (95 %-CI: 0,88 – 1,06) und für Fußball mit zehn eingeschlossenen Studien ein IRR von 0,99 (95 %-CI: 0,93 – 1,06) berechnet.

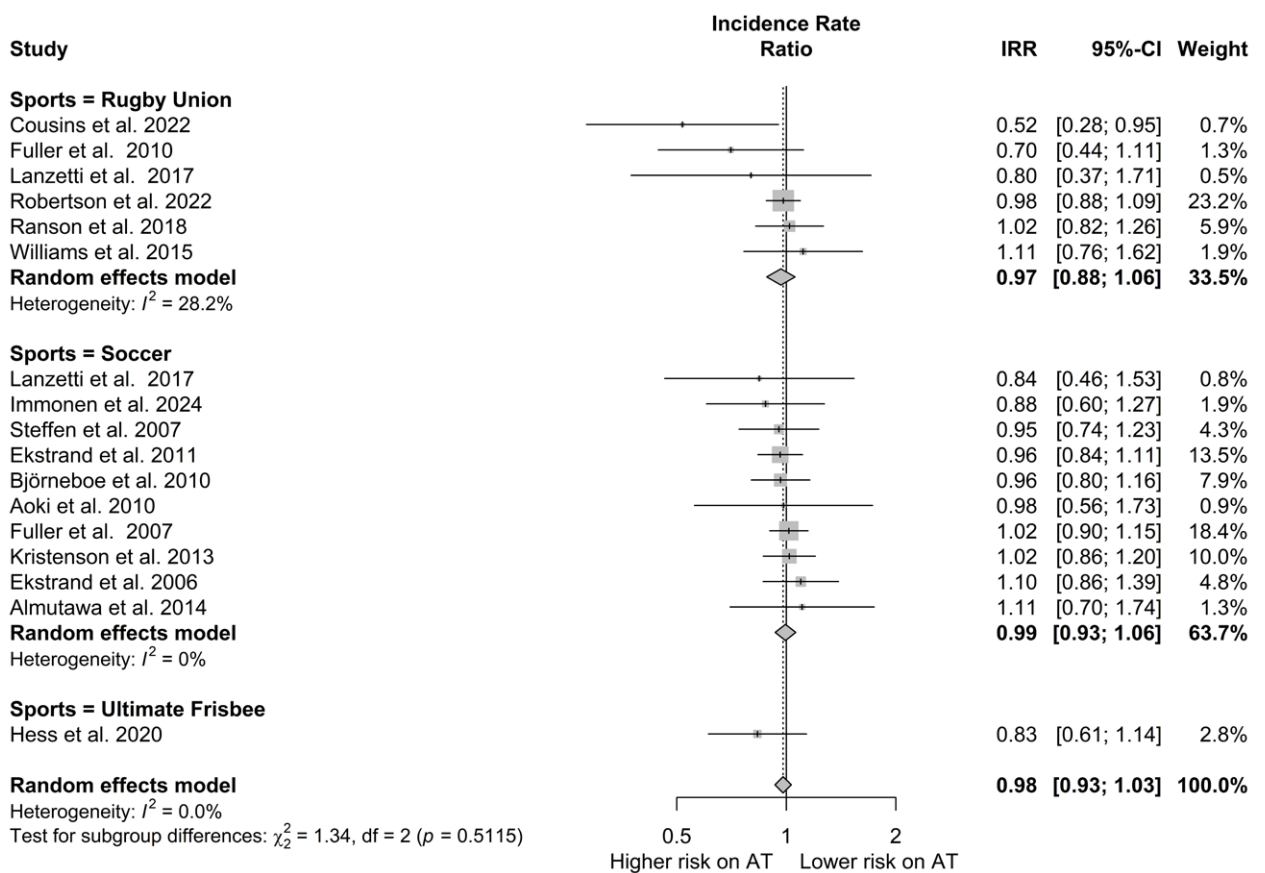


Abb. 4: Forest-Plot ($n = 17$ Studien) der Inzidenzratenverhältnisse (IRRs) aller Verletzungen im Wettkampf auf Naturrasen im Vergleich zu Kunststoffrasen. Kein signifikanter Unterschied. CI: Konfidenzintervall (engl. confidence intervals), AT: Kunststoffrasen (engl. artificial turf).

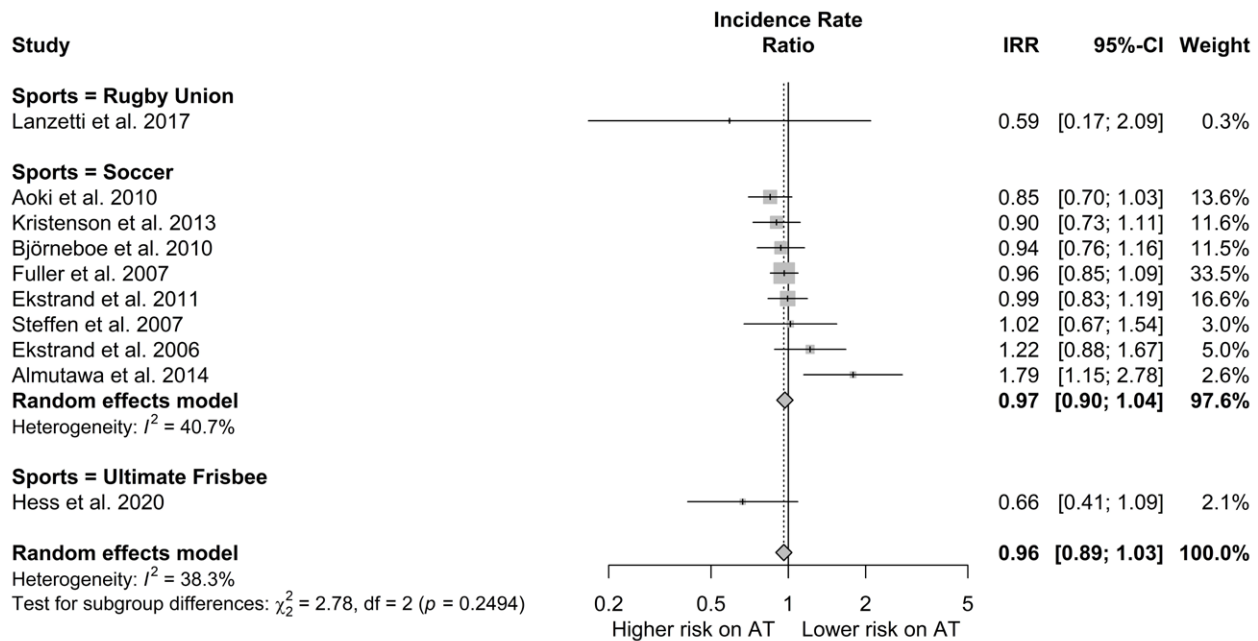


Abb. 5: Forest-Plot ($n=10$ Studien) der Inzidenzratenverhältnisse (IRRs) aller Verletzungen im Training auf Naturrasen im Vergleich zu Kunststoffsrasen. Kein signifikanter Unterschied. CI: Konfidenzintervall (engl. confidence intervals), AT: Kunststoffsrasen (engl. artificial turf).

Eine separate Analyse untersuchte das Verletzungsgeschehen im Trainingskontext (Abbildung 5). Hierfür wurden zehn Studien aus denselben Sportarten berücksichtigt. Das gepoolte IRR betrug 0,96 (95 %-CI: 0,89–1,03), womit auch im Training kein signifikanter Unterschied im Verletzungsrisiko zwischen Naturrasen und Kunststoffsrasen festgestellt werden konnte. In der Subgruppenanalyse für den Fußball ergab sich bei acht vorliegenden Studien ebenfalls kein signifikanter Unterschied (IRR: 0,97; 95 %-CI: 0,90–1,04).

- Das Gesamtverletzungsrisiko im Wettkampf unterscheidet sich nicht signifikant zwischen Naturrasen und Kunststoffsrasen, weder sportartübergreifend noch in den spezifischen Sportarten Fußball und Rugby.
- Auch das Gesamtverletzungsrisiko im Training unterscheidet sich weder über alle Sportarten hinweg noch im fußballspezifischen Vergleich signifikant zwischen Naturrasen und Kunststoffsrasen.

2.3.2.3 Verletzungen der unteren Extremitäten im Wettkampf

Die Analyse zur Inzidenz von Verletzungen der unteren Extremitäten im Wettkampf basierte auf $n=10$ Studien aus den Sportarten American Football, Rugby Union und Fußball (Abbildung 6). Der gepoolte IRR-Wert über alle Sportarten hinweg lag bei 0,89 (95 %-CI: 0,84–0,95) und weist damit auf ein signifikant geringeres Verletzungsrisiko auf Naturrasen im Vergleich zu Kunststoffsrasen hin. Die Heterogenität der Analyse war mit $I^2=62,2\%$ moderat bis hoch, was auf methodische und inhaltliche Unterschiede zwischen den Studien hindeutet. In der Subgruppenanalyse für den Fußball ($n=6$) ergab sich kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Untergruppen (IRR: 0,96; 95 %-CI: 0,89–1,03), bei keiner vorliegenden Heterogenität ($I^2=0\%$).

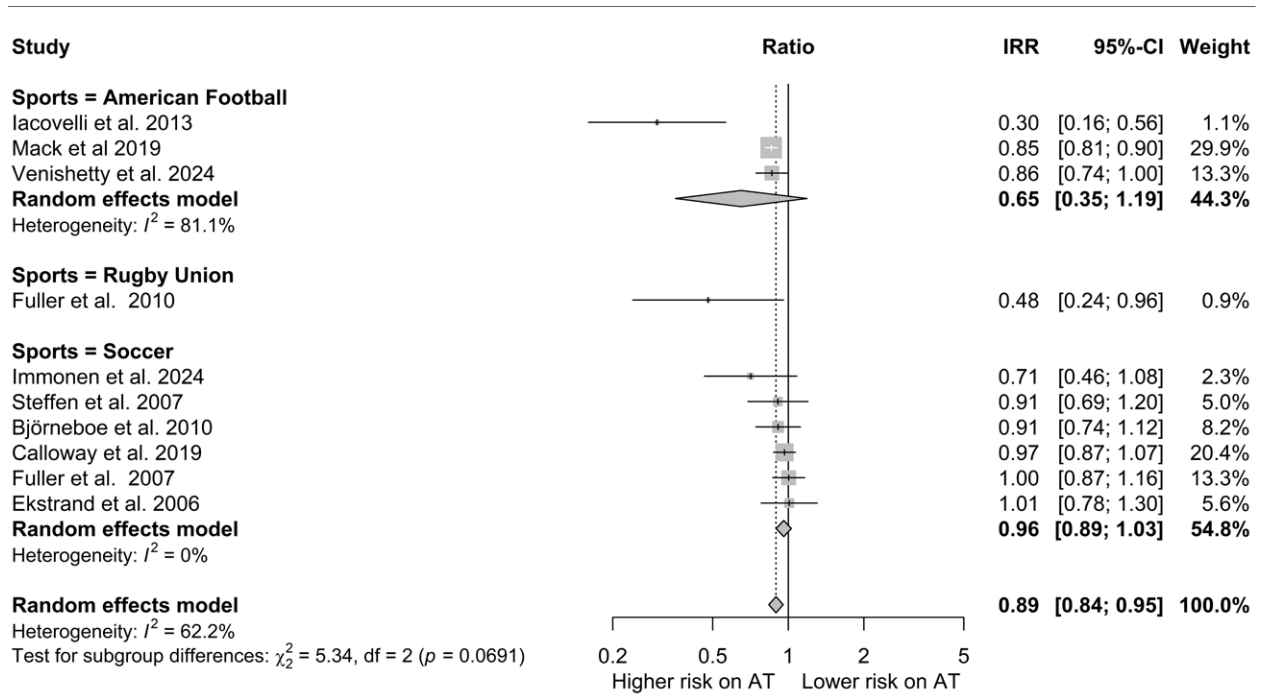


Abb. 6: Forest-Plot ($n = 10$ Studien) der Inzidenzratenverhältnisse (IRRs) von Verletzungen der unteren Extremitäten im Wettkampf auf Naturrasen im Vergleich zu Kunststoffrasen. Signifikant niedrigeres Risiko auf Naturrasen. CI: Konfidenzintervall (engl. confidence intervals), AT: Kunststoffrasen (engl. artificial turf).

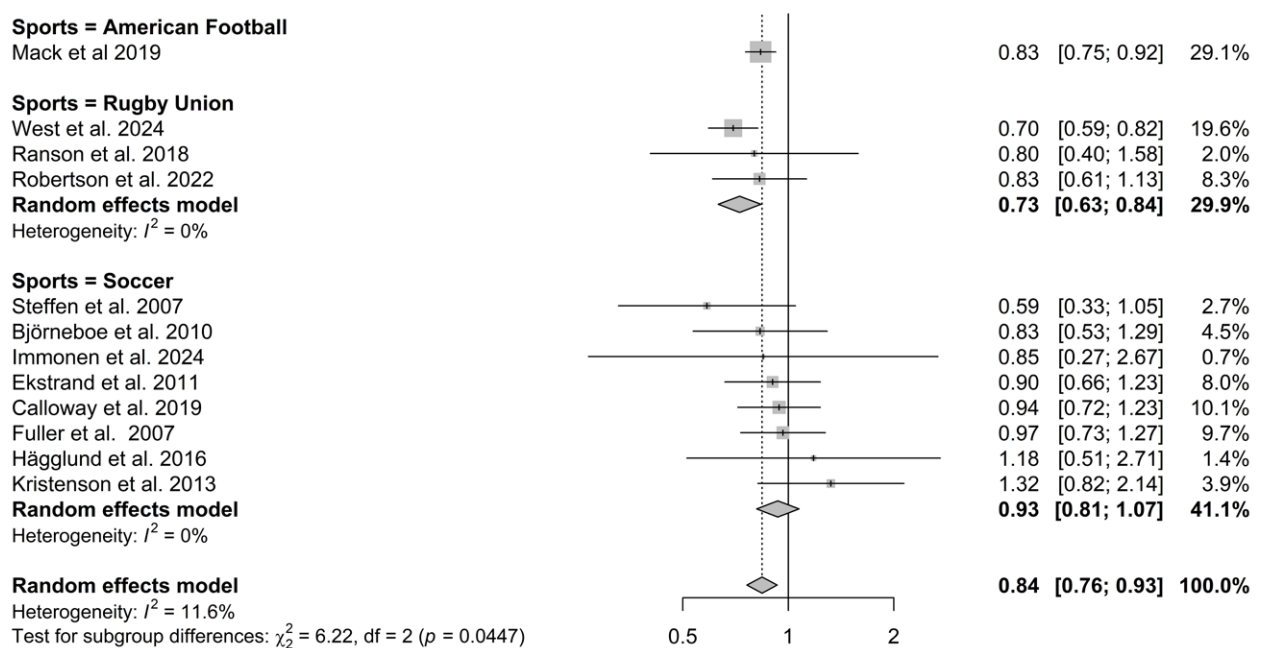


Abb. 7: Forest-Plot ($n = 12$ Studien) der Inzidenzratenverhältnisse (IRRs) von Kniegelenkverletzungen im Wettkampf auf Naturrasen im Vergleich zu Kunststoffrasen. Signifikant niedrigeres Risiko auf Naturrasen. CI: Konfidenzintervall (engl. confidence intervals), AT: Kunststoffrasen (engl. artificial turf).

› Sportartübergreifend zeigt sich im Wettkampf auf Naturrasen ein um 11 % signifikant geringeres Risiko für Verletzungen der unteren Extremitäten im Vergleich zu Kunststoffrasen.

› Die fußballspezifische Analyse zeigt im Wettkampf keinen signifikanten Unterschied im Verletzungsrisiko der unteren Extremitäten zwischen Naturrasen und Kunststoffrasen.

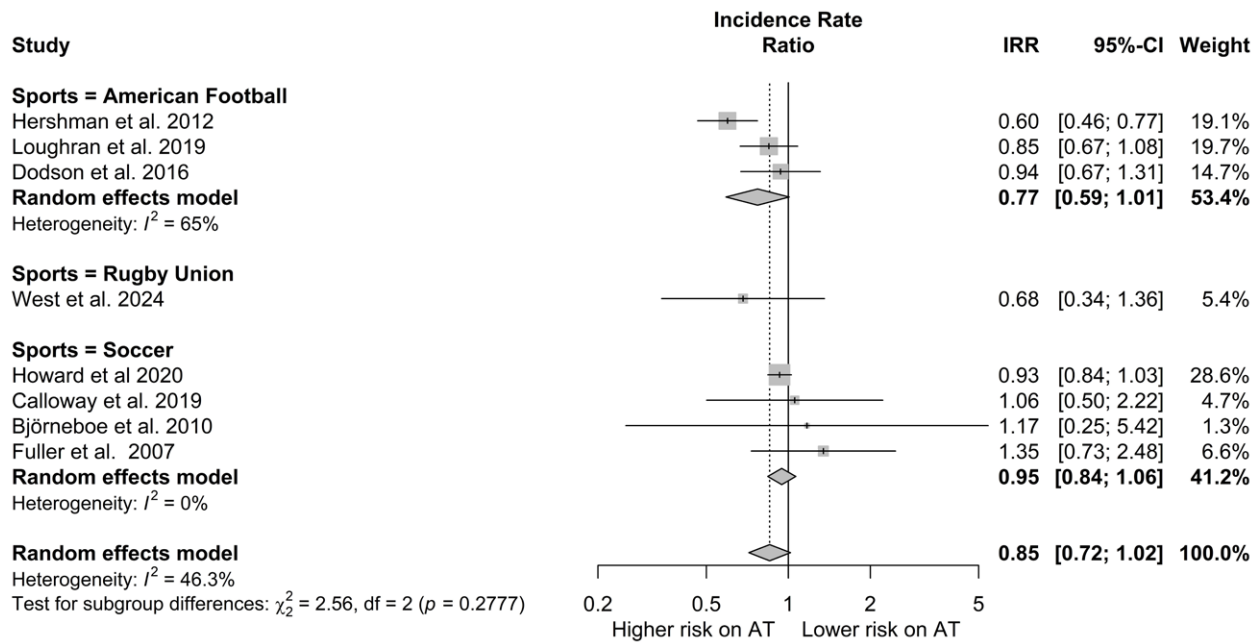


Abb. 8: Forest-Plot ($n = 8$ Studien) der Inzidenzratenverhältnisse (IRRs) von Rupturen des vorderen Kreuzbandes im Wettkampf auf Naturrasen im Vergleich zu Kunststoffrasen. Kein signifikanter Unterschied. CI: Konfidenzintervall (engl. confidence intervals), AT: Kunststoffrasen (engl. artificial turf).

2.3.2.4 Kniegelenkverletzungen im Wettkampf

Zur Analyse von Kniegelenkverletzungen im Wettkampf wurden $n = 12$ Studien aus den Sportarten American Football, Rugby Union und Fußball herangezogen (Abbildung 7). Der gepoolte IRR-Wert betrug 0,84 (95 %-CI: 0,76 – 0,93) und weist auf ein signifikant geringeres Risiko für Kniegelenkverletzungen auf Naturrasen im Vergleich zu Kunststoffrasen hin. Die Heterogenität war mit $I^2 = 11,6\%$ gering, was auf eine hohe methodische Konsistenz der eingeschlossenen Studien schließen lässt. In der fußballspezifischen Subgruppenanalyse (8 Studien) zeigte sich hingegen kein signifikanter Unterschied (IRR: 0,93; 95 %-CI: 0,81 – 1,07).

Besonderes Augenmerk gilt der Ruptur des VKB, einer der schwerwiegendsten Verletzungen im Sport. Für diese Analyse wurden acht Studien aus den gleichen Sportarten einbezogen (Abbildung 8). Der gepoolte IRR-Wert lag bei 0,85 (95 %-CI: 0,72 – 1,02) und weist somit auf keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Bodenarten hin.

- Über alle Sportarten hinweg zeigt sich im Wettkampf auf Naturrasen ein um 16 % signifikant geringeres Risiko für Kniegelenkverletzungen im Vergleich zu Kunststoffrasen.
- Die fußballspezifische Analyse im Wettkampf ergibt keinen signifikanten Unterschied im Risiko für Kniegelenkverletzungen zwischen den beiden Untergründen.
- Für VKB-Rupturen zeigt sich im Wettkampf über alle Sportarten hinweg kein signifikanter Unterschied im Verletzungsrisiko zwischen den beiden Untergründen.

2.3.2.5 Sprunggelenkverletzungen im Wettkampf

Die Gesamtanalyse zu den Sprunggelenkverletzungen umfasste neun Studien aus den Sportarten Rugby und Fußball. Das gepoolte IRR lag bei 0,84 (95 %-CI: 0,73 – 0,97) bei einer niedrigen Heterogenität ($I^2 = 12,2\%$) und weist auf ein signifikant geringeres Verletzungsrisiko auf Naturrasen hin (Abbildung 9). Die Subgruppenanalyse für die Sportart Fußball ergab ebenfalls

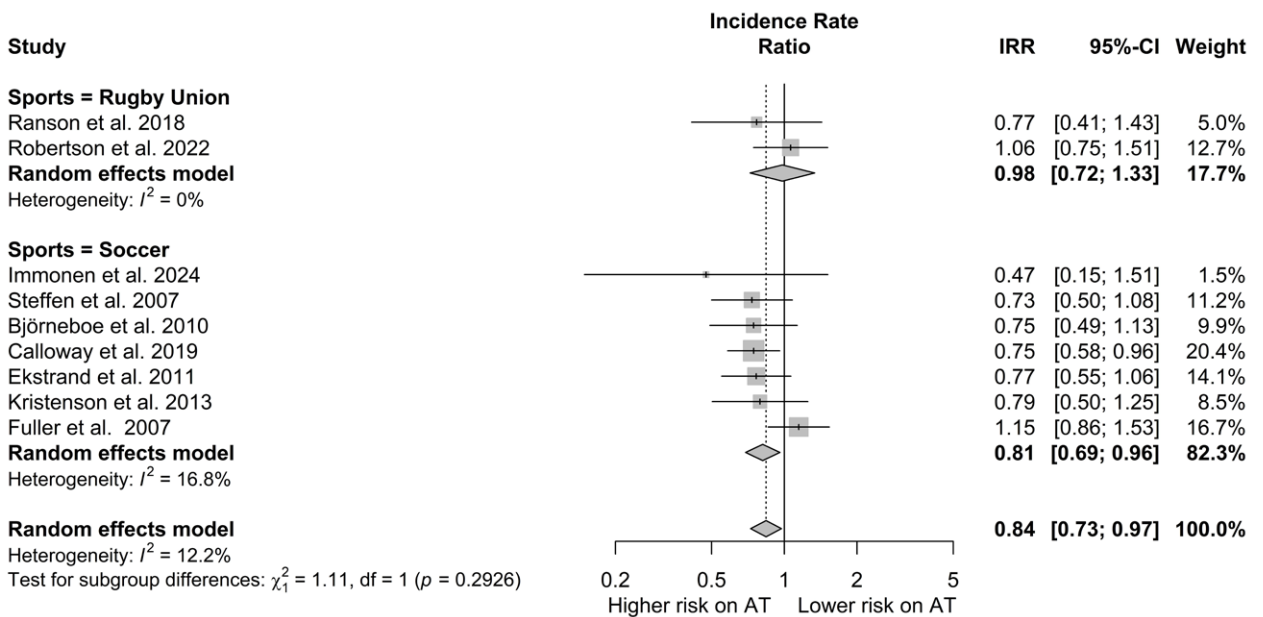


Abb. 9: Forest-Plot ($n = 9$ Studien) der Inzidenzratenverhältnisse (IRRs) von Sprunggelenkverletzungen im Wettkampf auf Naturrasen im Vergleich zu Kunststoffrasen. Signifikant niedrigeres Risiko auf Naturrasen. CI: Konfidenzintervall (engl. confidence intervals), AT: Kunststoffrasen (engl. artificial turf).

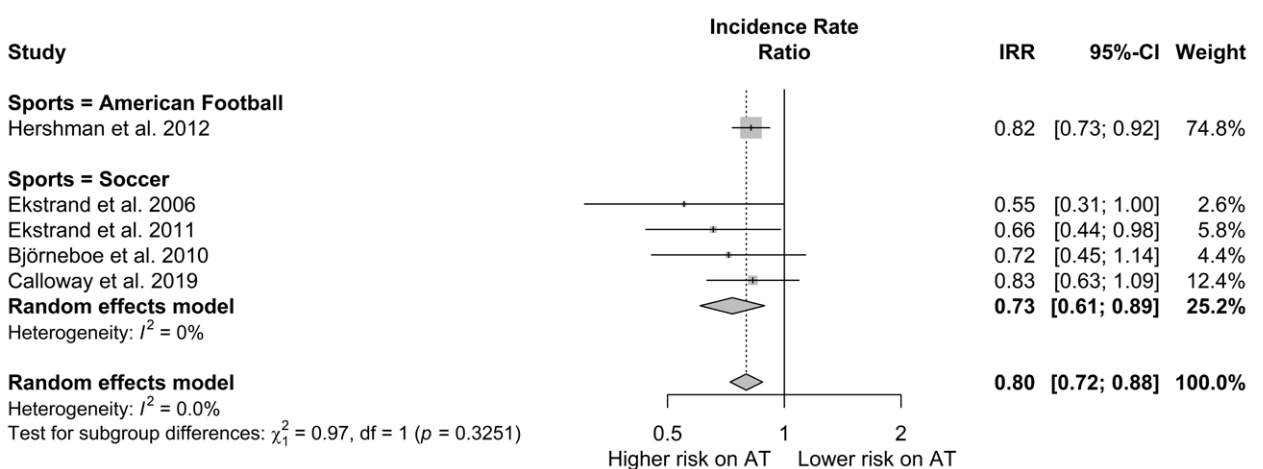


Abb. 10: Forest-Plot ($n = 5$ Studien) der Inzidenzratenverhältnisse (IRRs) von Sprunggelenkdistorsionen im Wettkampf auf Naturrasen im Vergleich zu Kunststoffrasen. Signifikant niedrigeres Risiko auf Naturrasen. CI: Konfidenzintervall (engl. confidence intervals), AT: Kunststoffrasen (engl. artificial turf).

ein signifikant geringeres Risiko auf Naturrasen (IRR: 0,81; 95 %-CI: 0,69 – 0,96), basierend auf sieben Studien.

Innerhalb dieser Verletzungsgruppe ist insbesondere die Sprunggelenkdistorsion hervorzuheben. Für diesen spezifischen Verletzungstyp wurden fünf Studien aus den Sportarten

American Football und Fußball analysiert. Das gepoolte IRR lag bei 0,80 (95 %-CI: 0,72 – 0,88) und zeigt ein signifikant geringeres Risiko für Distorsionen auf Naturrasen (Abbildung 10). Die Heterogenität lag bei $I^2 = 0\%$, was auf eine hohe Konsistenz der Studienergebnisse hinweist.

- Über alle Sportarten hinweg ist im Wettkampf von einem 16 % signifikant niedrigeren Risiko von Sprunggelenkverletzungen auf Naturrasen im Vergleich zu Kunststoffrasen auszugehen.
- Die fußballspezifische Analyse zeigt im Wettkampf auf Naturrasen ein signifikant um 19 % geringeres Risiko für Sprunggelenkverletzungen im Vergleich zu Kunststoffrasen.
- Für Sprunggelenkdorsionen im Wettkampf ergibt sich über alle Sportarten hinweg ein 20 % signifikant niedrigeres Risiko auf Naturrasen im Vergleich zu Kunststoffrasen.

2.3.3 Qualitative Analyse zum Vergleich von Naturrasen und Kunststoffrasen

Für den Vergleich des Verletzungsrisikos auf Naturrasen und Kunststoffrasen erfüllten sechs weitere Studien die definierten Einschlusskriterien, eigneten sich jedoch nicht für eine meta-analytische Auswertung, da entweder ausschließlich spezifische Verletzungen berichtet wurden oder keine Angaben zur Verletzungsanzahl und Expositionszeit gemacht wurden. Im Folgenden werden die zentralen Erkenntnisse dieser Studien qualitativ analysiert und nach untersuchten Verletzungen geordnet dargestellt.

2.3.3.1 Verletzungen der unteren Extremitäten

Die prospektive Kohortenstudie von O’Kane et al. (2016) untersuchte akute Verletzungen der unteren Extremitäten bei jugendlichen Fußballspielerinnen im Alter von 11 bis 15 Jahren im Großraum Seattle (USA). Eingeschlossen wurden 351 Spielerinnen aus 36 zufällig ausgewählten Elite-Teams, die vier Jugendvereinen angehörten. Innerhalb der Kohorte wurde zusätzlich eine eingebettete Fall-Kontroll-Studie durchgeführt, um Risikofaktoren für derartige Verletzungen zu identifizieren. Die Forscherinnen und Forscher verglichen hierbei die Trainings- und Spielteilnahmen von Spielerinnen, bei denen eine Verletzung auftrat (Fälle), mit solchen ohne Verletzung (Kontrolle). Bei der Analyse der Trainings-Episoden wurde ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Verletzungsrisiko und

dem Sportboden festgestellt. Die Daten zeigten, dass 27,9 % der Verletzungsereignisse (Fälle im Training) auf Naturrasen stattfanden, im Vergleich zu nur 12,0 % der verletzungsfreien Kontroll-Episoden (*Odds Ratio* (OR): 2,83; 95 %-CI: 1,49 – 5,31). In Wettkampfsituationen zeigte sich hingegen kein signifikanter Unterschied (OR: 0,68; 95 %-CI: 0,37 – 1,11).

2.3.3.2 Verletzungen des vorderen Kreuzbandes

Dragoo et al. (2012) analysierten den Zusammenhang zwischen dem Sportboden und der Inzidenz von VKB-Rupturen bei Männern im American Football auf College-Ebene. Die Auswertung basierte auf Daten des *NCAA Injury Surveillance System* aus fünf Spielzeiten (2004/2005 bis 2008/2009). Analysiert wurden ausschließlich Fälle, die als vollständige VKB-Ruptur kodiert waren. Die Inzidenzen wurden als Anzahl der VKB-Verletzungen pro 10.000 Spieler-Expositionen berechnet und separat für Heim- und Auswärtsspiele analysiert. Im Verlauf des Beobachtungszeitraums wurden insgesamt 318 VKB-Rupturen bei 2.222.155 Spieler-Expositionen erfasst. Die Analyse der Wettkampfsituationen zeigte, dass die Inzidenz von VKB-Verletzungen bei Heimspielen auf Kunststoffrasen höher war als auf Naturrasen (8,76; 95 %-CI: 6,28 – 11,46 vs. 5,57; 95 %-CI: 3,72 – 7,87). Bei Auswärtsspielen zeigte sich hingegen kein signifikanter Unterschied in der Inzidenz von VKB-Verletzungen zwischen Kunststoffrasen und Naturrasen (9,34; 95 %-CI: 6,69 – 12,38 vs. 9,20; 95 %-CI: 6,69 – 11,97).

2.3.3.3 Muskuläre Verletzungen

In einer Kohortenstudie untersuchten Iraqui-Rato und Cuesta-Barriuso (2024) Risikofaktoren für muskuläre Verletzungen bei Amateurfußballspielerinnen im regionalen Ligabetrieb in Asturien (Spanien). Die Stichprobe umfasste 156 Spielerinnen, die durchschnittlich 24 Jahre alt waren. Über drei Saisons hinweg wurden im Mittel 1,46 Muskelverletzungen pro Spielerin registriert. Künstliche Spielflächen dominierten sowohl im Training (90,38 %) als auch im Wettkampf (52,56 %). Weder im Trainings- noch im Wettkampfkontext konnte ein signifikanter

Unterschied des Verletzungsrisikos zwischen den beiden Spielfeldtypen festgestellt werden. Das relative Risiko für Trainingsverletzungen auf Kunststoffrasen lag bei 0,84 (95 %-CI: 0,64 – 1,11), im Wettkampf bei 1,03 (95 %-CI: 0,83 – 1,27).

2.3.3.4 Achillessehnenrupturen

Krill et al. (2017) untersuchten den Einfluss von Spielerposition, Saisonzeitpunkt und Sportboden auf das Auftreten von Achillessehnenrupturen in regulären und Playoff-Spielen der *National Football League*. Die Datenerhebung basierte auf öffentlich zugänglichen Verletzungsberichten der Saisons 2009/10 bis 2016/17. Zur Bestimmung des Verletzungszeitpunkts sowie des jeweiligen Sportbodens wurden Spielpläne, Positionsangaben der Spieler und Stadiondaten herangezogen. Die Inzidenzen wurden als Verletzungen pro 100 Teamspiele berechnet. Zum Vergleich der Inzidenzen zwischen den Spieluntergründen wurde das IRR herangezogen. Insgesamt wurden 44 Rupturen identifiziert, davon 24 auf Naturrasen (IR: 1,00 Verletzungen pro 100 Mannschaftsspiele) und 20 auf Kunststoffrasen (IR: 1,08 Verletzungen pro 100 Mannschaftsspiele). Der Unterschied war statistisch nicht signifikant (IRR: 0,93; $p = 0,80$).

2.3.3.5 Lisfranc-Fußverletzungen

Meyers und Sterling (2022) analysierten die Inzidenz von Lisfranc-Fußverletzungen (Fraktur, Luxation oder Verstauchung im Bereich der Tarsometatarsalgelenke des Mittelfußes) im American Football auf Grundlage von Daten aus zehn Spielzeiten und 32 Universitäten. Von 1.577 erfassten Spielen fanden 783 auf Kunststoffrasen und 794 auf Naturrasen statt. Insgesamt wurden 78 entsprechende Verletzungen dokumentiert, davon 34 auf Kunststoffrasen (43,6 %) und 44 auf Naturrasen (56,4 %). Die multivariate Varianzanalyse ergab signifikante Unterschiede in der Verteilung der Verletzungen in Abhängigkeit vom Spielfeldtyp ($p = 0,001$). Post-hoc-Analysen zeigten eine signifikant höhere Inzidenz von Lisfranc-Fußverletzungen auf Naturrasen, sofern der zugrunde liegende Verletzungsmechanismus der Schuh-Sportboden-Interaktion zugeordnet wurde ($p < 0,05$).

2.3.3.6 Gehirnerschütterungen

Smoliga et al. (2023) führten eine retrospektive Kohortenstudie durch, um das Risiko für diagnostizierte Gehirnerschütterungen in der National Football League im Zeitraum von 2012 bis 2019 in Abhängigkeit vom Sportboden zu analysieren. Untersucht wurden 1.830 reguläre Saisonspiele, davon 1.030 Spiele auf Naturrasen und 800 Spiele auf Kunststoffrasen. Insgesamt wurden 544 Gehirnerschütterungen auf Naturrasen und 552 auf Kunststoffrasen registriert. Die Analyse erfolgte mittels eines bayesianischen negativen Binomial-Regressionmodells, das den Zusammenhang zwischen Risikofaktoren wie dem Sportboden sowie der Anzahl der Gehirnerschütterungen pro Spiel untersuchte. Die Ergebnisse zeigten, dass Spiele auf Naturrasen mit einem signifikant geringeren Risiko für Gehirnerschütterungen im Vergleich zu Kunststoffrasen einhergingen. Das berechnete IRR betrug 0,78, was einer Risikoreduktion von etwa 22 % für Spiele auf Naturrasen entspricht. Die 95 %-Kreditintervalle von 0,68 bis 0,89 lassen eine tatsächliche Risikoreduktion zwischen 11 % und 32 % zugunsten des Naturrasens vermuten.

- › Für Verletzungen der unteren Extremitäten im Fußballtraining sowie Lisfranc-Verletzungen im American-Football-Wettkampf wurde ein signifikant erhöhtes Risiko auf Naturrasen im Vergleich zu Kunststoffrasen berichtet.
- › Im American Football wurde auf Naturrasen im Vergleich zu Kunststoffrasen ein signifikant geringeres Risiko für VKB-Rupturen bei Heimspielen sowie für Gehirnerschütterungen im Wettkampf festgestellt.
- › Kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Untergründen zeigte sich für das Risiko von Verletzungen der unteren Extremitäten im Wettkampf (Fußball), für muskuläre Verletzungen (Fußball), für VKB-Rupturen bei Auswärtsspielen sowie für Achillessehnenrupturen (beides American Football).

2.3.4 Qualitative Analyse zum Vergleich weiterer Sportböden

Zur Bewertung des Einflusses unterschiedlicher Sportbodenarten auf das Verletzungsrisiko erfüllten zehn Studien, die sich nicht auf den direkten Vergleich zwischen Natur- und Kunststoffrasen fokussierten, die festgelegten Einschlusskriterien. Eine quantitative Synthese im Sinne einer Meta-Analyse war aufgrund einer unzureichenden Anzahl methodisch vergleichbarer Studien nicht möglich. Die nachfolgende qualitative Darstellung der Ergebnisse gliedert sich nach der untersuchten Sportbodenart.

2.3.4.1 Naturrasen

Orchard (2002) analysierte den Einfluss verschiedener Rasentypen sowie der Boden Härte auf die Inzidenz nicht-kontaktbedingter VKB-Rupturen bei Spielern der Australian Football League im Zeitraum von 1992 bis 2004. Insgesamt flossen 3.206 Spiele mit dokumentierter Rasensorte in die Analyse ein, wobei 84 VKB-Verletzungen registriert wurden. Die Ergebnisse zeigten ein signifikant erhöhtes Risiko für VKB-Verletzungen auf Bermudagrass im Vergleich zu anderen Rasensorten (Inzidenzrate: 22,4 Verletzungen pro 1.000 Spiele). Demgegenüber wiesen Ryegrass (9,9/1.000; RR: 0,44; 95 %-CI: 0,27 – 0,71) sowie eine Mischung aus Ryegrass und Annual Bluegrass (10,7/1.000; RR: 0,48; 95 %-CI: 0,26 – 0,88) signifikant niedrigere Inzidenzen auf. Für Kikuyugras wurde eine vergleichbare Inzidenz wie bei Bermudagrass beobachtet (21,7/1.000; RR: 0,97; 95 %-CI: 0,13 – 7,39). Die verschiedenen Rasensorten unterscheiden sich in der Dicke ihrer Rasenfilzschicht. So weisen Bermuda- und Kikuyugras eine besonders ausgeprägte Rasenfilzschicht zwischen den Grasblättern und dem Boden auf, während Ryegrass nur eine minimale Rasenfilzschicht zeigt. Die Mischung aus Ryegrass und Annual Bluegrass liegt mit einer moderaten Rasenfilz-Dicke zwischen diesen Extremen. Der Einfluss der Boden Härte auf das Verletzungsrisiko wurde auf Grundlage von 953 Spielen mit 24 dokumentierten VKB-Verletzungen untersucht. Die Inzidenzraten unterschieden sich nicht

signifikant zwischen festem (13,3/1.000), mittlerem (12,7/1.000; RR: 0,95; 95 %-CI: 0,35 – 2,59) und weichem Untergrund (11,9/1.000; RR: 0,90; 95 %-CI: 0,32 – 2,51).

Takemura et al. (2007) führten eine prospektive Studie im Rugby Union durch, bei der 271 Spieler der *Premier Grade Rugby-Liga* in Dunedin (Neuseeland) über 20 Spielrunden beobachtet wurden. Die Boden Härte wurde vor jedem Spiel mittels Penetrometer gemessen. Es wurden 164 Verletzungen bei 108 Spielern registriert, was einer Verletzungsinzidenz von 52 pro 1.000 Spielerstunden entspricht. Die univariate Poisson-Modellierung zeigte keinen signifikanten Zusammenhang zwischen Boden Härte und Verletzungsinzidenz ($p = 0,961$).

Nyagetuba et al. (2015) untersuchten den Einfluss der Platzqualität im Rugby in der Saison 2010 auf das Verletzungsrisiko. Basierend auf fünf Kriterien (Ebenheit, Griffbarkeit, Grasbedeckung, Drainage, Wetterresistenz) wurden acht Spielfelder in „gut“ ($n = 2$) und „suboptimal“ ($n = 6$) klassifiziert. Während 60 Ligaspielen (2.400 Spielerstunden) traten 102 Verletzungen auf. Die Inzidenz auf gut bewerteten Feldern betrug 29,03 Verletzungen/1.000 Stunden Wettkampf, während sie auf suboptimalen Feldern mit 56,9 Verletzungen/1.000 Stunden signifikant höher war.

- Eine Studie berichtet ein signifikant erhöhtes Risiko für VKB-Rupturen im Australian Football auf Rasensorten mit ausgeprägter Rasenfilzschicht im Vergleich zu Rasentypen mit geringer oder moderater Filzschichtdicke.
- Zwei Studien finden keinen signifikanten Zusammenhang zwischen Boden Härte und dem Risiko für VKB-Rupturen (Australian Football) bzw. für allgemeine Verletzungen (Rugby).
- Eine Studie im Rugby zeigt ein signifikant geringeres Verletzungsrisiko auf Spielfeldern, die basierend auf mehreren Kriterien (u. a. Ebenheit, Drainage, Griffbarkeit) als „gut“ bewertet wurden, im Vergleich zu suboptimalen Spielfeldern.

2.3.4.2 Kunststoffrasensysteme

Kordi et al. (2011) verglichen in ihrer Studie das Verletzungsrisiko auf Tennenflächen (*Dirtfield*) und Kunststoffrasen im Amateurfußball. Insgesamt nahmen 252 männliche Spieler aus 14 Teams an einem Turnier auf einem Hartplatz sowie 216 Spieler aus 12 Teams an einem vergleichbaren Turnier auf einem Kunststoffrasenplatz in derselben Region teil. Die Gesamtinzidenz von Spielverletzungen lag bei 36,9 Verletzungen pro 1.000 Spielerstunden auf dem Hartplatz gegenüber 19,5 auf dem Kunststoffrasen, was einem signifikanten IRR von 1,88 (95 %-CI: 1,19 – 3,05; $p < 0,004$) entspricht. Bezüglich der Schwere der Verletzungen war die Inzidenz von leichten und minimalen Verletzungen auf dem Hartplatz signifikant höher als auf dem Kunststoffrasen. Alle weiteren Kategorien unterschieden sich nicht signifikant.

Meyers (2019) untersuchte den Zusammenhang zwischen dem Gewicht des Füllstoffs (sog. *Infill*) von Kunststoffrasensystemen und der Inzidenz, dem Mechanismus sowie der Schwere von Wettkampfverletzungen im US-amerikanischen High School-Football über fünf Spielzeiten hinweg. Insgesamt nahmen 57 High Schools aus vier Bundesstaaten teil. Erfasst wurden 1.837 Spiele mit insgesamt 4.655 Verletzungen. Die Kunststoffrasensysteme wurden gemäß Infill-Gewicht (Sand/Gummigranulat in Pfund pro Quadratfuß) in vier Gruppen eingeteilt: $\geq 9,0$ lb/ft² ($n = 528$ Spiele), 6,0 – 8,9 lb/ft² ($n = 521$), 3,0 – 5,9 lb/ft² ($n = 525$) und 0,0 – 2,9 lb/ft² ($n = 263$). Die Inzidenzrate für Verletzungen stieg mit abnehmendem Infill-Gewicht kontinuierlich an:

- $\geq 9,0$ lb/ft² mit 17,4 (95 %-CI: 16,9 – 17,7) Verletzungen/10 Teamspiele
- 6,0 – 8,9 lb/ft² mit 25,4 (24,8 – 25,8) Verletzungen/10 Teamspiele
- 3,0 – 5,9 lb/ft² mit 30,3 (29,9 – 30,5) Verletzungen/10 Teamspiele
- 0,0 – 2,9 lb/ft² mit 31,3 (30,7 – 31,8) Verletzungen/10 Teamspiele.

Post-hoc-Analysen zeigten, dass die höchste Infill-Kategorie ($\geq 9,0$ lb/ft²) signifikant geringere Verletzungsraten im Vergleich zu allen anderen Infill-Kategorien aufwies. Auch hinsichtlich der Verletzungsschwere zeigte sich ein signifikanter Unterschied: Die Inzidenz substantieller Verletzungen (7 – 21 Tage Ausfallzeit) war bei Feldern mit $\geq 9,0$ lb/ft² signifikant niedriger als bei allen leichteren Infill-Kategorien. Obwohl schwere Verletzungen (mehr als 22 Tage Ausfallzeit) insgesamt selten waren, war deren Auftreten bei den schwereren Infill-Kategorien ($\geq 6,0$ lb/ft²) ebenfalls signifikant seltener als bei den leichteren Belägen.

Neben der genannten Studie veröffentlichten Meyers et al. (2024) auch einen ergänzenden Poster-Abstract, der sich spezifisch mit Verletzungen durch den Kontakt zwischen Spieler und Spielfeldoberfläche im High School-Football befasste. In dieser Untersuchung über zwölf Spielzeiten hinweg wurden insgesamt 3.788 Spiele von 89 High Schools aus sechs US-Bundesstaaten ausgewertet. Die Kunststoffrasenfelder wurden in zwei Gruppen unterteilt: Felder mit hohem Infill-Gewicht ($\geq 9,0$ lb/ft²) und Felder mit niedrigem Infill-Gewicht (3,0 – 6,0 lb/ft²). Von den dokumentierten Spielen wurden 1.055 (27,9 %) auf Feldern mit hohem Infill-Gewicht und 2.733 (72,1 %) auf Feldern mit niedrigem Infill-Gewicht ausgetragen. Insgesamt wurden 8.995 Verletzungen erfasst, von denen 1.462 direkt auf den Spieler-Boden-Kontakt zurückgeführt wurden (269 auf Feldern mit hohem Infill-Gewicht und 1.193 auf Feldern mit niedrigem Infill-Gewicht). Die Inzidenzrate lag bei hohem Infill-Gewicht bei 2,6 Verletzungen pro 10 Spiele (95 %-CI: 2,3 – 2,8), während sie bei niedrigem Infill-Gewicht mit 4,4 (95 %-CI: 4,2 – 4,6) signifikant höher war ($p < 0,05$). Auch die Inzidenzrate substantieller Verletzungen mit einem Ausfallzeitraum von 7 bis 21 Tagen war auf hohem Infill-Gewicht deutlich geringer (0,5 [95 %-CI: 0,4 – 0,6] vs. 1,1 [95 %-CI: 1,0 – 1,2]).

Eine weitere Untersuchung von Meyers (2021) betrachtete den Einfluss von stoßdämpfenden Elastikschichten aus Polypropylen oder thermoplastischen Elastomeren (*Pads*) unter Kunststoffrasensystemen auf die Inzidenz oberflächenbe-

dingter Verletzungen im High School-Football. Über sieben Spielzeiten wurden Daten aus 658 Spielen von 58 High Schools in drei US-Bundesstaaten erhoben. Davon fanden 260 Spiele auf Feldern mit stoßdämpfender Elastikschiicht und 398 auf Feldern ohne solche Elastikschiicht statt. Insgesamt wurden 1.453 Spielverletzungen erfasst, wovon 795 als oberflächenbedingt (Spieler-Untergrund-Kontakt, Schuh-Untergrund-Interaktion mit und ohne Gegner-Kontakt, strukturelle Überlastung) klassifiziert wurden. Die Inzidenzrate oberflächenbedingter Verletzungen lag bei Feldern mit Pad bei 18,9 pro 10-Teamspiele (95 %-CI: 18,4 – 19,2), während sie auf Feldern ohne Pad 7,6 betrug (95 %-CI: 7,2 – 8,0). Die multivariate Varianzanalyse zeigte einen signifikanten Haupteffekt zwischen Spielfeldern mit und ohne Unterlage in Bezug auf Verletzungen ($p < 0,0001$). In den post-hoc-Analysen zeigte sich, dass sowohl die Gesamtanzahl als auch die Anzahl leichter, substantieller und schwerer Verletzungen auf Kunststoffrasenfeldern mit stoßdämpfender Unterlage signifikant höher war als auf Feldern ohne Pad ($p < 0,05$).

- Eine Studie zeigt, insbesondere für minimale und leichte Verletzungen, ein signifikant erhöhtes Verletzungsrisiko auf Hartplätzen im Vergleich zu Kunststoffrasenplätzen im Amateurfußball.
- Zwei Untersuchungen zeigen, dass ein höheres Gewicht des Füllstoffs mit signifikant niedrigeren Inzidenzraten für Gesamtverletzungen sowie substanzielle und schwere Verletzungen assoziiert ist.
- In einer Studie führte die Verwendung stoßdämpfender Elastikschiichten unter dem Kunststoffrasen zu einer signifikant höheren Verletzungsrate über alle Schweregrade hinweg im Vergleich zu Feldern ohne Unterlage.

2.3.4.3 Hallenböden

In einer Untersuchung von Coetzee et al. (2014) zum Zusammenhang zwischen Spielfeldoberfläche und Verletzungen im südafrikanischen Netball wurden insgesamt 1.280 Spielerinnen erfasst, die an zwei Turnieren der *University Sport*

of South Africa sowie an den nationalen Seniorenmeisterschaften im Jahr 2009 teilnahmen. Bei den Seniorenmeisterschaften wurden die Spiele sowohl auf Betonplätzen (engl. Cement, insgesamt 54 Stunden) als auch auf einem synthetischen Hallenboden (77 Stunden) ausgetragen. Auf Betonplätzen traten 500 Verletzungen pro 1.000 Wettkampfstunden auf, während es auf dem synthetischen Hallenboden lediglich 260 Verletzungen pro 1.000 Wettkampfstunden waren. Das entspricht einer 1,9-mal höheren Verletzungsrate auf Beton im Vergleich zum synthetischen Boden. Besonders auffällig war der Unterschied bei Knieverletzungen: 148 Knieverletzungen pro 1.000 Wettkampfstunden (entsprechend 80 % aller Knieverletzungen) ereigneten sich auf Beton, wohingegen auf dem synthetischen Hallenboden nur 26 Knieverletzungen pro 1.000 Wettkampfstunden (20 %) registriert wurden.

In einer prospektiven Analyse zum Zusammenhang zwischen dem Bodenbelag und dem Risiko für VKB-Verletzungen im Teamhandball analysierten Olsen et al. (2003) Daten aus drei früheren Langzeitstudien, die sich über insgesamt sieben Spielzeiten erstreckten. Insgesamt wurden 174 VKB-Verletzungen erfasst, von denen 53 während regulärer Ligaspiele auftraten und in die vorliegende Untersuchung einbezogen wurden. Im Beobachtungszeitraum wurden 6.724 Ligaspiele mit einer Gesamtexposition von 94.136 Spielerstunden dokumentiert (davon 57.022 Stunden bei Frauen und 37.114 Stunden bei Männern). Die durchschnittliche Inzidenz lag bei männlichen Spielern bei 0,24 VKB-Verletzungen pro 1.000 Spielerstunden, während sie bei Spielerinnen signifikant höher war und 0,77 pro 1.000 Spielerstunden betrug (OR Frauen vs. Männer: 3,21; 95 %-CI 1,56 – 6,58). Mit Blick auf die Art des Bodenbelags entfielen 62.160 Spielerstunden auf synthetische Hallenböden (Linoleum, Polyvinylchlorid, Polyurethan-Beschichtung) und 31.976 Spielerstunden auf Holzböden. Die Inzidenz von VKB-Verletzungen lag auf synthetischen Böden bei 0,66 pro 1.000 Spielerstunden, verglichen mit 0,38 auf Holzböden (OR: 1,76; 95 %-CI: 0,93 – 3,36; $p = 0,08$). Dieser Unterschied war statistisch nicht signifikant. In der Subgruppenanalyse der Spielerinnen zeigte sich jedoch ein signifikanter Unterschied: Die Inzidenz betrug

0,96 Verletzungen pro 1.000 Spielerstunden (95 %-CI: 0,92 – 1,00) auf synthetischen Hallenböden gegenüber 0,41 pro 1.000 Spielerstunden (95 %-CI: 0,32 – 0,50) auf Holzböden. Bei männlichen Spielern hingegen war kein signifikanter Unterschied in der Verletzungsinzidenz in Abhängigkeit vom Bodenbelag festzustellen.

Pasanen et al. (2008) führten eine prospektive Studie mit 331 finnischen Floorball-Spielerinnen über eine Saison hinweg durch. Die Spielexposition betrug 971 Stunden auf Holzböden und 601 Stunden auf synthetischen Böden. Insgesamt wurden 62 Verletzungen dokumentiert, davon 36 auf synthetischen Böden und 26 auf Holzböden. Die Inzidenzrate betrug 59,9 Verletzungen pro 1.000 Wettkampfstunden (95 %-CI: 43,2 – 83,0) auf synthetischem Boden und 26,8 pro 1.000 Wettkampfstunden (95 %-CI: 18,2 – 39,3) auf Holz. Dies entspricht einem IRR von 2,2 (95 %-CI: 1,4 – 3,7) zugunsten des Holzbodens. Das Risiko für Verletzungen der unteren Extremitäten war auf synthetischen Böden ebenfalls signifikant erhöht (IRR: 2,1; 95 %-CI: 1,2 – 3,7). Besonders auffällig war die Inzidenz schwerer Verletzungen, die auf synthetischem Boden 3,6-mal höher lag als auf Holz (95 %-CI: 1,1 – 11,8; $p = 0,032$). Nicht-kontaktbedingte Verletzungen traten auf synthetischem Boden sogar 13,7-mal häufiger auf als auf Holzboden (95 %-CI: 3,2 – 59,4; $p < 0,001$).

- Eine Netball-Studie zeigt insgesamt, aber vor allem für Knieverletzungen, ein signifikant höheres Verletzungsrisiko auf Betonplätzen im Vergleich zu synthetischen Belägen.
- Zwei Studien zum Vergleich synthetischer Hallenböden und Holzböden berichten ein signifikant erhöhtes Verletzungsrisiko auf synthetischen Böden:
 - In der Handballstudie war der Unterschied in Bezug auf VKB-Rupturen bei Frauen signifikant.
 - In der Floorball-Studie zeigten sich signifikant höhere Inzidenzraten für die Gesamtverletzungen sowie für schwere und nicht-kontaktbedingte Verletzungen auf synthetischem Boden.

2.4 Diskussion

Ziel dieser Übersicht war es, den aktuellen Forschungsstand zum Zusammenhang zwischen verschiedenen Sportbodenarten und dem Verletzungsrisiko in Teamsportarten systematisch zu analysieren. Für eine valide Bewertung des Einflusses von Sportbodenarten auf das Verletzungsrisiko wurden ausschließlich Studien eingeschlossen, die einen direkten Vergleich zweier oder mehrerer Bodenarten auf Basis epidemiologischer Daten zulassen.

Vier Studien der Arbeitsgruppe um Meyers (Meyers, 2010, 2013, 2016; Meyers et al., 2024) wurden aufgrund ihrer Finanzierung durch einen Kunststoffrasenhersteller und dem Hinweis der statistischen Analyse auf Publikationsverzerrung ausgeschlossen, um die Ergebnisqualität der Analyse nicht zu beeinträchtigen. Ein besonderes Augenmerk lag auf der getrennten Auswertung von Trainings- und Wettkampfdaten, um Ergebnisverzerrungen in der Risikobewertung zu vermeiden.

2.4.1 Vergleich Naturrasen vs. Kunststoffrasen

Die Resultate der vorliegenden Meta-Analyse bieten eine umfassende und differenzierte Betrachtung des Verletzungsrisikos auf Naturrasen im Vergleich zu Kunststoffrasen in Mannschaftssportarten wie Fußball, American Football oder Rugby. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass kein signifikanter Unterschied im allgemeinen Verletzungsrisiko zwischen Natur- und Kunststoffrasen besteht, wenn Trainings- und Wettkampfsituationen getrennt voneinander analysiert werden. Dies gilt ebenso für die Subgruppenanalysen der unterschiedlichen Sportarten. Die Betrachtung von Verletzungen der unteren Extremitäten, des Knies sowie des Sprunggelenks zeigt jedoch ein signifikant niedrigeres Verletzungsrisiko für Naturrasen im Vergleich zu Kunststoffrasensystemen.

Diese Ergebnisse unterstreichen, dass pauschale Aussagen über die Überlegenheit eines Sportbodens nicht gerechtfertigt sind. Vielmehr erfordert die Risikoabschätzung eine differenzierte

Betrachtung, die sowohl die Art der Verletzung als auch die Sportart berücksichtigt. Die Meta-Analyse zeigte jedoch, dass bei signifikanten Unterschieden zwischen den Sportböden durchgängig ein geringeres Verletzungsrisiko auf Naturrasen im Vergleich zu Kunststoffrasen festgestellt wurde. Hinweise auf ein erhöhtes Risiko auf Naturrasen ergaben sich lediglich aus der qualitativen Analyse einzelner Studien.

Eine mögliche Erklärung für diese Befunde liegt in der Schuh-Sportboden-Interaktion, die eine zentrale Rolle mit Blick auf die Mechanismen von Verletzungen der unteren Extremitäten spielt (Orchard et al., 2013; vgl. auch Kapitel 4). Ein wesentlicher Faktor der Interaktion ist die rotatorische Traktion zwischen Schuh und Untergrund. Hohe rotatorische Traktionskräfte resultieren in einer starken Restriktion gegen Rotationen des Schuhs auf dem Untergrund und zu einem Verblocken des Schuhs, was mit Verletzungen der unteren Extremitäten assoziiert wird (Lambson et al., 1996). Es zeigte sich, dass diese Traktionskräfte auf Kunststoffrasen oftmals höher sind als auf Naturrasen, was eine Erklärung für das erhöhte Verletzungsrisiko bezüglich spezifischer Verletzungen sein kann (Williams et al., 2011). Neben den maximalen Traktionskräften ist auch die Rate, in der die Kräfte bei Rotationsbewegungen zunehmen, ein entscheidender Faktor für das Verletzungsrisiko (Livesay et al., 2006). Höhere mittlere Kraftentwicklungsraten konnten für Kunststoffrasen dokumentiert werden (Williams et al., 2011). Jedoch muss bedacht werden, dass die Auswahl des Schuhs ebenfalls eine zentrale Rolle bezüglich dieser beiden Faktoren spielen kann, sodass der geeignete Schuh für den jeweiligen Untergrund einen protektiven Einfluss auf das Verletzungsrisiko haben kann (Livesay et al., 2006). Da Verletzungsmechanismen stets multifaktoriell bedingt sind (Bahr & Krosshaug, 2005), lässt sich allerdings kein unmittelbarer kausaler Zusammenhang zwischen dem Sportboden und dem Verletzungsgeschehen herstellen.

Das Verletzungsrisiko auf Naturrasen im Vergleich zu Kunststoffrasen wurde bereits in mehreren systematischen Übersichtsarbeiten und Meta-Analysen behandelt (Kuitunen et al., 2023).

Jedoch fokussieren sich vorherige Arbeiten meist nur auf einzelne Sportarten, spezifische Verletzungstypen (Williams et al., 2013) oder beinhalten eine nicht weiter differenzierte Aggregation von Trainings- und Wettkampfdaten (Gould et al., 2023). Dadurch könnte eine verzerrte Darstellung der tatsächlichen Risikozusammenhänge auftreten. Die aktuelle systematische Übersicht mit Meta-Analyse hebt sich davon ab, indem sie mehrere Sportarten inkludiert sowie eine klare Differenzierung nach Expositionsart und Verletzungstyp vornimmt.

Die Meta-Analyse von Kuitunen et al. (2023) stellt eine der umfassendsten Arbeiten zum Verletzungsrisiko im Fußball auf Kunststoffrasen vs. Naturrasen dar. Insgesamt berichten die Autorinnen und Autoren eine geringere Gesamtverletzungsinzidenz auf Kunststoffrasen ($IRR = 0,86$; 95 %-CI: 0,78 – 0,95), wobei sich dies sowohl für Männer ($IRR = 0,82$; 95 %-CI: 0,72 – 0,94) als auch Frauen ($IRR = 0,83$; 95 %-CI: 0,76 – 0,91) zeigte. Auch Knie- und Oberschenkelverletzungen traten seltener auf Kunststoffrasen auf. Zu beachten ist hierbei, dass diese Ergebnisse auf einer Analyse beruht, welche keine konsequente Trennung zwischen Trainings- und Wettkampffexposition vorgenommen hat. Jedoch kann gerade die Vermischung beider Expositionsarten eine Scheinassoziation erzeugen, da sich Nutzungshäufigkeit (z. B. Kunststoffrasen im Training) und Risiko (höher im Wettkampf) stark unterscheiden. In einer Subanalyse aller Verletzungen nach Training und Wettkampf differenziert, zeigt sich auch bei Kuitunen et al. kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Untergründen.

Die Arbeit von Xiao et al. (2022) konzentriert sich auf VKB-Rupturen im Fußball und bietet eine geschlechterspezifische Betrachtung des Verletzungsrisikos in Abhängigkeit des Untergrunds. Die Autorinnen und Autoren finden weder für Wettkampf noch für Training ein erhöhtes Risiko für VKB-Rupturen auf Kunststoffrasen. Jedoch wird ein signifikant erhöhtes Risiko für Spielerinnen im Wettkampf berichtet. Allerdings inkludierten Xiao et al. für die Analyse der VKB-Rupturen bei Spielerinnen lediglich zwei Studien, von denen eine aufgrund der großen Stichprobe mit einer

Gewichtung von über 98% in die Analyse einfluss. Aus diesem Grund gleicht diese Meta-Analyse eher dem Bericht einer Einzelstudie.

In einer weiteren Meta-Analyse kommen Williams et al. (2013) zu dem Schluss, dass das Verletzungsrisiko im Fußball auf Naturrasen höher als auf Kunststoffrasen ist. Obwohl die vorliegende Meta-Analyse teilweise dieselben Primärstudien berücksichtigt wie die Untersuchung von Williams et al., ergeben sich abweichende Ergebnisse. Der zentrale Unterschied liegt in der methodischen Herangehensweise: Während Williams et al. Wettkampf- und Trainingssituationen gemeinsam auswerteten, wurde in der jetzigen Analyse eine klare Differenzierung zwischen diesen beiden Bedingungen vorgenommen.

Die systematische Übersicht von Gould et al. (2023) befasst sich mit Verletzungen der unteren Extremitäten auf Kunststoffrasen im Vergleich zu Naturrasen, wobei die Daten jedoch nicht meta-analytisch aggregiert wurden. Die Autorinnen und Autoren berichten eine erhöhte Rate an Fuß- und Sprunggelenkverletzungen auf Kunststoffrasen, weisen aber selbst auf die methodischen Einschränkungen durch die heterogene Datenlage und die fehlende statistische Synthese hin.

2.4.2 Vergleich weiterer Sportböden

Sowohl innerhalb der Gruppe der Naturrasenflächen als auch innerhalb der Kunststoffrasensysteme konnten teils deutliche Unterschiede im Verletzungsrisiko identifiziert werden. Diese Befunde unterstreichen, dass nicht allein die generelle Sportbodenart – also Naturrasen vs. Kunststoffrasen – ausschlaggebend ist, sondern auch deren spezifische technische Eigenschaften eine wesentliche Rolle spielen. Bei Naturrasen umfassen diese Merkmale insbesondere die Rasensorte und die subjektive Feldqualität, während bei Kunststoffrasen vor allem Faktoren wie das Gewicht des Füllstoffs sowie die Beschaffenheit der Elastikschicht relevant sind. Ein höheres Gewicht des Füllstoffs ist mit signifikant niedrigeren Verletzungsraten assoziiert, vermutlich da es zu einer verbesserten Dämpfung (Meyers, 2019) und zur Regulierung der Traktionskräfte

beiträgt (vgl. auch Kapitel 4). Der Füllstoff ist dabei zentral für die Traktion und wird nach dem Ansatz von Forrester und Fleming (2019) durch drei Mechanismen erklärt: die Reibung zwischen der Außensohle des Schuhs und der Oberfläche, dem Scherwiderstand der Polschicht gegenüber der Außensohle, sowie dem Druckwiderstand der Polschicht gegen die horizontale Verschiebung der Stollen. Diese Widerstände werden maßgeblich durch die lokale Dichte und Kompression des Füllstoffs bestimmt. Alle zuvor genannten Merkmale beeinflussen entscheidende Aspekte der Schuh-Sportboden-Interaktion, die als zentraler Risikofaktor für nicht-kontaktbedingte Verletzungen gilt. Auch innerhalb einer Bodenart können unterschiedliche Konfigurationen somit zu variierenden mechanischen Eigenschaften führen, mit potenziellen Auswirkungen auf das Verletzungsrisiko. Die vorliegenden Befunde verdeutlichen daher die Notwendigkeit, künftige Analysen nicht allein auf den Sportboden, sondern auch auf deren spezifische technische Merkmale zu fokussieren.

Im Bereich der Hallensportarten ist die derzeitige Datenlage insgesamt begrenzt, da lediglich drei Studien in die Analyse einbezogen werden konnten. Entsprechend sind die aktuellen Befunde mit Zurückhaltung zu interpretieren und erlauben keine generalisierbaren Aussagen. Dennoch weisen alle drei Untersuchungen auf relevante Unterschiede im Verletzungsrisiko in Abhängigkeit von der Beschaffenheit des Hallenbodens hin.

Ein zentraler Einflussfaktor scheint auch bei Hallenböden die Schuh-Sportboden-Interaktion zu sein, die maßgeblich durch die Reibungseigenschaften der Oberfläche bestimmt wird. In der Studie von Olsen et al. (2003) zeigte sich beispielsweise, dass die synthetischen Hallenböden, auf denen ein signifikant erhöhtes Risiko für VKB-Rupturen bei Handballspielerinnen festgestellt wurde, höhere Friktionswerte aufwiesen als klassische Holzböden. Hohe Reibung kann dabei die Rotationsfreiheit des Fußes einschränken und zu erhöhten Torsionskräften auf Kniegelenk und umliegende Strukturen führen. Jedoch wurden in dieser Studie wichtige Faktoren nicht berücksichtigt, welche die Friktionswerte

mit beeinflussen. Dazu zählen insbesondere das Alter und der Verschleißgrad des Sportbodens, regelmäßige Reinigungs- und Instandhaltungsmaßnahmen, die Nutzung von Haftmittel sowie der verwendete Sportschuh. Auch in der einschlägigen Literatur werden diese Einflussgrößen nur selten oder gar nicht systematisch erfasst und berichtet.

Angesichts dieser Limitationen erscheint eine differenziertere Erfassung und standardisierte Dokumentation von Bodeneigenschaften und Umgebungsfaktoren in zukünftigen Studien zu dieser Thematik dringend erforderlich. Nur durch eine präzisere Charakterisierung aller Komponenten und deren Interaktionen lässt sich der Zusammenhang zwischen Sportboden und Verletzungsrisiko wissenschaftlich valide beurteilen.

2.4.3 Limitationen der Analyse

Die Ergebnisse dieser Analyse sind vor dem Hintergrund mehrerer methodischer und inhaltlicher Einschränkungen zu interpretieren. Diese betreffen sowohl die Vergleichbarkeit der eingeschlossenen Studien als auch spezifische Aspekte der untersuchten Sportbodenarten.

Erstens ist hervorzuheben, dass nur ein Teil der inkludierten Studien differenzierte Angaben zur Verletzungsschwere lieferte. In vielen Fällen werden lediglich Inzidenzraten oder Gesamtverletzungen berichtet, ohne die klinische Relevanz der Verletzungen zu differenzieren. Dabei ist die Schwere einer Verletzung (z. B. Ausfallzeit, operative Versorgung, langfristige Funktionseinschränkung) ein mindestens ebenso bedeutsamer Endpunkt wie die reine Anzahl der Verletzungen und sollte für eine differenzierte Beurteilung ebenfalls berücksichtigt werden (Verhagen et al., 2024). Eine valide Bewertung des tatsächlichen Verletzungsrisikos im Sinne der Belastung für Athletinnen und Athleten und das Gesundheitssystem bleibt somit eingeschränkt.

Zweitens zeigte sich eine teilweise uneinheitliche Definition des Verletzungsbegriffs zwischen den Studien. Während einige Arbeiten bereits leichte Beschwerden mit kurzer Ausfallzeit ein-

beziehen (z. B. Cousins et al., 2022; Immonen et al., 2024), erfassen andere nur medizinisch dokumentierte oder behandlungsbedürftige Verletzungen (z. B. Loughran et al., 2019). Diese definitorische Heterogenität erschwert die direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse und kann zu Verzerrungen in der Gesamtauswertung führen.

Im spezifischen Vergleich zwischen Kunststoff- und Naturrasenplätzen bestehen weitere Limitationen. Um eine möglichst aktuelle Datenbasis zu gewährleisten, wurden nur Studien eingeschlossen, deren Untersuchungszeiträume nach dem Jahr 2000 liegen. Dieses Kriterium diente dazu, ältere Generationen von Kunststoffrasensystemen weitestgehend auszuschließen, da sich deren mechanische Eigenschaften erheblich von denen neuerer Generationen unterscheiden. Dennoch ist zu berücksichtigen, dass selbst die in neueren Studien untersuchten Kunststoffrasenplätze in ihrer technologischen Ausführung bereits wieder veraltet sein können. Da Sportbeläge, Füllstoffe und Elastikschichten kontinuierlich weiterentwickelt werden, ist die Übertragbarkeit auf neu installierte Plätze nur eingeschränkt möglich.

Zudem wurde der Nutzungsgrad bzw. die Gewöhnung an einen bestimmten Untergrund in der Analyse nicht systematisch erfasst. Es ist jedoch denkbar, dass Spielerinnen und Spielern, die regelmäßig auf einem bestimmten Sportboden trainieren und spielen, biomechanische Anpassungsprozesse entwickeln, die das Verletzungsrisiko potenziell senken. Gelegentliche Nutzung eines Bodens oder häufige Wechsel zwischen verschiedenen Böden könnten hingegen eine zusätzliche Belastung darstellen. Dieser Aspekt sollte in künftigen Untersuchungen stärker berücksichtigt werden.

Ein weiterer relevanter Punkt ist der tatsächliche Zustand der Spielflächen zum Zeitpunkt der Datenerhebung. So differenzieren bisherige Studien beispielsweise nicht zwischen gut gepflegten, abgenutzten oder gar beschädigten Plätzen und spezifisch bei Kunststoffrasenflächen nicht zwischen erst kürzlich vs. schon langjährig installierten Sportböden. Besonders im Amateur- und Breitensportbereich ist davon auszugehen,

dass Naturrasenplätze häufig unebener oder schlechter instandgehalten sind als Kunststoffrasenflächen, die meist standardisierter und wartungsärmer sind.

2.4.4 Schlussfolgerungen für Praxis und Forschung

Die vorliegenden Ergebnisse verdeutlichen, dass der Zusammenhang zwischen Sportbodenarten und dem Verletzungsrisiko im Teamsport ein komplexes Themenfeld darstellt. Während sich bezüglich spezifischer Verletzungen Hinweise auf risikobehaftete Konstellationen ergeben, lassen sich derzeit keine pauschalen Empfehlungen zugunsten oder zulasten einzelner Sportböden ableiten. Die bislang verfügbare Studienlage ist heterogen, teilweise methodisch limitiert und erlaubt nur eingeschränkt generalisierbare Aussagen.

Aus forschungsmethodischer Sicht besteht ein erheblicher Bedarf an qualitativ hochwertigen, prospektiven Studien, die das Verletzungsrisiko in Abhängigkeit von Sportbodenarten systematisch untersuchen. Zukünftige Arbeiten sollten dabei einheitliche Definitionen von Verletzungen verwenden und sowohl die Inzidenz als auch die Schwere der Verletzungen differenziert erfassen. Hierbei ist eine standardisierte Klassifikation der Verletzungsschwere notwendig, um die klinische und sportliche Relevanz der Ergebnisse besser einordnen zu können.

Ein zentrales Defizit der bisherigen Forschung liegt in der unzureichenden Erfassung der technischen Eigenschaften der Sportböden. Variablen wie Traktion, Dämpfungseigenschaften, Gleichmäßigkeit, Verschleißgrad und Wartungszustand werden selten oder nur unzureichend dokumentiert, obwohl sie maßgeblich die Schuh-Sportboden-Interaktion beeinflussen. In zukünftigen Forschungsvorhaben sollte eine systematische Charakterisierung dieser Bodenparameter erfolgen, idealerweise standardisiert und unabhängig gemessen.

Ebenso bedeutsam ist die bislang weitgehend vernachlässigte Rolle des Sportschuhs bei Studien, die Unterschiede zwischen Sportböden analysieren. Die Interaktion zwischen Schuh-

sohle und Untergrund stellt einen entscheidenden biomechanischen Risikofaktor dar, besonders für nicht-kontaktbedingte Verletzungen der unteren Extremität. Dennoch wird der verwendete Schuhtyp in den meisten Studien nicht erfasst oder kontrolliert. Perspektivisch erscheint es daher sinnvoll, Sportboden und Sportschuh als kombiniertes Belastungssystem zu begreifen und in Studien gemeinsam zu dokumentieren und zu analysieren. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Vielzahl möglicher Kombinationen von Schuh- und Bodencharakteristika eine standardisierte Erfassung und vergleichende Analyse in der Praxis erheblich erschwert.

Gerade im professionellen Leistungssport, in dem sowohl Verletzungsprävention als auch technische Ausstattung einen hohen Stellenwert besitzen, wäre die Einführung eines standardisierten Monitoringsystems zur Erfassung von Sportbodentyp, Bodenzustand, Schuhtyp und Exposition (Training vs. Wettkampf) wünschenswert. Darüber hinaus ist eine kontinuierliche Forschung notwendig, um den Einfluss technischer Weiterentwicklungen systematisch zu erfassen. Eine solche Datengrundlage könnte dazu beitragen, Risikofaktoren besser zu bewerten und gezieltere Präventionsmaßnahmen zu entwickeln.

Gleichzeitig ist die multifaktorielle Natur von Verletzungen im Teamsport hervorzuheben. Der Sportboden ist ein relevanter, aber nur einzelner Faktor in einem komplexen Zusammenspiel internaler und externaler Risikofaktoren. Maßnahmen am Sportboden besitzen den Vorteil einer verhältnispräventiven Wirkung, da sie unabhängig vom individuellen Verhalten greifen und eine Risikoreduktion auf Populationsebene ermöglichen. Sie sollten jedoch konsequent durch verhaltenspräventive Strategien ergänzt werden. Insbesondere neuromuskuläre Trainingsprogramme zeigen unter kontrollierten Bedingungen häufig deutlich höhere Risikoreduktionen, als dies mit Modifikationen an Sportböden möglich scheint. Übersichtsarbeiten berichten beispielsweise relative Risikoreduktionen für Verletzungen der unteren Extremitäten von 39 % (Hübscher et al., 2010) bzw. 36 % (Emery et al., 2015).

Insgesamt zeigt sich, dass eine valide Risikobewertung nicht allein durch die Unterscheidung von Naturrasen, Kunststoffrasen oder Hallenbodenarten erfolgen kann. Vielmehr erfordert die Untersuchung von Verletzungsrisiken eine Analyse von biomechanischen, sportartspezifischen und kontextuellen Endpunkten. Nur durch einen solchen multidimensionalen Forschungsansatz kann langfristig ein besseres Verständnis für die Rolle des Sportbodens in der Entstehung von Verletzungen gewonnen werden.

2.5 Geschlechtsspezifische Analysen

Die sogenannte *Gender Data Gap* zeigt sich auch in Studien zum Einfluss von Sportschuhen und Sportböden auf das Verletzungsrisiko. Der Transfer von Befunden aus Studien mit männlichen Athleten auf Athletinnen ist aufgrund bedeutsamer hormoneller, anatomischer und neuromuskulärer Unterschiede zwischen den Geschlechtern nicht möglich. Diese Unterschiede können sich maßgeblich auf das Verletzungsrisiko auswirken, wie sich am Beispiel der VKB-Ruptur mit nachweisbar deutlich höheren Verletzungsraten für Athletinnen im Vergleich zu Athleten zeigt (Montalvo et al., 2019).

Vor diesem Hintergrund werden in diesem Abschnitt Ergebnisse aus Studien mit Athletinnen separat betrachtet. Diese geschlechtsspezifischen Analysen werden den zuvor mit primär männlichen Athleten ermittelten Ergebnissen gegenübergestellt. Mithilfe dieser Subanalyse soll qualitativ geprüft werden, ob sich geschlechtsspezifische Muster im Verletzungsrisiko erkennen lassen und ob sich daraus weiterführende Erkenntnisse für die Verletzungsprävention und zukünftige Forschung ableiten lassen. Darüber hinaus soll die Aussagekraft der vorhandenen Evidenz für beide Geschlechter kritisch beleuchtet werden, um potenzielle Forschungslücken zu identifizieren.

Von insgesamt 44 in die Analyse eingeschlossenen Studien zum Zusammenhang zwischen Sportbodenbelägen und Verletzungsrisiko berücksichtigten lediglich fünf Studien sowohl

männliche als auch weibliche Probandinnen und Probanden und ermöglichten einen direkten Vergleich zwischen den Geschlechtern. Weitere fünf Studien untersuchten ausschließlich Athletinnen. Die verbleibenden 34 Studien bezogen sich entweder ausschließlich auf männliche Probanden oder machten keine Angaben zum Geschlecht der untersuchten Personen. Aufgrund der geringen Zahl methodisch vergleichbarer Studien war keine meta-analytische Zusammenfassung der Studien mit weiblichen Probanden möglich.

2.5.1 Vergleich Naturrasen vs. Kunststoffrasen

In vier Untersuchungen wurde das Verletzungsrisiko auf Naturrasen im Vergleich zu Kunststoffrasen bei Fußballspielerinnen sowie Fußballspielern analysiert. Die Studie von Ekstrand et al. (2011) zeigte, dass weder bei Männern noch bei Frauen ein signifikanter Unterschied in der Verletzungsinzidenz zwischen Naturrasen und Kunststoffrasen bestand. Dies galt sowohl für Training als auch für Wettkampf sowie für alle Verletzungen insgesamt und für Verletzungen des Knie- und Sprunggelenks. Somit zeigten sich in der vorgenommenen qualitativen und geschlechtsspezifischen Analyse keine Unterschiede in Abhängigkeit des Spieluntergrunds.

Ein vergleichbares Ergebnis zeigen die beiden Studien der Arbeitsgruppe um Fuller (Fuller et al., 2010; Fuller et al., 2007), die das Verletzungsrisiko im Trainings- und Wettkampfbetrieb bei männlichen und weiblichen College- sowie Universitätsfußballteams untersuchten. Auch hier konnte weder bei Männern noch bei Frauen ein signifikanter Unterschied in der Häufigkeit von Gesamtverletzungen, Knie- oder Sprunggelenkverletzungen zwischen Naturrasen und Kunststoffrasen festgestellt werden.

Bezüglich der VKB-Rupturen zeigen sich differenzierte Ergebnisse. Howard et al. (2020) konnten signifikante Unterschiede zwischen den beiden Bodenarten feststellen. Im Wettkampf war das VKB-Rupturrisiko auf Kunststoffrasen erhöht, während es im Training auf Naturrasen höher ausfiel. Dieses Muster zeigte sich sowohl

bei Spielerinnen als auch Spielern, sodass keine geschlechtsspezifischen Unterschiede in Bezug auf einen bestimmten Sportboden festgestellt werden konnten. Hervorzuheben ist jedoch die deutliche Differenz in der Magnitude der Effektgröße im Training. Während männliche Spieler ein ca. 3-fach erhöhtes Risiko auf Naturrasen im Vergleich zu Kunststoffrasen aufwiesen, konnte ein 11-fach erhöhtes Risiko bei Spielerinnen ermittelt werden.

Zusätzlich untersuchten Autorinnen und Autoren von weiteren Studien das Verletzungsrisiko im Fußball auf Naturrasen im Vergleich zu Kunststoffrasen ausschließlich bei adoleszenten Spielerinnen. In diesem Kontext zeigt die Studie von Steffen et al. (2007) sowohl für alle Verletzungen im Training und im Wettkampf als auch für Verletzungen der unteren Extremitäten sowie des Knie- und Sprunggelenks im Wettkampf keinen signifikanten Unterschied im Risiko zwischen den beiden Bodenbelägen. Diese Ergebnisse wurden von Hagglund & Walden (2016) bestätigt, die ebenfalls keinen Unterschied im Risiko für Knieverletzungen im Training oder im Wettkampf zwischen Naturrasen und Kunststoffrasen ermitteln konnten.

Diese Ergebnisse stehen im Widerspruch zu den Befunden der vorliegenden Meta-Analyse, in der beide Geschlechter zusammen betrachtet wurden. Dort zeigte sich im Wettkampf ein erhöhtes Risiko für Verletzungen der unteren Extremitäten sowie für Knie- und Sprunggelenkverletzungen auf Kunststoffrasen. Ebenso weichen die Ergebnisse der Studie von O’Kane et al. (2016) von denen der aktuellen Meta-Analyse hinsichtlich aller Verletzungen im Training ab. Während die aktuelle Analyse keinen Unterschied zwischen den beiden Bodenarten ergab, berichtete jene Meta-Analyse bei adoleszenten Fußballerinnen von einem 2,8-fach erhöhten Verletzungsrisiko auf Naturrasen.

2.5.2 Vergleich von Hallenböden

Lediglich eine Studie verglich das Verletzungsrisiko auf unterschiedlichen Hallenböden unter Einbezug geschlechtsspezifischer Analysen. Olsen et al. (2003) untersuchten das Risiko von

VKB-Rupturen bei Handballspielerinnen und Handballspielern auf hölzernen und synthetischen Hallenböden. Während sich weder bei der Gesamtgruppe noch bei den männlichen Spielern allein betrachtet ein signifikanter Unterschied im Verletzungsrisiko zeigte, ergab die Analyse für Spielerinnen ein deutlich erhöhtes Risiko auf synthetischen Böden. Die Inzidenz lag bei 0,96 Verletzungen pro 1.000 Spielerstunden (95 %-CI: 0,92 – 1,00) auf synthetischen Böden im Vergleich zu 0,41 Verletzungen pro 1.000 Spielerstunden (95 %-CI: 0,32 – 0,50) auf Holzböden. Bei Männern hingegen lag die Inzidenz bei 0,20 (95 %-CI: 0,08 – 0,32) auf synthetischen Böden und bei 0,32 (95 %-CI: 0,19 – 0,45) auf Holzböden.

2.5.3 Fazit

Die geschlechtsspezifischen Subanalysen zeigen, dass Frauen in sportwissenschaftlich-epidemiologischen Studien nach wie vor unterrepräsentiert sind. Gleichzeitig legen die vorhandenen Daten nahe, dass geschlechtsspezifische Unterschiede im Verletzungsrisiko auf unterschiedlichen Bodenbelägen bestehen könnten. Da aufgrund der geringen Anzahl an verfügbaren Studien keine meta-analytische Betrachtung des Geschlechtseffektes möglich war, wurden die Ergebnisse der vorliegenden Subanalyse lediglich qualitativ beschrieben. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, Männer und Frauen in zukünftigen Studien systematisch zu analysieren, um geschlechtsspezifische Effekte herausarbeiten zu können. Künftige Forschungsarbeiten sollten daher möglichst beide Geschlechter in ausreichend großen Stichproben einbeziehen, um vergleichende Analysen zu ermöglichen und um daraus geschlechtsspezifische präventive Maßnahmen abzuleiten.

3 Scoping Review zum Einfluss unterschiedlicher Konstruktionsmerkmale von Sportschuhen auf das Verletzungsrisiko im Teamsport

3.1 Einleitung

Verletzungen der unteren Extremitäten treten in zahlreichen Mannschaftssportarten häufig auf und können zu relevanten Ausfallzeiten für Athletinnen und Athleten oder gar zum Karriereende führen. Neben intrinsischen Risikofaktoren (z.B. vorherige Verletzungen, Geschlecht, Alter) rückt die Sportausrüstung und insbesondere der Sportschuh als modifizierbarer externer Risikofaktor in den Fokus der Prävention.

Sportschuhe werden kontinuierlich technologisch weiterentwickelt, um nicht nur die sportliche Leistung zu steigern, sondern auch das potenzielle Verletzungsrisiko zu senken. Spezifische Konstruktionsmerkmale wie die Material- und Strukturzusammensetzung der Zwischensohle, die Implementierung verschiedener Dämpfungssysteme, die Außensohle (inklusive Gestaltung von Stollenprofilen) sowie die Schafthöhe beeinflussen mechanische Eigenschaften von Sportschuhen wie Traktionsverhalten oder Steifigkeit wesentlich. Hierdurch können diese Merkmale einen bedeutsamen Einfluss auf das Verletzungsrisiko der unteren Extremitäten nehmen.

Im Rahmen dieser Expertise wurde mithilfe eines systematischen Literaturüberblicks der aktuelle Forschungsstand bezüglich des Einflusses von

Sportschuh-Konstruktionsmerkmalen in Bezug auf das Verletzungsrisiko der unteren Extremitäten in Mannschaftssportarten zusammengefasst und kritisch analysiert. Basierend auf diesem Wissensstand werden kritische Schuhmerkmale identifiziert, die mit höherem oder geringerem Verletzungsrisiko assoziiert sind.

3.2 Methodik

3.2.1 Einschlusskriterien für diese Übersichtsarbeit

Zur Aufnahme von Originalarbeiten und Konferenzbeiträgen in diese systematische Übersichtsarbeit mussten die in Tabelle 4 aufgeführten Ein- und Ausschlusskriterien erfüllt werden.

Berücksichtigt wurden nur Originalarbeiten in deutscher oder englischer Sprache. Eingeschlossen wurden Studien, welche die Inzidenzrate von Sportverletzungen als primären Parameter untersuchten. Ausgeschlossen wurden Studien, die lediglich Häufigkeitsverteilungen von Verletzungen oder Prävalenzen berichteten. Darüber hinaus wurden Publikationen vor dem Jahr 2000 ebenfalls nicht berücksichtigt, aufgrund der technologischen Weiterentwicklung von Sportböden und/oder -schuhen.

Tab. 4: Einschlusskriterien hinsichtlich des PECO-Schemas (Population, Exposure, Comparison, Outcome)

Kategorie	Einschlusskriterium	Ausschlusskriterium
Population	Mannschaftssportarten	2 vs. 2 Sportarten; Eishockey
Exposure/Kontrolle	Vergleich zwischen Konstruktionsmerkmalen von Sportschuhen	Fehlender Vergleich; keine Kontrollbedingung
Zielparameter – Verletzungen	Akute Verletzungen	Chronische Verletzungen
Zielparameter – Epidemiologie	Epidemiologische Kennzahlen zur Quantifizierung des Verletzungsrisikos und von Verletzungsraten	Keine epidemiologischen Kennzahlen vorhanden

3.2.2 Literatursuche/Suchstrategie

Die systematische Literaturrecherche orientierte sich an den Empfehlungen des Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions (Higgins et al., 2024) und den PRISMA-2020 Richtlinien (Page et al., 2021). Gesucht wurde in den Datenbanken PubMed, Web of Science und BASE (jeweils Stand November 2024) sowie der Fachzeitschrift Footwear Science (Stand Februar 2025). In Anlehnung an das PECO-Schema wurde für die Suche eine Kombination von relevanten Schlüsselwörtern für das Thema Sportschuhe und Verletzungsrisiko/-rate verwendet, welche mittels der Operatoren „AND“ zwischen den Kategorien und „OR“ innerhalb der Kategorien logisch verknüpft wurden (Tabelle 5). Darüber hinaus wurde in den Literaturverzeichnissen relevanter Studien recherchiert.

3.2.3 Studienwahl

Nach Abschluss der Literaturrecherche erfolgte in einem ersten Schritt eine Vorauswahl an Studien anhand ihrer Titel und Zusammenfassungen (Abstracts). Diese Studiena Auswahl erfolgte durch zwei unabhängige Gutachter. Eventuelle Unstimmigkeiten hinsichtlich Studieneignung wurden im Konsensverfahren durch Diskussion und unter Einbeziehung weiterer Kollegen gelöst. In einem nächsten Schritt wurden die Volltextversionen der identifizierten Publikationen hinsichtlich der definierten Ein- und Ausschlusskriterien auf ihre Eignung überprüft.

3.2.4 Datenextraktion

Die relevanten Informationen der Primärstudien wurden unter Verwendung standardisierter Auswertebögen extrahiert (Tabelle 6).

3.3 Ergebnisse

3.3.1 Ergebnisse der systematischen Literaturrecherche

Abbildung 11 zeigt das PRISMA-Flussdiagramm der systematischen Literaturrecherche. Die Literaturrecherche ergab insgesamt 1.135 Studien. Nach Entfernung von 492 Duplikaten verblieben 643 Artikel für das Screening. Auf Grundlage von Titel und Abstract wurden 24 Studien in die Volltextanalyse einbezogen. Hiervon wurden acht Studien aufgrund fehlender Angaben zu Inzidenzraten ausgeschlossen, ebenso eine Studie, weil der Volltext nur auf Spanisch verfügbar war, sowie eine Studie, weil kein Volltext verfügbar war und eine weitere Studie wegen unzureichender Beschreibung der Konstruktionsmerkmale der Sportschuhe. Zwei Konferenzbeiträge mussten aufgrund unzureichend berichteter Inzidenzraten ausgeschlossen werden. Da die Inzidenzraten bei Meyers (2013, 2016, 2019) nicht nach der Anzahl an untersuchten Athletinnen und Athleten korrigiert wurden, die mit einer bestimmten Außensohle spielten, mussten auch diese Studien ausgeschlossen werden.

Tab. 5: Einschlusskriterien hinsichtlich des PECO-Schemas.

PECO	Kategorie	Schlüsselwörter und Verknüpfungen
P	Sportarten	(„team sport“ OR „field hockey“ OR soccer OR football OR handball OR basketball OR rugby OR volleyball OR lacrosse OR futsal OR netball)
E & C	Sportschuh	(footwear OR shoe* OR stud* OR cleat* OR boot*)
O1	Verletzung	(injury OR injuries OR trauma OR tear* OR rupture* OR sprain* OR fracture*)
O2	Epidemiologie	(epidemiology OR incidence OR prevalence OR severity OR risk OR ratio)

Tab. 6: Struktur der Datenextraktion

Kategorie	Extrahierte Informationen
Population	Anzahl der Probandinnen und Probanden, Geschlecht, Alter, Sportart, Expertiseniveau, Art der Verletzung
Exposure & Kontrolle	Konstruktionsmerkmale der untersuchten Schuhe
Zielparameter	Verletzungsrisiko
Ergebnisse	Verletzungsrisiko in Abhängigkeit der Konstruktionsmerkmale von Sportschuhen

Folglich wurden insgesamt acht Studien in die Analyse einbezogen, welche sich über folgende Mannschaftssportarten erstreckten: American Football (Iacovelli et al., 2013; Wannop et al., 2013), Basketball (Curtis et al., 2008; Lysdal et al., 2021; McKay et al., 2001; Moré-Pacheco et al., 2019), Fußball (Iraqi-Rato & Cuesta-Barriuso, 2024; O’Kane et al., 2016), Handball (Lysdal et al., 2021) und Badminton (Lysdal et al., 2021).

Die untersuchten Konstruktionsmerkmale der Sportschuhe waren Dämpfungselemente bei Basketballschuhen (Curtis et al., 2008; McKay et al., 2001; Moré-Pacheco et al., 2019), Schuhtraktion im American Football (Wannop et al., 2013), Schuhfraktion im Handball, Basketball und Badminton (Lysdal et al., 2021), die Schafthöhe bei Schuhen im American Football (Iacovelli et al., 2013) sowie Stollenkonfigurationen im Fußball (Iraqi-Rato & Cuesta-Barriuso, 2024; O’Kane et al., 2016) und American Football (Iacovelli et al., 2013).

Vier Studien erfassten explizit Verletzungen des Sprunggelenks. Zwei dieser Studien untersuchten spezifisch laterale Sprunggelenkdorsionen (Curtis et al., 2008; Lysdal et al., 2021), während zwei Studien die Sprunggelenkverletzungen nicht weiter ausdifferenzierten (McKay et al., 2001; Moré-Pacheco et al., 2019). Vier Studien erfassten Verletzungen der unteren Extremitäten, wobei zwei davon nicht nach dem verletzten Gelenk oder Art der Verletzung unterschieden (Iacovelli et al., 2013; O’Kane et al., 2016). Wannop

et al. (2013) untersuchten NKV der unteren Extremitäten ohne Spezifizierung des verletzten Gelenks oder der Verletzungsart. Iraqi-Rato und Cuesta-Barriuso (2024) erfassten muskuläre Verletzungen der unteren Extremitäten.

In vier der acht Studien wurden Verletzungen definiert als jedes trainings- oder wettkampfbezogene Trauma, das mit den folgenden Konsequenzen verknüpft war: (1) Athletinnen und Athleten verpassten ein Spiel ganz oder teilweise, (2) Athletinnen und Athleten konnten verletzungsbedingt nicht am Wettkampf teilnehmen, (3) Athletiktrainer und Athletiktrainerinnen oder Arzt und Ärztin meldeten bzw. behandelten eine Verletzung. Iacovelli et al. (2013), McKay et al. (2001), Moré-Pacheco et al. (2019), O’Kane et al. (2016) und Wannop et al. (2013) bezogen alle Sprunggelenkdorsionen mit dem Schweregrad I oder II in ihre Analysen mit ein. In den verbleibenden drei Studien gab es keine exakte Definition der Verletzungen (Curtis et al., 2008; Iraqi-Rato & Cuesta-Barriuso, 2024; Lysdal et al., 2021).

Als epidemiologische Endpunkte wurden die Inzidenzraten (Curtis et al., 2008; Iacovelli et al., 2013; Lysdal et al., 2021; Wannop et al., 2013), das absolute Risiko (Iraqi-Rato & Cuesta-Barriuso, 2024) sowie das relative Risiko (Curtis et al., 2008; Iacovelli et al., 2013), das Inzidenzratenverhältnis (Lysdal et al., 2021) und die Odds Ratio (Moré-Pacheco et al., 2019; O’Kane et al., 2016) verwendet.

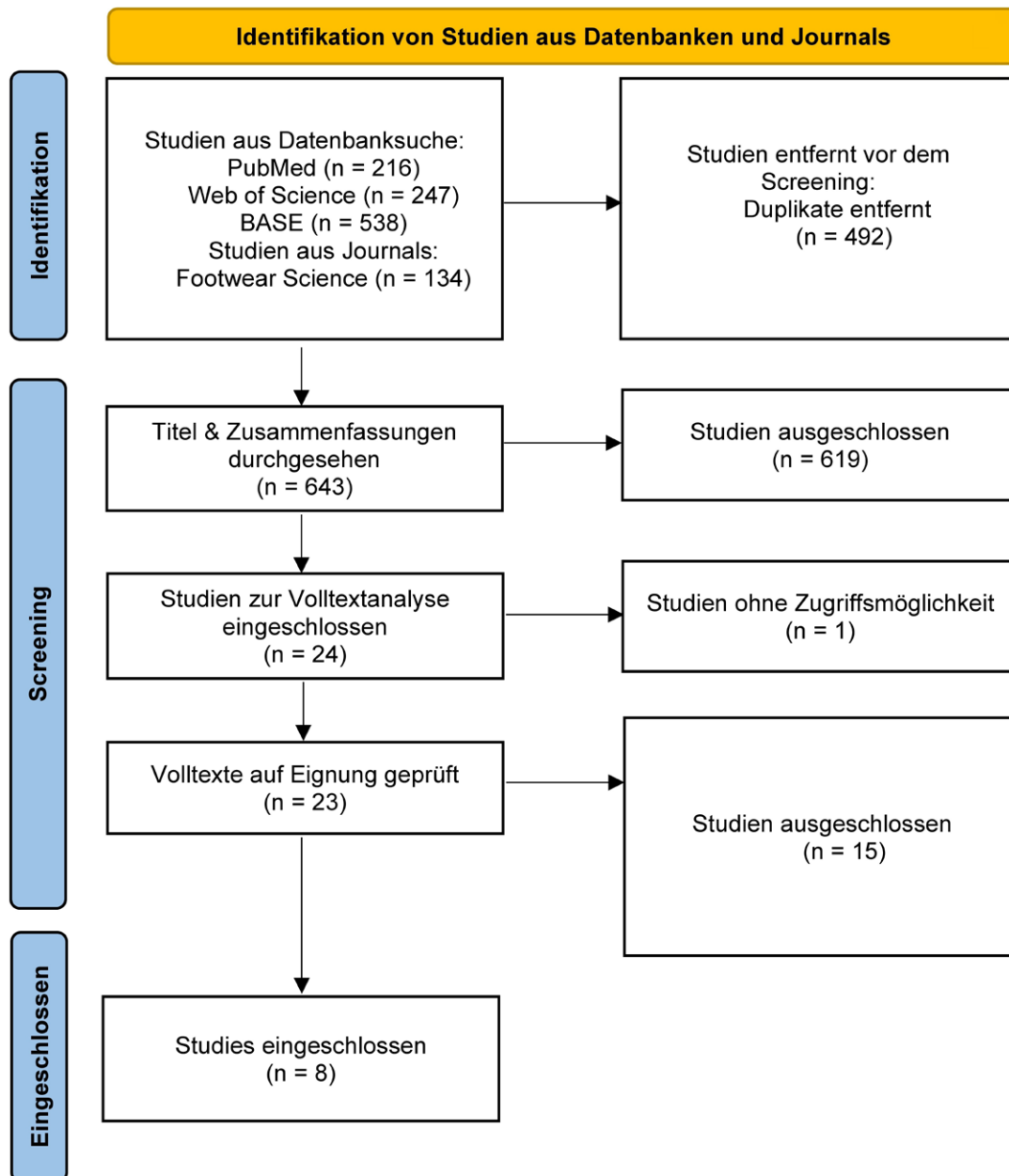


Abb. 11: PRISMA-Flussdiagramm.

3.3.2 Einfluss der Traktion von Sportschuhen auf das Verletzungsrisiko im Teamsport

Im American Football, und somit auf Rasen- und Kunststoffrasenflächen, untersuchten Wannop et al. (2013) in einer prospektiven Kohortenstudie den Zusammenhang zwischen der translatorischen sowie rotatorischen Traktion von Sportschuhen und den Inzidenzraten von NKV

der unteren Extremitäten. Über drei Jahre hinweg wurde bei 555 männlichen High-School-Spielern (Alter = $16,3 \pm 0,7$ Jahre) NKV der unteren Extremitäten während des Wettkampfes dokumentiert. Zu Beginn der jeweiligen Saison wurde die Traktion der individuellen Sportschuhe auf dem Sportboden gemessen, auf dem auch die Wettkämpfe ausgetragen wurden (entweder Rasenfläche oder Kunststoffrasenfläche). Da sich die Verletzungsraten auf Naturrasen

(12,2 Verletzungen pro 1.000 Spieleinsätze; CI = 7,1 – 17,3) und auf Kunststoffrasen (14,8 Verletzungen pro 1.000 Spieleinsätze; CI = 10,0 – 19,6) statistisch nicht signifikant unterschieden, wurden die Daten beider Spielflächen zusammengeführt. Die Spieler wurden basierend auf den gemessenen Traktionswerten in Terzile eingeteilt. Dementsprechend wurden bei der translatorischen Traktion Werte von 0,480 – 0,685 als niedrig, Werte von 0,686 – 0,719 als mittel und Werte von 0,720 – 0,970 als hoch klassifiziert. Die Verletzungsraten waren bei niedrigster translatorischer Traktion im mittleren Bereich (13,4 Verletzungen pro 1.000 Wettkampf-Expositionen; CI = 7,4 – 19,5). Bei mittlerer translatorischer Traktion waren die Verletzungsraten am höchsten (23,3 Verletzungen pro 1.000 Wettkampf-Expositionen; CI = 15,1 – 31,5) und bei höchster translatorischer Traktion am niedrigsten (5,0 Verletzungen pro 1.000 Wettkampf-Expositionen; CI = 1,3 – 8,7). Bei der rotatorischen Traktion wurde der Bereich von 15,0 bis 30,9 Nm als niedrig, 31,0 – 38,9 Nm als mittel und 39,0 – 54,9 Nm als hoch klassifiziert. Auch zwischen den rotatorischen Traktionsgruppen gab es signifikante Unterschiede der Verletzungsraten. Die Verletzungsraten waren bei niedrigster rotatorischer Traktion am geringsten (4,2 Verletzungen pro 1.000 Wettkampf-Expositionen; CI = 0,9 – 7,6), lagen höher im mittleren Traktionsbereich (17,6 Verletzungen pro 1.000 Wettkampf-Expositionen; CI = 10,6 – 24,6) und zeigten die höchste Rate bei hoher rotatorischer Traktion (19,2 Verletzungen pro 1.000 Wettkampf-Expositionen; CI = 12,0 – 26,3).

Lysdal et al. (2021) rekrutierten in ihrer prospektiven und randomisiert-kontrollierten Studie $N = 510$ Athletinnen und Athleten ($m = 292$, $w = 218$; Alter = $22,7 \pm 4,3$ Jahre) aus den Hallensportarten Handball ($n = 409$), Basketball ($n = 57$) und Badminton ($n = 44$). Alle Teilnehmenden hatten in den vergangenen 24 Monaten eine laterale Sprunggelenkdistorsion erlitten und waren vor Beginn der Studie wieder in den Wettkampf zurückgekehrt. Die Athletinnen und Athleten

wurden randomisiert zu gleichen Verhältnissen einer von zwei Experimentalgruppen zugewiesen und über einen neunmonatigen Follow-up-Zeitraum beobachtet. Eine Gruppe brachte an der lateralen Außensohle ihrer Sportschuhe einen sog. *low-friction patch* an. Darunter versteht man eine spezielle Klebefolie, welche die translatorische Friktion der Sportschuhe in medio-lateraler Richtung auf flächeneelastischen Untergründen reduziert. Die andere Gruppe diente als Kontrollgruppe ohne den *low-friction patch* („do-as-usual“). Lysdal et al. (2021) berichten insgesamt über den Beobachtungszeitraum hinweg von 151 lateralen Sprunggelenkdistorsionen. Das Verhältnis der Inzidenzraten betrug 0,87 (95 % CI = 0,62 – 1,23) für alle 151 Sprunggelenkdistorsionen, mit einer signifikant niedrigeren Ausfallzeit von 1,8 Wochen (95 % CI = 1,3 – 2,3) in der Interventionsgruppe verglichen mit 2,8 Wochen (95 % CI = 2,2 – 3,4) in der Kontrollgruppe (IRR 0,63; 95 % CI = 0,44 – 0,92). 96 der 151 lateralen Sprunggelenkdistorsionen wurden als NKV klassifiziert. Diese traten in der Gruppe mit *low-friction patch* signifikant seltener auf als in der Kontrollgruppe (IRR 0,64; 95 % CI = 0,42 – 0,98). Es konnte kein signifikanter Unterschied in den daraus resultierenden Ausfallzeiten (*low-friction patch*: 1,9 Wochen; 95 % CI = 1,1 – 2,7; Kontrolle: 2,7 Wochen; 95 % CI = 2,0 – 3,4; Ratio: 0,67; 95 % CI = 0,41 – 1,10) ermittelt werden. Erwähnenswert ist weiterhin, dass die Teilnehmenden der Gruppe mit *low-friction patch* signifikant weniger schwere Sprunggelenkdistorsionen im Allgemeinen (IRR 0,47; 95 % CI = 0,25 – 0,88) und weniger schwere Nicht-Kontakt-Sprunggelenkdistorsionen im Speziellen (IRR 0,43; 95 % CI = 0,19 – 0,97) erlitten, als die Kontrollgruppe.

- Es existieren lediglich zwei epidemiologische Studien zum Einfluss der Traktion/Friktion von Sportschuhen auf das Verletzungsrisiko.
- Geringere rotatorische Traktion im American Football und geringere laterale Friktion im Basketball, Handball und Badminton reduzieren das Verletzungsrisiko von NKV signifikant.

3.3.3 Einfluss der Stollenkonfiguration von Sportschuhen auf das Verletzungsrisiko im Teamsport

Für den Einsatz auf Rasenflächen und Kunststoffrasenflächen können die Außensohlen von Sportschuhen durch die Anzahl, die Anordnung, die Beschaffenheit und die Form von Stollen modifiziert werden, um somit mechanische Eigenschaften der Sportschuhe zu verändern. Die Außensohle beeinflusst hierbei maßgeblich die Traktion der Sportschuhe.

Iacovelli et al. (2013) untersuchten die Verletzungen der unteren Extremitäten von 188 männlichen American-Football-Spielern eines *Division I College*-Teams. Die Verletzungsraten wurden unter den Schuhen mit ≤ 7 Stollen, 8–12 Stollen oder > 12 Stollen kontrastiert. Bei Schuhen mit ≤ 7 Stollen betrug die Inzidenzrate 24,0 Verletzungen pro 10.000 Trainings- und Wettkampf-Expositionen, bei Schuhen mit 8–12 Stollen lag sie bei 38,2 Verletzungen pro 10.000 Spieler-Expositionen und bei Schuhen mit > 12 Stollen bei 33,4 Verletzungen pro 10.000 Spieler-Expositionen. Die Autorinnen und Autoren berichten keine signifikanten Unterschiede in den Inzidenzen der Schuhe mit ≤ 7 Stollen zu den Schuhen mit > 12 Stollen (RR 0,79; 95 % CI = 0,43 – 1,43) und den Schuhen mit 8–12 Stollen (RR 1,06; 95 % CI = 0,61 – 1,83). Das relative Risiko zwischen den Schuhen mit 8–12 Stollen und > 12 Stollen wurde nicht berichtet. Auch bei einer Ausdifferenzierung der Verletzungen nach Trainingsverletzungen und Wettkampfverletzungen war die Anzahl an Stollen statistisch nicht mit dem Risiko von Verletzungen der unteren Extremitäten assoziiert. Darüber hinaus wurden die Verletzungsinzidenzen in Abhängigkeit der Schafthöhe des Schuhs („high-top shoes“ vs. „low-top shoes“) untersucht. Es gab keinen Unterschied in den Inzidenzraten zwischen High-top-Schuhen, die über das Sprunggelenk gehen, und Low-top-Schuhen, die unterhalb des Sprunggelenks abschließen (RR 1,14; 95 % CI = 0,68 – 1,90). Der Faktor Schafthöhe erzielte auch bei einer

Differenzierung in Trainingsverletzungen (RR 1,19; 95 % CI = 0,59–2,38) und Wettkampfverletzungen (RR 0,97; 95 % CI = 0,43 – 2,19) nicht das statistische Signifikanzniveau hinsichtlich der Assoziation zum Verletzungsrisiko.

O’Kane et al. (2016) untersuchten bei Fußballerinnen ($N = 351$) im Alter von 11 bis 15 Jahren den Zusammenhang zwischen dem getragenen Fußballschuh und akuten Verletzungen der unteren Extremitäten. Im Training auf Kunststoffrasen war die Verletzungswahrscheinlichkeit mit für Kunststoffrasen ausgelegten Schuhen (engl. *turf shoes*) gleich groß wie die Verletzungswahrscheinlichkeit mit Stollenschuhen (OR 0,63; 95 % CI = 0,00 – 6,03). Im Wettkampf auf Kunststoffrasen war die Verletzungswahrscheinlichkeit mit für Kunststoffrasen ausgelegten Schuhen ebenfalls gleich groß wie die Verletzungswahrscheinlichkeit mit Stollenschuhen (OR 1,36; 95 % CI = 0,22 – 3,67). Spielerinnen, die sich im Training verletzten, trugen außerdem mit 2,4-facher Wahrscheinlichkeit (95 % CI = 1,03 – 5,96) Stollenschuhe auf Naturrasen gegenüber Stollenschuhen auf Kunststoffrasen. Dieser Befund zeigte im Wettkampf keine statistische Signifikanz (OR 0,69; 95 % CI = 0,22 – 3,67).

In einer retrospektiven Kohortenstudie untersuchten Iraqui-Rato und Cuesta-Barriuso (2024) den Einfluss der Stollenart (Metallstollen vs. Gummistollen vs. Multi-Stollen) von Fußballschuhen auf muskuläre Verletzungen der unteren Extremitäten bei $N = 156$ Fußballspielern auf Amateurniveau. Die Art des Schuhs stellte keinen signifikanten Risikofaktor für muskuläre Verletzungen dar.

- Es gibt keinen Nachweis, dass die Stollenkonfiguration einen Einfluss auf das Verletzungsrisiko von NKV hat.
- Es gibt keine Studie, die das Verletzungsrisiko in Abhängigkeit von spezifischen Schuhmodellen oder Außensohlenkonfigurationen untersucht.

3.3.4 Einfluss von Dämpfungssystemen in Sportschuhen auf das Verletzungsrisiko im Teamsport

Drei Studien evaluierten die Verletzungsrate bei Sportschuhen mit Dämpfungssystemen auf flächenelastischen Sportböden im Basketball. In einer prospektiven Kohortenstudie untersuchten McKay et al. (2001) Sprunggelenkverletzungen bei Basketballerinnen und Basketballern. Insgesamt wurden 10.393 Spieleinsätze erfasst ($m = 3.421$, $w = 6.972$) und 40 Sprunggelenkverletzungen dokumentiert. Alle Spieleinsätze waren in der Halle und auf Holzboden, der aber nicht weiter spezifiziert wurde. Die Verletzungsrate über alle Teilnehmenden lag bei 3,85 pro 1.000 Trainings- oder Wettkampfeinsätze. Bei 45,9 % der Verletzungen konnten die Spielerinnen und Spieler eine Woche oder länger nicht in das Wettkampfgeschehen zurückkehren. Die Autorinnen und Autoren berichten von einem signifikant höheren Verletzungsrisiko bei Basketballschuhen mit Dämpfungselementen („*air cells*“) verglichen mit Schuhen ohne Dämpfungselement (OR 4,34; 95 % CI = 1,51–12,40).

Demgegenüber zeigt die prospektive Kohortenstudie von Curtis et al. (2008), dass ein Rückfußdämpfungssystem keinen Einfluss auf die Verletzungsrate bei lateralen Sprunggelenkdistorstionen im männlichen und weiblichen College-Basketball der Division I-III hat. Im Englischen wurde der Begriff „*cushioned column shoes*“ verwendet, der ins Deutsche am treffendsten mit Rückfußdämpfungssystem übersetzt werden kann. Dieses Dämpfungselement war federartig aufgebaut und befand sich unter der Ferse des Schuhs. Im Beobachtungszeitraum von einer regulären Saison (Saison ohne Playoffs) dokumentierten die Autorinnen und Autoren 230 Sprunggelenkdistorstionen ($m = 141$, $w = 89$). Die Inzidenzrate betrug 1,33 Verletzungen pro 1.000 Trainings- oder Wettkampf-Expositionen in der Gruppe mit Rückfußdämpfungssystem (95 % CI = 0,62–3,51) und 1,96 Verletzungen pro 1.000 Expositionen in der Gruppe ohne Rückfußdämpfungssystem (95 % CI = 0,51–4,22). Es wurde kein signifikanter Unterschied in der Inzidenz von Sprunggelenkverletzungen zwischen den Gruppen festgestellt (RR = 1,47; 95 % CI = 0,32–6,86).

Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit den Ergebnissen einer Kohortenstudie mit fünfmonatigem Follow-up (Moré-Pacheco et al., 2019). In der Studie wurden 94 jugendliche Sportlerinnen und Sportler der Sportarten Basketball und Volleyball ($m = 66$, $w = 28$; Alter = $15,8 \pm 1,7$ Jahre) untersucht. Es konnten keine signifikanten Assoziationen zwischen dem Tragen von Schuhen mit Dämpfungselementen (engl. *dampers*) und dem Auftreten von Sprunggelenkdistorstionen festgestellt werden (OR 0,34; 95 % CI = 0,09–1,39).

- Es existieren lediglich drei epidemiologische Studien zum Einfluss von Dämpfungssystemen in Sportschuhen auf das Verletzungsrisiko.
 - Die Studien sind allesamt im Basketball durchgeführt worden und untersuchen das Risiko von Sprunggelenkdistorstionen.
 - Eine Studie berichtet ein signifikant höheres Verletzungsrisiko bei Basketballschuhen mit Dämpfungselementen, während zwei Studien kein erhöhtes Verletzungsrisiko feststellen konnten.
- Ein Vergleich der Dämpfungssysteme ist nicht möglich, da in den Originalarbeiten unterschiedliche Terminologien verwendet und die mechanischen Konstruktionen der Dämpfungssysteme nicht spezifiziert werden.

3.4 Diskussion

Ziel der vorliegenden Übersicht war die kritische Auseinandersetzung mit der Evidenz zur verletzungspräventiven Wirksamkeit von Konstruktionsmerkmalen und mechanischen Eigenschaften von Sportschuhen hinsichtlich NKV der unteren Extremitäten im Teamsport. Die vorliegenden Ergebnisse können im Hinblick auf die Anforderungen einer evidenzbasierten Praxis als Basis für eine Bewertung von Sportschuhen und deren Assoziation mit Sportverletzungen dienen. Für eine möglichst valide Bewertung von Konstruktionsmerkmalen von Sportschuhen in Bezug auf das Verletzungsrisiko ist es von besonderer Relevanz, dass die Studien, die als Bewertungsgrundlage herangezogen werden, primär auf klinische Endpunkte im Sinne eindeutig definierbarer

medizinischer Ereignisse ausgerichtet sind. Daher wurden in die vorliegende Übersichtsarbeit ausschließlich Studien eingeschlossen, die als Hauptzielparameter epidemiologische Endpunkte von Sportverletzungen nannten.

3.4.1 Einfluss der Traktion und der Stollenkonfiguration von Sportschuhen auf das Verletzungsrisiko im Teamsport

Die zusammengefassten Befunde verdeutlichen, dass bestimmte Konstruktionsmerkmale von Sportschuhen und die daraus resultierenden mechanischen Eigenschaften das Risiko für Verletzungen der unteren Extremitäten beeinflussen können. Ein zentrales Ergebnis ist die Rolle der Schuh-Sportboden-Interaktion. Hohe Traktion zwischen der Außensohle des Schuhs und dem Untergrund verbessert zwar die sportliche Leistung für den Antritt, Stopps oder schnelle Richtungswechsel (Silva et al., 2017), kann aber in einem Zielkonflikt mit dem Verletzungsrisiko stehen (Wannop et al., 2013). Insbesondere eine gesteigerte rotatorische Traktion ist mit einer erhöhten Inzidenz an NKV assoziiert, da diese Art der Traktion Situationen begünstigen kann, bei denen eine gegebenenfalls zu starke Fixierung des Schuhs am Untergrund zu einem Verblocken des Fußes führt (Wannop et al., 2013). So wurde bereits gezeigt, dass eine erhöhte rotatorische Traktion im Zusammenhang mit einem gesteigerten Verletzungsrisiko für Rupturen des vorderen Kreuzbandes im American Football steht (Lambson et al., 1996). Auch Wannop et al. (2013) schlussfolgern aus ihrer Studie, dass eine Zunahme der rotatorischen Traktion mit einer höheren Verletzungsrate assoziiert ist, während eine Zunahme der translatorischen Traktion zu einem Rückgang der Verletzungsrate führt. Die Autorinnen und Autoren empfehlen auf dieser Grundlage, dass Athletinnen und Athleten Schuhe mit niedriger rotatorischer Traktion wählen sollten. Ebenso unterstützten die Ergebnisse von Lysdal et al. (2021) die Annahme, dass zu viel Friktion das Verletzungsrisiko begünstigt. Die Forschenden kommen zu dem Schluss, dass die gezielte Reduktion der Friktion am lateralen Rand der Außensohle (durch den low-friction patch) die Inzidenzrate von Sprunggelenkdistorsionen

auf flächenelastischen Sportböden signifikant senkt. Durch die reduzierte Friktion könnte damit ein kontrolliertes „Weggleiten“ im Moment des Umknickvorganges das Ausmaß der Verletzung reduzieren (Lysdal et al., 2021)

Die Messung der rotatorischen und translatorischen Traktion in der Studie von Wannop (2013) erfolgte mittels einer selbst entwickelten, tragbaren, robotergestützten Apparatur. Hierbei wurde ein Sportschuh auf einem Leisten fixiert, der in einem Winkel von 20° Plantarflexion unter einer beweglichen Plattform montiert war. Der Vorfuß des Schuhs stand somit in direktem Kontakt mit der Rasen- oder Kunststoffrasenfläche. Eine konstante vertikale Last von 580 N wurde auf den Schuh aufgebracht. Zur Erfassung der rotatorischen Traktion wurde der Schuh mit 90°-s-1 rotiert, wobei ein integrierter Kraftaufnehmer das entstehende Drehmoment maß. Ein Vergleich der experimentellen Traktionsmessung von Wannop et al. (2013) mit standardisierten Prüfverfahren gemäß DIN EN 15301-1 zeigt deutliche methodische Unterschiede: Normwerte für die rotatorische Traktion auf Kunststoffrasenflächen werden in der DIN EN 15330-1 als Drehwiderstand bezeichnet. Der in der DIN EN 15301-1 verwendete Prüffuß besteht nicht wie bei Wannop et al. (2013) aus einem Sportschuh, sondern aus einer Stahlscheibe, auf die eine Prüfsohle mit sechs Fußballstollen montiert wird. Die Fußballstollen sind gleichmäßig mit einem Abstand von 46 mm von der Mitte der Scheibe an der Unterseite des Prüffußes angeordnet. Zudem rotiert der Prüffuß nicht wie bei Wannop et al. (2013) mit 90°-s-1, sondern mit 72°-s-1. Diese Unterschiede zeigen, dass Wannop et al. (2013) einen praxisbezogenen Ansatz zur Bewertung der Schuh-Sportboden-Interaktion wählten, während die DIN EN 15301-1 einen normierten Test zur Beurteilung der Kunststoffrasenfläche darstellt. In der Fachliteratur beschriebene Traktionswerte lassen sich damit nicht mit Normwerten zum Drehwiderstand auf bspw. Kunststoffrasenflächen gemäß DIN EN 15330-1 vergleichen.

Die Relevanz der Abstimmung von Schuhkonstruktion auf die jeweilige Spielfläche wurde von Serensits und McNitt (2014) unterstrichen. Mittels einer mechanischen Testapparatur wurde die rotatorische Traktion von acht unterschiedlichen Stollenschuhen auf einer Rasenfläche (*Kentucky bluegrass*) und drei Kunststoffrasenflächen untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Stollenkonfiguration den größten Einfluss auf die rotatorische Traktion hat, wobei die Unterschiede zwischen den Schuhen fast viermal so groß waren wie die zwischen den Spielflächen. Hierbei gemessene rotatorische Traktionskräfte auf den Kunststoffrasenflächen lagen zwischen 49,3 Nm und 53,1 Nm, während sie auf der Rasenfläche bei 52,3 Nm lagen. Die rotatorische Traktion zwischen den verschiedenen Schuhen variierten deutlich stärker von 43,8 Nm bis 58,6 Nm. Diese Befunde deuten darauf hin, dass die Auswahl des Schuhwerks einen größeren Einfluss auf die rotatorische Traktion und damit potenziell auf das Verletzungsrisiko hat als die Art der Spielfläche. In Feldsportarten wie American Football, Fußball oder Rugby wird die Traktion maßgeblich durch die Konfiguration der Außensohle bestimmt. Das Material, die Form und Anordnung der Stollen scheinen zentrale Faktoren zur Beeinflussung der Traktion und somit des Risikos für NKV.

Dieser theoretisch kausale Zusammenhang zeigt sich jedoch nicht in allen Studien. So zeigen die Ergebnisse von Iacovelli et al. (2013) im American Football, dass die Anzahl von Stollen nicht mit der Verletzungsrate assoziiert ist. Der fehlende Zusammenhang zeigte sich sowohl bei Trainings- als auch Wettkampfverletzungen. O’Kane et al. (2016) fanden hinsichtlich der Verletzungsrate auf Kunststoffrasen zudem keinen Unterschied zwischen Fußballschuhen, die für Kunststoffrasenflächen ausgelegt sind, und klassischen Stollenschuhen, die für Naturrasen ausgelegt sind. In diese Ergebnisse reißen sich auch die Befunde von Iraqui-Rato und Cuesta-Barriuso (2024) ein, die keinen Einfluss der Stollenkonstruktion (Metallstollen vs. Gummistollen vs. Multi-Stollen) auf die Verletzungsinzidenz im Fußball zeigen. Die Ergebnisse deuten folglich darauf hin, dass isolierte Konstruktionsmerkmale, wie hier die Stollenanzahl, das Stollenmaterial oder die Stollenanordnung, nur un-

zureichend das komplexe Zusammenspiel von Schuh und Untergrund bei sportartspezifischen Bewegungsanforderungen abbilden.

Die aufgeführten Studien von Iacovelli et al. (2013) und O’Kane et al. (2016), aber auch von Meyers (2013, 2016, 2019) klassifizieren die Außensohle hinsichtlich allgemeiner Konfigurationsmerkmale wie Anzahl der Stollen, Material der Stollen oder Form der Stollen. Eine differenzierte Analyse von Verletzungsinzidenzen in Abhängigkeit solcher Konstruktionsmerkmale oder spezifischer Schuhmodelle liegt in der aktuellen Literatur bislang jedoch nicht vor. In einem kürzlich veröffentlichten Konferenzbeitrag berichten Pescatore et al. (2024) hingegen, dass sie in einer retrospektiven Studie Stollenmuster und Schuhmodelle von Fußballspielern untersuchten, die in der Saison 2021/2022 der englischen Premier League Verletzungen der unteren Extremitäten erlitten. Aus dem publizierten Konferenzbeitrag können keine Verletzungsinzidenzen für unterschiedliche Fußballschuhe abgeleitet werden. Eine Publikation dieser Ergebnisse würde erstmals die Assoziation von Verletzungsinzidenzen mit spezifischen Fußballschuhmodellen im Profifußball quantifizieren.

3.4.2 Einfluss von Dämpfungssystemen in Sportschuhen auf das Verletzungsrisiko im Teamsport

Hinsichtlich des Einflusses von Dämpfungselementen in Sportschuhen auf die Verletzungsinzidenz der unteren Extremitäten zeigt sich eine heterogene Studienlage. Während McKay et al. (2001) signifikant höhere Verletzungsinzidenzen bei Basketballschuhen mit Dämpfungssystem berichten, zeigen die Untersuchungen von Curtis et al. (2008) und Moré-Pacheco et al. (2019) im Basketball und Volleyball keine signifikanten Unterschiede der Verletzungsinzidenz zwischen Schuhen mit und ohne Dämpfungssystemen. Ein zentrales Problem bei der Interpretation der Studien besteht darin, dass aus diesen Originalarbeiten nicht abgeleitet werden kann, inwiefern sich die Dämpfungssysteme hinsichtlich ihrer Konstruktion oder Wirkprinzipien voneinander unterscheiden. McKay et al. (2001)

sprechen lediglich von „*air cells*“, Curtis et al. (2008) von „*spring-like columns*“ im Bereich des Rückfußes und Moré-Pacheco et al. (2019) von „*dampers*“. Ebenso ist anzumerken, dass McKay et al. (2001) den Schuhpreis als Indikator für die Dämpfungselemente nutzten. In einer univariaten logistischen Regression war das Risiko für Sprunggelenkverletzungen bei teuren Schuhen (> 201 \$) deutlich höher als bei günstigen (< 99 \$) (OR 4,89; 95 % CI 1,70 – 14,15). Da nur die teuren Schuhmodelle über „*air cells*“ verfügen, wurde der Schuhpreis für die multivariate Analyse in Schuhe mit vs. ohne „*air cells*“ in der Ferse umkodiert. Die Forschenden vermuten, dass „*air cells*“ die Rückfußstabilität verringern und so Sprunggelenkverletzungen begünstigen. Curtis et al. (2008) geben zudem zu bedenken, dass der Einsatz anderer externer Unterstützungsmaßnahmen in ihrer Untersuchung nicht reguliert werden konnten. Von den 30.765 Expositionen in der Gruppe mit Rückfußdämpfungssystem wurde das Sprunggelenk bei 22.375 Expositionen (72,7 %) von einer Orthese versorgt oder getaped. In der Gruppe ohne Rückfußdämpfungssystem wurde das Sprunggelenk bei 9.278 der 13.794 Expositionen (67,3 %) von einer Orthese versorgt oder getaped. Da derartige Hilfsmittel einen nachgewiesenen Effekt auf die Verletzungsinzidenz haben, könnte dies den Effekt des Dämpfungssystems des Schuhs überlagern. Darüber hinaus besteht eine der Einschränkungen der vorliegenden Studien darin, dass die spezifische Art, die Form und das Material der Dämpfungssysteme nicht vollständig untersucht wurden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Evidenzlage zum Einfluss von Dämpfungssystemen in Hallenschuhen auf das Risiko von NKV unzureichend ist.

3.5 Praktische Implikationen

NKV der unteren Extremitäten lassen sich durch bestimmte Konstruktionsmerkmale von Sportschuhen teilweise beeinflussen, sodass Sportschuhe einen potenziell wirksamen Bestandteil in der Verletzungsprävention darstellen können. Im Folgenden werden praktische Empfehlungen für die Konstruktion bzw. die mechanischen

Eigenschaften von Sportschuhen im Teamsport formuliert, die auf Basis der im Rahmen dieser Expertise zusammengetragenen Erkenntnisse verletzungspräventiv wirken können.

Sportschuhe, die auf Rasen- und Kunststoffrasenflächen eingesetzt werden, müssen ausreichend translatorische Traktion bieten, um ein schnelles Beschleunigen, Abbremsen und schnelle Richtungswechsel ohne unkontrolliertes Wegrutschen zu ermöglichen. Gleichzeitig darf die rotatorische Traktion nicht zu hoch sein, um ein Verblocken des Schuhs im Boden bei Drehbewegungen zu vermeiden. Demgegenüber nahm die Verletzungsrate mit höherer translatorischer Traktion sogar ab (Wannop et al., 2013), was darauf hindeutet, dass die translatorische Traktion vorteilhaft ist, solange die Rotation des Sportschuhs nicht übermäßig blockiert wird. Praktisch bedeutet das, dass das Außensohlenprofil und Material so gestaltet werden sollten, dass bei Rotationen eine Fixierung des Schuhs am Sportboden verhindert wird. Da die Traktion des Sportschuhs in Sportarten auf Rasen- und Kunststoffrasenflächen primär durch die Form und Anzahl der Stollen determiniert wird, sollten Stollenprofile gewählt werden, die ein Pivotieren des Sportschuhs ermöglichen. So sind beispielsweise Fußballschuhe für Kunststoffrasenflächen meist aus kurzen, konisch geformten und oftmals hohlen Stollen konstruiert, um ein Verblocken in der Kunststoffrasenfläche zu vermeiden und so die Gelenkmomente zu begrenzen. Auf flächenelastischen Sportböden wird die hohe Friktion zwischen Sportschuh und Sportboden in medio-lateraler Richtung als ein Risikofaktor für Verletzungen der unteren Extremitäten und insbesondere Sprunggelenkdistorsionen diskutiert (Dragoo et al., 2012; Frias Bocanegra & Fong, 2022; Pasanen et al., 2008). Ein praktikabler Ansatz, um die medio-laterale Traktion von Sportschuhen auf flächenelastischen Sportböden zu reduzieren, ist es, die laterale Kante der Außensohle mit reibungsmindernden Elementen auszustatten. Ein Beispiel ist der low-friction patch. Das Anbringen dieser speziellen Folie auf der lateralen Außensohle von Hallensportschuhen reduziert sowohl die Verletzungsrate als auch den Schweregrad von Sprunggelenkdistorsionen (Lysdal et al., 2021). Die Untersuchung von

Serensits und McNitt (2014) deutet darauf hin, dass die Auswahl des Schuhwerks einen größeren Einfluss auf die rotatorische Traktion und potenziell auf das Verletzungsrisiko hat als die Art der Spielfläche. Daher ist es für Sportlerinnen und Sportler sowie Trainerinnen und Trainer wichtig, bei der Auswahl von Sportschuhen nicht nur den Untergrund, sondern vor allem den Schuhtyp zu berücksichtigen, um das Risiko von NKV der unteren Extremitäten zu minimieren.

Eine häufige Annahme ist, dass Sportschuhe mit einem höheren Schaft das Sprunggelenk besser stabilisieren und präventiv für Sprunggelenkdistorsionen wirken können. Allerdings gibt es keine empirische Evidenz dafür, dass die Schafthöhe der Sportschuhe einen Einfluss auf die Verletzungsinzidenz hat. Ein hochgeschnittener Sportschuh allein wirkt damit nicht verletzungspräventiv und sollte folglich nicht als geeignete Maßnahme zur mechanischen Stabilisierung betrachtet werden.

Zusammenfassend sollte die Außensohle so konstruiert sein, dass genügend Traktion in Bewegungsrichtung vorhanden ist, aber übermäßiger Widerstand gegenüber Rotationen vermieden wird. Für Trainerinnen und Trainer sowie Spielerinnen und Spieler gilt: Ein Sportschuh mit zu viel rotatorischer Traktion auf dem entsprechenden Sportboden erhöht das Verletzungsrisiko.

3.6 Geschlechtsspezifische Analyse

Von insgesamt acht in die Analyse eingeschlossenen Studien zum Zusammenhang zwischen Sportschuhen und Verletzungsrisiko inkludieren vier Studien sowohl männlich als auch weibliche Teilnehmende (Curtis et al., 2008; Lysdal et al., 2022; McKay et al., 2001; Moré-Pacheco et al., 2019). Drei Studien untersuchen ein rein männliches Kollektiv (Iacovelli et al., 2013; Wannop et al., 2013; Iraqui-Rato et al., 2024). Die Studie von O’Kane et al. (2016) untersucht eine ausschließlich weibliche Stichprobe.

Es muss jedoch konstatiert werden, dass keine der vier Studien, die sowohl männliche als auch weibliche Teilnehmende untersucht haben, die Inzidenzrate differenziert nach Geschlecht ausweist. Folglich gibt es keine Studie, die den Einfluss von Konstruktionsmerkmalen von Sportschuhen in Bezug auf das Verletzungsrisiko der unteren Extremitäten in Mannschaftssportarten zwischen Sportlerinnen und Sportlern vergleicht. Wie bereits in Fragestellung 1 deutlich wurde, sind Frauen in sportwissenschaftlich-epidemiologischen Studien unterrepräsentiert. Dies unterstreicht wiederholt die Notwendigkeit, Männer und Frauen in zukünftigen Studien systematisch zu analysieren, um geschlechtsspezifische Aspekte herausarbeiten zu können.

4 Narrativer Überblick zur Interaktion von Sportböden und Sportschuhen auf verletzungsbezogene biomechanische Parameter von Athletinnen und Athleten

4.1 Einleitung

Konstruktionsmerkmale von Sportschuhen und Sportböden können das Risiko für Verletzungen der unteren Extremitäten in Teamsportarten beeinflussen (vgl. Kapitel 2 und 3). Als maßgeblich werden bestimmte Schuhmerkmale wie beispielsweise Traktion, Stollenkonfiguration, Dämpfung, Schafthöhe und Biegesteifigkeit diskutiert, welche das Zusammenspiel zwischen Athletin bzw. Athlet, Schuh und Untergrund beeinflussen. Diese Interaktion kann sich wiederum auf biomechanisch quantifizierbare Belastungs- und Beanspruchungsparameter der unteren Extremitäten auswirken. Dabei gilt zu berücksichtigen, dass die Anforderungen an Sportschuhe und Untergründe in Abhängigkeit des Anforderungsprofils einer Sportart erheblich variieren können. In Sportarten wie Fußball, Handball und Hockey sind Beschleunigungs- und Abbremsbewegungen, schnelle Richtungswechsel und Drehbewegungen elementar, wodurch Schuhe eine hohe laterale Stabilität und eine auf den jeweiligen Untergrund abgestimmte Traktion gewährleisten sollten (Hennig, 2011). In Hallensportarten wie Handball oder Volleyball sind hingegen rutschfeste, dämpfende Sohlen erforderlich, um auf Hallensportböden ausreichend Haftung und Stoßabsorption zu gewährleisten (Malisoux et al., 2017).

Innerhalb dieses Kapitels werden zentrale Konstruktionsmerkmale und funktionelle Eigenschaften von Schuhwerk und Untergrund hinsichtlich ihrer potenziellen Auswirkungen auf die verletzungsbezogene Biomechanik der unteren Extremitäten beleuchtet. Aufgrund der Komplexität des Themas und der methodisch heterogenen Zugänge zum Thema wird auf einen narrativen Literaturüberblick zurückgegriffen.

Für dieses Kapitel wurde analog zu den vorangegangenen Kapiteln eine strukturierte Recherche relevanter Arbeiten in den Datenbanken PubMed, Web of Science und in der Fachzeitschrift *Footwear Science* durchgeführt. Die identifizierten Studien wurden gesichtet, zentrale Ergebnisse extrahiert und inhaltlich geordnet, um einen Überblick über die verfügbare Evidenz zu erhalten. Die im Folgenden ausgewählten

Konstruktionsmerkmale (z. B. Traktion, Stollenkonfiguration) wurden in Anlehnung an die vorigen Kapitel ausgewählt. Während zuvor eine systematische und teilweise sogar meta-analytische Vorgehensweise möglich war, wird hier ein narrativer Zugang verfolgt. Dieser Ansatz ermöglichte es, den aktuellen Literaturstand zusammenfassend darzustellen sowie zentrale Originalarbeiten detailliert hinsichtlich ihrer jeweiligen methodischen Ansätze, Ergebnisse und Schlussfolgerungen vorzustellen.

4.2 Wirkungen von Traktions-eigenschaften auf verletzungsassoziierte biomechanische Parameter

Die Traktion zwischen dem Sportschuh und dem Sportboden ist ein zentraler Faktor für sportliche Leistung (Thomson et al., 2022) und potenziell relevant für die Entstehung von NKV (Schrier et al., 2014; Stefanyshyn & Wannop, 2016). Traktion beschreibt hierbei den mechanischen Widerstand zwischen Sohle und Untergrund gegen Rutsch- und Drehbewegungen und lässt sich somit in translatorische (lineare) und rotatorische (drehende) Komponenten unterteilen. Im Gegensatz zum rein physikalischen Begriff der Haft- bzw. Gleitreibung umfasst Traktion auch dynamische und sportartspezifische Aspekte der Kraftübertragung, beispielsweise während Beschleunigungs- und Abbremsbewegungen sowie schneller Richtungswechsel (Thomson et al., 2022). Gleichzeitig wird diskutiert, dass Modifikationen der Traktion zwischen Schuh und Untergrund die mechanische Belastung auf Knie- und Sprunggelenke erhöhen können (Wannop et al., 2011). Vor diesem Hintergrund ist Traktion in der Sportschuhforschung vermehrt untersucht und soll im Folgenden anhand ausgewählter Originalarbeiten vorgestellt werden.

Die biomechanische Auswirkung von Traktion im Outdoorbereich wurde in mehreren experimentellen Studien untersucht. Wannop und Stefanyshyn (2016) untersuchten den Einfluss unterschiedlicher Traktionsniveaus von Sportschuhen auf verletzungsassoziierte biomechanische

Parameter bei Richtungswechselbewegungen auf Kunstrasen. Dafür verwendeten die Forschenden drei unterschiedliche Schuhmodelle, die für Rasensportarten konzipiert waren. Ein Kontrollschuh wurde mit zwei Modellen verglichen, die durch ihre Stollenkonfiguration entweder eine besonders hohe translatorische oder eine besonders hohe rotatorische Traktion aufwiesen. Die Traktionseigenschaften wurden mit einem Testgerät auf Kunstrasen bestimmt. Zehn männliche Probanden führten Laufbewegungen mit schnellen Richtungswechseln von 90° und 135° aus und die Gelenkmomente im Knie- und Sprunggelenk wurden ermittelt. Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl die rotatorische als auch die translatorische Traktion die Gelenkmomente in Knie- und Sprunggelenk beeinflussen. Insbesondere die erhöhte rotatorische Traktion ging mit einer Erhöhung der Knieabduktionsmomente und Knierotationsmomente einher (Wannop & Stefanyshyn, 2016), welche besondere Relevanz für die Entstehung von VKB-Rupturen haben (Yu & Garrett, 2007).

Zu beachten ist, dass die Messungen auf Kunststoffrasen durchgeführt wurden und neben dem Schuhwerk auch der Untergrund das Traktionsniveau erheblich beeinflusst (Schrier et al., 2014; Wannop et al., 2017). So legen Befunde von mechanischen Testungen nahe, dass Kunststoffrasen im Vergleich zu Naturrasen aufgrund seiner dichten Struktur und höheren Steifigkeit zu höheren maximalen Drehmomenten und Rotationssteifigkeit in der Schuh-Sportboden-Interaktion führen kann (Lake & Underdown, 2011; Wannop et al., 2012). Rotationssteifigkeit ist hierbei definiert als die Rate, mit der sich das Drehmoment bei Rotation entwickelt (Livesay et al., 2006) und wird mit erhöhten mechanischen Gelenkbelastungen assoziiert (Livesay et al., 2006; Stefanyshyn & Wannop, 2016). Beispielhaft ist die Studie von Livesay et al. (2006). Die Autorinnen und Autoren analysierten die biomechanische Interaktion zwischen unterschiedlichen Schuhmodellen und Spielflächen hinsichtlich Rotationssteifigkeit und Spitzendrehmomenten mit einem eigens entwickelten mechanischen Prüfstand, der eine kontrollierte Rotation unter definierter vertikaler Last ermöglichte. Verglichen wurden zwei Schuharten (Naturrasen- vs.

Kunststoffrasenschuh) auf fünf Oberflächen (Naturrasen und vier verschiedene Kunststoffrasensysteme). Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl das maximale Drehmoment als auch die Rotationssteifigkeit stark von der spezifischen Schuh-Boden-Kombination abhängen. Die höchsten Spitzendrehmomente wurden bei den Kombinationen Naturrasenschuh-Kunststoffrasen und Turfschuh-Kunststoffrasen gemessen, die niedrigsten auf Naturrasen. Besonders hervorzuheben ist, dass die Rotationssteifigkeit noch größere Unterschiede zwischen den Oberflächen offenbarte als das Spitzendrehmoment. So zeigte sich etwa, dass Kunststoffrasensysteme mit Füllstoff in bestimmten Kombinationen zwar ähnliche maximale Drehmomente wie Naturrasen aufwiesen, jedoch teilweise deutlich erhöhte Rotationssteifigkeit erzeugten. Die Forschenden folgerten, dass neben den absoluten Drehmomentspitzen die Rotationssteifigkeit ein zentraler biomechanischer Parameter zur Bewertung des Verletzungsrisikos sein könnte (Livesay et al., 2006). Darüber hinaus unterstreicht die Studie, dass synthetische Böden mitunter höhere mechanische Risiken bergen könnten als Naturrasen, auch wenn dies nicht immer über maximale Drehmomente ersichtlich ist.

Auch in Hallensportarten kann die Traktion zwischen Sportschuh und Sportboden die mit Sportverletzungen assoziierten mechanischen Belastungen beeinflussen. Wannop et al. (2010) testeten 13 Athleten in jeweils zwei verschiedenen Schuhen bei 45° Richtungswechseln auf Tartanboden. Die in die Studie inkludierten Schuhe hatten eine glatte Sohle (niedrigere rotatorische und translatorische Traktion) oder eine strukturierte Sohle (höhere rotatorische und translatorische Traktion). Die Gelenkmomente wurden wie in der vorherigen Kunststoffrasenstudie mittels 3D-Bewegungsanalyse und Kraftmessplatten berechnet. Das Modell mit höherer Traktion führte, insbesondere in der mit akuten Verletzungen assoziierten Frontal- und Transversalebene (Lysdal et al., 2022; Yu & Garrett, 2007), zu signifikant erhöhten externen Rotationsmomenten in Sprung- und Kniegelenk. Gleichzeitig zeigten sich jedoch keine Unterschiede in der Laufgeschwindigkeit oder Standzeit, sodass die gesteigerte Traktion in diesem Fall keine Leistungsverbesserung

bewirkte, aber potenziell das Verletzungsrisiko beeinflussen könnte (Wannop et al., 2010). Dies wirft die Frage auf, inwieweit Schuhhersteller Traktionswerte reduzieren können, um so potenziell das Verletzungsrisiko zu minimieren, ohne dabei die notwendige Basis für schnelle Stopp- und Richtungswechselbewegungen zu beeinträchtigen. Da auch Sportböden maßgeblich die Traktion beeinflussen, verglichen Frias Bocanegra und Fong (2022) einen synthetischen Sportboden mit hoher Reibung mit einem Parkettsportboden mit niedriger Reibung hinsichtlich der Biomechanik der unteren Extremitäten bei 29 Futsalspielern, die Bewegungen mit Richtungswechseln ausführten. Auf dem Sportboden mit hoher Reibung zeigten Spieler größere Plantarflexionswinkel, höhere Inversionswinkelgeschwindigkeiten sowie Innenrotationsmomente am Sprunggelenk als auf dem Parkettboden mit niedriger Reibung. Interessanterweise und entgegen der ursprünglichen Hypothese traten auf dem Boden mit niedriger Reibung höhere Inversionsmomente auf. Dies verdeutlicht die Komplexität der Wechselwirkung zwischen Sportschuh und Sportböden, in welcher jede modifizierte Variable eine Veränderung der resultierenden Bewegungsmechanik zur Folge haben kann.

Wie aus den erläuterten Arbeiten hervorgeht, handelt es sich bei der Schuh-Sportboden-Interaktion um einen hochkomplexen Vorgang mit diversen, sich untereinander beeinflussenden Variablen. Versuche, ein Mindestmaß an Traktion festzustellen, mit dem Ziel, Spielerinnen und Spielern möglichst wenig „überflüssige“ und letztlich das Verletzungsrisiko steigernde rotatorische Traktion durch Schuhwerk zu liefern, sind methodisch und hinsichtlich ökologischer Validität mit großen Hürden verbunden (Barrons et al., 2023; Barrons et al., 2019; Luo & Stefanyshyn, 2011). Selbst innerhalb einer Sportart sind verschiedene Spielpositionen, Sportböden und individuelle Merkmale von Spielerinnen und Spielern zu variabel, um auch klare Traktionsgrenzen festlegen zu können (Barrons et al., 2023; Barrons et al., 2019; Luo & Stefanyshyn, 2011).

Die Interaktion zwischen Sportschuh und Sportboden ist hierbei nicht alleine durch die Schuhkonstruktion determiniert, sondern unterliegt

einer Vielzahl kontextueller Einflüsse. Insbesondere können Unterschiede in den verwendeten Baustoffen (bei Kunststofffrasenflächen, Hallenböden etc.), Struktur (dickes vs. dünnes Gras bei Naturrasen) und Zustand (nass, trocken, abgenutzt, verschmutzt) der Spielfläche die situativ vorhandene Traktion maßgeblich beeinflussen (Hardin et al., 2004; Nunome et al., 2009). Bis dato wenig beachtet in empirischen Studien ist jedoch der Zustand der Sportböden. Abnutzungs- und Wettereinflüsse oder Verschmutzung (z. B. durch Staub oder Harz) können die Eigenschaften des Spielfeldes beeinflussen und so die mechanische Interaktion zwischen Schuh und Sportboden verändern. Wannop et al. (2012) zeigten beispielsweise, dass sich die Traktionseigenschaften von Naturrasen im Verlauf einer Saison stark verändern. Zu Beginn der Saison war die Traktion gleichmäßig über die Spielfläche verteilt und konstant hoch. Gegen Saisonende war sie hingegen um etwa 10 % am Spielfeldrand und bis zu 25 % im mittleren Feldbereich reduziert. Somit ergaben sich deutliche Differenzen der Traktionseigenschaften zwischen stark und weniger stark frequentierten Bereichen (Wannop et al., 2012). Auch Kunststoffrasen wies nach saisonaler Nutzung ähnlich veränderte Traktionseigenschaften auf. Es bildeten sich Stellen mit höherer oder niedrigerer Traktion, verursacht durch die Verschiebung des Füllstoffs. Die Forschenden weisen darauf hin, dass sich die Veränderungen der Traktion auf Naturrasen optisch oftmals identifizieren lassen, wodurch Spielerinnen und Spielern veränderte Untergrundbedingungen antizipieren können. Auf Kunststoffrasen hingegen entstehen keine optischen Veränderungen der Oberfläche, wodurch unvorhersehbare Traktionsänderungen für Spielerinnen und Spielern einen zusätzlichen Risikofaktor bedeuten können (Wannop et al., 2012). Weiterhin anzumerken ist, dass verschiedene Stollenprofile unterschiedlich stark auf die veränderten Bedingungen reagieren. Auf Gras zeigten einzelne Stollenprofile keine relevanten Unterschiede im Hinblick auf die Interaktion mit den abgenutzten Böden, auf Kunststoffrasen zeigten sich jedoch Differenzen. Hierbei führten längliche Stollen zu den konsistentesten Traktionswerten, wohingegen Rundstollen oder flache Stollen stärker auf den veränderten Untergrund reagierten.

Schlussendlich dokumentierten Thomson et al. (2019), dass Wetter- und Platzbedingungen die rotatorische Traktion im Profifußball auf Naturrasen stark beeinflussen. Bei hohen Temperaturen, geringer Luftfeuchtigkeit und trockenerer Oberfläche wurden deutlich höhere rotatorische Traktionswerte gemessen als bei kühleren Temperaturen, höherer Luftfeuchtigkeit und nasserer Oberfläche. Auch hier reagierten unterschiedliche Fußballschuhtypen (runde Stollen, längliche Stollen, Hybridmodelle) mehr oder weniger sensitiv auf die Veränderungen.

- Erhöhte rotatorische Traktionswerte führen zu höheren Knie- und Sprunggelenkmomenten und sind mit einem erhöhten Verletzungsrisiko assoziiert.
- Die Traktion wird nicht allein vom Schuh, sondern oftmals sogar in stärkerem Maße durch den Sportboden (z. B. Baustoff und Bauweise, Zustand, Feuchtigkeit) beeinflusst.
- Die Sportschuh-Sportboden-Interaktion ist komplex und kontextabhängig, weshalb keine universellen „optimalen“ Traktionswerte definiert werden können.

4.3 Einfluss der Stollenkonfiguration auf die Traktion

Ein maßgeblicher Faktor für die Traktion von Rasensportschuhen ist die Wahl der verwendeten Stollen sowie deren Konfiguration auf der Außensohle. Variationen in Form, Anzahl, Länge und Material der Stollen beeinflussen nicht nur die Traktion, sondern auch die Druckverteilung unter der Sohle (Silva et al., 2017; Galbusera et al., 2013; Villwock et al., 2009). Die Kombination dieser Merkmale führt zu einem komplexen Wechselspiel zwischen Schuh und Untergrund mit potenziellen Auswirkungen auf das Verletzungsgeschehen. Studien widmeten sich daher dem Einfluss verschiedener Stollenkonfigurationen auf die Traktion und die Biomechanik der unteren Extremitäten. Ein zentraler Punkt vieler Untersuchungen zum Thema Stollenkonfigurationen ist die Form der Stollen. Auf dem Markt sind vorwiegend längliche, runde oder eckige

Stollen erhältlich, wobei längliche und eckige Stollen oftmals mit einer höheren rotatorischen Traktion assoziiert sind (Nunome et al., 2009). In Bezug auf die sportliche Leistung zeigten sich mit länglichen Stollen, insbesondere bei Bewegungen mit lateralen Abbrems- und Beschleunigungskomponenten, teils geringfügig überlegene Ergebnisse im Vergleich zu runden Stollen (Silva et al., 2017). Hinsichtlich der Entstehung von Verletzungen als problematisch eingeschätzt werden kann jedoch, dass eine erhöhte rotatorische Traktion das kontrollierte Drehen des Schuhs auf dem Untergrund erschwert. Dies kann zu erhöhten Innen- und Außenrotationsmomenten am Kniegelenk führen (Nunome et al., 2009), die besonders bei niedrigen Knieflexionswinkeln mit Verletzungen des VKBs assoziiert sind (Lambson et al., 1996). In weiteren Studien wird von erhöhten Druckbelastungen an der lateralen Fußaußenseite bei Verwendung von länglichen Stollen berichtet, was als potenzieller Risikofaktor für Distorsionen im Sprunggelenk gilt (Silva et al., 2017; Bentley et al., 2011).

Im Gegensatz dazu ermöglichen runde Stollen ein gewisses Maß an kontrollierter Rotation des Schuhs, was potenziell gefährliche rotatorische Belastungsspitzen reduzieren könnte (Villwock et al., 2009; Nunome et al., 2009). An dieser Stelle wichtig zu erwähnen bleibt jedoch, dass es auch andere vergleichende Erhebungen gibt, welche keine Unterschiede zwischen länglichen und Rundstollen fanden, beispielsweise hinsichtlich verletzungsbezogener Parameter am Kniegelenk (Gehring et al., 2007; Kaila, 2007). Generell ist die Datenlage zu der Thematik somit laut Überblicksarbeiten als heterogen zu beschreiben (Silva et al., 2017). Eine klare Empfehlung zur Nutzung bestimmter Stollenformen zur Verletzungsprävention kann daher nicht gegeben werden.

Neben der Stollenform beeinflussen die Anordnung und Anzahl der Stollen die resultierenden Bodenreaktionskräfte und die Traktion, wobei die Studienlage auch in diesem Kontext keine eindeutigen Ergebnisse liefert (Silva et al., 2017).

Ergänzend zu diesen Studien am Menschen wurden einige Erhebungen durchgeführt, welche die Traktionseigenschaften von Schuhen mittels

mechanischer Messapparaturen erfassen. Der Vorteil dieser methodischen Herangehensweise ist, dass auch verletzungskritische Belastungsszenarien untersucht werden können, die aus ethischen Gründen am Menschen nicht untersuchbar sind.

Galbusera et al. (2013) analysierten die rotatorische Traktion von drei Fußballschuhmodellen auf Natur- und Kunststoffrasen. Die Schuhe wurden in eine Messapparatur eingespannt, welche die Messung der rotatorischen Traktion bei Voll- und Vorfußkontakt ermöglichte. Die Ergebnisse zeigten, dass der Untergrund einen stärkeren Einfluss auf die resultierenden Drehmomente hatte als die Stollenkonfiguration selbst. Während auf Naturrasen der Schuh mit den runden Aluminiumstollen bei Vollfußkontakt die höchsten Drehmomente erzeugten, wiesen auf Kunstrasen längliche Stollen die höchsten Werte bei einer Außenrotation auf (Galbusera et al., 2013).

Villwock et al. (2009) verglichen zehn verschiedene, gängige Fußballschuhe (mit runden Stollen über längliche Stollen bis hin zu Gummistollen und Noppen) hinsichtlich ihrer rotatorischen Eigenschaften auf je zwei verschiedenen Kunststoff- und Naturrasentypen. Die Ergebnisse der Studie zeigten, dass sich für Kunststoffrasen ausgelegte Schuhe mit kleinen, elastischen Noppen zwar von Stollenschuhen unterscheiden, letztere aber untereinander keine relevanten Unterschiede hinsichtlich der rotatorischen Traktion aufwiesen. Der hauptsächlich identifizierte Unterschied bestand auch hier in den Untergründen. Die untersuchten Kunststoffrasen zeigten signifikant höhere maximale Drehmomente und rotatorische Steifigkeiten als die beiden Naturrasenvarianten. Innerhalb der Naturrasenflächen zeigten sich auf einer Naturrasenfläche mit speziell für Stabilität und Drainage entwickeltem Boden (90 % Sand, 10 % Feinanteile aus Schluff und Ton) höhere Drehmomente als auf Rasen mit lokal üblichem Boden. Zwischen den beiden Kunststoffrasenflächen bestand kein signifikanter Unterschied.

Neben den Drehmomenten und der Rotationssteifigkeit spielt auch die plantare Druckverteilung innerhalb des Schuhs eine Rolle bei

der mechanischen Belastung des Fußes. Hierzu haben Bentley et al. (2011) die biomechanischen Auswirkungen von länglichen Stollen gegen runde Stollen bei Fußballschuhen auf Kunststoffrasen getestet. Mithilfe eines In-Schuh-Druckmesssystems wurden plantare Druckverteilungen während des Geradeauslaufens und bei Richtungswechseln (60°) analysiert. Die Ergebnisse zeigten, dass Schuhe mit länglichen Stollen eine erhöhte Druckbelastung auf der lateralen Fußhälfte verursachten, während Rundstollenschuhe eine eher zentrierte Druckverteilung zeigten. Die Autorinnen und Autoren schlossen, dass die Druckverteilung mit den Rundstollen „natürlicher“ sei, da sie der Barfußdruckverteilung stärker ähnelt, wohingegen die erhöhte laterale Druckbelastung ein erhöhtes Verletzungsrisiko für Sprunggelenkverletzungen darstellen würde (Bentley et al., 2011).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Traktionseigenschaften von Sportschuhen sowohl bewegungs- als auch belastungsassoziierte Faktoren beeinflussen, welche sowohl für die Leistung als auch das Verletzungsrisiko bedeutsam sind. Hohe rotatorische und translatorische Traktionswerte können zu erhöhten Gelenkmomenten in der Frontal- und Transversalebene führen, welche mit Bandverletzungen an Knie- und Sprunggelenk in Verbindung stehen. Traktion ist hierbei als ein komplexes Konstrukt zu verstehen, welches nicht alleine durch den Schuh determiniert ist, sondern weiterhin durch die Untergrundbeschaffenheit und schlussendlich auch die situative Bewegung der Athletinnen und Athleten beeinflusst wird.

Bei Rasensportarten stehen die Stollenkonfigurationen in Wechselwirkung mit dem jeweiligen Untergrund und können biomechanisch relevante Unterschiede in Traktion, rotatorischer Steifigkeit und Druckverteilung verursachen. Teilweise wirkt sich der Untergrund dabei stärker aus als das Stollendesign selbst. Obwohl die Evidenzlage zu konkreten Risikoprofilen einzelner Stollentypen uneinheitlich bleibt, zeichnet sich in der Praxis aktuell ein Trend ab: Längsstollen werden zunehmend kürzer konstruiert oder mit konischen Elementen kombiniert, um die Rotationsfreiheit zu erhöhen und

potenziell als schädlich vermutete Belastungsspitzen zu reduzieren. Viele neue Modelle setzen verstärkt auf Mischformen oder auf Designs mit insgesamt geringerer Rotationssteifigkeit.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Sportschuhe für eine effektive Verletzungsprävention bei gleichzeitig unbeeinträchtigter Performanz auf die jeweilige Einsatzsituation abgestimmte Traktionseigenschaften aufweisen sollten. Konkrete Empfehlungen lassen sich aus der aktuell sehr heterogenen Literaturlage allerdings nicht ableiten.

- Die Stollenkonfiguration beeinflusst im Zusammenspiel mit dem Untergrund die Traktion, die plantare Druckverteilung und die Gelenkbelastungen.
- Längliche Stollen werden häufig hinsichtlich eines erhöhten Verletzungsrisikos diskutiert, wenngleich die Studienlage heterogen ist.
- Pauschal kann keine eindeutige Empfehlung für einen Stollentyp ausgesprochen werden. Vielmehr sollte die Wahl der Stollen auf die situative Bedingung des Sportbodens abgestimmt sein.

4.4 Einfluss der Dämpfungseigenschaften auf bio-mechanische Belastungen

Die Forschung zu den Dämpfungseigenschaften von Sportschuhen stammt überwiegend aus der Laufschuhforschung, während im Team- und Sportspiel vergleichsweise wenige Untersuchungen vorliegen (Lam et al., 2022). Dabei sind viele Einflussfaktoren schwer zu erfassen, wie beispielsweise die Propriozeption, die oftmals im Kontext Dämpfung diskutiert wird (Lam et al., 2020).

Studienergebnisse zeigen, dass weichere Zwischensohlen vertikale Bodenreaktionskräfte und plantare Druckspitzen reduzieren (Wei et al., 2018), gleichzeitig aber die Bewegungsmechanik

im Sinne eines veränderten Körperschwerpunktes beeinflussen können (Hardin et al., 2004). Härtere Sohlen können dagegen zu erhöhten Stoßbelastungen führen und passive Strukturen sowohl bei Landungen (Wei et al., 2018) als auch beim Laufen auf dem Spielfeld (Lam et al., 2018) stärker beanspruchen. Der von den Spielern wahrgenommene Komfort zwischen weichen und harten Sohlen zeigte, zumindest in einer Studie im Basketball, keine Unterschiede (Wei et al., 2018).

Experimentelle Arbeiten verdeutlichen zudem, dass nicht nur die Schuheigenschaften, sondern auch die Dämpfungseigenschaften des Sportbodens die Belastung und Leistungsparameter beeinflussen (Malisoux et al., 2017). Allerdings ist die Literatur insgesamt heterogen und liefert teils widersprüchliche Ergebnisse: Während weichere Sohlen und Sportböden die Stoßabsorption messbar verbessern, wird spekuliert, dass sie die Gelenkstabilität reduzieren (Malisoux et al., 2017). Von härteren Sohlen und Sportböden hingegen wird vermutet, dass sie die propriozeptive Rückmeldung verbessern, da sie mit messbar höheren Bodenreaktionskräften einhergehen (Malisoux et al., 2017).

Eine einheitliche Empfehlung zum optimalen Dämpfungsgrad existiert daher nicht. Vielmehr hängt der Effekt von individuellen Faktoren wie Körpergewicht, Muskelkraft oder Fußstruktur sowie von sportartspezifischen Anforderungen ab (Malisoux et al., 2017). Entsprechend bleibt die Evidenzlage dünn und heterogen, insbesondere für Sportarten.

- Weiche Dämpfung kann Stoß- und Druckbelastungen reduzieren, verändert aber möglicherweise propriozeptives Feedback, Bewegungsmechanik und Stabilität. Härtere Dämpfung kann höhere Stoßbelastungen verursachen und passive Strukturen stärker beanspruchen.
- Nicht nur die Dämpfungseigenschaften des Schuhs, sondern auch diejenigen des Sportbodens sind zu berücksichtigen.

4.5 Einfluss der Schafthöhe auf biomechanische Belastungen

Die Schafthöhe eines Sportschuhs könnte über zwei Wirkmechanismen vor allem die Stabilisierung des Sprunggelenks unterstützen. Erstens könnte sie die Bewegungen passiv einschränken im Sinne einer mechanischen Stabilisierung (Fu et al., 2014). Zweitens könnten sensorische Effekte durch Kompression oder Hautreizung die propriozeptive Rückmeldung sowie die neuromuskuläre Kontrolle während dynamischer Bewegungen beeinflussen (Bishop et al., 2014; Cordova et al., 2002).

Fu et al. (2014) untersuchten Landebewegungen auf gekippten Plattformen mittels Hochgeschwindigkeitskameras, Markern und Elektromyographie und zeigten, dass hohe Schäfte bei Basketballschuhen keinen Einfluss auf das Bewegungsausmaß des Sprunggelenks, maximale Inversionswinkel oder Inversionsgeschwindigkeit hatten. Gleichzeitig wurde jedoch eine signifikant verzögerte und reduzierte Aktivierung der evertierenden Muskulatur (*M. peroneus longus* und *brevis*, *M. tibialis anterior*) vor Bodenkontakt beobachtet. Dies deutet auf eine mögliche Beeinflussung der neuromuskulären Vorbereitung der Landung hin (Fu et al., 2014).

Ricard et al. (2000) nutzten ein ähnliches Vorgehen, allerdings ohne Elektromyographie-Messungen, und kamen zu gegensätzlichen Ergebnissen. Die hohen Schäfte bei Basketballschuhen reduzierten sowohl die Inversionsamplitude, als auch die maximale Inversionsgeschwindigkeit signifikant.

Da besonders Richtungswechsel ein hohes Verletzungspotential aufweisen, untersuchten Lam et al. (2015) den Einfluss der Schafthöhe bei 45° Richtungsänderungen bei 15 Basketballspielern auf die Biomechanik des Sprunggelenks. Schuhe mit hohem Schaft führten hierbei zu verringerter am Schuh gemessener Außenrotation und Inversion des Sprunggelenks beim initialen Kontakt während Landungen. Die Gelenkmomente, Bodenreaktionskräfte oder

auch leistungsbezogene Parameter wurden nicht beeinflusst. Entsprechend wurden die Ergebnisse als positiv für Schuhe mit hohem Schaft eingeschätzt, auch wenn lediglich am Schuh gemessene Winkel, nicht aber resultierende Gelenkmomente reduziert wurden.

Ein Review von Lai et al. (2020) fasst abschließend 10 Studien (1993–2019) zum Einfluss der Schafthöhe auf Mechanismen von Sprunggelenkverletzungen zusammen und kommt zu dem Schluss: Hochschaftige Schuhe können in statischen Testbedingungen (z.B. bei kontrolliert durchgeführten Gelenkbewegungen oder auf Umknickplattformen) zwar die am Schuh gemessene verletzungsbezogene Kinematik verändern (z.B. Reduktion der Inversionsbewegung). In dynamischen, sportnahen Testbedingungen zeigen sich jedoch inkonsistente und meist keine als protektiv einzuordnenden Effekte. Zudem wurden teils eine verzögerte und abgeschwächte Aktivierung der Evertoren sowie leichte Leistungseinbußen (Agilität, Sprunghöhe) beobachtet. Insgesamt wird die Evidenz für hochschaftige Schuhe zur Veränderung der Sprunggelenkmechanik als Präventionsmaßnahme von den Autorinnen und Autoren als schwach und uneinheitlich beurteilt. Methodisch bleibt abschließend zu erwähnen, dass insbesondere die Untersuchungen von High-Top Schuhen in aller Regel eine wichtige Limitation aufweisen. So analysierten Bishop et al. (2014) mittels eines dynamischen Röntgenverfahrens das Inversionsverhalten bei Richtungswechselbewegungen. Laut der Forschenden wurde die tatsächliche Gelenkbewegung durch die Anbringung externer Marker überschätzt, das heißt die gemessene Schuhinversion lag deutlich über der skelettalen Sprunggelenkinversion. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass Studien mit Markern auf der Schuhoberfläche mit Vorsicht zu bewerten sind, und zukünftige Untersuchungen dieser methodischen Herausforderung begegnen sollten.

Insgesamt scheinen Sportschuhe mit hohem Schaft die verletzungsbezogene Biomechanik nur in begrenztem Maß zu beeinflussen. Zwar können sie bestimmte Gelenkbewegungen wie Inversion oder Außenrotation des Sprunggelenks

unter bestimmten experimentellen Bedingungen begrenzen, jedoch zeigen sich diese Effekte bei funktionell relevanten hochdynamischen Bewegungen nur schwach und inkonsistent.

- › Hohe Schafthöhen können Sprunggelenkbewegungen unter kontrollierten Bedingungen begrenzen, zeigen jedoch in dynamischen, sportnahen Situationen nur geringe und inkonsistente Effekte.
- › In einigen Studien werden verzögerte bzw. reduzierte Muskelaktivierungen sowie leichte Leistungseinbußen berichtet.
- › Die Evidenzlage ist insgesamt gering und uneinheitlich.

4.6 Einfluss der Biegesteifigkeit auf biomechanische Belastungen

Die Biegesteifigkeit des Schuhs ist ein im Hinblick auf sportliche Leistungsfähigkeit und Verletzungsrisiko durchaus diskutiertes, jedoch bislang wenig untersuchtes Schuhmerkmal (Stefanyshyn & Wannop, 2016). Im Folgenden werden einige Originalstudien vorgestellt, die exemplarische Einblicke liefern, wie sich Längs- und Torsionsbiegesteifigkeit eines Sportschuhs auf biomechanische und mit Verletzungen assoziierte Parameter auswirken können.

Wannop et al. (2023) analysierten den Einfluss der Längsbiegesteifigkeit im Vorfußbereich von Stollenschuhen auf den Extensionswinkel des Zehengrundgelenks (*Metatarsophalangealgelenks*) bei American-Football-Spielern, da eine Hyperextension dieses Gelenks als hauptursächlich für die sogenannte „Turf-Toe“-Verletzung gilt (Coker et al., 1978). Drei Stollenschuhmodelle mit unterschiedlichen marktüblichen Biegesteifigkeiten wurden bei einer Richtungswechselbewegung, linearem Sprint sowie vertikalen und horizontalen Sprüngen auf Kunststoffrasen verglichen. Die Ergebnisse zeigten keine

signifikanten Unterschiede im maximalen Extensionswinkel des Zehengrundgelenks zwischen den getesteten Schuhen. Die Forschenden folgern, dass die aktuellen, marktüblichen Längsbiegesteifigkeiten möglicherweise nicht ausreichen, um die Hyperextension und so das Risiko einer „Turf-Toe“-Verletzung bei großgewachsenen American-Football-Spielern mit hohem Körpergewicht effektiv zu reduzieren.

Weitere Studien befassen sich jeweils mit Sportschuhen, die für den Einsatz im Hallensport konzipiert sind. Firminger et al. (2019) untersuchten die Achillessehnenbelastung bei 30 Basketballern beim Counter Movement Jump und verglichen hierbei drei Schuhprototypen mit variierender Mittelsohlensteifigkeit (gering, mittel, hoch) auf drei unterschiedlich steifen Hallenböden. Es zeigte sich, dass die Dehnung der Achillessehne im Modell im Schuh mit der niedrigsten Steifigkeit um 5,3 % geringer war als im steifsten Modell. Gleichzeitig reduzierte der steifste Boden die Sehnendehnung im Vergleich zum nachgiebigsten Boden um 8,1 %. Folglich trat die geringste Dehnung bei der Kombination aus dem am wenigsten steifen Schuh und dem steifsten Boden auf. Die Autorinnen und Autoren folgerten, dass die gezielte Anpassung von Längsbiegesteifigkeit der Mittelsole von Basketballschuhen sowie der Bodensteifigkeit ein praktikabler Ansatz zur Reduktion der Achillessehnenbelastung und zur Prävention entsprechender Pathologien im Sprungsport sein könnte. In einer Folgestudie mit identischem Versuchsdesign analysierten Bruce et al. (2019) weitere Risikoparameter für Verletzungen der unteren Extremität. Auch hier zeigte sich ein Effekt der Schuhsteifigkeit: Das maximale Dorsalflexionsmoment war im weichsten Schuh signifikant geringer und die maximale tibiale Beschleunigung um 8,2 % reduziert. Bezüglich der Bodensteifigkeit ließ sich eine signifikante Reduktion der exzentrischen Sprunggelenkarbeit auf dem steifsten Boden feststellen. Interaktionseffekte zwischen Schuh und Boden traten nicht auf, und die Gesamtbefunde wurden von den Forschenden in ihrer Bedeutung als gering für die Verletzungsprävention eingestuft.

Bagehorn et al. (2024) untersuchten den Einfluss der Längsbiegesteifigkeit von Hallensportschuhen auf die mit Sprunggelenkdorsionen assoziierte Biomechanik des Sprunggelenks und Fußes. 19 Probanden führten dazu Sprungbewegungen mit 45°- sowie 180°-Richtungswechsel durch. Analysiert wurden drei Schuhkonditionen, die sich durch unterschiedliche Karbonplatten in ihrer Biegesteifigkeit unterschieden. Schuhe mit höherer Biegesteifigkeit erhöhten die maximale Inversion des Sprunggelenks bei den 180°-Cuts. Gleichzeitig zeigte sich bei Schuhen mit höherer Biegesteifigkeit, dass die natürliche Torsion des Fußes reduziert wird, was die erhöhte Inversion des Sprunggelenks begründen kann. Da jedoch mit zunehmender Längsbiegesteifigkeit auch die Torsionssteifigkeit der Schuhe zunahm, ist eine differenzierte Betrachtung beider Schuheigenschaften notwendig.

Spezifisch mit dem Einfluss erhöhter Torsionssteifigkeit auf biomechanische Risikofaktoren für Sprunggelenkverletzungen beschäftigte sich die Studie von Graf und Stefanyshyn (2013). Basketballspieler führten Richtungswechselbewegungen mit zwei Basketballschuhen durch, die sich ausschließlich in ihrer durch die Außensohlenkonstruktion bedingte Torsionssteifigkeit unterschieden. Es zeigten sich vergleichbare Ergebnisse zur Studie von Bagehorn et al. (2024): Eine erhöhte Torsionssteifigkeit führte zu einer signifikanten Reduktion der Fußtorsion bei gleichzeitiger Vergrößerung des maximalen Inversionswinkels und hiermit verbundenen Drehmomenten des Sprunggelenks. Am Kniegelenk zeigten sich hingegen keine signifikanten Effekte der Torsionssteifigkeit. Die Ergebnisse legen nahe, dass insbesondere die Einschränkung der natürlichen Fußbewegung durch erhöhte Torsionssteifigkeit potenziell zur Entstehung von Sprunggelenkverletzungen beitragen könnte.

Eine Übersichtsarbeit von Stefanyshyn und Wannop (2016) kommt zu dem Schluss, dass die Vorfußbiegesteifigkeit einen Einfluss auf die Metatarsalbelastung und die Dorsalextension des Zehengrundgelenkes haben kann, die

Evidenzlage hier aber uneindeutig ist. Besonders steife oder besonders weiche Biegesteifigkeit wurde in den meisten Fällen außerdem mit reduzierter Leistung und Komfort assoziiert, wohingegen sich ein zu präferierender Bereich mit mittlerer Steifigkeit abzeichnete. Konkrete Ableitungen oder Empfehlungen zu spezifischen Härtegraden bestehen nicht, da diese stark von individuellen Merkmalen der Spielerinnen und Spielern, den Untergrundbedingungen, der Sportart und weiteren Faktoren abhängen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Biegesteifigkeit von Sportschuhen sowohl Bewegungsabläufe als auch Belastungen im Fuß- und Sprunggelenk beeinflussen kann und damit potenziell leistungs- sowie verletzungsrelevant ist. Eine geringere Längsbiegesteifigkeit kann in manchen Situationen belastungsreduzierend wirken, während eine erhöhte Längs- oder Torsionssteifigkeit möglicherweise die Sprunggelenkinversion verstärkt und so ein potenzielles Risiko für Dorsionen darstellen kann. Die Effekte scheinen allerdings abhängig von Bewegungstyp, Untergrund und Individuum zu sein, sodass eine kontextbezogene Betrachtung unerlässlich ist. Hinsichtlich der Auswirkungen einer modifizierten Längsbiegesteifigkeit auf die Biomechanik des Großzehengrundgelenks liegt bislang eine unklare und uneinheitliche Datenlage vor.

- Die Biegesteifigkeit von Sportschuhen kann Bewegungsabläufe sowie Belastungen am Fuß- und Sprunggelenk beeinflussen.
- Eine geringere Sohlensteifigkeit scheint belastungsreduzierend zu wirken, während eine erhöhte Längs- oder Torsionssteifigkeit teilweise mit größerer Sprunggelenkinversion und potenziell erhöhtem Dorsionsrisiko verbunden ist.
- Die Effekte variieren je nach Bewegung, Untergrund und Individuum.
- Die Evidenz zur Belastung des Großzehengrundgelenks durch Modifikation der Sohlensteifigkeit ist bislang uneinheitlich.

5 Verletzungsgeschehen im professionellen Sport und im Breitensport anhand von Versicherungsdaten

Eine systematische Auswertung von Datenbeständen zu NKV im Teamsport ergänzt die zuvor dargestellte Literaturübersicht. Über die *Verwaltungs-Berufsgenossenschaft (VBG)* stehen hierfür Verletzungsdaten männlicher Spieler aus dem professionellen Sport der 1. und 2. Bundesligen im Fußball, Handball und Basketball in aggregierter Form zur Verfügung. Die VBG dokumentiert mittels systematischer Videoanalyse verletzungsauslösende Ereignisse bei moderaten bis schweren Wettkampfverletzungen, die eine Arbeitsunfähigkeit von sieben Tagen oder länger und/oder Leistungen der VBG von 1.000 Euro oder mehr verursachen. In diesem sogenannten Videokollektiv werden unter anderem der übergeordnete Kontaktmechanismus (Kontaktverletzung, indirekter Kontakt, NKV), der spezifische Verletzungsmechanismus, die Spielsituation sowie das Spieler- und Gegnerverhalten erfasst. Weitere Erläuterungen zum Videokollektiv finden sich im *VBG-Sportreport* (Klein et al., 2024).

Über die *Stiftung Sicherheit im Sport*, die den Sportunfall-Datensatz der ARAG Allgemeine Versicherung AG und der Ruhr-Universität Bochum in ausgewerteter und aggregierter Form bereitstellt, können Verletzungen versicherter Personen (weiblich und männlich) im organisierten Breitensport analysiert werden. Als Datengrundlage dienen Unfallberichte der verunfallten Personen. Diese Berichte enthalten unter anderem Angaben zum Sportboden, auf dem die Sportart ausgeführt wurde (z. B. Rasen, Holz/Parkett, Kunststoffrasen), sowie zur Bodenbeschaffenheit des Untergrundes (z. B. eben/uneben, hart/weich, rutschig/stumpf). Die verletzte Körperregion (z. B. Kniegelenk, Sprunggelenk oder Unterschenkel) sowie die Art der Verletzung (z. B. Ruptur, Distorsion oder Fraktur) werden von den Betroffenen in der Regel auf Grundlage ärztlicher Befunde selbst angegeben. Für diese Expertise wurden die verfügbaren Daten aus dem Zeitraum von 2010 bis 2019 ausgewertet.

Im Rahmen dieser Expertise sollen die Hauptbefunde der Analyse der beiden Datenbestände, vor dem Hintergrund der Fragestellung, welche Rolle die Schuh-Sportboden-Interaktion bei akuten Verletzungen im Teamsport spielen

könnte, in kompakter Form dargestellt werden. Es ist zu beachten, dass bei dieser Betrachtung im Datensatz der VBG sowohl NKV als auch indirekte Kontaktverletzungen eingeschlossen wurden, da hier ebenfalls ein Zusammenhang zur Schuh-Sportboden-Interaktion bestehen kann. Im Datensatz der Stiftung Sicherheit im Sport war diesbezüglich keine Differenzierung möglich, sodass auch Kontaktverletzungen enthalten sind.

Im Datensatz der VBG wird zudem über eine Videoanalyse der primäre Verletzungsauslöser identifiziert. Dabei wird zwischen folgenden Mechanismen unterschieden:

- Umknicken:
Übermäßige Supination, Pronation, Eversion oder Inversion, die meist das Sprunggelenk betrifft.
- Verdrehen:
Rotationsbewegung über den physiologischen Gelenkspielraum hinaus, die oft das Kniegelenk betrifft.
- Verblocken:
Durch zu hohe Traktion zwischen Spieler (in der Regel mit dem Standfuß) und Boden hervorgerufene Stauchung oder Hyperextension eines Gelenks.
- Ausrutschen:
Durch zu geringe Traktion zwischen Spieler (in der Regel mit dem Standfuß) und Boden hervorgerufene Verletzung.

Diese Verletzungsmechanismen können maßgeblich mit der Interaktion zwischen dem Sportschuh und dem Sportboden in Verbindung gebracht werden. Beispielsweise begünstigt ein aufgrund von zu hoher Traktion auf dem Sportboden fixierter Sportschuh ein Umknicken, Verdrehen oder Verblocken. Eine zu geringe Traktion hingegen erhöht das Risiko, dass die Sportlerinnen und Sportler ausrutschen.

Darüber hinaus gibt es zwei weitere Verletzungsmechanismen, bei denen der Einfluss von Schuh und Untergrund auf das Verletzungsgeschehen als weniger bedeutend eingeschätzt wird:

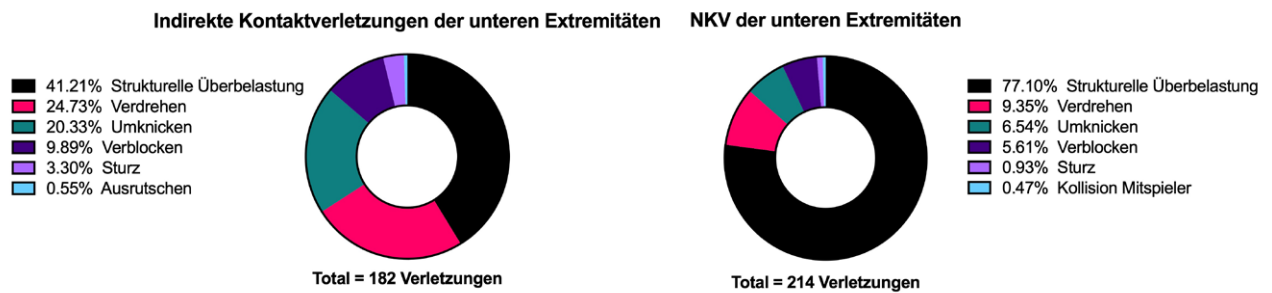


Abb. 12: Anteil der unterschiedlichen Verletzungsmechanismen bei Verletzungen der unteren Extremitäten im Fußball.

- **Strukturelle Überbelastung:**
Verletzungen ohne sichtbare Überbelastung und ohne äußere Einwirkung, die häufig mit Muskel- oder Sehnenläsionen assoziiert sind.
- **Sturz:**
Verletzungen, die sich durch unkontrollierten Bodenkontakt ereignen.

Mit über drei Viertel aller Verletzungen ist die strukturelle Überbelastung (z. B. Muskelfaserriss) der häufigste Verletzungsmechanismus bei NKV im Profifußball.

5.1.1.1 Verletzungsmechanismen bei indirekten Kontaktverletzungen im Fußball

Am Kniegelenk wurden $n = 46$ indirekte Kontaktverletzungen dokumentiert. Mit 83 % ($n = 38$) stellt das Verdrehen hierbei den häufigsten Verletzungsmechanismus dar. Diese Verletzung tritt überwiegend in defensiven Spielsituationen gegen den Ball (27/38) auf, häufig bei Ausfallschritten (10/38) während eines eigenen Tacklings (9/38) oder beim Klären/Wegspitzeln des Balls (5/38), fast immer im Zweikampf mit einem Gegenspieler (35/38) und ohne Regelverstoß (30/38). Die verbleibenden 17 % ($n = 8$) der indirekten Kontaktverletzungen des Kniegelenks sind auf ein Verblocken zurückzuführen.

Am Sprunggelenk wurden $n = 42$ indirekte Kontaktverletzungen dokumentiert. Mit 79 % ($n = 33$) ist das Umknicken der häufigste mit einer Schuh-Sportboden-Interaktion assoziierte Verletzungsmechanismus am Sprunggelenk. Sprunggelenkdistorsionen treten sowohl in offensiven (17/33) als auch in defensiven (14/33) Spielaktionen auf, häufig beim Laufen oder in Sprints (13/33), fast immer in Zweikampfsituationen (30/33) und in den meisten Fällen ohne Regelverstoß (22/33). 12 % ($n = 5$) der Verletzungen sind auf ein Verblocken und 9 % ($n = 4$ Verletzungen) auf ein Verdrehen zurückzuführen.

5.1 Fußball

5.1.1 Analyse von Verletzungen im professionellen Sport

Das Videokollektiv der VBG umfasst insgesamt 1.006 Verletzungen im Profifußball (1. und 2. Bundesliga). Davon wurden 522 Fälle (51,7 %) als Kontaktverletzungen, 256 Fälle (25,4 %) als indirekte Kontaktverletzungen und 228 Fälle (22,6 %) als NKV klassifiziert.

Von den 256 indirekten Kontaktverletzungen traten 183 Verletzungen (71 %) an den unteren Extremitäten auf. Bei den 228 NKV sind in 218 Fällen (91 %) die unteren Extremitäten betroffen.

Abbildung 12 zeigt den relativen Anteil der Verletzungsmechanismen an den Verletzungen der unteren Extremitäten. Bei den indirekten Kontaktverletzungen machten Mechanismen, die mit einer Schuh-Sportboden-Interaktion in Verbindung gebracht werden können (Verdrehen, Verblocken, Umknicken) über die Hälfte aller Verletzungen aus. Bei den NKV beläuft sich dieser Anteil auf nur 20 % aller Verletzungen.

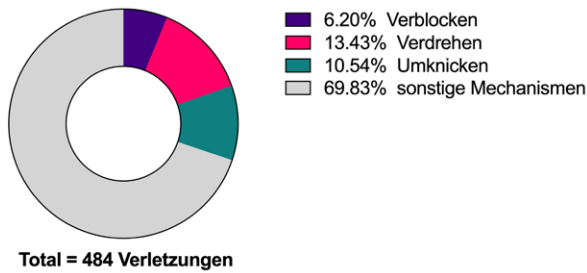


Abb. 13: Anteil der mit einer Schuh-Sportboden-Interaktion assoziierten Verletzungsmechanismen an allen NKV und indirekten Kontaktverletzungen im Fußball.

5.1.1.2 Verletzungsmechanismen bei NKV im Fußball

Am Kniegelenk wurden $n = 46$ NKV dokumentiert. Ähnlich wie bei indirekten Kontaktverletzungen ist auch bei NKV des Kniegelenks das Verdrehen mit einem Anteil von 75 % ($n = 18$) der häufigste Verletzungsmechanismus. Diese Kniegelenkverletzungen treten überwiegend in offensiven Spielsituationen mit Ballbesitz (14/18) auf, recht häufig bei Richtungswechseln (5/18) und überwiegend ohne Fremdeinwirkung (13/18). 21 % ($n = 5$) der NKV des Kniegelenks sind auf ein Verblocken und 4 % ($n = 1$) auf ein Umknicken zurückzuführen.

Bei Sprunggelenkverletzungen zeigt sich ein ähnliches Bild. Von den insgesamt 16 dokumentierten NKV am Sprunggelenk handelt es sich in 81 % der Fälle ($n = 13$) um eine Sprunggelenkdorsion, die überwiegend in offensiven Spielsituationen mit Ballbesitz (9/13) und beim

Laufen oder Sprinten (6/13) auftritt. Die Verletzungen ereignen sich sowohl in Zweikampfsituationen (6/13) als auch ohne Fremdeinwirkung (7/13). 13 % der NKV des Sprunggelenks ($n = 2$) sind auf ein Verblocken und 6 % ($n = 1$) auf ein Umknicken zurückzuführen.

Die Gesamtbetrachtung aller 484 NKV und indirekten Kontaktverletzungen im Fußball ergibt, dass bei 30 % der Fälle ($n = 146$) die Schuh-Sportboden-Interaktion einen relevanten Einflussfaktor im Verletzungsmechanismus darstellen kann (Abbildung 13).

5.1.2 Analyse der Verletzungen im Breitensport anhand der Daten der Stiftung Sicherheit im Sport

Die Vereinssportunfalldatenbank der Stiftung Sicherheit im Sport zum Verletzungsgeschehen umfasst für den Zeitraum von 2010 bis 2019 insgesamt 6.267 Verletzungen der unteren Extremitäten im Fußball. Insgesamt 3.993 der Verletzungen der unteren Extremitäten wurden von der Stiftung Sicherheit im Sport einer von vier Verletzungskategorien zugeordnet und für diese Expertise analysiert:

- Kniegelenk (Ruptur) ($n = 2.363$ Verletzungen)
- Unterschenkel (Fraktur) ($n = 433$ Verletzungen)
- Sprunggelenk (Fraktur) ($n = 482$ Verletzungen)
- Sprunggelenk (Ruptur) ($n = 715$ Verletzungen)

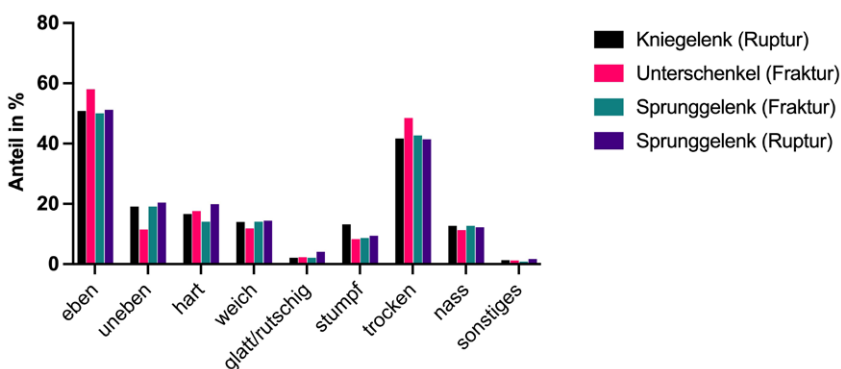


Abb. 14: Anteil der Verletzungen je Kategorie, differenziert nach den von den Verunfallten angegebenen Bodenmerkmalen.

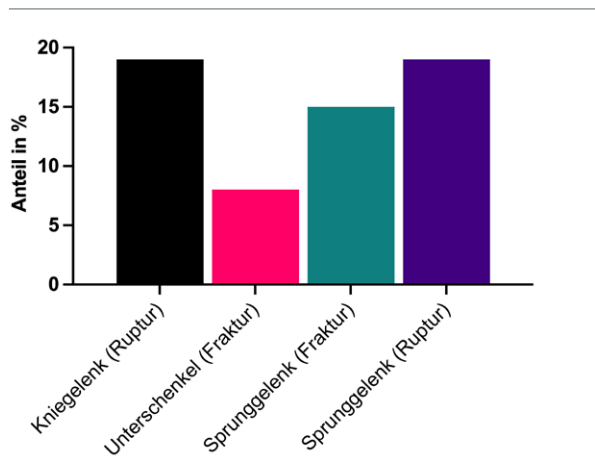


Abb. 15: Anteil an Verletzungen, bei denen die Bodenbeschaffenheit als mitursächlich für die Verletzung wahrgenommen wurde.

Die Verunfallten konnten in einem Mehrfachantwortschema verschiedene Merkmale des Sportbodens auswählen (z.B. „eben“, „glatt/rutschig“, „trocken“).

5.1.2.1 Verteilung der Bodenmerkmale bei allen Verletzungen

Es zeigt sich beispielsweise, dass 50–60 % aller Verletzungen auf ebenem Boden auftreten. Zudem wurde der Boden bei 40–50 % der Verletzungen als trocken angegeben (Abbildung 14).

Zudem gaben die Verunfallten an, ob sie die Bodenbeschaffenheit als mitursächlich für ihre Verletzung wahrgenommen haben. Unter diesem Gesichtspunkt wurde eine Subgruppenanalyse der Daten durchgeführt.

Bei Bandrupturen im Knie- sowie im Sprunggelenk gaben jeweils 19 % der Betroffenen an, dass ihrer Einschätzung nach die Bodenbeschaffenheit einen Einfluss auf die Entstehung der Verletzung hatte. Bei Frakturen des Unterschenkels und des Sprunggelenks lag dieser Anteil bei nur 8 % bzw. 15 % (Abbildung 15).

Anschließend wurde bei diesen Verletzungen untersucht, welche spezifische Bodenbeschaffenheit von den Betroffenen als verletzungsursächlich eingeschätzt wurde (Abbildung 16). Hierbei zeigt sich beispielsweise, dass etwa 60 % aller Rupturen im Kniegelenk, bei denen der Boden als Einflussfaktor genannt wurde, auf unebenem Untergrund auftraten.

Abschließend sind in Abbildung 17 die Verletzungen dargestellt, bei denen eine bestimmte Bodenbeschaffenheit subjektiv als verletzungsursächlich bewertet wurde, relativ zur Gesamtzahl aller Verletzungen. Demnach wurde beispielsweise bei 5 % aller 2.363 Rupturen im Kniegelenk ein nasser Boden als mitursächlich für die Verletzung genannt. Bei 12 % aller 715 Rupturen im Sprunggelenk wurde einem unebenen Boden ein subjektiver Einfluss auf das Verletzungsgeschehen zugeschrieben.

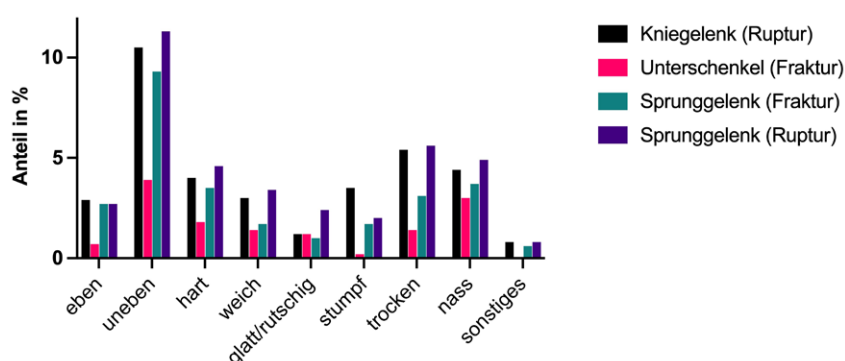


Abb. 16: Anteil der Verletzungen je Verletzungskategorie, bei denen die Verunfallten der Bodenbeschaffenheit einen subjektiven Einfluss auf die Entstehung der Verletzung zuschrieben.

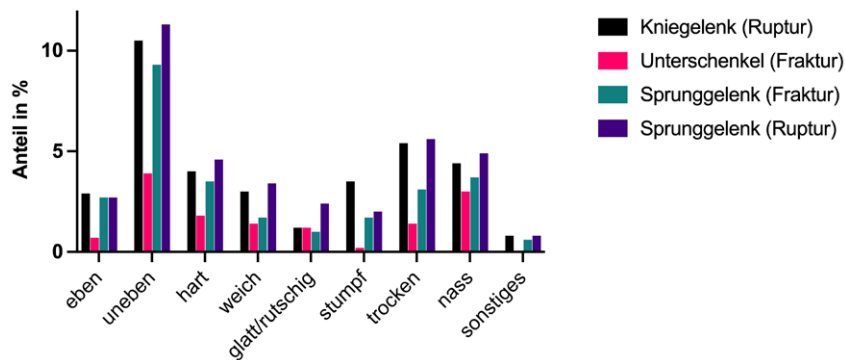


Abb. 17: Anteil der Verletzungen, bei denen die Bodenbeschaffenheit subjektiv als einflussnehmend bewertet wurde, relativ zur Gesamtzahl der Verletzungen in der jeweiligen Kategorie.

- Verletzungsmechanismen, die mit Schuh-Sportboden-Interaktionen assoziiert sind, verursachen im Profifußball ca. 55 % der indirekten Kontaktverletzungen und ca. 20 % der NKV. Bei NKV der unteren Extremität ist die strukturelle Überbelastung der häufigste Mechanismus (> 75 %).
- Insgesamt sind im Profifußball ca. 30 % aller NKV und indirekten Kontaktverletzungen der unteren Extremitäten auf Schuh-Sportboden-assoziierte Verletzungsmechanismen zurückzuführen.
- Im Fußball-Breitensport wird ein unebener Boden bei ca. 10 %, ein nasser Boden bei ca. 5 % und ein glatter bzw. rutschiger Boden bei ca. 2 % aller Verletzungen der unteren Extremitäten subjektiv als mitursächlich eingeschätzt.

5.2 Basketball

5.2.1 Analyse von Verletzungen im professionellen Sport

Das Videokollektiv der VBG umfasst insgesamt 356 Verletzungen im professionellen Basketball (1. und 2. Bundesliga). Davon wurden 199 Fälle (55,9 %) als Kontaktverletzungen, 95 Fälle (26,7 %) als indirekte Kontaktverletzungen und 56 Fälle (15,7 %) als NKV klassifiziert.

Von den 95 indirekten Kontaktverletzungen traten 61 Verletzungen (64 %) an den unteren Extremitäten auf. Bei den 56 NKV sind in 50 Fällen (89 %) die unteren Extremitäten betroffen.

Abbildung 18 zeigt den relativen Anteil der Verletzungsmechanismen an den Verletzungen der unteren Extremitäten. Bei den indirekten Kontaktverletzungen machten Mechanismen, die mit einer Schuh-Sportboden-Interaktion in

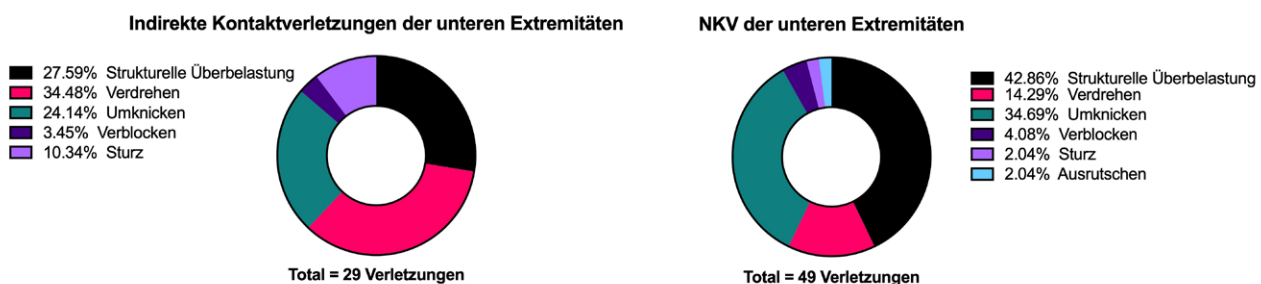


Abb. 18: Anteil der unterschiedlichen Verletzungsmechanismen bei Verletzungen der unteren Extremitäten im Basketball.

Verbindung gebracht werden können (Verdrehen, Verblocken, Umknicken, Ausrutschen) über 60 % aller Verletzungen aus. Bei den NKV beläuft sich dieser Anteil auf ca. 55 % aller Verletzungen. Mit über 40 % aller Verletzungen ist die strukturelle Überbelastung (z. B. Muskelfaserriss) der häufigste Verletzungsmechanismus bei NKV im professionellen Basketball.

5.2.1.1 Verletzungsmechanismen bei indirekten Kontaktverletzungen der unteren Extremitäten im Basketball

Bei indirekten Kontaktverletzungen des Kniegelenks sind alle Fälle ($n=8$) auf ein Verdrehen des Kniegelenks zurückzuführen. Diese Verletzung tritt überwiegend während Offensivsituationen (5/8) bei Ballbesitz des verletzten Spielers (3/8) oder des direkten Gegenspielers (3/8) auf. Die Verletzung ereignet sich oftmals während der Landung (3/8) oder in 1-gegen-1-Zweikämpfen (4/8), immer mit Gegnerbeteiligung (8/8), aber häufig ohne Regelverstoß (6/8).

Bei indirekten Kontaktverletzungen des Sprunggelenks sind sechs von sieben Fälle auf ein Umknicken des Sprunggelenks zurückzuführen. Sprunggelenkdistorsionen treten primär während Offensivsituationen (4/6) bei Ballbesitz des verletzten Spielers (4/6) und entweder während der Landung (4/6) oder nach Würfeln (3/6) auf. Fast immer ist ein Gegenspieler beteiligt (5/6), wobei in der Hälfte der Fälle kein Regelverstoß vorliegt (3/6).

5.2.1.2 Verletzungsmechanismen bei NKV im Basketball

Bei NKV des Kniegelenks sind sechs von sieben Fälle auf ein Verdrehen des Kniegelenks zurückzuführen. Diese Verletzung tritt überwiegend während Set-Offense (2/6) oder Half-Court Offense (2/6) und bei Ballbesitz des verletzten Spielers auf (3/6). Die Verletzung ereignet sich entweder während eines Richtungswechsels (2/6), beim Abstoppen (2/6) oder im Dribbling (2/6). Eine Gegnerbeteiligung lag bei keiner der Verletzungen vor (6/6).

Bei NKV des Sprunggelenks sind alle Fälle ($n=14$) auf ein Umknicken des Sprunggelenks zurückzuführen. Sprunggelenkdistorsionen treten primär während Set-Offense (6/14) oder Half-Court Offense (5/14) bei Ballbesitz des verletzten Spielers (6/14), während eines Richtungswechsels (4/14) und häufig ohne Gegnerbeteiligung (9/14) auf.

Die Gesamtbetrachtung aller 157 NKV und indirekten Kontaktverletzungen im Basketball ergibt, dass bei 28 % der Fälle ($n=44$) die Schuh-Sportboden-Interaktion einen relevanten Einflussfaktor im Verletzungsmechanismus darstellen kann (Abbildung 19).

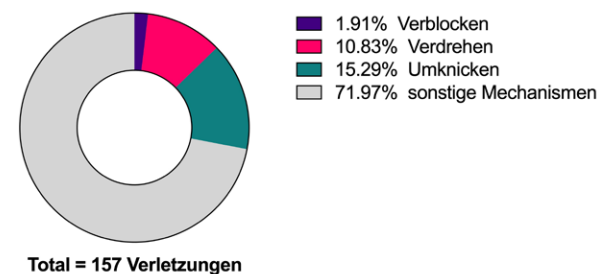


Abb. 19: Anteil der mit einer Schuh-Sportboden-Interaktion assoziierten Verletzungsmechanismen an allen NKV und indirekten Kontaktverletzungen im Basketball.

5.2.2 Analyse der Verletzungen im Breitensport

Die Vereinssportunfalldatenbank der Stiftung Sicherheit im Sport zum Verletzungsgeschehen umfasst für den Zeitraum von 2010 bis 2019 insgesamt 245 Verletzungen der unteren Extremitäten im Basketball. Für jede gemeldete Verletzung wurden die verletzte Körperregion und die Verletzungsart erfasst. Insgesamt 187 der Verletzungen der unteren Extremitäten wurden von der Stiftung Sicherheit im Sport einer von fünf Verletzungskategorien zugeordnet und für diese Expertise analysiert:

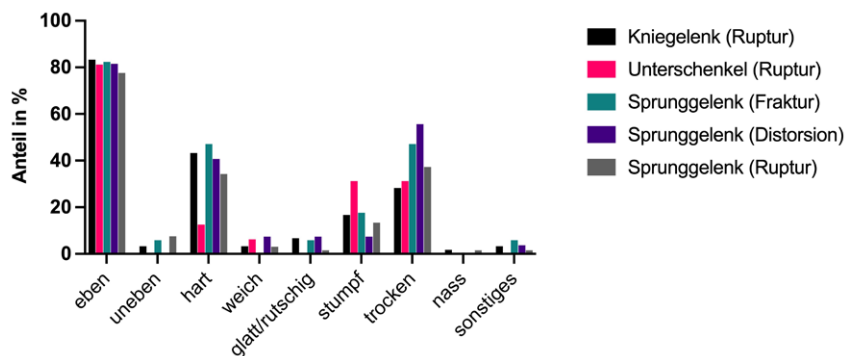


Abb. 20: Anteil der Verletzungen je Kategorie, differenziert nach den von den Verunfallten angegebenen Bodenmerkmalen.

- Kniegelenk (Ruptur) ($n = 60$ Verletzungen)
- Unterschenkel (Ruptur) ($n = 16$ Verletzungen)
- Sprunggelenk (Fraktur) ($n = 17$ Verletzungen)
- Sprunggelenk (Distorsion) ($n = 27$ Verletzungen)
- Sprunggelenk (Ruptur) ($n = 67$ Verletzungen)

5.2.2.1 Verteilung der Bodenmerkmale bei allen Verletzungen

Etwa 80 % aller in den fünf Kategorien erfassten Verletzungen traten auf ebenem Sportboden auf (Abbildung 20).

Zudem gaben die Verunfallten an, ob sie die Sportbodenbeschaffenheit als mitursächlich für ihre Verletzung wahrgenommen haben. Bemerkenswert an den Daten der Stiftung Sicherheit im Sport zum Verletzungsgeschehen im Basketball ist, dass lediglich in sieben Fällen die Bodenbeschaffenheit von den Betroffenen als mitursächlich benannt wurde. In Relation zur Gesamtzahl an Verletzungen ergibt sich somit, dass bei 3,7 % der Verletzungen im Basketball die Bodenbeschaffenheit subjektiv als einflussnehmend bewertet wurde.

Eine differenziertere Analyse zum subjektiven Einfluss der unterschiedlichen Sportbodenmerkmale auf das Verletzungsgeschehen ist aufgrund der geringen Fallzahl von Verletzungen, bei denen die Bodenbeschaffenheit von den Verunfallten als mitursächlich genannt wurde, nicht möglich.

➤ Verletzungsmechanismen, die mit Schuh-Sportboden-Interaktionen assoziiert sind, verursachen im professionellen Basketball ca. 60 % der indirekten Kontaktverletzungen und ca. 55 % der NKV. Bei NKV der unteren Extremität ist die strukturelle Überbelastung der häufigste Mechanismus (ca. 40 %).

➤ Insgesamt sind im professionellen Basketball ca. 25 % aller NKV und indirekten Kontaktverletzungen der unteren Extremitäten auf Schuh-Sportboden-assoziierte Verletzungsmechanismen zurückzuführen.

➤ Im Breitensport wurden lediglich sieben Fälle gemeldet, bei denen die Bodenbeschaffenheit explizit als einflussnehmender Faktor genannt wurde. Eine differenzierte Auswertung ist daher nicht möglich.

5.3 Handball

5.3.1 Analyse von Verletzungen im professionellen Sport

Das Videokollektiv der VBG umfasst insgesamt 743 Verletzungen im professionellen Handball (1. und 2. Handball-Bundesliga). Davon wurden 355 Fälle (47,7 %) als Kontaktverletzungen, 202 Fälle (27,1 %) als indirekte Kontaktverletzungen und 183 Fälle (24,6 %) als NKV klassifiziert.

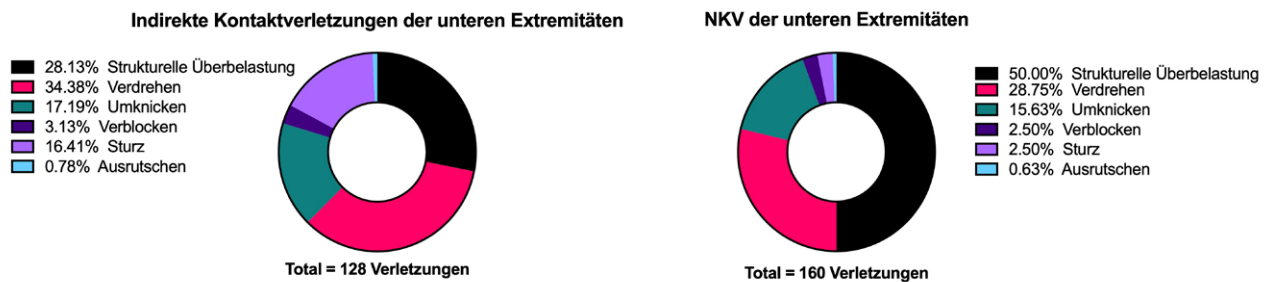


Abb. 21: Anteil der Verletzungsmechanismen bei Verletzungen der unteren Extremitäten im Handball.

Von den 202 indirekten Kontaktverletzungen traten 133 Verletzungen (65,8 %) an den unteren Extremitäten auf. Bei den 183 NKV sind in 160 Fällen (87,4 %) die unteren Extremitäten betroffen.

Abbildung 21 zeigt den relativen Anteil der Verletzungsmechanismen an den Verletzungen der unteren Extremitäten. Bei den indirekten Kontaktverletzungen machten Mechanismen, die mit einer Schuh-Sportboden-Interaktion in Verbindung gebracht werden können (Verdrehen, Verblocken, Umknicken) über 50 % aller Verletzungen aus. Bei den NKV beläuft sich dieser Anteil auf ca. 45 % aller Verletzungen. Mit 50 % aller Verletzungen ist die strukturelle Überbelastung (z. B. Muskelfaserriss) der häufigste Verletzungsmechanismus bei NKV im professionellen Handball.

5.3.1.1 Verletzungsmechanismen bei indirekten Kontaktverletzungen im Handball

Bei indirekten Kontaktverletzungen des Kniegelenks sind 39 von 40 Fällen auf ein Verdrehen des Kniegelenks zurückzuführen. Diese Verletzung tritt überwiegend im Positionsangriff (27/39) bei Ballbesitz des verletzten Spielers (28/39) auf. In der Hälfte der Fälle verletzt sich der Spieler nach einer Landung (19/39) oder in 1-gegen-1-Zweikämpfen (18/39). In fast allen Fällen ist ein Gegenspieler beteiligt (38/39), ein Regelverstoß liegt aber häufig nicht vor (24/39).

Mit 95 % ist das Umknicken der häufigste Verletzungsmechanismus bei indirekten Kontaktverletzungen des Sprunggelenks ($n = 18$ Verletzungen). Diese Verletzung tritt überwiegend im Positionsangriff (15/18) bei Ballbesitz des verletzten Spielers auf (16/18). Die Verletzung

ereignet sich oftmals während der Landung (8/18) nach Sprungwürfen (7/18). In jedem der dokumentierten Fälle gab es eine Gegnerbeteiligung (18/18), wobei dieser oftmals ein Foulspiel beging (11/18).

5.3.1.2 Verletzungsmechanismen bei NKV im Handball

Auffallend an den NKV im Handball ist, dass alle NKV des Kniegelenks auf ein Verdrehen dieses Gelenks zurückzuführen sind ($n = 45$). Alle Verletzungen des Sprunggelenks sind mit einem Umknicken des Gelenks assoziiert ($n = 23$).

Die NKV des Kniegelenks durch Verdrehen treten überwiegend im Positionsangriff (25/45) und fast immer bei Ballbesitz des verletzten Spielers (34/45) auf. Der verletzte Spieler vollzieht oft einen Richtungswechsel (22/45) oder eine Landung (18/45). In den meisten Fällen ereignet sich die Verletzung ohne Gegnerbeteiligung (36/45) und Foulspiel (44/45).

NKV des Sprunggelenks durch Umknicken treten vorrangig im Positionsangriff (13/23) bei Ballbesitz des verletzten Spielers (14/23) und während eines Richtungswechsels (14/23) auf. Auch hier liegt zumeist keine Gegnerbeteiligung vor (18/23). Ein Foulspiel ist nie mit der Verletzung verbunden (23/23).

Die Gesamtbetrachtung aller 385 NKV und indirekten Kontaktverletzungen im Handball ergibt, dass bei 35 % der Fälle ($n = 136$) die Schuh-Sportboden-Interaktion einen relevanten Einflussfaktor im Verletzungsmechanismus darstellen kann (Abbildung 22).

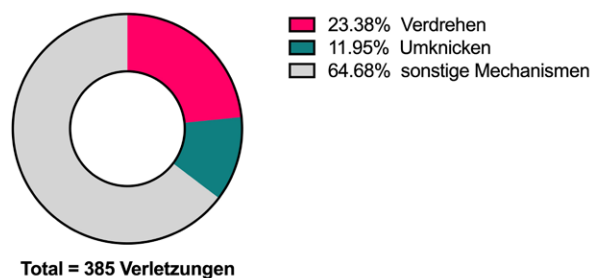


Abb. 22: Anteil der mit einer Schuh-Sportboden-Interaktion assoziierten Verletzungsmechanismen an allen NKV und indirekten Kontaktverletzungen im Handball.

5.3.2 Analyse der Verletzungen im Breitensport anhand der Daten der Stiftung Sicherheit im Sport

Die Vereinssportunfalldatenbank der Stiftung Sicherheit im Sport zum Verletzungsgeschehen umfasst für den Zeitraum von 2010 bis 2019 insgesamt 1149 Verletzungen der unteren Extremitäten im Handball. Für jede gemeldete Verletzung wurden die verletzte Körperregion und die Verletzungsart erfasst. Insgesamt 833 der Verletzungen der unteren Extremitäten wurden von der Stiftung Sicherheit im Sport einer von vier Verletzungskategorien zugeordnet und für diese Expertise analysiert:

- Kniegelenk (Ruptur) ($n = 493$ Verletzungen)
- Unterschenkel (Ruptur) ($n = 77$ Verletzungen)
- Sprunggelenk (Distorsion) ($n = 93$ Verletzungen)
- Sprunggelenk (Ruptur) ($n = 170$ Verletzungen)

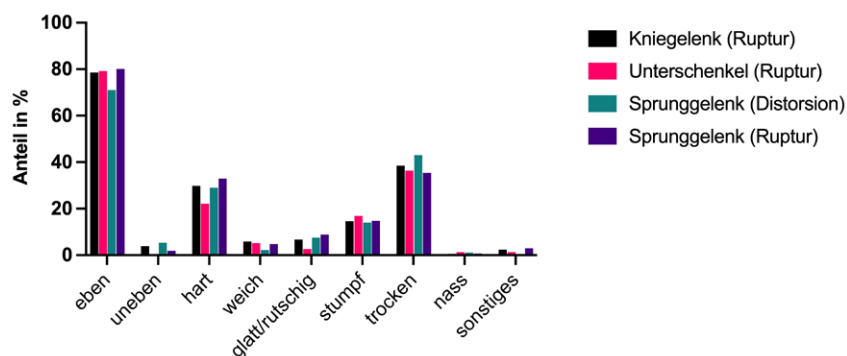


Abb. 23: Anteil der Verletzungen je Kategorie, differenziert nach den von den Verunfallten angegebenen Bodenmerkmalen.

5.3.2.1 Verteilung der Bodenmerkmale bei allen Verletzungen

Es zeigt sich beispielsweise, dass in allen vier Verletzungskategorien 70 – 80 % aller Verletzungen auf ebenem Boden auftreten (Abbildung 23).

Zudem gaben die Verunfallten an, ob sie die Bodenbeschaffenheit als mitursächlich für ihre Verletzung wahrgenommen haben. Unter diesem Gesichtspunkt wurde eine Subgruppenanalyse der Daten durchgeführt.

Bei Sprunggelenkdistorsionen gaben 10 % der Betroffenen an, dass ihrer Einschätzung nach die Bodenbeschaffenheit einen Einfluss auf die Entstehung der Verletzung hatte (Abbildung 24).

Anschließend wurde bei diesen Verletzungen untersucht, welche spezifische Bodenbeschaffenheit von den Betroffenen als verletzungsursächlich eingeschätzt wurde (Abbildung 25). Hierbei zeigt sich beispielsweise, dass etwa 50 % aller Verletzungen des Sprunggelenks, bei denen der Boden als Einflussfaktor genannt wurde, auf einem glatten/rutschigen Untergrund auftraten.

Abschließend sind in Abbildung 26 die Verletzungen dargestellt, bei denen eine bestimmte Bodenbeschaffenheit subjektiv als einflussnehmend auf das Verletzungsgeschehen bewertet wurde, relativ zur Gesamtzahl aller Verletzungen. Demnach wurde beispielsweise bei 5 % aller 93 Kniegelenkrupturen eine glatte/rutschige Oberfläche als mitursächlich für die Verletzung genannt.

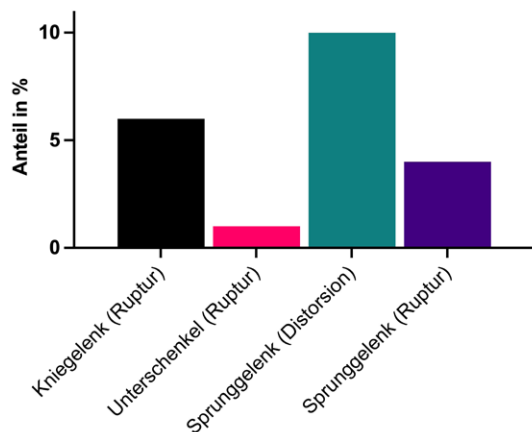


Abb. 24: Anteil an Verletzungen, bei denen die Bodenbeschaffenheit als mitursächlich für die Verletzung wahrgenommen wurde.

- › Verletzungsmechanismen, die mit Schuh-Sportboden-Interaktionen assoziiert sind, verursachen im professionellen Handball ca. 55 % der indirekten Kontaktverletzungen und ca. 45 % der NKV. Bei NKV der unteren Extremität ist die strukturelle Überbelastung der häufigste Mechanismus (50%).
- › Insgesamt sind im professionellen Handball ca. 35 % aller NKV und indirekten Kontaktverletzungen der unteren Extremitäten auf Schuh-Sportboden-assoziierte Verletzungsmechanismen zurückzuführen.
- › Bei Sprunggelenkdistorsionen im Breiten-sport wird in ca. 10 % der Fälle ein Einfluss der Bodenbeschaffenheit berichtet. In ca. 50 % dieser Fälle wird der Boden als glatt/rutschig beschrieben. Bezogen auf alle Handball-verletzungen im Breiten-sport wird eine glatte/rutschige Oberfläche aber nur in ca. 3 % der Fälle subjektiv als einflussnehmend bewertet.

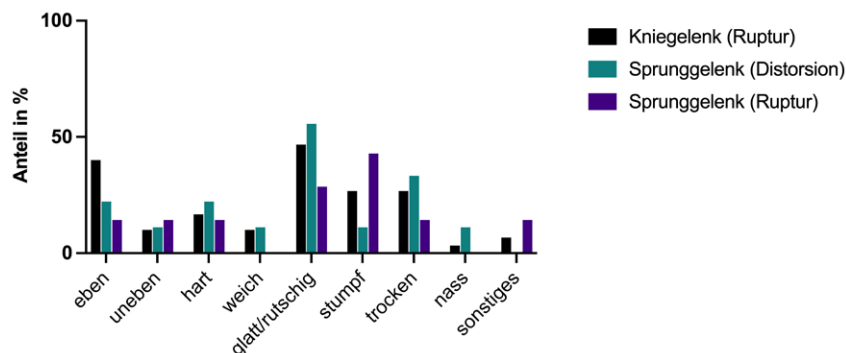


Abb. 25: Anteil der Verletzungen je Verletzungskategorie, bei denen die Verunfallten der Bodenbeschaffenheit einen subjektiven Einfluss auf die Entstehung der Verletzung zuschrieben.

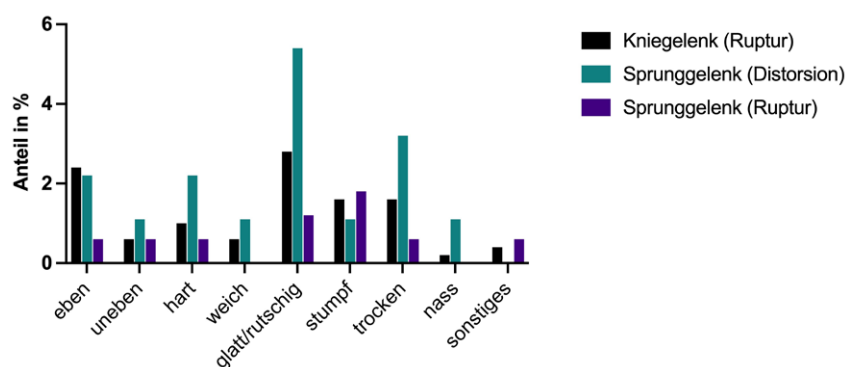


Abb. 26: Anteil der Verletzungen, bei denen die Bodenbeschaffenheit subjektiv als einflussnehmend bewertet wurde, relativ zur Gesamtzahl der Verletzungen in der jeweiligen Kategorie.

5.4 Diskussion

Die Analyse der Versicherungsdaten aus dem professionellen sowie dem organisierten Breitensport liefert Einblicke in das Verletzungsgeschehen der gesellschaftlich populären Mannschaftssportarten Fußball, Basketball und Handball. Die systematische Dokumentation der Verletzungsmechanismen und des subjektiven Einflusses der Bodenbeschaffenheit auf die Entstehung der Verletzung erlaubt eine differenzierte Betrachtung potenzieller Einflussfaktoren auf das Risiko von NKV und indirekten Kontaktverletzungen.

5.4.1 Relevanz der Schuh-Sportboden-Interaktion bei Knie- und Sprunggelenkverletzungen

Die Daten der VBG zeigen, dass 28 % (Basketball) bis 35 % (Handball) aller erfassten NKV und indirekten Kontaktverletzungen im Profisport auf einen Verletzungsmechanismus zurückzuführen sind, der mit einer Schuh-Sportboden-Interaktion assoziiert ist (z. B. Verdrehen, Verblocken, Umknicken). Besonders hervorzuheben ist, dass diese Mechanismen vor allem das Knie- und Sprunggelenk betreffen. Die Daten der Stiftung Sicherheit im Sport aus dem organisierten Breitensport zeigen einen vergleichbaren Befund. Im Fußball gaben die Verunfallten bei 19 % der Sprung- und Kniegelenkverletzungen an, dass ihrer Einschätzung nach die Bodenbeschaffenheit einen Einfluss auf die Entstehung der Verletzung hatte. Im Handball gaben 10 % der Betroffenen an, dass die Sportbodenbeschaffenheit einen subjektiven Einfluss auf die Entstehung der Sprunggelenkdistorsion hatte. Bei Kniegelenkverletzungen sind es 6 %. Damit decken sich die subjektiven Einschätzungen zum Einfluss der Bodenbeschaffenheit auf das Verletzungsgeschehen aus dem Breitensport mit den über Videoanalysen identifizierten und mit einer Schuh-Sportboden-Interaktion assoziierten Verletzungsmechanismen im Profibereich.

5.4.2 Nicht-Kontakt-Verletzungen durch strukturelle Überbelastung

Bei NKV im professionellen Fußball fällt auf, dass die strukturelle Überbelastung mit 77 % den mit Abstand häufigsten Verletzungsmechanismus darstellt. Im professionellen Basketball und Handball belaufen sich diese Werte auf 43 % bzw. 50 %, womit die strukturelle Überbelastung auch in diesen Sportarten der häufigste Verletzungsmechanismus ist. Damit ereignet sich ein Großteil der NKV im Teamsport durch Verletzungsmechanismen, die nicht unmittelbar mit einer Schuh-Sportboden-Interaktion assoziiert sind.

5.4.3 Subjektiver Einfluss der Bodenbeschaffenheit am Verletzungsgeschehen im Breitensport

Aus den Daten der Stiftung Sicherheit im Sport ist nachvollziehbar, welche Bodenbeschaffenheit subjektiv von den Verunfallten als Verletzungsursächlich bewertet wurde. Diese Fälle lassen sich in Relation zur Gesamtzahl aller Verletzungen setzen. So wird ersichtlich, in wie viel Prozent der Verletzungen einer bestimmten Sportbodenbeschaffenheit ein subjektiver Einfluss auf die Entstehung der Verletzung zugeschrieben wurde. Im Fußball ist der unebene Untergrund derjenige, der subjektiv am häufigsten als einflussnehmend auf das Verletzungsgeschehen bewertet wurde. Bei etwa 10 % aller Verletzungen im Fußball gaben die Verunfallten an, dass ein unebener Boden einen Einfluss auf das Verletzungsgeschehen hatte. Ein nasser Untergrund wird bei nur etwa 5 % aller Verletzungen als mitursächlich für die Verletzung angegeben, ein glatter/rutschiger Untergrund sogar lediglich bei rund 2 %.

Bei der Hallensportart Handball zeichnet sich ein anderes Bild ab. Etwa 50 % aller Verletzungen, bei denen der Boden als Einflussfaktor genannt wurde, traten auf einem glatten/rutschigen Untergrund auf. Relativ zur Gesamtzahl aller Verletzungen im Handball zeigt sich jedoch, dass der glatte/rutschige Boden, dem ein subjektiver Einfluss auf die Entstehung der Verletzung zugeschrieben wird, nur 3 % der gesamten Fälle ausmacht.

5.5 Praktische Implikation

Die Analyse von Verletzungen im Breitensport zeigt auf, dass ein unebener Sportboden im Fußball und eine glatte/rutschige Oberfläche im Hallensport mit NKV und indirekten Kontaktverletzungen assoziiert sind. Daraus ergibt sich, dass die Qualität und Beschaffenheit der Spielfläche einen unmittelbaren Ansatzpunkt für verhältnispräventive Maßnahmen darstellt. Für den Breitensport bedeutet dies in erster Linie, dass regelmäßige Wartung, Reinigung und Instandhaltung der Sportböden essenziell sind, um den Einfluss des Bodens auf das Verletzungsgeschehen zu minimieren.

Auffällig bei NKV im professionellen Sport ist der hohe Anteil struktureller Überlastungen als zugrundeliegender Verletzungsmechanismus. Neben der Schuh-Sportboden-Interaktion als externalem Risikofaktor richtet sich für die Verletzungsprävention dadurch ein weiterer Fokus auf internale Risikofaktoren der Sportlerinnen und Sportler. Das häufige Auftreten von strukturellen Überlastungen legt nahe, dass das Monitoring und die individuelle Steuerung von Trainings- und Wettkampfbelastung zentrale Bausteine einer wirksamen Verletzungsprävention darstellen.

6 Zusammenfassung und Implikationen für Praxis und Forschung

Ziel dieser Expertise ist es, den Einfluss des Zusammenspiels von Mensch, Sportschuh und Sportboden auf das Risiko von NKV im Team-sport systematisch und evidenzbasiert zu analysieren. Im Zentrum steht die Frage, wie Konstruktionsmerkmale und Funktionseigenschaften von Sportböden und Sportschuhen sowie deren wechselseitige Interaktion die biomechanische Belastung und somit das Verletzungsrisiko in Teamsportarten beeinflussen. Auf dieser Grundlage sollen wissenschaftlich fundierte Implikationen für zukünftige Forschungsprojekte, Normung und die Sportpraxis abgeleitet werden.

Zur Beantwortung dieser Fragestellung wurden vier komplementäre Ansätze verfolgt:

1. In Kapitel 2 wurde der wissenschaftliche Literaturbestand hinsichtlich der Effekte verschiedener Sportbodenbeläge auf das Verletzungsrisiko in Mannschaftssportarten analysiert.
2. In Kapitel 3 wurde der Einfluss spezifischer Konstruktionsmerkmale von Sportschuhen auf das Verletzungsrisiko in Mannschaftssportarten in Form eines systematischen Literaturüberblicks untersucht.
3. Kapitel 4 beinhaltet einen narrativen Literaturüberblick zu den Konstruktionsmerkmalen und Funktionseigenschaften von Sportböden und Sportschuhen sowie deren Einfluss auf die Biomechanik von Athletinnen und Athleten während sportlicher Bewegungen. Mithilfe dieses Ansatzes konnten potenzielle Verletzungsmechanismen identifiziert werden.
4. Kapitel 5 ergänzte die literaturbasierte Analyse durch eine quantitative Analyse zweier umfassender Versicherungsdatenbanken aus dem professionellen Mannschaftssport sowie dem Breitensport, um das tatsächliche Verletzungsgeschehen unter praxisnahen Bedingungen abzubilden.

6.1 Zusammenfassung der wesentlichen Befunde

Im Folgenden werden die zentralen Erkenntnisse dieser vier Ansätze zusammengeführt und vor dem Hintergrund der Forschungsfragestellungen diskutiert. Darauf aufbauend werden Empfehlungen für weiterführende Forschungsprojekte, die Normung und Sportpraxis abgeleitet.

Die Ergebnisse der Meta-Analyse zum Vergleich des Verletzungsrisikos auf Natur- vs. Kunststoffrasen im Teamsport zeigen, dass sich das allgemeine Verletzungsrisiko zwischen beiden Bodenarten nicht signifikant unterscheidet, sofern Trainings- und Wettkampfsituationen getrennt betrachtet werden. Eine differenzierte Analyse spezifischer Verletzungen im Wettkampf zeigt jedoch, dass speziell das Verletzungsrisiko der häufig betroffenen unteren Extremitäten und insbesondere des Kniegelenks und des Sprunggelenks auf Naturrasen signifikant geringer ist als auf Kunststoffrasen. Für den Bereich der Hallensportarten ist die vorhandene Evidenz bislang eingeschränkt. Die wenigen verfügbaren Studien deuten darauf hin, dass auch hier die mechanischen Eigenschaften des Bodens einen relevanten Einfluss auf das Verletzungsrisiko haben könnten. Insbesondere höhere Reibungswerte, wie sie bei bestimmten synthetischen Hallenböden gemessen wurden, sind bei Handballspielerinnen mit einem erhöhten Risiko für VKB-Rupturen assoziiert.

Die epidemiologische Analyse zum Einfluss spezifischer Konstruktionsmerkmale von Sportschuhen auf das Verletzungsrisiko zeigte, dass eine vergleichsweise geringe rotatorische Traktion bei Stollenschuhen sowie eine geringe laterale Traktion bei Hallensportschuhen mit einem signifikant reduzierten Verletzungsrisiko verbunden waren. Die Traktionseigenschaften von Sportschuhen werden hierbei maßgeblich über die Gestaltung der Außensohle beeinflusst. Für den Einsatz auf Natur- und Kunststoffrasen lassen sich diese Eigenschaften vor allem durch die Konfiguration der Stollen modifizieren. Es zeigten sich allerdings keine signifikanten Unterschiede im Verletzungsrisiko, wenn ausschließlich die Anzahl oder die Art der Stollen

variiert wurde. Auch die Schafthöhe von Stollenschuhen zeigte in einer Studie keinen signifikanten Einfluss auf das Verletzungsrisiko. Im Basketball wurden zusätzlich Dämpfungseigenschaften der Zwischensohle als potenziell relevant zur Vermeidung von Verletzungen untersucht, wobei die epidemiologische Literatur ein heterogenes Bild zeigte.

Während die in Kapitel 2 und 3 dargestellten epidemiologischen Befunde Hinweise auf Zusammenhänge zwischen spezifischen Sportböden bzw. Schuhmerkmalen und dem Verletzungsrisiko liefern, bleiben die zugrunde liegenden Ursachen dieser Zusammenhänge häufig unklar. Variablen wie der Sportboden- bzw. Oberflächenzustand, die Verletzungshistorie der Spielerinnen und Spielern oder eine integrierte epidemiologische Betrachtung von Schuh- und Sportbodenmerkmalen innerhalb derselben Analyse blieben in der Literatur bisher unberücksichtigt. Kausale Schlussfolgerungen sind nicht möglich. Die Befunde zum Einfluss der Schuhmerkmale auf das Verletzungsrisiko sollten deshalb nicht isoliert, sondern immer in Verbindung mit den Befunden der verschiedenen Sportbodenbeläge betrachtet werden.

Um besser zu verstehen, wie bestimmte Sportboden- oder Schuheigenschaften konkret zur Entstehung von Verletzungen beitragen können, ist die Einbeziehung biomechanischer Studien erforderlich. Diese ermöglichen es, potenzielle Verletzungsmechanismen zu identifizieren und zu analysieren, wie spezifische Schuh- oder Bodeneigenschaften das Verletzungsrisiko beeinflussen können. Kapitel 4 greift diesen Ansatz auf und analysiert biomechanische Parameter, die im Zusammenhang mit NKV stehen, um so die epidemiologischen Befunde mechanistisch zu untermauern und in praxisrelevante Empfehlungen zu überführen.

Ein zentraler Mechanismus, der Unterschiede im Verletzungsrisiko zwischen verschiedenen Bodenarten erklären kann, ist die Schuh-Sportboden-Interaktion. Die auf Grundlage der analysierten biomechanischen Studien gewonnenen Befunde zeigen, dass vor allem rotatorische Traktionskräfte, die bei Richtungswechseln, Landun-

gen oder Abbremsbewegungen auftreten, eine entscheidende Rolle spielen. Erhöhte Traktionswerte, wie sie teilweise auf Kunststoffrasen oder auf synthetischen Hallenböden ermittelt wurden, können zu erhöhten verletzungsbezogenen Drehmomenten im Knie- und Sprunggelenk führen. Ebenso kann ein schneller Kraftanstieg nach Bodenkontakt abrupte Belastungsspitzen begünstigen. Darüber hinaus weisen einige Befunde darauf hin, dass auch dämpfungs- und steifigkeitsbezogene Schuhparameter die Belastungsverteilung beeinflussen könnten. Dabei wird angenommen, dass das Schuhwerk entweder die Stoßabsorption oder die propriozeptive Rückmeldung verändern könnte. Insgesamt lässt sich vermuten, dass Verletzungsrisiken weniger durch einzelne Schuh- oder Bodeneigenschaften, sondern vielmehr durch deren Wechselwirkung bestimmt werden.

6.2 Einfluss geschlechtsspezifischer Unterschiede auf das Verletzungsrisiko

Übergreifend für die Fragestellungen der Kapitel 2 bis 4 ist zu berücksichtigen, dass geschlechtsspezifische Unterschiede das Verletzungsrisiko sowie die zugrundeliegenden Verletzungsmechanismen maßgeblich beeinflussen können. Die Analyse des Verletzungsrisikos auf unterschiedlichen Sportböden verdeutlicht, dass geschlechtsspezifische Unterschiede in der bisherigen Forschung weitgehend unberücksichtigt geblieben sind. Von insgesamt 44 Studien ermöglichen lediglich fünf einen direkten Vergleich zwischen Athleten und Athletinnen, während sich der überwiegende Teil der Studien ausschließlich auf männliche Athleten bezieht. Die geringe Anzahl an Studien zu geschlechtsspezifischen Effekten lässt einen vorsichtigen Rückschluss zu, dass das Geschlecht in Abhängigkeit vom Sportboden eine Rolle in Bezug auf das Verletzungsrisiko spielen könnte. Aufgrund der geringen Anzahl an Studien, die eine geschlechterdifferenzierte Analyse vorgenommen haben, ist eine quantitative Auswertung dieser Thematik nicht möglich. Von insgesamt acht eingeschlossenen Studien zum Einfluss von

Schuhmerkmalen auf die Verletzungsinzidenz untersuchen vier Studien sowohl männliche als auch weibliche Athletinnen und Athleten. Keine dieser Arbeiten berichtet jedoch geschlechtsspezifische Inzidenzen. Darüber hinaus konzentrierten sich drei Studien ausschließlich auf männliche und eine auf weibliche Teilnehmende, sodass ein direkter Geschlechtervergleich bislang nicht möglich ist.

Auch im Bereich der biomechanischen Studien bleibt die geschlechtsspezifische Betrachtung bislang weitgehend unberücksichtigt. Mittlerweile besteht eine klare Evidenz, dass Verletzungsmechanismen und Risikofaktoren geschlechtsspezifisch zu betrachten sind, beispielsweise hinsichtlich VKB-Rupturen. Dennoch gibt es nur wenige Untersuchungen, die Unterschiede in kinematischen, kinetischen oder neuromuskulären Parametern zwischen Athleten und Athletinnen im Kontext von Schuh-Sportboden-Interaktionen analysieren. Ob und in welchem Ausmaß sich Modifikationen von Sportschuhen oder Sportböden geschlechtsspezifisch auf die Biomechanik und die neuromuskuläre Ansteuerung bei verletzungsbezogenen Bewegungen auswirken, ist aktuell weitgehend ungeklärt.

Über alle drei Fragestellungen hinweg fehlt es an systematischer, geschlechtsspezifischer Evidenz. Somit bleibt unklar, in welchem Maße das Geschlecht die verletzungsrelevante Schuh-Sportboden-Interaktion moderiert. Geschlechtsspezifische Empfehlungen für die Entwicklung von Sportschuhen und Sportböden können daher nicht abgeleitet werden.

6.3 Analyse der Versicherten-datenbanken

Vor dem Hintergrund der beschriebenen Limitationen des aktuellen Literaturüberblicks bietet die ergänzende Auswertung von Versicherungsdaten eine wertvolle Erweiterung des literaturbasierten Evidenzstandes. Die Daten der VBG aus den professionellen Mannschaftssportarten sowie der Stiftung Sicherheit im Sport aus dem organisierten Breitensport ermöglichen

Analysen auf Basis großer, einander ergänzender Kollektive. Sie umfassen eine Vielzahl unterschiedlicher Sportarten, Altersgruppen und Spielniveaus, dokumentieren sämtliche Verletzungstypen und bilden das Verletzungsgeschehen unter praxisnahen Bedingungen realitätsgetreu ab.

Die Daten der VBG bestätigen die Bedeutung von Verletzungsmechanismen, die mit einer Schuh-Sportboden-Interaktion assoziiert sind. Dies zeigt sich insbesondere bei indirekten Kontaktverletzungen der unteren Extremitäten, die in über der Hälfte der Fälle auf ein Verblocken, Verdrehen oder Umknicken zurückzuführen sind. Auch die Daten der Stiftung Sicherheit im Sport verdeutlichen, dass die Bodenbeschaffenheit von den verunfallten Sportlerinnen und Sportlern subjektiv als bedeutsam für den Verletzungshergang wahrgenommen wird. Beispielsweise beläuft sich der Anteil der Verletzungen im Fußball, bei denen die Bodenbeschaffenheit als ursächlich für die Verletzung eingestuft wurde, auf etwa 15–20 %.

Die Auswertung der Versicherungsdaten erlaubt keine kausalen Aussagen zu spezifischen Eigenschaften von Sportböden oder Sportschuhen, da objektive Merkmale des Bodens (z.B. Kraftabbau und Gleitverhalten für Hallensportböden nach DIN 18032-2 oder Kraftabbau und Drehwiderstand für Kunststoffrasenflächen nach DIN EN 14808 bzw. DIN EN 15301-1) und der Sportschuhe (z.B. rotatorische/translatorische Traktion der Außensohle, Anzahl und Geometrie der Stollen oder Längsbiege- und Torsionssteifigkeit) nicht erfasst werden. Risikobezogene Vergleiche sind bislang nicht möglich. Das deckt sich mit den durch die Literaturanalysen benannten Forschungslücken, wonach Boden- und Schuhkennwerte in Zukunft systematisch dokumentiert werden müssen, um den Einfluss dieser Faktoren auf das Verletzungsgeschehen aufklären zu können. Zudem werden im VBG-Videokollektiv primär moderate bis schwere Wettkampfverletzungen (Arbeitsunfähigkeit ≥ 7 Tage und/oder Leistungsanspruch ≥ 1.000 Euro) erfasst. Leichte Fälle und Trainingsverletzungen sind damit unterrepräsentiert bzw. nicht abgebildet. Die gleiche Verzerrung spiegelt sich in den

Daten der Stiftung Sicherheit im Sport wider. Darüber hinaus subsumiert die Datenbank der Stiftung Sicherheit im Sport NKV, indirekte Kontaktverletzungen und Kontaktverletzungen. Eine trennscharfe Analyse von NKV ist daher nicht möglich. Schlussendlich sind die Versicherungsdaten ergänzend und damit wertvoll zur Hypothesengenerierung.

6.4 Praxisempfehlungen

Die vorliegenden Ergebnisse liefern Hinweise auf systematische Zusammenhänge zwischen dem Verletzungsrisiko, den Eigenschaften von Sportböden und den Konstruktionsmerkmalen von Sportschuhen. Zugleich muss jedoch konstatiert werden, dass die derzeitige Evidenzlage keine belastbaren, allgemeingültigen und praxisorientierten Empfehlungen zulässt. Die Ursachen hierfür sind mannigfaltig und liegen vor allem in der Heterogenität der Studiendesigns und -ergebnisse sowie der unzureichend detaillierten Beschreibung der untersuchten Sportböden und Sportschuhe. Konkrete Handlungsempfehlungen für die Entwicklung und Auswahl von Sportböden und Sportschuhen zur Verletzungsprävention können aus der Literatur allein noch nicht abgeleitet werden. Weitere Forschungsarbeiten mit methodisch hochwertigen Studiendesigns sind notwendig, um weiteren Einblick in diese Fragestellungen zu erhalten.

Vor diesem Hintergrund ist für die Sportpraxis ein pragmatischer Umgang mit der Schuh-Sportboden-Interaktion zu empfehlen, der vorhandenes Wissen nutzt. Dazu gehört die gezielte Schulung von Sportlerinnen und Sportlern und Betreuenden im Hinblick auf eine sachgerechte Schuhwahl unter Berücksichtigung der jeweiligen Bodenbeschaffenheit und der hersteller-spezifischen Empfehlungen. Die verwendeten Schuhe sollten keine überhöhte rotatorische Traktion erzeugen und somit die Rotationsfreiheit des Schuhs möglichst wenig einschränken.

Offenheit gegenüber neuartigen Technologien im Schuh-Sportboden-Bereich ist grundsätzlich sinnvoll, sofern der Einsatz neuer Technologien

sportartspezifisch plausibel erscheint und die Implementierung professionell begleitet wird. Beispielsweise führte der Einsatz eines sogenannten „low-friction patch“ an der lateralen Außensohle von Hallenschuhen über mehrere Hallensportarten hinweg zu geringeren Inzidenzen von NKV des Sprunggelenks.

Gleichzeitig ist die multifaktorielle Natur von Verletzungen in Teamsportarten hervorzuheben. Sportboden und Sportschuh sind relevante, aber nur einzelne Faktoren in einem komplexen Zusammenspiel internaler und externaler Risikofaktoren. Maßnahmen am Sportboden oder am Sportschuh besitzen den Vorteil einer verhältnispräventiven Wirkung, da sie unabhängig vom individuellen Verhalten greifen und eine Risikoreduktion auf Populationsebene ermöglichen. Sie stellen jedoch nur einen Baustein zur Prävention von Verletzungen dar und sollten konsequent durch weitere, vor allem verhaltenspräventive Strategien ergänzt werden. Insbesondere neuromuskuläre Trainingsprogramme zeigen unter kontrollierten Bedingungen deutlich höhere Risikoreduktionen, als dies mit Modifikationen an Sportböden und Sportschuhen möglich scheint.

6.5 Implikationen für die Normung

Hinsichtlich der Testung von Sportböden und Sportschuhen ist hervorzuheben, dass mechanische Tests im Sportschuhbereich und Prüfverfahren für Sportböden nicht direkt vergleichbar sind. Selbst Verfahren, die die gleiche Eigenschaft adressieren (z. B. rotatorische Traktion bei Sportschuhen und Drehwiderstand auf Kunststoffraffenflächen nach DIN EN 15301-1), unterscheiden sich in den Prüfständen, Randbedingungen und Kennwertdefinitionen. Entsprechend sollten Verantwortliche von Vereinen, Verbänden, Kommunen und die Grenzen der Übertragbarkeit kennen.

Perspektivisch sollte geprüft werden, ob für die wichtigsten mechanischen Eigenschaften, speziell die rotatorische Traktion, vergleichbare Testansätze etabliert und um schuhgetreue

In-situ-Prüfungen ergänzt werden können. Eine solche Harmonisierung würde die Entscheidungsgrundlagen für Beschaffung, Wartung und Schuhauswahl verbessern und mittelfristig die Ableitung wirklich praxisrelevanter Grenzwerte erleichtern. Darüber hinaus wird empfohlen, die Inklusion der translatorischen Traktion bei der Prüfung von Kunststoffrasenflächen (DIN EN 15330-1) in Betracht zu ziehen, da diese Komponente in einzelnen Untersuchungen ebenfalls mit dem Auftreten von Verletzungen verbunden war.

6.6 Implikationen für zukünftige Forschung

Die bisherigen Erkenntnisse unterstreichen die Relevanz von Sportböden und Sportschuhen für das Verletzungsrisiko in Teamsportarten, zeigen jedoch zugleich erhebliche Forschungslücken in der systematischen Erfassung, Bewertung und Integration dieser Einflussfaktoren.

Ein Schwerpunkt sollte hierbei darauf liegen, die technischen und mechanischen Eigenschaften von Sportböden und Sportschuhen als unabhängige Einflussgrößen systematisch zu erheben und zu dokumentieren. Es fehlen oftmals grundlegende Informationen zu den untersuchten Schuhen und Böden und eine kategorische Zuordnung ist somit nicht möglich. Relevante Parameter wie rotatorische und translatorische Traktion, Dämpfungseigenschaften, Energieaufnahme und Oberflächenreibung sollten bekannt sein und in Studienberichten aufgeführt werden. Nur durch eine konsequente Verknüpfung solcher Materialparameter mit Verletzungsdaten lassen sich Zusammenhänge zwischen mechanischen Eigenschaften und Verletzungsrisiken identifizieren. Hierfür sind validierte Labor- und Feldprotokolle erforderlich, die unter realitätsnahen Bewegungsbedingungen die tatsächlichen Materialeigenschaften abbilden und einen Vergleich zwischen Studien ermöglichen. Ebenfalls sollten dynamische Prüfverfahren, die realistische Bewegungsabläufe abbilden, weiterentwickelt werden, da sie die tatsächlichen Belastungsbedingungen im Sport wahrscheinlich

präziser widerspiegeln. Schlussendlich bieten auch Modellierungs- und Simulationsansätze zunehmend Möglichkeiten, die komplexen Zusammenhänge zwischen Materialeigenschaften, biomechanischer Belastung und Verletzungsentstehung zu analysieren und so experimentelle Befunde zu ergänzen.

Hierauf aufbauend sollte Forschung zur Ergründung biomechanischer und neuromuskulärer Reaktionen auf unterschiedliche Schuh- und Bodeneigenschaften konzipiert und weitergeführt werden. Mit Verletzungen assoziierte Parameter, wie Gelenkmomente, Kraftanstiegsraten, Bewegungsstrategien oder neuromuskuläre Aktivierungsmuster, können Aufschluss über zugrundeliegende Mechanismen der Entstehung von Verletzungen geben. Die Verknüpfung dieser abhängigen Variablen mit den zuvor charakterisierten Konstruktions- und Funktionseigenschaften ist zentral, um zu verstehen, wie spezifische Schuh- oder Bodeneigenschaften Belastung verändern und somit das Verletzungsrisiko beeinflussen können.

Auch die bisherigen Befunde zum Einfluss von Sportschuhen auf das Verletzungsrisiko unterstreichen die zentrale Bedeutung der Interaktion zwischen Schuh und Boden. Eine integrative Analyse, die konkrete Schuhmodelle mit ihren mechanischen Eigenschaften in Kombination mit spezifischen Bodenarten systematisch mit der Verletzungsinzidenz in Beziehung setzt, steht bislang aus. Eine solche Untersuchung könnte jedoch entscheidende Erkenntnisse über tatsächliche Risikofaktoren liefern. Zudem sollten in epidemiologischen Registerstudien zu Verletzungen im Teamsport künftig Informationen zum getragenen Schuhwerk und Sportboden routinemäßig dokumentiert werden, um differenzierte Risikobewertungen zu ermöglichen. Insgesamt sollten zukünftige Forschungsarbeiten die Risikofaktoren Sportboden und Sportschuh nicht länger isoliert betrachten, sondern ihre Interaktion in den Mittelpunkt stellen, um konkrete Schuh-Sportboden-Kombinationen systematisch mit Verletzungsrisiken verknüpfen zu können. So lassen sich

praxisnahe Zielbereiche (z.B. für rotatorische/translatorische Traktion) und letztlich umsetzbare Empfehlungen ableiten. Darüber hinaus besteht weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Konstruktionsmerkmalen. So könnten Kombinationen aus erhöhter Sohlensteifigkeit und hoher Traktion andere Belastungsprofile erzeugen, als die isolierte Betrachtung einzelner Faktoren vermuten lässt.

Ein besonderes Augenmerk sollte zukünftig auch auf die Erforschung der Wirkung neuartiger Technologien im Zusammenhang mit Sportschuhen und Sportböden gelegt werden. Beispielsweise gewinnen Glasböden vor allem im professionellen Sport an Bedeutung, sind aber bisher nahezu unerforscht. Hier besteht unmittelbarer Forschungsbedarf zum Verletzungsrisiko auf diesem neuen Sportbodenbelag. Insbesondere ist auch die Interaktion mit auf diesem Boden getragenen Sportschuhen aus biomechanischer Sicht von Interesse. Ebenfalls ist der kontinuierlichen technologischen Weiterentwicklung bestehender Systeme durch begleitende Forschung Rechnung zu tragen. Dies betrifft beispielsweise den Bereich der Kunststoffrasenplätze, bei denen sich in der Vergangenheit stetig Anpassungen von Füllstoffen, Fasergeometrien oder Oberbaukonstruktionen ergeben haben. Solche Modifikationen erfolgen häufig mit dem Ziel, die Spielbarkeit, Haltbarkeit oder ökologische Nachhaltigkeit der Plätze zu verbessern. Gleichzeitig können sie jedoch auch biomechanische Kenngrößen wie Traktion, Dämpfung, Energieaufnahme beeinflussen und damit auch das Verletzungsrisiko verändern.

Darüber hinaus sollten bislang wenig berücksichtigte Einflussfaktoren systematisch erhoben werden. Gespräche im Rahmen dieser Expertise mit Expertinnen und Experten verdeutlichen, dass der Reinigungszustand von Sportböden (speziell in Mehrzweckhallen) einen relevanten Einfluss auf die Interaktion von Sportboden und Sportschuh hat. Vor allem die Verunreinigung des Sportbodens durch Harz im Handball wird als verletzungsrelevant eingeschätzt.

Empirische Untersuchungen hierzu fehlen jedoch. Weitere in diesem Zusammenhang möglicherweise bedeutende kontextuelle Faktoren des Untergrunds, wie Alter, Pflegezustand oder Ebenheit von Spielflächen sollten ebenfalls berücksichtigt werden. Auch Gewöhnungseffekte bei wechselnden Bodenarten sowie das subjektive Sicherheitsgefühl von Spielerinnen und Spielern könnten das Bewegungsverhalten und damit das Verletzungsrisiko beeinflussen, wurden bislang jedoch kaum untersucht. Schlussendlich verdienen im Rasensport möglicherweise vorhandene Unterschiede zwischen Spielklassen ebenfalls Aufmerksamkeit. Während auf Plätzen niederklassig spielender Vereine häufiger eine geringere Naturrasenqualität vorzufinden ist, könnte Kunststoffrasen hier durch seine gleichmäßigeren Eigenschaften Vorteile bieten. Solche Aspekte sind bislang jedoch nur anekdotischer Natur und sollten empirisch überprüft werden.

Zusätzlich sind für künftige Forschungsarbeiten auch übergreifende methodische Standards erforderlich. Hierfür sind i) geschlechtsspezifische Analysen, ii) die Anwendung einheitlicher und transparenter Verletzungsdefinitionen sowie iii) die konsistente Erfassung und Kategorisierung der Verletzungsschwere obligatorisch. Nur auf dieser Basis lassen sich Inzidenzen, Risikoverhältnisse und geschlechtsspezifische Unterschiede robust und valide vergleichen.

Zusammenfassend verdeutlicht diese Expertise, dass Sportboden und Sportschuh zentrale, aber bislang unzureichend integrierte Determinanten des Verletzungsrisikos im Teamsport darstellen. Zukünftige Forschung und Entwicklung sollte daher auf einer engen Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft, Praxis und Industrie basieren, um evidenzbasiert sichere und leistungsförderliche Sportbedingungen zu schaffen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass sich die vorliegende Expertise ausschließlich auf akute Verletzungen im Mannschaftssport bezieht und daher keine Aussagen zu Verletzungen getroffen werden können, die infolge chronischer Überlastung entstehen.

Danksagung



Danksagung

Wir bedanken uns bei den Projektpartnern für die konstruktive Zusammenarbeit und den wertvollen fachlichen Austausch im Rahmen der Erstellung dieser Expertise: Dennis Frank (ISP GmbH), Harald Körger (adidas AG), Dr. Kevin Krieger (TurfCoach GmbH), Harald Jung (Hamburger Flooring GmbH & Co. KG), Daniel Feßer (GymLab GmbH) sowie Dr. Dr. Markus Wenning (BDH-Klinik Waldkirch gGmbH, Orthoteam Freiburg).

Ein besonderer Dank gilt der Verwaltungs-Berufsgenossenschaft (VBG) für die Bereitstellung aggregierter Verletzungsdaten sowie der Stiftung Sicherheit im Sport, die den Sportunfall-Datensatz der ARAG Allgemeine Versicherung AG und der Ruhr-Universität Bochum analysiert, aggregiert und für das Projekt bereitgestellt hat. Beide Institutionen haben durch ihre Unterstützung einen zentralen inhaltlichen Beitrag zu dieser Expertise geleistet.

Weiterer Dank gilt den Mitgliedern des wissenschaftlichen Beirats für ihre wertvollen Anregungen und die fachliche Begleitung während des Projekts: Christian Siegel (Deutscher Olympischer Sportbund, DOSB), Heinz Schomakers (Bundesverband Garten-, Landschafts- und Sportplatzbau, BGL), Prof. Martin Thieme-Hack (Hochschule Osnabrück), Prof. Dr. Kerstin Witte (Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg) und Prof. Dr. Karen Zentgraf (Goethe-Universität Frankfurt).

Unser abschließender Dank gilt dem Bundesinstitut für Sportwissenschaft (BISp), insbesondere Katharina Schorr und Dr. Jutta Katthage, für die unterstützende Zusammenarbeit im Rahmen des Projekts.

Literatur



Literaturverzeichnis

- Almutawa, M., Scott, M., George, K. P. & Drust, B. (2014). The incidence and nature of injuries sustained on grass and 3rd generation artificial turf: A pilot study in elite Saudi National Team footballers. *Physical Therapy in Sport*, 15(1), 47 – 52. <https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2013.02.004>
- Aoki, H., Kohno, T., Fujiya, H., Kato, H., Yatabe, K., Morikawa, T. & Seki, J. (2010). Incidence of injury among adolescent soccer players: A comparative study of artificial and natural grass turfs. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 20(1), 1 – 7. <https://doi.org/10.1097/JSM.0b013e3181c967cd>
- Bagehorn, T., Mai, P., Bill, K., Herbaut, A., de Zee, M. & Kersting, U. G. (2024). Effect of increased shoe longitudinal bending stiffness on ankle and foot biomechanics in jump-cut movements of low and high degrees. *Footwear Science*, 16(2), 135 – 146. <https://doi.org/10.1080/19424280.2024.2328289>
- Bahr, R., & Krosshaug, T. (2005). Understanding injury mechanisms: a key component of preventing injuries in sport. *British Journal of Sports Medicine*, 39(6), 324 – 329. <https://doi.org/10.1136/bjism.2005.018341>
- Barrons, Z. B., Esposito, M. J. S., Stefanyshyn, D. J., & Wannop, J. W. (2023). The traction requirements of female and male basketball players. *Footwear Science*, 15(1), 28 – 34. <https://doi.org/10.1080/19424280.2022.2141899>
- Barrons, Z. B., Ura, D., Bill, K., Cooke, E. S., Wannop, J. W., & Stefanyshyn, D. (2019). Required traction during common rugby movements. *Footwear Science*, 11(sup1), S165-S166. <https://doi.org/10.1080/19424280.2019.1606308>
- Bentley, J. A., Ramanathan, A. K., Arnold, G. P., Wang, W., & Abboud, R. J. (2011). Harmful cleats of football boots: a biomechanical evaluation. *Foot and ankle surgery: official journal of the European Society of Foot and Ankle Surgeons*, 17(3), 140 – 144. <https://doi.org/10.1016/j.fas.2010.04.001>
- Bisciotti, G. N., Chamari, K., Cena, E., Bisciotti, A., Bisciotti, A., Corsini, A., & Volpi, P. (2019). Anterior cruciate ligament injury risk factors in football. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 59(10), 1724 – 1738. <https://doi.org/10.23736/S0022-4707.19.09563-X>
- Bishop, J. L., Nurse, M. A., & Bey, M. J. (2014). Do high-top shoes reduce ankle inversion? A dynamic x-ray analysis of aggressive cutting in a high-top and low-top shoe. *Footwear Science*, 6(1), 21 – 26. <https://doi.org/10.1080/19424280.2013.834981>
- Bjorneboe, J., Bahr, R., & Andersen, T. E. (2010). Risk of injury on third-generation artificial turf in Norwegian professional football. *British Journal of Sports Medicine*, 44(11), 794 – 798. <https://doi.org/10.1136/bjism.2010.073783>
- Boden, B. P., & Sheehan, F. T. (2022). Mechanism of non-contact ACL injury: OREF Clinical Research Award 2021. *Journal of orthopaedic research: official publication of the Orthopaedic Research Society*, 40(3), 531 – 540. <https://doi.org/10.1002/jor.25257>
- Bruce, O. L., Firminger, C. R., Wannop, J. W., Stefanyshyn, D. J., & Edwards, W. B. (2019). Effects of basketball court construction and shoe stiffness on countermovement jump landings. *Footwear Science*, 11(3), 171 – 179. <https://doi.org/10.1080/19424280.2019.1668867>

- Calloway, S. P., Hardin, D. M., Crawford, M. D., Hardin, J. M., Lemak, L. J., Giza, E., Forsythe, B., Lu, Y., Patel, B. H., Osbahr, D. C., Gerhardt, M. B., Mandelbaum, B. R., & Baldwin, W. W. (2019). Injury surveillance in major league soccer: a 4-year comparison of injury on natural grass vs. artificial turf field. *The American Journal of Sports Medicine*, 47(10), 2279 – 2286. <https://doi.org/10.1177/0363546519860522>
- Chia, L., de Oliveira Silva, D., Whalan, M., McKay, M. J., Sullivan, J., Fuller, C. W., & Pappas, E. (2022). Non-contact anterior cruciate ligament injury epidemiology in team-ball sports: a systematic review with meta-analysis by sex, age, sport, participation level, and exposure type. *Sports Medicine*, 52(10), 2447 – 2467. <https://doi.org/10.1007/s40279-022-01697-w>
- Coetzee, D., Langeveld, E., & Holtzhausen, L. (2014). Training habits, training surface and injuries among South African netball players. *South African Journal for Research in Sport, Physical Education and Recreation*, 36(3), 39 – 49.
- Coker, T. P., Arnold, J. A., & Weber, D. L. (1978). Traumatic lesions of the metatarsophalangeal joint of the great toe in athletes. *The American Journal of Sports Medicine*, 6(6), 326 – 334. <https://doi.org/10.1177/036354657800600604>
- Collings, T. J., Bourne, M. N., Barrett, R. S., du Moulin, W., Hickey, J. T., & Diamond, L. E. (2021). Risk factors for lower limb injury in female team field and court sports: a systematic review, meta-analysis, and best evidence synthesis. *Sports Medicine*, 51(4), 759 – 776. <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01410-9>
- Cordova, M. L., Ingersoll, C. D., & Palmieri, R. M. (2002). Efficacy of prophylactic ankle support: an experimental perspective. *Journal of Athletic Training*, 37(4), 446 – 457.
- Cousins, B. E. W., Morris, J. G., Sunderland, C., Bennett, A. M., Shahtahmassebi, G., & Cooper, S. B. (2022). Synthetic playing surfaces increase the incidence of match injuries in an elite Rugby Union team. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 25(2), 134 – 138. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2021.08.019>
- Curtis, C. K., Laudner, K. G., McLoda, T. A., & McCaw, S. T. (2008). The role of shoe design in ankle sprain rates among collegiate basketball players. *Journal of Athletic Training*, 43(3), 230 – 233. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-43.3.230>
- Della Villa, F., Buckthorpe, M., Tosarelli, F., Zago, M., Zaffagnini, S., & Grassi, A. (2022). Video analysis of Achilles tendon rupture in male professional football (soccer) players: injury mechanisms, patterns and biomechanics. *BMJ Open Sport & Exercise Medicine*, 8(3), e001419. <https://doi.org/10.1136/bmjsem-2022-001419>
- Dodson, C. C., Secrist, E. S., Bhat, S. B., Woods, D. P., & Deluca, P. F. (2016). Anterior cruciate ligament injuries in national football league athletes from 2010 to 2013: a descriptive epidemiology study. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 4(3). <https://doi.org/10.1177/2325967116631949>
- Dolan, P., Kenny, I., Glynn, L., Campbell, M., Warrington, G. D., Cahalan, R., Harrison, A., Lyons, M., & Comyns, T. (2023). Risk factors for acute ankle sprains in field-based, team contact sports: a systematic review of prospective etiological studies. *The Physician and Sportsmedicine*, 51(6), 517 – 530. <https://doi.org/10.1080/00913847.2022.2093618>

- Dragoo, J. L., Braun, H. J., Durham, J. L., Chen, M. R., & Harris, A. H. S. (2012). Incidence and risk factors for injuries to the anterior cruciate ligament in national collegiate athletic association football data from the 2004 – 2005 through 2008 – 2009 national collegiate athletic association injury surveillance system. *The American Journal of Sports Medicine*, 40(5), 990 – 995. <https://doi.org/10.1177/0363546512442336>
- Ekstrand, J., Hagglund, M., & Fuller, C. W. (2011). Comparison of injuries sustained on artificial turf and grass by male and female elite football players. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 21(6), 824 – 832. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2010.01118.x>
- Ekstrand, J., Timpka, T., & Hagglund, M. (2006). Risk of injury in elite football played on artificial turf vs. natural grass: a prospective two-cohort study. *British Journal of Sports Medicine*, 40(12), 975 – 980. <https://doi.org/10.1136/bjsm.2006.027623>
- Ekstrand, J., Hagglund, M., & Walden, M. (2011). Epidemiology of muscle injuries in professional football (soccer). *American Journal of Sports Medicine*, 39(6), 1226 – 1232. <https://doi.org/10.1177/0363546510395879>
- Emery, C. A., Roy, T.-O., Whittaker, J. L., Nettel-Aguirre, A., & van Mechelen, W. (2015). Neuromuscular training injury prevention strategies in youth sport: a systematic review and meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine*, 49(13), 865 – 870. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2015-094639>
- Firminger, C. R., Bruce, O. L., Wannop, J. W., Stefanyshyn, D. J., & Edwards, W. B. (2019). Effect of shoe and surface stiffness on lower limb tendon strain in jumping. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 51(9), 1895 – 1903. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002004>
- Fong, D. T.-P., Hong, Y., Chan, L.-K., Yung, P. S.-H., & Chan, K.-M. (2007). A systematic review on ankle injury and ankle sprain in sports. *Sports Medicine*, 37(1), 73 – 94. <https://doi.org/10.2165/00007256-200737010-00006>
- Forrester, S., & Fleming, P. (2019). Traction forces generated during studded boot-surface interactions on third-generation artificial turf: a novel mechanistic perspective. *Engineering Reports*, 1(e12066). <https://doi.org/10.1002/eng2.12066>
- Frias Bocanegra, J. M., & Fong, D. T. P. (2022). Playing surface traction influences movement strategies during a sidestep cutting task in futsal: implications for ankle performance and sprain injury risk. *Sports Biomechanics*, 21(4), 380 – 390. <https://doi.org/10.1080/14763141.2021.1980606>
- Fu, W., Fang, Y., Liu, Y., & Hou, J. (2014). The effect of high-top and low-top shoes on ankle inversion kinematics and muscle activation in landing on a tilted surface. *Journal of Foot and Ankle Research*, 7(1), 14. <https://doi.org/10.1186/1757-1146-7-14>
- Fuller, C. W., Clarke, L., & Molloy, M. G. (2010). Risk of injury associated with rugby union played on artificial turf. *Journal of Sports Sciences*, 28(5), 563 – 570. <https://doi.org/10.1080/02640411003629681>
- Fuller, C. W., Dick, R. W., Corlette, J., & Schmalz, R. (2007). Comparison of the incidence, nature and cause of injuries sustained on grass and new generation artificial turf by male and female football players. Part 1: match injuries. *British Journal of Sports Medicine*, 41(1), i20 – i26. <https://doi.org/10.1136/bjsm.2007.037267>

- Fuller, C. W., Dick, R. W., Corlette, J., & Schmalz, R. (2007). Comparison of the incidence, nature and cause of injuries sustained on grass and new generation artificial turf by male and female football players. Part 2: training injuries. *British Journal of Sports Medicine*, 41, i27 – 32. <https://doi.org/10.1136/bjsm.2007.037275>
- Galbusera, F., Tornese, D. Z., Anasetti, F., Bersini, S., Volpi, P., La Barbera, L., & Villa, T. (2013). Does soccer cleat design influence the rotational interaction with the playing surface? *Sports Biomechanics*, 12(3), 293 – 301. <https://doi.org/10.1080/14763141.2013.769277>
- Gehring, D., Rott, F., Stapelfeldt, B., & Gollhofer, A. (2007). Effect of soccer shoe cleats on knee joint loads. *International Journal of Sports Medicine*, 28(12), 1030 – 1034. <https://doi.org/10.1055/s-2007-965000>
- Gokeler, A., Benjaminse, A., Della Villa, F., Tosarelli, F., Verhagen, E., & Baumeister, J. (2021). Anterior cruciate ligament injury mechanisms through a neurocognition lens: implications for injury screening. *BMJ Open Sport & Exercise Medicine*, 7(2), e001091. <https://doi.org/10.1136/bmjsem-2021-001091>
- Gould, H. P., Lostetter, S. J., Samuelson, E. R., & Guyton, G. P. (2023). Lower extremity injury rates on artificial turf vs. natural grass playing surfaces: a systematic review. *The American Journal of Sports Medicine*, 51(6), 1615 – 1621. <https://doi.org/10.1177/03635465211069562>
- Graf, E. S., & Stefanyshyn, D. (2013). The effect of footwear torsional stiffness on lower extremity kinematics and kinetics during lateral cutting movements. *Footwear Science*, 5(2), 101 – 109. <https://doi.org/10.1080/19424280.2013.789561>
- Hagglund, M., & Walden, M. (2016). Risk factors for acute knee injury in female youth football. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 24(3), 737 – 746. <https://doi.org/10.1007/s00167-015-3922-z>
- Hardin, E. C., van den Bogert, A. J., & Hamill, J. (2004). Kinematic adaptations during running: effects of footwear, surface, and duration. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 36(5), 838 – 844. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000126605.65966.40>
- Henke, T., Luig, P., & Schulz, D. (2014). Sportunfälle im Vereinssport in Deutschland. Aspekte der Epidemiologie und Prävention. *Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz*, 57(6), 628 – 637. <https://doi.org/10.1007/s00103-014-1964-x>
- Hennig, E. M. (2011). The influence of soccer shoe design on player performance and injuries. *Research in Sports Medicine*, 19(3), 186 – 201. <https://doi.org/10.1080/15438627.2011.582823>
- Hershman, E. B., Anderson, R., Bergfeld, J. A., Bradley, J. P., Coughlin, M. J., Johnson, R. J., Spindler, K. P., Wojtys, E., Powell, J. W., & National Football League Injury and Safety Panel. (2012). An analysis of specific lower extremity injury rates on grass and FieldTurf playing surfaces in national football league games 2000 – 2009 seasons. *American Journal of Sports Medicine*, 40(10), 2200 – 2205. <https://doi.org/10.1177/0363546512458888>
- Herzog, W. (2018). Do recreational team sports provide fitness and health benefits? *Journal of Sport and Health Science*, 7(2), 127 – 128. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2018.01.001>

- Hess, M. C., Swedler, I., Collins, C. S., Ponce, B. A., & Brabston, E. W. (2020). Descriptive epidemiology of injuries in professional ultimate frisbee athletes. *Journal of Athletic Training*, 55(2), 195 – 204. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-269-18>
- Hewett, T. E., & Myer, G. D. (2011). The mechanistic connection between the trunk, hip, knee, and anterior cruciate ligament injury. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 39(4), 161 – 166. <https://doi.org/10.1097/JES.0b013e3182297439>
- Higgins, J. P. T., Thomas, J., Chandler, J., Cumpston, M., Li, T., Page, M. J., & Welch, V. A. (Eds.). (2024). *Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions (Version 6.5, updated August 2024)*. Cochrane. www.training.cochrane.org/handbook.
- Howard, M., Solaru, S., Kang, H. P., Bolia, I. K., Hatch, G. F. R., Tibone, J. E., Gamradt, S. C., & Weber, A. E. (2020). Epidemiology of anterior cruciate ligament injury on natural grass vs. artificial turf in soccer: 10-year data from the national collegiate athletic association injury surveillance system. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 8(7). <https://doi.org/10.1177/2325967120934434>
- Hübscher, M., Zech, A., Pfeifer, K., Hänsel, F., Vogt, L., & Banzer, W. (2010). Neuromuscular training for sports injury prevention: a systematic review. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 42(3), 413 – 421. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181b88d37>
- Iacovelli, J. N., Yang, J., Thomas, G., Wu, H., Schiltz, T., & Foster, D. T. (2013). The effect of field condition and shoe type on lower extremity injuries in American Football. *British Journal of Sports Medicine*, 47(12), 789-793. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2012-092113>
- Immonen, V., Kurittu, E., Kuitunen, I., Vasankari, T., & Leppänen, M. (2024). No increased injury risk on artificial turf in Finnish premier division football. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 35(6), 663 – 668. <https://doi.org/10.1097/jsm.0000000000001296>
- Iraqi-Rato, I., & Cuesta-Barriuso, R. (2024). Predictors of risk of muscle injury in non-professional soccer players: an ambispective cohort study. *Sports*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/sports12110314>
- Jones, P. A., Herrington, L., & Graham-Smith, P. (2016). Braking characteristics during cutting and pivoting in female soccer players. *Journal of electromyography and kinesiology: official journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology*, 30, 46 – 54. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2016.05.006>
- Kaila, R. (2007). Influence of modern studded and bladed soccer boots and sidestep cutting on knee loading during match play conditions. *The American Journal of Sports Medicine*, 35(9), 1528 – 1536. <https://doi.org/10.1177/0363546507300257>
- Kalkhoven, J. T., Watsford, M. L., & Impellizzeri, F. M. (2020). A conceptual model and detailed framework for stress-related, strain-related, and overuse athletic injury. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 23(8), 726 – 734. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2020.02.002>
- King, D. A., Clark, T. N., Hume, P. A., & Hind, K. (2022). Match and training injury incidence in rugby league: A systematic review, pooled analysis, and update on published studies. *Sports Medicine and Health Science*, 4(2), 75 – 84. <https://doi.org/10.1016/j.smhs.2022.03.002>

- Klein, C., Bloch, H., Burkhardt, K., Kühn, N., Pietzonka, M., Schäfer, M., Woller, M., & Toumi, N. (2022). VBG-Sportreport 2021 – Analyse des Verletzungsgeschehens in den zwei höchsten Ligen der Männer: Basketball, Eishockey, Fußball, Handball. Hamburg: VBG.
- Klein, C., Bloch, H., Burkhardt, K., Kühn, N., Pietzonka, M., Schäfer, M., Woller, M., & Toumi, N. (2024). VBG-Sportreport 2024 – Analyse des Verletzungsgeschehens in den zwei höchsten Ligen der Männer: Basketball, Eishockey, Fußball, Handball. Hamburg: VBG.
- Kordi, R., Hemmati, F., Heidarian, H., & Ziaee, V. (2011). Comparison of the incidence, nature and cause of injuries sustained on dirt field and artificial turf field by amateur football players. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 3, 3. <https://doi.org/10.1186/1758-2555-3-3>
- Krill, M. K., Borchers, J. R., Hoffman, J. T., Krill, M. L., & Hewett, T. E. (2017). Effect of position, time in the season, and playing surface on Achilles tendon ruptures in NFL games: a 2009-10 to 2016-17 review. *Physician and Sportsmedicine*, 45(3), 259 – 264. <https://doi.org/10.1080/00913847.2017.1343652>
- Kristenson, K., Bjørneboe, J., Waldén, M., Andersen, T. E., Ekstrand, J., & Häggglund, M. (2013). The Nordic football injury audit: higher injury rates for professional football clubs with third-generation artificial turf at their home venue. *British Journal of Sports Medicine*, 47(12), 775 – 781. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2013-092266>
- Kuitunen, I., Immonen, V., Pakarinen, O., Mattila, V. M., & Ponkilainen, V. T. (2023). Incidence of football injuries sustained on artificial turf compared to grass and other playing surfaces: a systematic review and meta-analysis. *EClinicalMedicine*, 59, 101956. <https://doi.org/10.1016/j.eclinm.2023.101956>
- Kulesa, D. J., Gollhofer, A., & Gehring, D. (2017). The influence of football shoe characteristics on athletic performance and injury risk – a review. *Footwear Science*, 9(1), 49 – 63. <https://doi.org/10.1080/19424280.2017.1284273>
- Labrecque, J. A., Hunink, M. M. G., Ikram, M. A., & Ikram, M. K. (2021). Do case-control studies always estimate odds ratios? *The American Journal of Epidemiology*, 190(2), 318 – 321. <https://doi.org/10.1093/aje/kwaa167>
- Lai, J. H.-C., Ling, S. K. K., Cacho, P., Mok, S. W., & Yung, P. S. H. (2020). The effects of shoe collar height on ankle sprain mechanics in athletes: A review of literature. *Journal of Orthopaedics, Trauma and Rehabilitation*, 27(2), 221 – 230. <https://doi.org/10.1177/2210491720950325>
- Lake, M., & Underdown, T. (2011). Traction and lower limb motion during rapid turning on different football turf surfaces. *Footwear Science*, 3(sup1), S92 – S93. <https://doi.org/10.1080/19424280.2011.575402>
- Lam, G. W. K., Park, E. J., Lee, K.-K., & Cheung, J. T.-M. (2015). Shoe collar height effect on athletic performance, ankle joint kinematics and kinetics during unanticipated maximum-effort side-cutting performance. *Journal of Sports Sciences*, 33(16), 1738 – 1749. <https://doi.org/10.1080/02640414.2015.1011206>

- Lam, W. K., Kan, W. H., Chia, J. S., & Kong, P. W. (2022). Effect of shoe modifications on biomechanical changes in basketball: A systematic review. *Sports Biomechanics*, 21(5), 577 – 603. <https://doi.org/10.1080/14763141.2019.1656770>
- Lam, W.-K., Cheung, C. C.-W., & Leung, A. K.-L. (2020). Shoe collar height and heel counter-stiffness for shoe cushioning and joint stability in landing. *Journal of Sports Sciences*, 38(20), 2374 – 2381. <https://doi.org/10.1080/02640414.2020.1785728>
- Lam, W.-K., Liebenberg, J., Woo, J., Park, S.-K., Yoon, S.-H., Cheung, R. T.-H., & Ryu, J. (2018). Do running speed and shoe cushioning influence impact loading and tibial shock in basketball players? *PeerJ*, 6, e4753. <https://doi.org/10.7717/peerj.4753>
- Lambson, R. B., Barnhill, B. S., & Higgins, R. W. (1996). Football cleat design and its effect on anterior cruciate ligament injuries. A three-year prospective study. *The American Journal of Sports Medicine*, 24(2), 155 – 159. <https://doi.org/10.1177/036354659602400206>
- Lanzetti, R. M., Ciompi, A., Lupariello, D., Guzzini, M., Carli, A., & Ferretti, A. (2017). Safety of third-generation artificial turf in male elite professional soccer players in Italian major league. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 27(4), 435 – 439. <https://doi.org/10.1111/sms.12654>
- Lanzetti, R. M., Lupariello, D., Venditto, T., Rota, P., Guzzini, M., Vadalà, A., Rota, A., & Ferretti, A. (2017). The influence of playing surface on injury risk in Italian elite rugby players. *Muscles, Ligaments and Tendons Journal*, 7(1), 180 – 185. <http://hdl.handle.net/11573/1048994>
- Livesay, G. A., Reda, D. R., & Nauman, E. A. (2006). Peak torque and rotational stiffness developed at the shoe-surface interface: the effect of shoe type and playing surface. *The American Journal of Sports Medicine*, 34(3), 415 – 422. <https://doi.org/10.1177/0363546505284182>
- Loughran, G. J., Vulpis, C. T., Murphy, J. P., Weiner, D. A., Svoboda, S. J., Hinton, R. Y., & Milzman, D. P. (2019). Incidence of knee injuries on artificial turf vs. natural grass in national collegiate athletic association american football: 2004 – 2005 through 2013 – 2014 seasons. *The American Journal of Sports Medicine*, 47(6), 1294 – 1301. <https://doi.org/10.1177/0363546519833925>
- Lucarno, S., Zago, M., Buckthorpe, M., Grassi, A., Tosarelli, F., Smith, R., & Della Villa, F. (2021). Systematic video analysis of anterior cruciate ligament injuries in professional female soccer players. *The American Journal of Sports Medicine*, 49(7), 1794 – 1802. <https://doi.org/10.1177/03635465211008169>
- Luo, G., & Stefanyshyn, D. (2011). Identification of critical traction values for maximum athletic performance. *Footwear Science*, 3(3), 127 – 138. <https://doi.org/10.1080/19424280.2011.639807>
- Lysdal, F. G., Bandholm, T., Tolstrup, J. S., Clausen, M. B., Mann, S., Petersen, P. B., Grønlykke, T. B., Kersting, U. G., Delahunt, E., & Thorborg, K. (2021). Does the Spraino low-friction shoe patch prevent lateral ankle sprain injury in indoor sports? A pilot randomised controlled trial with 510 participants with previous ankle injuries. *British Journal of Sports Medicine*, 55(2), 92 – 98. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2019-101767>

- Lysdal, F. G., Wang, Y., Delahunt, E., Gehring, D., Kosik, K. B., Krosshaug, T., Li, Y., Mok, K.-M., Pasanen, K., Remus, A., Terada, M., & Fong, D. T. P. (2022). What have we learnt from quantitative case reports of acute lateral ankle sprains injuries and episodes of „giving-way“ of the ankle joint, and what shall we further investigate? *Sports Biomechanics*, 21(4), 359 – 379. <https://doi.org/10.1080/14763141.2022.2035801>
- Mack, C. D., Hershman, E. B., Anderson, R. B., Coughlin, M. J., McNitt, A. S., Sendor, R. R., & Kent, R. W. (2019). Higher rates of lower extremity injury on synthetic turf compared with natural turf among national football league athletes: epidemiologic confirmation of a biomechanical hypothesis. *The American Journal of Sports Medicine*, 47(1), 189 – 196. <https://doi.org/10.1177/0363546518808499>
- Malisoux, L., Gette, P., Urhausen, A., Bomfim, J., & Theisen, D. (2017). Influence of sports flooring and shoes on impact forces and performance during jump tasks. *PLOS One*, 12(10), e0186297. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186297>
- Maniar, N., Carmichael, D. S., Hickey, J. T., Timmins, R. G., San Jose, A. J., Dickson, J., & Opar, D. (2023). Incidence and prevalence of hamstring injuries in field-based team sports: a systematic review and meta-analysis of 5952 injuries from over 7 million exposure hours. *British Journal of Sports Medicine*, 57(2), 109 – 116. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2021-104936>
- McKay, G. D., Goldie, P. A., Payne, W. R., & Oakes, B. W. (2001). Ankle injuries in basketball: Injury rate and risk factors. *British Journal of Sports Medicine*, 35(2), 103 – 108. <https://doi.org/10.1136/bjism.35.2.103>
- Meyers, M., Sterling, J., & Robinson, S. (2024). Poster 378: Surface impact injuries during high school football games on light- and heavyweight artificial turf fields. a 12-season prospective study. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 12(7, Suppl. 2). <https://doi.org/10.1177/2325967124s00343>
- Meyers, M. C. (2010). Incidence, mechanisms, and severity of game-related college football injuries on fieldturf vs. natural grass a 3-year prospective study. *The American Journal of Sports Medicine*, 38(4), 687 – 697. <https://doi.org/10.1177/0363546509352464>
- Meyers, M. C. (2013). Incidence, mechanisms, and severity of match-related collegiate women's soccer injuries on fieldturf and natural grass surfaces: a 5-year prospective study. *The American Journal of Sports Medicine*, 41(10), 2409 – 2420. <https://doi.org/10.1177/0363546513498994>
- Meyers, M. C. (2016). Incidence, mechanisms, and severity of match-related collegiate men's soccer injuries on fieldturf and natural grass surfaces: a 6-year prospective study. *The American Journal of Sports Medicine*, 45(3), 708 – 718. <https://doi.org/10.1177/0363546516671715>
- Meyers, M. C. (2019). Incidence, mechanisms, and severity of game-related high school football injuries across artificial turf systems of various infill weights. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 7(3). <https://doi.org/10.1177/2325967119832878>
- Meyers, M. C. (2021). Surface-related high school football game injuries on pad and no-pad fields. *The American Journal of Sports Medicine*, 49(9), 2489 – 2497. <https://doi.org/10.1177/0363546521990780>

- Meyers, M. C., & Sterling, J. C. (2022). Lisfranc injury: Prevalence and maintaining a high index of suspicion for optimal evaluation. *The Physician and Sportsmedicine*, 50(6), 507 – 514. <https://doi.org/10.1080/00913847.2021.1969218>
- Meyers, M. C., Sterling, J. C., & Robinson, S. K. (2024). Imaging and surgical procedures after surface-related collegiate football injuries on artificial turf vs. natural grass: prevalence and trends over 15 seasons. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 12(9). <https://doi.org/10.1177/23259671241274144>
- Miller, K. R., McClave, S. A., Jampolis, M. B., Hurt, R. T., Krueger, K., Landes, S., & Collier, B. (2016). The health benefits of exercise and physical activity. *Current Nutrition Reports*, 5(3), 204 – 212. <https://doi.org/10.1007/s13668-016-0175-5>
- Montalvo, A. M., Schneider, D. K., Silva, P. L., Yut, L., Webster, K. E., Riley, M. A., Kiefer, A. W., Doherty-Restrepo, J. L., & Myer, G. D. (2019). ‘What’s my risk of sustaining an ACL injury while playing football (soccer)?’ A systematic review with meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine*, 53(21), 1333 – 1340. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2016-097261>
- More-Pacheco, A., Meyer, F., Pacheco, I., Candotti, C. T., Sedrez, J. A., Loureiro-Chaves, R. F., & Loss, J. F. (2019). Ankle sprain risk factors: A 5-month follow-up study in volley and basketball athletes. *Revista Brasileira de Medicina do Esporte*, 25(3), 220 – 225. <https://doi.org/10.1590/1517-869220192503208053>
- Myklebust, G., Olsen, O. E., Engebretsen, L., & Bahr, R. (2001). ACL injuries in team handball: Is there any association between different floor types and the ACL incidence in matches? *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33(5), S86. <https://doi.org/10.1097/00005768-200105001-00495>
- Nunome, H., Shinkai, H., & Ikegami, Y. (2009). The effect of cleat shape on soccer boots – surface interaction during cutting. *Footwear Science*, 1(sup1), 50 – 51. <https://doi.org/10.1080/19424280902977236>
- Nyagetuba, M. J. K., Saidi, H., & Githaiga, J. (2015). The Association between pitch conditions and the incidence of injury in rugby. *The Annals of African Surgery*, 12(2), 73 – 76. <https://doaj.org/article/ea9074eeee2d45baaea3440723508cbd>
- O’Kane, J. W., Gray, K. E., Levy, M. R., Neradilek, M., Tencer, A. F., Polissar, N. L., & Schiff, M. A. (2016). Shoe and field surface risk factors for acute lower extremity injuries among female youth soccer players. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 26(3), 245 – 250. <https://doi.org/10.1097/JSM.0000000000000236>
- Olsen, O. E., Myklebust, G., Engebretsen, L., Holme, I., & Bahr, R. (2003). Relationship between floor type and risk of ACL injury in team handball. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 13(5), 299 – 304. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0838.2003.00329.x>
- Olsen, O. E., Myklebust, G., Engebretsen, L., & Bahr, R. (2004). Injury mechanisms for anterior cruciate ligament injuries in team handball: a systematic video analysis. *The American Journal of Sports Medicine*, 32(4), 1002 – 1012. <https://doi.org/10.1177/0363546503261724>

- Orchard, J. (2002). Is there a relationship between ground and climatic conditions and injuries in football? *Sports Medicine*, 32(7), 419–432. <https://doi.org/10.2165/00007256-200232070-00002>
- Orchard, J. W., Walden, M., Hagglund, M., Orchard, J. J., Chivers, I., Seward, H., & Ekstrand, J. (2013). Comparison of injury incidences between football teams playing in different climatic regions. *Open Access Journal of Sports Medicine*, 2013, 251–260. <https://doaj.org/article/5978ad77f3dc43eda14489b2ae419e49>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *The BMJ*, 372. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Pasanen, K., Parkkari, J., Rossi, L., & Kannus, P. (2008). Artificial playing surface increases the injury risk in pivoting indoor sports: a prospective one-season follow-up study in Finnish female floorball. *British Journal of Sports Medicine*, 42(3), 194–197. <https://doi.org/10.1136/bjsm.2007.038596>
- Pescatore, S. M., DeShazo, S., & Weiss, W. M. (2024, February 2 – 6). *Effects of soccer cleats worn vs. lower extremity injuries in the English Premier League* [Conference Presentation]. ORS Annual Meeting, Long Beach, CA, United States. <https://www.ors.org/wp-content/uploads/AM24/1188.pdf>
- Ranson, C., George, J., Rafferty, J., Miles, J., & Moore, I. (2018). Playing surface and UK professional rugby union injury risk. *Journal of Sport Sciences*, 36(21), 2393–2398. <https://doi.org/10.1080/02640414.2018.1458588>
- Ricard, M. D., Schulties, S. S., & Saret, J. J. (2000). Effects of high-top and low-top shoes on ankle inversion. *Journal of Athletic Training*, 35(1), 38–43.
- Robertson, C. M., Williams, S., West, S. W., Starling, L., Kemp, S., Cross, M., & Stokes, K. A. (2022). Influence of playing surface on match injury risk in men's professional rugby union in England (2013-2019). *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 32(11), 1615–1624. <https://doi.org/10.1111/sms.14226>
- Schrier, N., Wannop, J. W., Worobets, J. T., & Stefanyshyn, D. J. (2022). Influence of compliance and aging of artificial turf surfaces on lower extremity joint loading. *Biomechanics*, 2(1), 66–75. <https://doi.org/10.3390/biomechanics2010007>
- Schrier, N. M., Wannop, J. W., Lewinson, R. T., Worobets, J., & Stefanyshyn, D. (2014). Shoe traction and surface compliance affect performance of soccer-related movements. *Footwear Science*, 6(2), 69–80. <https://doi.org/10.1080/19424280.2014.886302>
- Serensits, T. J., & McNitt, A. S. (2014). Comparison of rotational traction of athletic footwear on varying playing surfaces using different normal loads. *Applied Turfgrass Science*, 11(1), ATS-2013-0073-RS. <https://doi.org/10.2134/ATS-2013-0073-RS>
- Serner, A., Mosler, A. B., Tol, J. L., Bahr, R., & Weir, A. (2019). Mechanisms of acute adductor longus injuries in male football players: a systematic visual video analysis. *British Journal of Sports Medicine*, 53(3), 158–164. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2018-099246>

- Silva, D. C. F., Santos, R., Vilas-Boas, J. P., Macedo, R., Montes, A. M., & Sousa, A. S. P. (2017). Influence of cleats-surface interaction on the performance and risk of injury in soccer: a systematic review. *Applied Bionics and Biomechanics*, 2017, 1305479. <https://doi.org/10.1155/2017/1305479>
- Silva, D. C. F., Santos, R., Vilas-Boas, J. P., Macedo, R., Montes, A., & Sousa, A. S. (2017). The influence of different soccer cleat type on kinetic, kinematic and neuromuscular ankle variables in artificial turf. *Footwear Science*, 9(1), 21 – 31. <https://doi.org/10.1080/19424280.2016.1240246>
- Smoliga, J. M., Deshpande, S. K., & Binney, Z. O. (2023). Interaction of surface type, temperature, and week of season on concussion risk in the national football league: a bayesian analysis. *Epidemiology*, 34(6), 807 – 816. <https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000001657>
- Stefanyshyn, D. J., & Wannop, J. W. (2016). The influence of forefoot bending stiffness of footwear on athletic injury and performance. *Footwear Science*, 8(2), 51 – 63. <https://doi.org/10.1080/19424280.2016.1144652>
- Steffen, K., Andersen, T. E., & Bahr, R. (2007). Risk of injury on artificial turf and natural grass in young female football players. *British Journal of Sports Medicine*, 41(1), I33-I37. <https://doi.org/10.1136/bjsm.2007.036665>
- Stojanović, E., Faude, O., Nikić, M., Scanlan, A. T., Radovanović, D., & Jakovljević, V. (2023). The incidence rate of ACL injuries and ankle sprains in basketball players: A systematic review and meta-analysis. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 33(6), 790 – 813. <https://doi.org/10.1111/sms.14328>
- Szymiski, D., Achenbach, L., Zellner, J., Weber, J., Koch, M., Zeman, F., Huppertz, G., Pfeifer, C., Alt, V., & Krutsch, W. (2022). Higher risk of ACL rupture in amateur football compared to professional football: 5-year results of the „Anterior cruciate ligament-registry in German football“. *Knee Surgery Sports Traumatology Arthroscopy*, 30(5), 1776 – 1785. <https://doi.org/10.1007/s00167-021-06737-y>
- Takemura, M., Schneiders, A. G., Bell, M. L., & Milburn, P. D. (2007). Association of ground hardness with injuries in rugby union. *British Journal of Sports Medicine*, 41(9). <https://doi.org/10.1136/bjsm.2007.035568>
- Thomson, A., Bleakley, C., Holmes, W., Hodge, E., Paul, D., & Wannop, J. W. (2022). Rotational traction of soccer football shoes on a hybrid reinforced turf system and natural grass. *Footwear Science*, 14(1), 58 – 69. <https://doi.org/10.1080/19424280.2022.2038690>
- Thomson, A., Whiteley, R., & Bleakley, C. (2015). Higher shoe-surface interaction is associated with doubling of lower extremity injury risk in football codes: a systematic review and meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine*, 49(19), 1245 – 1252. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2014-094478>
- Thomson, A., Whiteley, R., Wilson, M., & Bleakley, C. (2019). Six different football shoes, one playing surface and the weather; Assessing variation in shoe-surface traction over one season of elite football. *PLOS One*, 14(4), e0216364. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0216364>

- Venishetty, N., Xiao, A., Ghant, R., Reddy, R., Pandya, N., & Feeley, B. (2024). Poster 373: Lower extremity injury rates on turf vs. natural grass surfaces – an analysis of professional football athletes in the 2021 and 2022 seasons. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 12(7, Suppl. 2). <https://doi.org/10.1177/2325967124s00338>
- Verhagen, E., Clarsen, B., van der Graaff, L., & Bahr, R. (2024). Do not neglect injury severity and burden when assessing the effect of sports injury prevention interventions: time to paint the whole picture. *British Journal of Sports Medicine*, 58(20), 1166 – 1169. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2024-108215>
- Villwock, M. R., Meyer, E. G., Powell, J. W., Fouty, A. J., & Haut, R. C. (2009). Football playing surface and shoe design affect rotational traction. *The American Journal of Sports Medicine*, 37(3), 518 – 525. <https://doi.org/10.1177/0363546508328108>
- Wannop, J. W., Luo, G., & Stefanyshyn, D. J. (2012). Footwear traction at different areas on artificial and natural grass fields. *Sports Engineering*, 15(2), 111 – 116. <https://doi.org/10.1007/s12283-012-0091-x>
- Wannop, J. W., Luo, G., & Stefanyshyn, D. J. (2013). Footwear traction and lower extremity noncontact injury. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 45(11), 2137 – 2143. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e318299ac56>
- Wannop, J. W., & Stefanyshyn, D. J. (2016). The effect of translational and rotational traction on lower extremity joint loading. *Journal of Sports Sciences*, 34(7), 613 – 620. <https://doi.org/10.1080/02640414.2015.1066023>
- Wannop, J. W., Worobets, J. T., & Stefanyshyn, D. J. (2010). Footwear traction and lower extremity joint loading. *The American Journal of Sports Medicine*, 38(6), 1221 – 1228. <https://doi.org/10.1177/0363546509359065>
- Wannop, J. W., Foreman, T., Madden, R., & Stefanyshyn, D. (2019). Influence of the composition of artificial turf on rotational traction and athlete biomechanics. *Journal of Sports Sciences*, 37(16), 1849 – 1856. <https://doi.org/10.1080/02640414.2019.1598923>
- Wannop, J. W., Killick, A., Madden, R., & Stefanyshyn, D. J. (2017). Influence of the composition of artificial turf on rotational traction and athlete biomechanics. *Footwear Science*, 9(sup1), S40 – S42. <https://doi.org/10.1080/19424280.2017.1314325>
- Wannop, J. W., Luo, G., & Stefanyshyn, D. (2011). Footwear traction and lower extremity non-contact injury. *Footwear Science*, 3(sup1), S166 – S167. <https://doi.org/10.1080/19424280.2011.575832>
- Wannop, J. W., Schrier, N., Worobets, J., & Stefanyshyn, D. (2023). Influence of forefoot bending stiffness on American football performance and metatarsophalangeal joint bending angle. *Sports Biomechanics*, 22(5), 704 – 714. <https://doi.org/10.1080/14763141.2020.1750682>
- Wei, Q., Wang, Z., Woo, J., Liebenberg, J., Park, S.-K., Ryu, J., & Lam, W.-K. (2018). Kinetics and perception of basketball landing in various heights and footwear cushioning. *PLOS One*, 13(8), e0201758. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201758>
- West, S. W., Hudson, S. J., Starling, L., Cross, M., Williams, S., McKay, C. D., Cazzola, D., Brooks, J. H. M., Murray, R., Williams, A., Kemp, S. P. T., & Stokes, K. A. (2024). Twenty year analysis of professional men's rugby union knee injuries from the English premiership shows high rates and burden. *British Journal of Sports Medicine*, 58(24), 1496 – 1504. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2024-108639>

- Williams, J. H., Akogyrem, E., & Williams, J. R. (2013). A meta-analysis of soccer injuries on artificial turf and natural grass. *Journal of Sports Medicine*, 2013, 380523. <https://doi.org/10.1155/2013/380523>
- Williams, S., Hume, P. A., & Kara, S. (2011). A review of football injuries on third and fourth generation artificial turfs compared with natural turf. *Sports Medicine*, 41(11), 903 – 923. <https://doi.org/10.2165/11593190-000000000-00000>
- Xiao, M., Lemos, J. L., Hwang, C. E., Sherman, S. L., Safran, M. R., & Abrams, G. D. (2022). Increased risk of ACL injury for female but not male soccer players on artificial turf vs. natural grass: a systematic review and meta-analysis. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 10(8). <https://doi.org/10.1177/23259671221114353>
- Yu, B., & Garrett, W. E. (2007). Mechanisms of non-contact ACL injuries. *British Journal of Sports Medicine*, 41(Suppl 1), i47 – 51. <https://doi.org/10.1136/bjsm.2007.037192>
- Zech, A., Hollander, K., Junge, A., Steib, S., Groll, A., Heiner, J., Nowak, F., Pfeiffer, D., & Rahlf, A. L. (2022). Sex differences in injury rates in team-sport athletes: A systematic review and meta-regression analysis. *Journal of Sport and Health Science*, 11(1), 104 – 114. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2021.04.003>



www.bisp.de
Bundesinstitut für Sportwissenschaft
Graurheindorfer Straße 198 · 53117 Bonn
info@bisp.de



Wir helfen
dem Sport