



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

Technische Universität Chemnitz

Fakultät für Human- und Sozialwissenschaften

Institut für Angewandte Bewegungswissenschaften

Masterarbeit

zum Thema

Auswirkungen des natürlichen Menstruationszyklus im Vergleich zur oralen Kontrazeption auf die mechanischen Eigenschaften von Bindegeweben

Zur Erlangung des Grades Master of Science

Eingereicht von: Wella Oehme

Matrikel-Nr.: 385668

Geboren am: 17.05.1996

in: Freiberg

Studiengang: Gesundheits- und Fitnesssport

Tag der Ausgabe: 01.07.2019

Tag der Abgabe: 09.12.2019

Erstgutachter: Nicolai Kram

Zweitgutachter: Freddy Sichtung

Danksagung

Ich möchte mich bei meinen Freunden für die vielen gemeinsamen Stunden und den Zusammenhalt während des Studiums bedanken. Ein besonderes Dankeschön geht an meine Familie, die mich während des Studiums immer unterstützt hat.

Im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit möchte ich mich bei allen Probandinnen für die Teilnahme an der Untersuchung bedanken. Einen speziellen Dank möchte ich meinem Betreuer Nicolai Kram aussprechen, der mich bereits während der Bachelorarbeit begleitet hat und mir immer mit Rat und Tat zur Seite stand.



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

Prüfungsausschuss des Studiengangs
Master Gesundheits- und Fitnesssport
Prüfungsausschussvorsitzender

Technische Universität Chemnitz · 8 ZPA · D-09107 Chemnitz

Aktenzeichen: 385668

Frau
Wella Oehme
Hauptstraße 20
09600 Weißenborn

Bearbeiter: Daniela Vogelsang
Gebäude: Reichenhainer Str. 70, C-Bau
Telefon: +49 (0)371 531-37243
Fax: +49 (0)371 531-77709
Email: zpa1@verwaltung.tu-chemnitz.de
Internet: www.tu-chemnitz.de/studentenservice/

Ort, Datum: Chemnitz, 24.07.2019

Aufgabenstellung

Sehr geehrte Frau Oehme,

Ihr Antrag zur Abschlussarbeit wurde vom Prüfungsausschuss genehmigt.

Thema:
Auswirkungen des natürlichen Menstruationszyklus im Vergleich zur oralen Kontrazeption auf die mechanischen Eigenschaften von Bindegeweben

Ausgabedatum: 01.07.2019
Abgabedatum: 09.12.2019
Prüfer: Nicolai Kram
Prüfer: Dr. Freddy Sichtung

Die Abschlussarbeit ist in zwei Exemplaren in maschinenschriftlicher und gebundener Ausfertigung sowie zusätzlich als elektronische Datei im Zentralen Prüfungsamt abzugeben. Eine Selbstständigkeitserklärung ist einzubinden.

Mit freundlichen Grüßen
Im Auftrag

Daniela Vogelsang
Zentrales Prüfungsamt

Bibliographische Angaben

Fakultät: Human- und Sozialwissenschaften

Studiengang: Gesundheits- und Fitnesssport

Verfasser: Wella Oehme

Titel: Auswirkungen des natürlichen Menstruationszyklus im Vergleich zur oralen
Kontrazeption auf die mechanischen Eigenschaften von Bindegeweben

Art der Arbeit: Masterarbeit

Umfang¹: 91

Quellen²: 157

Abbildungen: 22

Tabellen: 13

Anlagen: 11

¹ Seitenzahl des inhaltlichen Anteils der Arbeit.

² Zahl der im Literaturverzeichnis ausgewiesenen Literaturangaben.

Kurzreferat/Abstract

Das Risiko für Frauen, eine kontaktlose Verletzung des vorderen Kreuzbandes zu erleiden, ist um ein Vielfaches höher als für Männer. Forschungen der letzten Jahre haben ergeben, dass möglicherweise die unterschiedliche hormonelle Situation im Körper von Männern und Frauen Grund für das ungleiche Verletzungsrisiko sein könnte. Insbesondere Östrogen, Progesteron und Relaxin scheinen als Hormone das Potenzial zu besitzen, die mechanischen Eigenschaften von faserigen Bindegeweben zu beeinflussen. Bis zum jetzigen Zeitpunkt gibt es einige Studien, welche sich mit der Veränderung der Laxizität des vorderen Kreuzbandes im Verlauf des weiblichen Menstruationszyklus auseinandersetzen. Ebenso wurde der Einfluss einer oralen Kontrazeption auf die mechanischen Eigenschaften des vorderen Kreuzbandes betrachtet. Jedoch gibt es nur wenige Studien, die mehr als eine Bindegewebsstruktur am gleichen Probandenkollektiv mit einer hohen Messdichte untersucht haben. Diese Forschungslücke soll die vorliegende Arbeit schließen. Über einen Untersuchungszeitraum von fünf Wochen werden fünfzehn Verlaufsmessungen während eines Zyklus vorgenommen. Verwendet wird das Myoton, welches die Steifigkeit der Plantarapponose, der Achillessehne, der Patellasehne und des m. rectus femoris misst. Außerdem werden zwei Gruppen voneinander unterschieden: eine Versuchsgruppe mit Probandinnen, welche einen natürlichen Zyklus (NZ) haben, und eine Kontrollgruppe mit Frauen, die orale Kontrazeptive (OK) zur Empfängnisverhütung nutzen. Insgesamt nahmen an der Studie 21 Probandinnen teil (NZ: n = 13, OK: n = 8), welche sich aus Studentinnen und wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen der TU Chemnitz zusammensetzen.

Bei keinem der erhobenen Parameter konnten signifikante Ergebnisse erbracht werden. Es konnte jedoch eine Tendenz dahingehend gezeigt werden, dass die Gruppe der oralen Kontrazeption (OK) über die gemessenen Gewebe bis auf die Achillessehne im Mittel eine größere Steifigkeit zeigt als die Gruppe mit natürlichem Zyklus (NZ). Zudem weist die Gruppe der Frauen mit natürlichem Zyklus tendenziell größere Schwankungen in den Messwerten der einzelnen Gewebe auf.

Ursächlich für diese Tendenzen könnte die Einnahme der Pille sein, welche durch einen konstanten Hormonspiegel Veränderungen in der Kollagensynthese an faserigen Bindegeweben bedingen könnte. Jedoch könnten ebenso andere Faktoren wie Nährstoffaufnahme, Wasserhaushalt oder Aktivitätslevel der Probandinnen die Ergebnisse beeinflusst haben. Rückschlüsse im Hinblick auf ein potenzielles Verletzungsrisiko konnten nicht gezogen werden.

Kurzreferat/Abstract

The risk for women to suffer a contactless injury of the anterior cruciate ligament is many-times higher than for men. Research in recent years has shown that the different hormonal situation in men's and women's bodies may be the reason for the unequal risk of injury. Especially the hormones estrogen, progesterone and relaxin seem to have the potential to influence the mechanical properties of fibrous connective tissues. Up to now there are several studies which deal with changes in the laxity of the anterior cruciate ligament during the female menstrual cycle. The influence of the contraceptive pill on the mechanical properties of the anterior cruciate ligament was also considered. However, there are only a few studies that have investigated more than one connective tissue structure in the same group of test persons with a high measurement density. This research gap is to be closed by the present work. Over an investigation period of five weeks, fifteen course measurements are made during a cycle with the myoton, which measures the stiffness of the plantar aponeurosis, the Achilles tendon, the patellar tendon and the M. rectus femoris. In addition, two groups are distinguished from each other: an experimental group with test subjects who have a natural cycle (NZ) and a control group with women who use oral contraception (OK) for contraception. A total of 21 subjects participated in the study (NZ: n = 13, OK: n = 8), which consists of female students and scientific staff of the TU Chemnitz.

No significant results could be obtained for any of the parameters. However, a tendency could be shown that the group of oral contraception (OK) via the measured tissues up to the Achilles tendon showed a greater stiffness on average than the group with natural cycle (NZ). In addition, the group of women with a natural cycle tended to show greater fluctuations in the measured values of the individual tissues.

The reason for these tendencies could be the intake of the pill, which could cause changes in the collagen synthesis of fibrous connective tissue due to a constant hormone level. However, other factors such as nutrient uptake, water balance or activity levels of the test subjects may also have influenced the results. Conclusions regarding a potential risk of injury could not be drawn.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis.....	V
Abkürzungsverzeichnis.....	VI
1 Einleitung: Thematik und Relevanz.....	1
2 Funktionelle Anatomie von faserigen Bindegeweben.....	4
2.1 Allgemeiner zellulärer und extrazellulärer Aufbau	4
2.2 Sehnen.....	8
2.2.1 Anatomie und Funktion.....	8
2.2.2 Achillessehne.....	12
2.2.3 Patellasehne	12
2.3 Bänder	13
2.3.1 Anatomie und Funktion	13
2.3.2 Vorderes Kreuzband	16
2.4 Apponeurosen	17
2.4.1 Anatomie und Funktion.....	17
2.4.2 Plantarapponeurose	17
3 Physiologie des weiblichen Zyklus	21
3.1 Physiologie und Bedeutung.....	21
3.1.1 Eizelle.....	21
3.2 Zusammenspiel der Hormone des weiblichen Zyklus.....	22
3.3 Phasen des weiblichen Zyklus	24
3.3.1 Menstruation (Tag 0-5).....	24
3.3.2 Follikularphase (Tag 0-14)	24
3.3.3 Ovulationsphase (Tag 14)	25
3.3.4 Lutealphase (Tag 14-28)	25
3.4 Das prämenstruelle Syndrom	26
3.5 Studienlage zu körperlicher Aktivität und weiblichem Zyklus	27
3.6 Orale Kontrazeption.....	27

4	Hormoneller Einfluss des weiblichen Zyklus auf die mechanischen Eigenschaften von faserigem Bindegewebe	29
4.1	Einfluss von Östrogen	29
4.2	Einfluss von Relaxin	31
4.3	Wachstumsfaktoren und sonstige Einflussfaktoren	32
4.4	Einfluss einer oralen Kontrazeption.....	33
4.5	Differenzierte Betrachtung spezifischer Bindegewebe.....	34
4.5.1	Vorderes Kreuzband	34
4.5.2	Achillessehne	35
4.5.3	Patellasehne	36
4.5.4	Plantarapponeurose	36
4.5.5	Fasziale Strukturen	36
4.6	Erklärungsmodell für den Einfluss von Hormonen auf die Veränderung der mechanischen Eigenschaften von faserigen Bindegeweben.....	38
5	Fragestellung und Hypothesen.....	43
6	Methodik.....	46
6.1	Studienplanung.....	46
6.2	Probandenkollektiv.....	48
6.3	Messzeitpunkte	50
6.4	Untersuchungsablauf	51
6.5	Messmethodik.....	51
6.5.1	Myoton	51
6.5.2	Identifizierung der Messpunkte	54
6.5.3	Positionierung der Probandin.....	56
6.6	Voruntersuchungen	58
7	Datenaufbereitung und statistische Auswertung	60
8	Ergebnisse	61
8.1	Steifigkeit mittels Myoton.....	61
8.1.1	Verlaufskurven der Steifigkeit	61
8.1.2	Ergebnisse der statistischen Auswertung für die Zyklusphasen.....	63
8.1.3	Statistische Auswertung der gemessenen Gewebe über den gesamten Zyklus	68

8.2	Temperaturkurvenverlauf	71
9	Diskussion	72
9.1	Vorbemerkung	72
9.2	Ergebnisdiskussion	72
9.2.1	Steifigkeit	72
9.2.2	Einfluss oraler Kontrazeptiva	75
9.2.3	Zeitpunkt des Zyklus	78
9.2.4	Verletzungsrisiko	80
9.2.5	Temperatur	81
9.3	Zusammenfassung	82
10	Methodenkritik	84
10.1	Untersuchungszeitpunkte	84
10.2	Messvorrichtung	84
10.3	Myoton	85
10.4	Temperaturmessung	87
11	Limitationen	89
12	Fazit und Ausblick	90
13	Literaturverzeichnis	92
14	Selbstständigkeitserklärung	106
15	Anhang	107

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Fibroblast und die von ihm gebildeten Bestandteile der Extrazellulärmatrix (entnommen aus Schünke, 2014. p. 19).....	6
Abbildung 2: Schematische Darstellung des Aufbaus einer Sehne (entnommen aus Wang, 2006).....	10
Abbildung 3: Allgemeiner Aufbau eines Ligaments (entnommen aus Bray et al., 2005).....	15
Abbildung 4: Struktureller Aufbau der Plantarapponeurose (entnommen aus Wearing et al., 2006).....	18
Abbildung 5: Steifigkeit fasriger Bindegewebe des menschlichen Körpers (entnommen aus Wearing et al., 2006).....	20
Abbildung 6: Belastbarkeit fasriger Bindegewebe des menschlichen Körpers (entnommen aus Wearing et al., 2006).....	20
Abbildung 7: Schema zum Verlauf der Hormonlevelkonzentration (eigene Abbildung).....	26
Abbildung 8: Schematische Darstellung des Erklärungsmodells.....	42
Abbildung 9: Myoton (entnommen aus Peipsi et al., 2012).....	53
Abbildung 10: Messpunkt für die Plantarapponeurose (eigene Abbildung).....	54
Abbildung 11: Messpunkt für die Achillessehne (eigene Abbildung).....	55
Abbildung 12: Messpunkte für Patellasehne und m. rectus femoris (eigene Abbildung).....	56
Abbildung 13: Messapparatur für die Messung von AS, PS, RF (eigene Abbildung).....	58
Abbildung 14: Steifigkeit der Achillessehne im Verlauf, Probandin der Gruppe mit natürlichem Zyklus.....	61
Abbildung 15: Steifigkeit der Achillessehne im Verlauf, Probandin der Gruppe mit oraler Kontrazeption.....	62
Abbildung 16: Verlauf der Steifigkeit der Achillessehne in Abhängigkeit der prozentualen Zykluslänge.....	62
Abbildung 17: Verlauf der Steifigkeit der Achillessehne in Abhängigkeit der prozentualen Zykluslänge.....	63
Abbildung 18: Steifigkeit der Plantarapponeurose im Vergleich zwischen NZ und OK zu den Zeitpunkten Menstruation (ME), Eisprung (ES) und Lutealphase (LP).....	65
Abbildung 19: Steifigkeit der Patellasehne im Vergleich zu NZ und OK zu den Zeitpunkten Menstruation (ME), Eisprung (ES) und Lutealphase (LP).....	66
Abbildung 20: Steifigkeit der Patellasehne im Vergleich zu NZ und OK zu den Zeitpunkten Menstruation (ME), Eisprung (ES) und Lutealphase (LP).....	67
Abbildung 21: Mittlere Steifigkeiten von PA, AS, PS, RF im Vergleich zwischen den Versuchsgruppen.....	70

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 22: Temperaturverlauf während des Zyklus einer Probandin aus der Gruppe mit natürlichem Zyklus	71
--	----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über den Ausschüttungsort der einzelnen Hormone (eigene Abbildung)	23
Tabelle 2: Übersicht zur Wirkung von Hormonen auf Bindegewebeigenschaften (eigene Darstellung).....	37
Tabelle 3: Deutsche und englische Suchbegriffe	46
Tabelle 4: Vergleich von Versuchs- und Kontrollgruppe.....	50
Tabelle 5: P-Werte des Shapiro-Wilk-Tests zur Prüfung auf Normalverteilung	64
Tabelle 6: p-Werte des t-Tests für abhängige Stichproben für die Gruppe des natürlichen Zyklus.....	64
Tabelle 7: p-Werte des t-Tests für abhängige Stichproben der Gruppe mit oraler Kontrazeption	66
Tabelle 8: P-Werte des Welch-Tests zwischen den beiden Versuchsgruppen	67
Tabelle 9: p-Werte des Shapiro-Wilk-Tests beider Gruppen über alle gemessenen Gewebe	68
Tabelle 10: p-Werte des t-Tests für abhängige Stichproben über den gesamten Zyklus der gemessenen Gewebe der Gruppe mit natürlichem Zyklus	69
Tabelle 11: p-Werte des t-Tests für abhängige Stichproben über den gesamten Zyklus der gemessenen Gewebe für die Gruppe der oralen Kontrazeption.....	69
Tabelle 12: Statistische Auswertung zwischen den Versuchsgruppen für die gemessenen Gewebe.....	69
Tabelle 13: Variationskoeffizienten von PA, AS, PS und RF im Vergleich zwischen der Gruppe mit natürlichem Zyklus (NZ) und oraler Kontrazeption (OK)	70

Abkürzungen

Abkürzungen

AS	Achillessehne
FSH	follikelstimulierende Hormone
GF	Gesundheits- und Fitnesssport
GnRH	Gonadotropin-Releasing-Hormon
HVL	Hypophysenvorderlappen
LH	luteinisierendes Hormon
MA	Masterarbeit
NZ	natürlicher Zyklus
OK	orale Kontrazeption
PA	Plantarapponeurose
PS	Patellasehne
RF	musculus rectus femoris

1 Einleitung: Thematik und Relevanz

Weibliche Athleten verletzen sich 2,4- bis 9,5- mal häufiger am vorderen Kreuzband als Männer. 70 % dieser Verletzungen entstehen ohne direkte äußerliche Einwirkung (Petersen et al., 2005). Was sind Gründe für ein erhöhtes Verletzungsrisiko von Frauen im Vergleich zu Männern? Mit dieser Fragestellung haben sich in den letzten Jahren viele Forscher und Arbeitsgruppen auseinandergesetzt. Eine potenzielle Antwort auf diese Frage könnte die unterschiedliche geschlechtsspezifische hormonelle Situation im Körper von Frauen und Männern sein. Insbesondere ist bei Frauen nach der Pubertät und vor der Menopause der weibliche Zyklus durch ein Zusammenwirken von unterschiedlichen Hormonen wie Östrogen oder Progesteron gesteuert (Thiyagarajan and Jeanmonod, 2018). Es wird darauf hingewiesen, dass Frauen um den Zeitpunkt des Eisprungs besonders verletzungsanfällig sind (Eiling et al., 2006). Untersuchungen zu dieser Thematik konnten die Existenz von Rezeptoren im vorderen Kreuzband nachweisen, welche auf die Hormone Östrogen, Progesteron und Relaxin reagieren (Liu et al., 1997; Wojtys et al., 2002). Diese Hormone scheinen das Potenzial zu besitzen, die mechanischen Eigenschaften von faserigem Bindegewebe zu beeinflussen. Dementsprechend steht eine verminderte Steifigkeit des vorderen Kreuzbandes in Zusammenhang mit einer erhöhten Laxizität dieser Struktur, wodurch sich ein erhöhtes Verletzungsrisiko ergibt (Hewett et al., 2007a). Demgegenüber wird auch die Position vertreten, dass kein Zusammenhang zwischen der Knielaxizität und der Phase des Zyklus existiert (Hertel et al., 2006). Hinzu kommt, dass Sehnen einem anderen Anpassungsmechanismus als Bänder unterliegen könnten. Denn im Gegensatz zum vorderen Kreuzband ist das Verletzungsrisiko für Frauen an der Achillessehne deutlich geringer, als das bei Männern der Fall ist (Vosseller et al., 2013). Dabei wirkt sich in diesem Fall der Einfluss von Östrogen durch einen spannungsreduzierenden Effekt schützend auf das Gewebe aus (Bryant et al., 2008). Dieses Beispiel erhärtet den Verdacht, dass Sehnen und Bänder unterschiedlich auf den Einfluss von Hormonen reagieren könnten. Dieser Aspekt verdeutlicht die bestehende Forschungslücke zum Einfluss von Hormonen auf die mechanischen Eigenschaften von faserigen Bindegeweben. Für künftige Forschungsarbeiten könnte dadurch vor allem eine differenzierte Betrachtung von Sehnen und Bändern sowie der Untersuchungszeitpunkt, insbesondere bei weiblichen Probanden, relevant sein.

Ebenso kontrovers diskutiert wird die Einnahme der Pille und damit verbundene Anpassungsphänomene an Sehnen und Bändern. Untersuchungen deuten auf eine verringerte Steifigkeit der Achillessehne durch die Nutzung von oralen Kontrazeptiva hin (Bryant et al., 2008). Dies wird mit dem hemmenden Effekt der Pille auf die Kollagensynthese begründet (Hansen et al., 2009a). Dieser Aspekt könnte außerdem ursächlich für ein verringertes Verletzungsrisiko von Frauen sein, welche orale Kontrazeptiva nehmen, im Vergleich zu jenen,

die einen natürlichen Zyklus haben (Herzberg et al., 2017). Im Gegensatz dazu wird vertreten, dass eine Einnahme der Pille keine Auswirkungen auf die Steifigkeit der Patellasehne hat (Hansen et al., 2013a). Beide Aussagen im Hinblick auf die Nutzung von oralen Kontrazeptiva belegen nicht nur eine Auswirkung der Pille auf das Bindegewebe, sondern verdeutlichen erneut die Kontroverse zwischen Sehnen und Bändern. Die Reaktion von Geweben auf hormonelle Verhütungsmittel sind für viele Frauen relevant, denn jede zweite Frau im Alter zwischen 18 und 49 Jahren verwendet die Pille zur Empfängnisverhütung (Heßling and Bundeszentrale für Gesundheitliche Aufklärung, 2011). Die natürliche Schwankung des Hormonlevels im Blut der Frau wird durch die Einnahme der Pille unterdrückt. Dauerhaft hohe Hormonspiegel hemmen die Abgabe von GnRH aus dem Hypothalamus und verhindern so einen Eisprung (Schwegler and Lucius, 2016, p. 472). Damit ist das faserige Bindegewebe von Frauen, welche die Pille nutzen, einer anderen hormonellen Situation ausgesetzt als das bei Frauen der Fall ist, die keine Kontrazeptiva zu sich nehmen. Das Wissen darüber, inwiefern das Bindegewebe auf hormonelle Verhütungsmittel anders reagiert, ist ebenso für künftige Untersuchungen relevant, denn Probandinnen, welche die Pille nutzen, müssten gesondert betrachtet werden. Darüber hinaus könnten fundierte Empfehlungen zur Verletzungsprävention von Frauen möglich sein. Damit zeigt das Thema bei weiblichen Athleten nicht nur im trainingswissenschaftlichen Kontext oder im Freizeit- und Leistungssportbereich seine Relevanz, sondern auch im Hinblick auf Frauen, die in Berufen tätig sind, welche eine große Belastung für Sehnen und Bänder darstellen. Mit dem Wissen eines bestehenden Verletzungsrisikos könnte zudem jede Frau in bestimmten Zyklusphasen eine eigene Verletzungsprävention betreiben. Die aufgeführte Fachliteratur verdeutlicht die Unstimmigkeiten über den Effekt der Einnahme der Antibabypille auf die mechanischen Eigenschaften des Bindegewebes und der damit verbundenen Verletzungsanfälligkeit (Hansen et al., 2009b; Hewett et al., 2007b). Aus den Informationen der vorherigen Abschnitte ergeben sich für die vorliegende Arbeit folgende Fragestellungen: Wie beeinflusst ein natürliches Zyklusverhalten im Vergleich zu einem Zyklus, welcher durch die Einnahme von oralen Kontrazeptiva weniger Hormonschwankungen ausgesetzt ist, die Eigenschaften von Sehnen und Bändern? Sind Sehnen und Bänder unterschiedlichen Anpassungsphänomenen ausgesetzt?

Um den Einfluss von Hormonen auf faserige Bindegewebe, aber auch die Reaktion dieser Gewebe auf den Einfluss von oralen Kontrazeptiva untersuchen zu können, werden Frauen mit einem natürlichen Zyklus, und Frauen, welche die Pille nutzen, für die vorliegende Untersuchung akquiriert. Um die Anpassungsphänomene von faserigen Bindegeweben differenziert betrachten zu können, werden insgesamt fünfzehn Messungen von Achillessehne, Patellasehne, Plantarapponurose sowie dem m. rectus femoris eines Zyklus über einen Zeitraum von fünf Wochen vorgenommen. Eine potenzielle Veränderung der genannten Bindegewebe wird mit dem Myoton Pro bestimmt. Dieses Messgerät gibt Aufschluss über die Stei-

figkeit von verschiedenen Geweben, welche in N/m angegeben wird. Bis zum jetzigen Zeitpunkt wurde vermehrt das vordere Kreuzband untersucht. In dieser Arbeit soll vor allem die Wirkung von Hormonen auf Sehnen betrachtet werden. Die Untersuchung der Plantarapponneurose ist ein Versuch, weitere Bindegewebsstrukturen abzubilden. Sie wird als eine bandähnliche Struktur betrachtet, um einen vergleichenden Rückschluss auf Bänder vornehmen zu können (Petrofsky and Lee, 2015). Unter den genannten Aspekten soll die vorliegende Arbeit dazu dienen, bestehende Forschungslücken zu schließen. Auf Sehnen und Bänder und auf die Auswirkungen im Verlauf des weiblichen Zyklus mit der Unterscheidung in eine Gruppe mit natürlichem Zyklus (NZ) und eine Kontrollgruppe, welche orale Kontrazeptiva (OK) einnimmt, soll näher eingegangen werden. Hinzu kommt, dass das Myoton als Messgerät für die Steifigkeit der faserigen Bindegewebe verwendet wird. Dies ermöglicht zeitsparende Messungen und bietet außerdem den Vorteil, dass viele Messungen vorgenommen werden können, da es in der Lage ist, Sehnen, Bänder aber auch Muskeln in Bezug auf deren Steifigkeit zu messen. Dementsprechend kann eine potenzielle Auswirkung von Hormonen auf die verschiedenen Bindegewebe mit einem Messgerät vorgenommen werden. Aufgrund der zu dieser Thematik vorliegenden Fachliteratur wird angenommen, dass sich die beiden Gruppen voneinander unterscheiden, aber dass es ebenso innerhalb der Gruppen im Verlauf des Zyklus zu Unterschieden kommt. Die Vermutung liegt nahe, dass sich die größten Differenzen um den Zeitpunkt der Ovulation zeigen werden. Es besteht die Annahme, dass Bänder und Sehnen im Vergleich zur Baseline (Menstruation) eine niedrigere Steifigkeit aufweisen. Dieser Unterschied sollte besonders in der Gruppe Frauen, welche keine oralen Verhütungsmittel nehmen, zu beobachten sein. Das Wissen über eine Beeinflussung der Steifigkeit von Bindegeweben durch Hormone und ein damit verbundenes höheres Verletzungsrisiko in bestimmten Phasen des weiblichen Zyklus könnte zur Verletzungsprävention genutzt werden. Damit könnten auch Trainer weiblicher Sportler gezielter auf die Bedürfnisse ihrer Athletinnen eingehen. Möglicherweise könnte sich das Myoton in Zukunft als Messinstrument etablieren, um schnell und kostengünstig individuelle Messwerte aufzuzeigen, wenn die einzelnen Frauen ein erhöhtes Verletzungsrisiko haben. Falls ein entsprechender Zusammenhang von Hormonen auf die Bindegewebeigenschaften besteht, kann künftig ein differenzierter Umgang im Hinblick auf weitere Forschung erfolgen.

2 Funktionelle Anatomie von faserigen Bindegeweben

2.1 Allgemeiner zellulärer und extrazellulärer Aufbau

Das vorliegende Kapitel beschäftigt sich mit den Grundlagen faseriger Bindegewebe. Dabei werden der anatomische Aufbau und die Funktion von Sehnen, Bändern und Apponeurosen beschrieben. Außerdem werden zu jeder der genannten Strukturen die für die vorliegende Arbeit spezifischen Gewebe erläutert. Dazu zählen:

- Achillessehne
- Patellasehne
- Vorderes Kreuzband
- Plantarapponurose

Das vordere Kreuzband wird aufgrund der evidenten Forschungslage zum Thema des Einflusses weiblicher Geschlechtshormone beschrieben, wurde aber in der vorliegenden Untersuchung nicht mit gemessen.

Klassifikation

Sehnen und Bänder gehören im Hinblick auf ihre Entwicklung eng zusammen. Beide Gewebe entstammen entwicklungsgeschichtlich dem Mesenchym, einer Form des Bindegewebes, welches noch nicht differenziert ist. Aufgrund des Zuges durch Muskeln sind Sehnen und Bänder in eine Vorzugsrichtung ausgerichtet und gehören damit zum straffen parallel faserigen Bindegewebe (Schünke, 2014, p. 20). Der grundsätzliche Aufbau ist bei beiden Gewebsformen jedoch gleich und wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

Die Grundsubstanz von faserigen Bindegeweben, welche auch als Extrazellulärmatrix bezeichnet wird, besteht zu 55-70 % aus Wasser. Darüber hinaus lassen sich ortsständige Zellen und freie Bindegewebszellen differenzieren. Zu den ortsständigen Zellen gehören Fibrozyten. Wenn diese aktiviert werden, können sie sich in Fibroblasten umwandeln. Durch diese Eigenschaft zeigen sie eine hohe Synthesetätigkeit. Sie bilden unter anderem die ungeformte Grundsubstanz und Faserteilstücke wie beispielsweise das Prokollagen. Zu den freien Bindegewebszellen lassen sich Leukozyten, Lymphozyten, Makrophagen und Mastzellen zuordnen. Ihre Hauptaufgabe besteht darin, Fremdkörper im Bindegewebe abzuwehren (Klein et al., 2011, p. 71-72). Fibroblasten sind außerdem in der Lage, weitere Strukturelemente der Extrazellulärmatrix zu bilden. Dadurch können verschiedene Fasern und Strukturbausteine voneinander unterschieden werden. Erst durch die unterschiedliche Menge, Art und Aufbau dieser Elemente wird eine Differenzierung in unterschiedliche Bindegewebe wie Sehnen und Bänder möglich (Zschäbitz, 2005). In Abbildung 1 ist die Extrazellulärmatrix mit

Funktionelle Anatomie von faserigen Bindegeweben

ihren einzelnen Bestandteilen veranschaulicht. Die Fasertypen können wie folgt unterteilt werden:

- Kollagenfasern
- Elastische Fasern
- Retikuläre Fasern

Die Hauptbestandteile der Grundsubstanz setzen sich anteilig aus folgenden Strukturelementen zusammen (vgl. Abbildung 1):

- interstitielle Flüssigkeit und Makromoleküle
- Glykosaminoglykane
- Proteoglykane
- Glykoproteine (Klein et al., 2011, pp. 70-73).

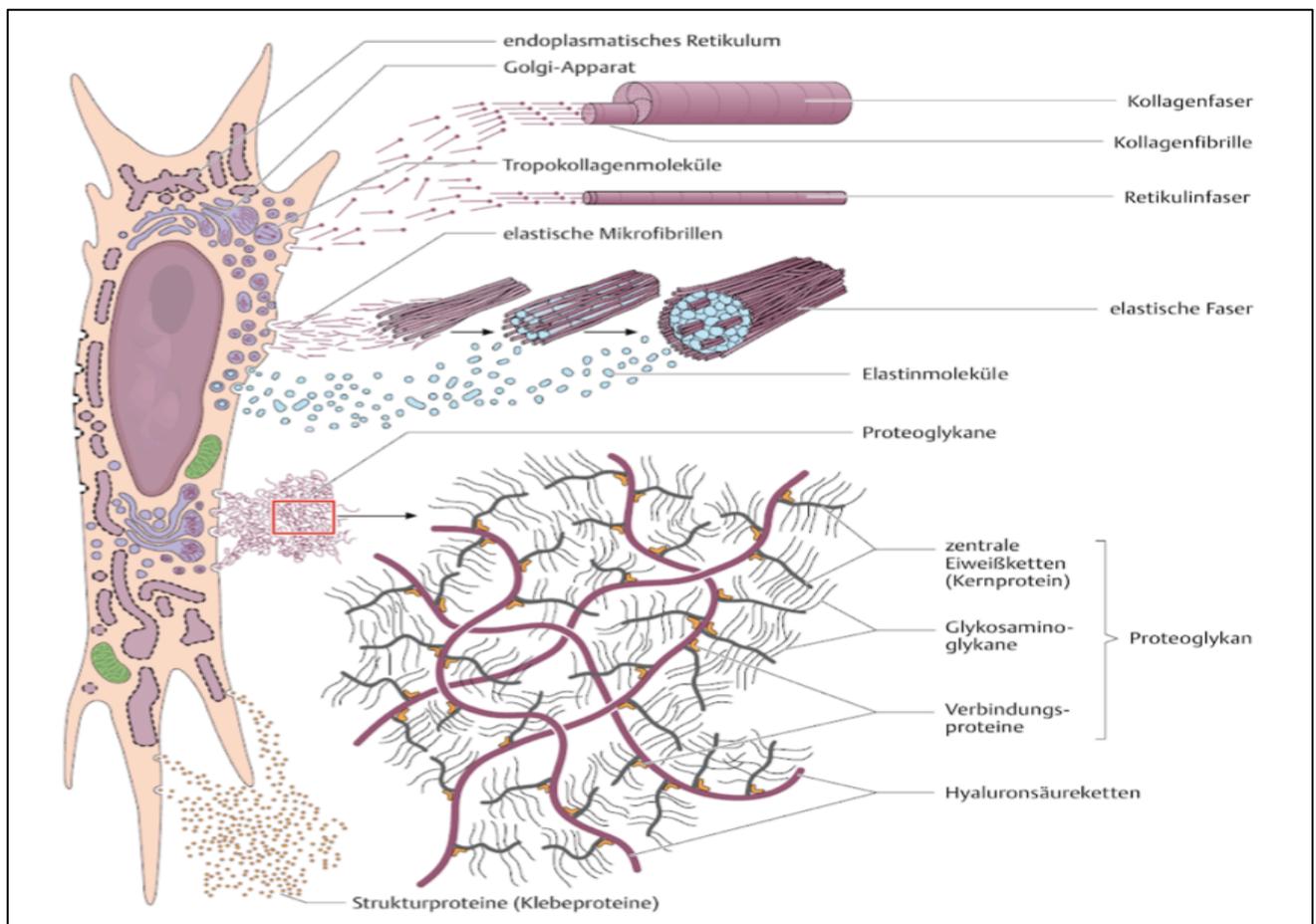


Abbildung 1: Fibroblast und die von ihm gebildeten Bestandteile der Extrazellulärmatrix (entnommen aus Schünke, 2014, p. 19)

Der folgende Abschnitt setzt sich vorerst mit den verschiedenen Fasertypen näher auseinander.

Fasern des Bindegewebes

Die Fasern des Bindegewebes sind in die Grundsubstanz eingelagert und bestimmen das mechanische Verhalten im Hinblick auf Kräfte, die von außen einwirken. Die am häufigsten vorkommenden Fasern im Bindegewebe sind Kollagenfasern. Die Vorstufe von Kollagenfasern ist das Prokollagen, das von Fibrozyten gebildet wird. Aus diesem Prokollagen entsteht Tropokollagen, wie es auch in Abbildung 1 nachvollzogen werden kann, das sich über Mikro- und Subfibrillen zu einer größeren Fibrille bündeln kann, wobei mehrere dieser Fibrillen eine Faser bilden und zu einer Sehne werden. Kollagenfasern besitzen eine sehr hohe Zugfestigkeit (Klein et al., 2011, p. 70). Bisher konnten über zwanzig verschiedene Kollagentypen

nachgewiesen werden. Dieser Aspekt verdeutlicht eine hohe Differenzierungsfähigkeit des Kollagens und zeigt, dass möglicherweise noch andere Kollagentypen existieren. Der vorherrschende Kollagentyp in Bindegewebsfasern ist Kollagen Typ I. Kollagenfasern zeichnen sich durch ihre Dehn- und Verlängerbarkeit aus. Sie nehmen Zugspannungen des umliegenden Gewebes auf. Diese Eigenschaften ermöglichen es, den hohen Beanspruchungen, welchen Sehnen und Bänder ausgesetzt sind, standzuhalten (Schünke, 2014, p. 21). Ebenfalls zu den Fasern des Bindegewebes gehören elastische Fasern, die durch das Protein Elastin gebildet werden. Vom Phänotyp sind sie netzartig und verzweigt. Die Hauptbestandteile der elastischen Fasern sind das gummiartige Protein Elastin sowie elastische Mikrofibrillen. Funktionell betrachtet sind elastische Fasern bis zu 100-150 % ihrer Ausgangslänge dehnbar, damit sind sie um ein Vielfaches dehnbarer als Kollagenfasern. Zudem sind sie im Anschluss an eine Dehnung in der Lage, zu ihrer ursprünglichen Länge zurückzukehren (ebd., 2014, p. 21). Ein weiteres Faserelement sind die Retikulinfasern. Diese sind sternförmig an die retikulären Bindegewebszellen gebunden und bilden so ein dreidimensionales Netz. Durch ihren Phänotyp sind diese Fasern in der Lage, Volumenschwankungen des umliegenden Gewebes zu kompensieren (ebd., 2014, p. 8).

Grundsubstanz

Ein Bestandteil der Grundsubstanz ist die interstitielle Flüssigkeit, die hauptsächlich aus Wasser besteht und für metabolische Vorgänge erforderlich ist. Anteilig sind ebenso Plasmaproteine, Elektrolyte und Hormone enthalten. Die interstitielle Flüssigkeit ist auch für die Ernährung der Bindegewebszellen und den Transport von Stoffen innerhalb der Zelle verantwortlich. Zur Grundsubstanz gehören zudem lange Polysaccharidketten, so genannte Glykosaminoglykane (GAG), sowie das Enzym Lysyl Oxidase, welches an der Vernetzung von benachbarten Aminosäuren beteiligt ist. Der wichtigste Vertreter der GAG ist die Hyaluronsäure, die unter anderem am Aufbau der Proteoglykane beteiligt ist, welche ebenso ein wichtiges Element der Grundsubstanz darstellen. Sie bestehen zu einem großen Teil aus Polysacchariden und zu 5 % aus Protein. Der letzte wichtige Bestandteil der Grundsubstanz sind Glykoproteine. Sie bestehen zu einem großen Teil aus Protein und dienen hauptsächlich der Verankerung von Zellen in der extrazellulären Matrix. Außerdem übermitteln diese Strukturelemente wichtige Informationen zwischen Zelle und extrazellulärer Matrix. Die Informationsübertragung beruht auf dem Prinzip des piezoelektrischen Effekts. Zusammenfassend lässt sich die Funktion der Grundsubstanz mit dem Stoffaustausch zwischen Blutgefäßen beschreiben. Sie wirkt als Barriere gegen Fremdkörper, die in das Gewebe eingedrungen sind (Klein et al., 2011, p. 70). Grundsätzlich fungiert die Extrazellulärmatrix als Gerüst, welche die Gewebeform- und Struktur definiert. Zudem dient sie als Substrat für Zelladhäsion, Wachstum und Differenzierung. Des Weiteren ist die Extrazellulärmatrix für die Übertra-

gung von mechanischen Lasten verantwortlich sowie für die Speicherung und Verteilung von elastischer Energie (Wang, 2006).

2.2 Sehnen

2.2.1 Anatomie und Funktion

Der Begriff Sehne kommt aus dem Lateinischen und lässt sich mit „spannen“ oder „ausdehnen“ übersetzen. Sehnen sind Bindegewebsfasern, die als allgemeines Merkmal eine Ansatzstelle mit einem Knochen aufweisen und Muskelkräfte übertragen (Hewett et al., 2007). Die Sehne folgt einem hierarchischen Aufbau, welcher sich aus mehreren Einheiten von Kollagenmolekülen zusammensetzt, die parallel zur Längsachse der Sehne angeordnet sind. Dieser Aufbau ermöglicht es der Sehne, hohen Zugbelastungen standhalten zu können (Ackermann et al., 2016, p. 4). Von links nach rechts betrachtet lässt sich in Abbildung 2 die hierarchische Struktur vom Aufbau einer Sehne nachvollziehen. Dabei sind die Kollagenmoleküle in wellenförmigen Bündeln angeordnet und richten sich nach dem Zug aus, in welche Richtung eine Kraft an der Sehne wirkt. Die Fibrille ist die kleinste strukturelle Einheit. Sie besteht aus stabförmigen Kollagenmolekülen. Fasern, bestehend aus Kollagenfibrillen, bilden die nächstgrößere Einheit innerhalb einer Sehne. Kollagenfasern lassen sich ihrerseits zu Faserbündeln zusammenfassen. Diese Einheiten werden, wie in Abbildung 2 zu erkennen ist, auch als Subfaszikel bezeichnet. Daraus ergeben sich weitere Bündel, die in der Hierarchie weiter als Sekundär- und Tertiärbündel zusammengefasst werden. Primär-, Sekundär- und Tertiärbündel ergeben zusammen das Endotendon. Die Tertiärbündel werden von Epitenon, einer feinen, lockeren Bindegewebshülle eingeschlossen, die für die Gefäß-, Lymph- und Nervenversorgung der Sehne verantwortlich ist. Damit fungiert das Epitenon als äußere Hülle einer Sehneneinheit. Diese Gewebsschicht ist weiterhin in der Lage, eine Form von Synovialflüssigkeit zu bilden. Damit kann die Sehne über umliegende Gewebsschichten bewegt werden. An Punkten, an denen besonders große Reibung herrscht, erfolgt zusätzlich die Bildung einer Sehnenscheide, damit diese Kräfte absorbiert werden können. An Stellen, an denen die Sehne großem Druck ausgesetzt ist, bildet sich Knorpelgewebe. Vor allem im Bereich der Ansatzstelle an einen Knochen lassen sich Knorpelzellen identifizieren, welche auch als Chondrozyten bezeichnet werden (Berg and Cabri, 1999, p. 225; Wang, 2006). Sehnen verbinden an ihren Endstellen Knochen und Muskeln miteinander. Die Verbindung zwischen einem Knochen und einer Sehne wird als Enthese bezeichnet. Es gibt zwei Arten der Entesen. Die faserige Enthese ist die Verbindung zwischen der Sehne und dem Periost, bei Kindern oder im Erwachsenenalter auch an den Knochen. Die faserige knorpelige Enthese ist eine Übergangszone aus hyalinem Knorpel, auf dem sich eine mechanische Belastung gut verteilen kann (Wang, 2006). Im Gegensatz zum Übergang einer knöchernen Struktur

Funktionelle Anatomie von faserigen Bindegeweben

zur Sehne wird die Verbindung zwischen der Sehne und dem Muskelgewebe über eine starke Oberflächenvergrößerung der Zytoplasmamembran am Muskelfaserende gewährleistet. Diese Membran ist durch Einfaltungen um das Zehnfache vergrößert. Außerdem ist der Übergangsbereich der Muskelzellen von einem Geflecht aus dünnen Kollagenfasern durchsetzt, die auch mit den Mikrofibrillen der Sehne verbunden sind. Dies ermöglicht eine feste Verbindung zwischen Sehnen und Muskelgewebe (Schünke, 2014). Die Innervation von Sehnen erfolgt über die umgebenden Strukturen, Endotenon und Epitenon sind dementsprechend daran beteiligt. Die Sehne an sich weist allerdings nahezu keine neuronale Verbindung auf. Dieser anatomische Befund zeigt, dass der Sehnenstoffwechsel von der Sehnenhülle, das heißt der interfaszikulären Matrix reguliert wird. Daraus resultiert, dass die Innervation einer Sehne nicht nur über afferente Funktionen gesteuert wird, sondern auch über efferente Pfade. Diese nehmen vor allem über eine Vielzahl von Neuromediatoren eine regulatorische Komponente bei der Sehnenhomöostase ein und sind an der metabolischen und neuroinflammatorischen Koordination beteiligt (Ackermann et al., 2016).

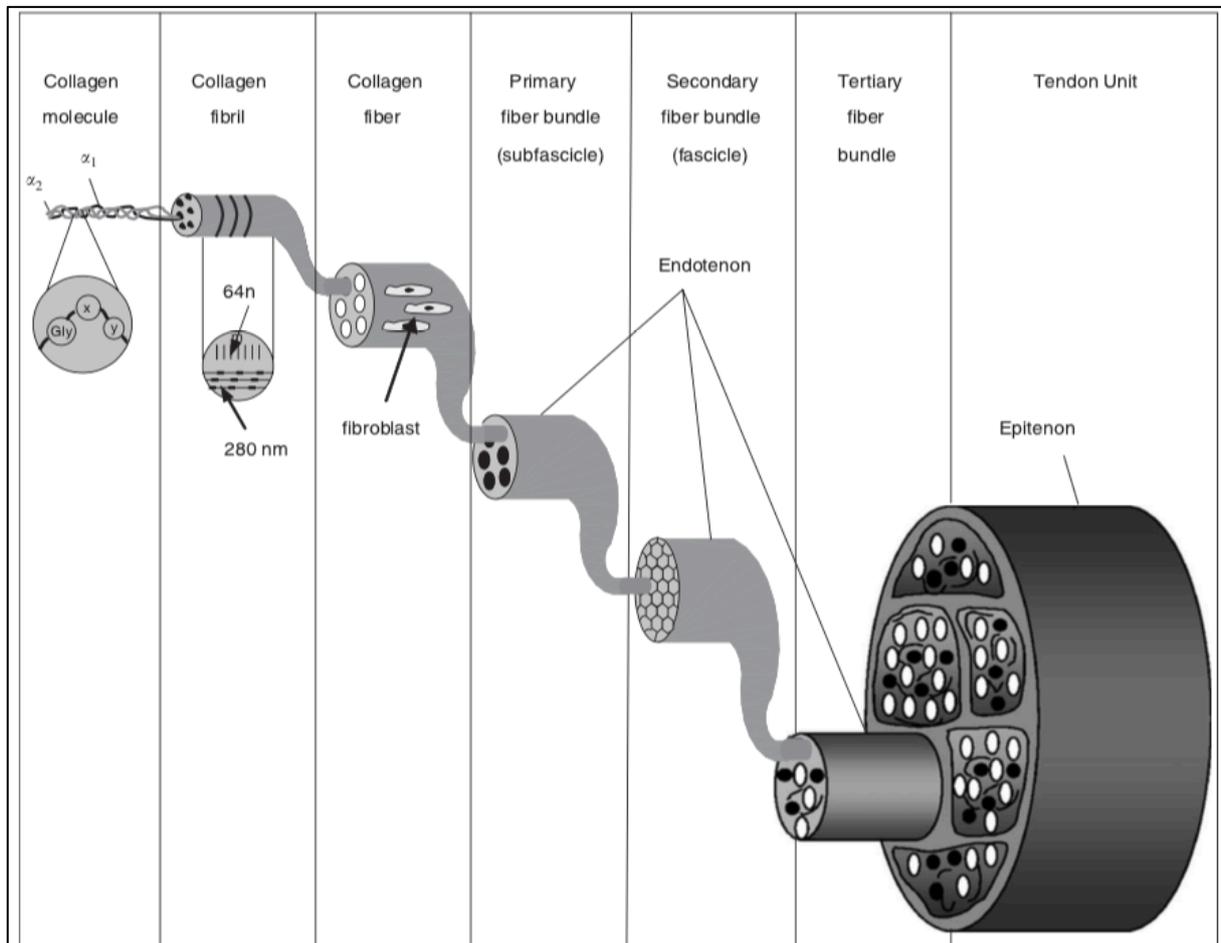


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Aufbaus einer Sehne (entnommen aus Wang, 2006)

Funktion

Sehnen können im Hinblick auf ihre Funktion nicht isoliert betrachtet werden, denn sie stellen in Verbindung mit dem dazugehörigen Muskel eine funktionelle Einheit dar. Der Muskel-Sehnen-Komplex stellt eine biomechanische Einheit dar, deren Hauptfunktion es ist, die muskelerzeugte Kraft auf das knöcherne Skelett zu übertragen, was die Bewegung um ein Gelenk erleichtert (Rosso et al., 2010). Durch den spezifischen morphologischen Aufbau sind Sehnen in der Lage, hohen Kräften standzuhalten und abrupte Muskelkontraktionen zu dämpfen. Speziell die Achillessehne kann kinetische Energie speichern. Die Speicherkapazität von Sehnen ist 400- bis 800-mal höher als das bei Muskelgewebe der Fall ist (Ackermann et al., 2016). Ähnlich wie bei Knochen wird auch bei Sehnen eine Anpassung gemäß der Belastung, welcher sie ausgesetzt sind, vermutet (Thiyagarajan and Jeanmonod, 2018). Beispielsweise zeigen Sehnen eine größere Querschnittsfläche und Zugfestigkeit sowie eine

Funktionelle Anatomie von faserigen Bindegeweben

vermehrte Produktion von Kollagen Typ I als Anpassung auf ein geeignetes körperliches Training. Dies konnte vor allem für die Achillessehne nachgewiesen werden (Langberg et al., 2001; Suominen et al., 1980). Im Gegensatz dazu kann mangelndes oder unangemessenes körperliches Training zu Verletzungen aber auch Sehnenüberlastungen führen (Khan and Maffulli, 1998). Außerdem konnte gezeigt werden, dass ein wiederholter und übermäßiger Dehnreiz an der Patellasehne eine erhöhte Produktion von Entzündungsmediatoren nach sich zieht (Li et al., 2004). Die Anpassung von Sehnen an die externe Belastung kann möglicherweise über ein spezielles Kommunikationssystem erklärt werden. Dieses Informationssystem funktioniert über „gap junctions“. Diese sind Aggregate interzellulärer Kanäle, welche aus Kanalproteinen, den so genannten Connexinen, aufgebaut sind. Sie ermöglichen einen direkten Transfer von Ionen und Molekülen von Zelle zu Zelle. Mithilfe der Gap junctions werden Informationen über das Einwirken von äußeren mechanischen Kräften weitergeleitet (Evans and Martin, 2002; Goodenough and Paul, 2009). Dementsprechend konnten Gap junctions an Stellen, an denen sich Zellprozesse treffen, und zwischen Zellkörpern nachgewiesen werden. Diese Ergebnisse zeigen, dass ein dreidimensionales Kommunikationsnetzwerk von Zellprozessen innerhalb von Sehnen existiert. Die enge Beziehung zwischen Zellprozessen und Kollagenfibrillenbündeln legt nahe, dass das Zellprozessnetzwerk an der Lastfassung und der Koordination der Antwort auf die Belastung beteiligt sein könnte (Zschäbitz, 2005). Sehnen sind zudem von Nervenfasern und Schmerzrezeptoren durchzogen, diese geben ein propriozeptives Feedback für die motorische Kontrolle und schützen damit vor einer Überlastung (Martin et al., 2015). Der wichtigste Sensor in diesem Zusammenhang, welcher sich im Übergang von Muskelfasern und der Sehne befindet, ist das Golgi-Sehnenorgan. Diese Organe sind seriell zur Arbeitsmuskulatur angeordnet und reagieren auf Muskelspannung, die durch eine Kontraktion des Muskels oder durch dessen Dehnung ausgelöst werden kann. Die Information über den Spannungszustand der Muskulatur wird über Afferenzen aus der Gruppe der Ib-Fasern zum Zentralnervensystem übermittelt. Golgi-Sehnenorgane adaptieren langsam an mechanische Reize und reagieren schon auf geringe Spannungsänderungen. Sehnen sind damit in der Lage, auf einwirkende mechanische Kräfte zu reagieren und bilden daher ein Kontrollsystem für die Arbeitsweise der Muskulatur (Häfelinger and Schuba, 2013, p. 30; Illert and Kutz-Buschbeck, 2006, pp. 108-110). Sie reagieren auf eine Veränderung der mechanischen Belastungsbedingungen, indem sie ihre Struktur, Zusammensetzung und die mechanischen Eigenschaften verändern. Verantwortlich für diese Veränderungen sind Fibroblasten, die innerhalb der Sehne den vorherrschenden Zelltyp darstellen. Fibroblasten sind in der Lage, die Expression von Proteinen innerhalb der extrazellulären Matrix zu verändern. Beispielsweise führt eine zyklische Dehnung einer Sehne dazu, dass sich die Fibroblasten senkrecht zur Streckrichtung ausrichten. Außerdem konnte gezeigt werden, dass zudem die Produktion von Fibroblasten erhöht wird. Sehnenzel-

len reagieren auf mechanische Kräfte, indem sie die Genexpression, die Proteinsynthese und den Zellphänotyp verändern. Diese frühzeitigen Reaktionen können fortfahren und langfristige Veränderungen der Sehnenstruktur einleiten und damit zu einer Veränderung der mechanischen Eigenschaften einer Sehne führen (Kjaer et al., 2018). Die nachfolgenden beiden Abschnitte beschreiben die Achilles- und die Patellasehne. Von beiden Strukturen wurden in der vorliegenden Untersuchung die Steifigkeit mit dem Myoton bestimmt.

2.2.2 Achillessehne

Die Achillessehne ist im Durchschnitt ca. 10-12 cm lang und ist damit die stärkste Sehne im menschlichen Körper. Sie kann Kräften standhalten, die bis zu zehnmals größer sind als das Körpergewicht eines Menschen, insbesondere bei Bewegungsformen wie laufen oder springen (O'Brien, 2005). Sie befindet sich direkt unter der Haut und ist als eine glatt begrenzte Struktur gut sichtbar und palpierbar. Sie ist die Endsehne des M. triceps surae, welcher am Tuberculum calcanei ansetzt und dessen Hauptfunktion die Plantarflexion des Fußes darstellt. Im distalen Bereich der Sehne wird sie durch Schleimbeutel geschützt. Die Achillessehne wird außerdem von lockerem Paratenon oder Peritendineum externum umgeben. Die Blutversorgung der Achillessehne erfolgt sowohl von proximal als auch distal durch Äste der Arteria tibialis posterior und Arteria peronea und von anterior durch stark durchblutetes Paratenon. Innerhalb dieses Bereiches, ca. 2-6 cm proximal des Sehnenansatzes, liegt eine Zone, die weniger stark vaskularisiert ist. Dieser Bereich ist auch am häufigsten von Sehnenrupturen betroffen. Außerdem findet dort die größte Belastung während des Laufens statt (Ulreich et al., 2002). Biomechanisch betrachtet weist die Achillessehne ideale Eigenschaften auf, um die Kraft vom Muskel auf den Knochen zu übertragen. Die Sehne weist eine Kombination aus steifen und elastischen Fasern und gleichzeitig eine hohe Zugfestigkeit auf. Außerdem wird die Kraftübertragung der Achillessehne durch einen aktiven Kontraktionsentspannungsmechanismus reguliert (Doral et al., 2010).

2.2.3 Patellasehne

Die Hauptaufgabe der Patellasehne ist die Kraftübertragung vom Oberschenkel auf den Unterschenkel. Außerdem ist sie die wichtigste Sehne, welche an der Kniestreckung beteiligt ist, weshalb sie umgangssprachlich auch als Kniestreckersehne bezeichnet wird (Müller and Knopp, 1984).

2.3 Bänder

Die letzten Kapitel haben sich mit Sehnen beschäftigt. In den kommenden Abschnitten werden der anatomische Aufbau und die Funktion von Bändern differenziert betrachtet.

2.3.1 Anatomie und Funktion

Ligamente sind Strukturen, die sich an jedem Gelenk im menschlichen Körper befinden. Bänder spannen sich damit zwischen zwei Skeletteilen und verbinden nicht wie Sehnen Knochen und Muskeln, sondern zwei Knochen miteinander (Schwegler and Lucius, 2016). Bänder entstehen aus dem Verlauf der Membrana fibrosa einer Gelenkkapsel, die den Schutz für die Membrana synovialis darstellt. Wenn die Membrana fibrosa regelmäßig Spannung und Zugbelastung ausgesetzt ist, ändert sich der kollagene Verlauf der Fasern. Sie beginnen, sich an der Wirkungslinie der Kraft zu orientieren, die auf sie wirkt. Dieses Areal nimmt an Dicke zu und wird so zu einer ligamentären Struktur. Es lassen sich zwei Formen von Bändern voneinander unterscheiden:

- Extrakapsuläre Bänder
- Intrakapsuläre Bänder

Die extrakapsulären Bänder weisen keine direkte Verbindung zu einer Kapsel auf und sind damit eigenständige Strukturen. Zwischen der Kapsel und dieser Art von Bändern befindet sich jedoch lockeres Bindegewebe, sodass eine Verbindung zur Kapsel bestehen bleibt. Die Hauptaufgabe der extrakapsulären Bänder ist das Steuern und Begrenzen von Bewegungen. Intrakapsuläre Bänder liegen innerhalb der Gelenkkapsel und haben eine direkte Verbindung zur Membrana synovialis wie zum Beispiel bei den Kreuzbändern im Knie. Auch sie besitzen führende und stabilisierende Aufgaben. Beide Arten der Bänder sind mit dem zellulären Aufbau von Sehnen zu vergleichen (Berg and Cabri, 1999, p. 184).

Die Hauptaufgabe von Bändern ist es, Bewegungen zu steuern. Gelenkkapsel und Bänder eines Gelenks lassen sich als Funktionseinheit betrachten. Die zellulären Hauptbestandteile von Ligamenten sind ebenso Fibroblasten. Allerdings ist die Menge der Fibroblasten und der Kollagene sowie der nichtkollagenen Proteine, Proteoglykane und Glykosaminoglykane deutlich geringer als in Sehnen. Die Grundsubstanz der Bänder unterscheidet sich nicht von der bei Sehnen. Die Grundsubstanz der Ligamente ist mit einem Knorpel vergleichbar. Es herrscht eine starke Bindung zwischen Proteoglykanen und der Zellmembran vor. Ebenso gehören, wie in den Sehnen, die Kollagenfasern zum Hauptbestandteil (Berg and Cabri, 1999, p. 184). Obwohl es Unterschiede in der Bandorganisation gibt, konnte ein allgemeiner Aufbau für Bänder nachgewiesen werden. Dieser kann in Abbildung 3 zum Aufbau eines Ligaments nachvollzogen werden. Dabei ist zu sehen, dass die Kollagenfasern des Typs I ent-

lang der Längsachse angeordnet sind. Diese sind durch eine Zellschicht, das Endoligament, abgegrenzt. Im vorderen Kreuzband ist diese Zellschicht beispielsweise besonders stark ausgeprägt. Alle Ligamentfaszikel sind in einer weiteren Zellschicht, die als Epiligament bezeichnet wird, eingeschlossen. Diese ist zudem von Nerven und Blutgefäßen durchzogen. Die Zellen im Bereich des Epiligaments zeigen lange zytoplasmatische Ausdehnungen, die als Liganden bezeichnet werden und senkrecht zur Längsachse verlaufen. Über diese Ausläufer können die Zellen innerhalb des Ligaments über große Entfernungen miteinander verbunden werden (Bray et al., 2005). Neben den Liganden verfügen Bänder ebenso wie Sehnen über Gap Junctions, eine Art von Zellen, die am Stoffaustausch zwischen Zellen beteiligt sind. Die genaue Funktion wurde bereits in Kapitel 2.2 genauer erläutert. Bänder besitzen im Vergleich zu Sehnen größere Mengen an Vernetzung, was möglicherweise auf das Zusammenwirken der beiden Kommunikationssysteme der Liganden und gap junctions zurückzuführen ist. Damit ist außerdem das metabolische Potenzial in Bändern im Vergleich zu Sehnen erhöht. Dieser Aspekt ermöglicht dem Ligament eine Anpassung an externe mechanische Belastung. Möglicherweise sind Bänder damit auch gegenüber der Einwirkung von weiblichen Sexualhormonen sensibler als Sehnen. Auf diesen Aspekt wird in Kapitel 4 zum Hormoneller Einfluss des weiblichen Zyklus auf die mechanischen Eigenschaften von faserigem Bindegewebe differenziert eingegangen. Darüber hinaus konnte in Bändern das Enzym Lysyl Oxidase identifiziert werden, welches ebenso eine Rolle bei der Vernetzungsbildung einnimmt und den Kollagenfasern eine hohe Festigkeit verleihen kann (Frank, 2004). In Ligamenten konnten zudem Neuropeptide nachgewiesen werden, die eine langsame Umsatzrate besitzen, was zu langanhaltenden regulatorischen Effekten im Ligament führt. Es konnten weiterhin sensorische Neuropeptide identifiziert werden, welche proinflammatorische und nozizeptive Wirkungen besitzen. In diesem Zusammenhang konnte gezeigt werden, dass die Konzentration dieser Peptide in Bändern im Vergleich zu Sehnen um das Vierfache niedriger ist. Dieser Aspekt ist mit einer geringeren gewebsspezifischen Anfälligkeit für Schmerzen assoziiert. Dies könnte erklären, warum chronische Schmerzsyndrome in Bändern seltener auftreten als in Sehnen (Bray et al., 2005).

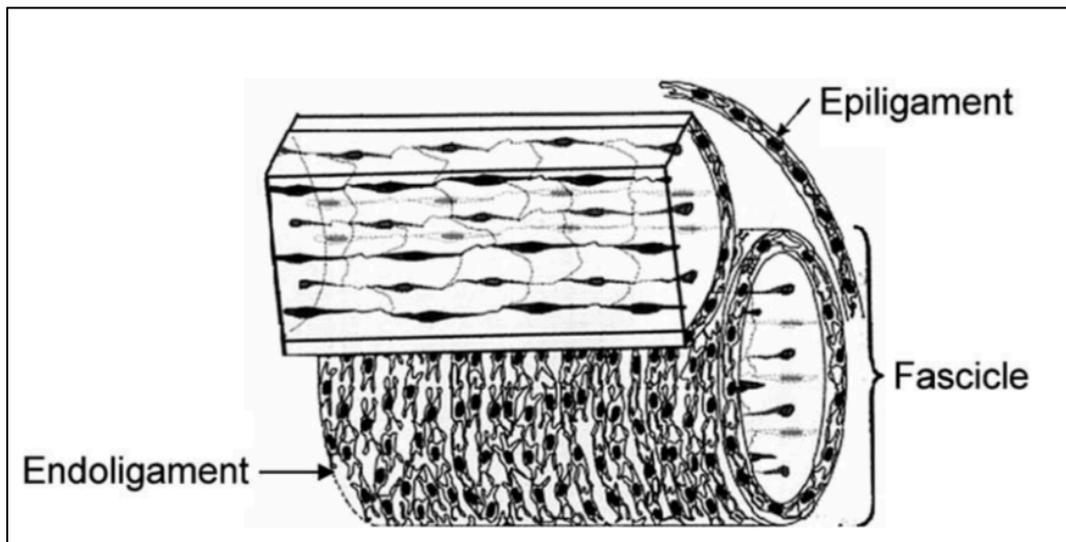


Abbildung 3: Allgemeiner Aufbau eines Ligaments (entnommen aus Bray et al., 2005)

Funktion

Neben der steuernden und stabilisierenden Funktion besitzen Bänder auch eine sensorische Funktion, die unter anderem zur motorischen Kontrolle beiträgt. Bänder stabilisieren Gelenke passiv und helfen diesen, Bewegungen durch den normalen Bewegungsbereich zu führen, wenn eine Zugbelastung aufgebracht wird. Unter Bedingungen mit niedrigen Belastungen sind Bänder nachgiebig und weisen ein nichtlineares mechanisches Verhalten auf. Eine anhaltende Belastung eines Ligaments kann allerdings zu einer zunehmenden Steifigkeit führen, bis nahezu ein linearer Zusammenhang zwischen einwirkender Kraft und Steifigkeit erreicht werden kann. Bänder absorbieren zudem Energie, um den menschlichen Organismus vor Verletzung zu schützen. Eine weitere Bandfunktion bezieht sich auf das viskoelastische Verhalten. Dabei nimmt die Belastung von Bändern ab, wenn sie einer konstanten Verformung ausgesetzt sind. Die Verformung unter einer konstanten oder zyklisch wiederkehrenden Belastung wird auch als „kriechen“ bezeichnet. Dieser Aspekt muss besonders bei Gelenksverletzungen oder rekonstruktiven Operationen beachtet werden, da übermäßiges Kriechen zu einer Lockerung des Gelenks führen kann und damit weitere Verletzungen hervorgerufen werden können. Eine weitere wichtige Funktion von Bändern ist ihre Fähigkeit, bei der Gelenkpropriozeption mitzuwirken. Diese Eigenschaft wird mit der bewussten Wahrnehmung der Extremitätenposition im Raum definiert. Diese Fähigkeit wird durch Gelenk-, Muskel- und Hautrezeptoren unterstützt. Wenn Ligamente unter Spannung stehen, können sie neurologische Rückkopplungssignale hervorrufen, die eine Muskelkontraktion nach sich ziehen. Dies trägt dazu bei, die Gelenkposition wahrnehmen zu können (Frank, 2004).

2.3.2 Vorderes Kreuzband

Das vordere Kreuzband wurde im Zusammenhang mit einer Auswirkung von Hormonen am häufigsten erforscht. Aus diesem Grund wird es zum besseren Verständnis für weitere Kapitel dieser Arbeit näher beschrieben, es wurde aber in der vorliegenden Arbeit nicht eigens gemessen.

Der Ursprung des vorderen Kreuzbandes ist am hinteren Anteil des lateralen Femurkondylus lokalisiert, dabei zieht es schräg durch die Fossa intercondylaris. Der Ansatz des vorderen Kreuzbandes befindet sich im Bereich der Eminentia intercondylaris in der Mitte des Tibiaplateaus. Weiterhin kann das vordere Kreuzband in zwei unterschiedliche Bündel unterteilt werden. Das anteriomediale Bündel ist in der Beugung angespannt, das posterolaterale Bündel hingegen in der Kniestreckung. Dieser Aspekt deutet darauf hin, dass beide Bündel in unterschiedlicher Stellung an der Sicherung des Kniegelenks beteiligt sind (Zantop and Petersen, 2007). Der Hauptteil des vorderen Kreuzbandes besteht aus straffem Bindegewebe. In der Region, in der das vordere Kreuzband bei Streckung des Kniegelenks an den vorderen Rand der Fossa intercondylaris anliegt, weist es eher die Struktur eines Faserknorpels auf. Dabei liegen zwischen den Kollagenfibrillen ovale Knorpelzellen, womit die härtere Struktur bedingt wird. Die wichtigste Funktion des vorderen Kreuzbandes ist es, die Tibia gegen eine Verschiebung nach vorn zu schützen. Dies funktioniert vor allem bei einer Beugung des Knies um 20-30° am ökonomischsten. Wenn das Knie nach innen rotiert wird, wickeln sich die vorderen Kreuzbänder umeinander, wodurch eine Verdrehung des Unterschenkels nach innen verhindert wird. Die Funktion des vorderen Kreuzbandes lässt sich jedoch nicht nur auf eine passiv stabilisierende beschränken, sondern ebenso auf propriozeptive, denn es enthält zudem zahlreiche Mechanorezeptoren. Es konnten entsprechend Vater-Pacini-Körperchen, Ruffini-Körperchen und freie Nervenendigungen nachgewiesen werden. Die Mechanorezeptoren spielen vor allem für die Kinematik des Kniegelenks eine wichtige Rolle (Haus et al., 1992; Petersen and Tillmann, 2002).

Schließlich werden im nächsten Abschnitt Apponeurosen von Sehnen und Bändern differenziert betrachtet. Die Plantarapponeurose wird dabei spezifisch beschrieben, da sie in der vorliegenden Studie ebenso hinsichtlich einer Änderung der mechanischen Eigenschaften untersucht wurde.

2.4 Apponeurosen

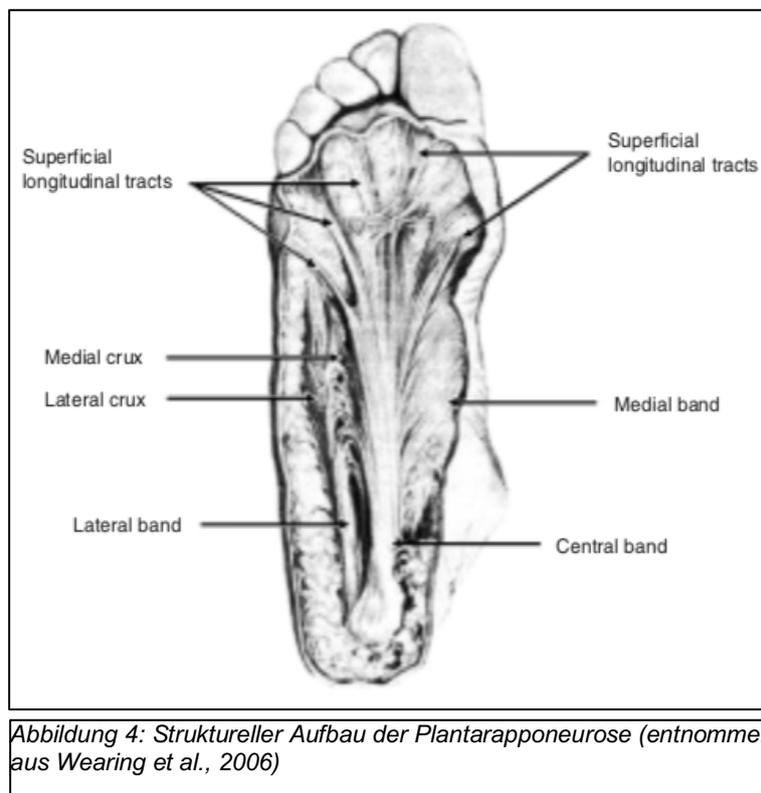
2.4.1 Anatomie und Funktion

Apponeurosen sind oberflächlich an der Haut gelegene, flächige Bindegewebsbereiche, denen zahlreiche biomechanische und neurophysiologische Aufgaben zugeordnet werden können (Tesarz, 2010). Apponeurosen lassen sich ebenso dem straffen Bindegewebe zuordnen, allerdings sind sie eher ein Geflecht aus Fasern und nicht parallel angeordnet, wie dies zu einem überwiegenden Anteil bei Bändern und Sehnen der Fall ist (Schleip and Baker, 2015). Apponeurosen können Muskeln miteinander verbinden, damit besteht deren Hauptfunktion darin, Muskelkräfte zu übertragen. Apponeurosen sind ebenso wichtige Sinnesorgane, da sie Dehnungsrezeptoren, Nozizeptoren und Thermorezeptoren enthalten. Damit sind Apponeurosen ebenso an propriozeptiven Prozessen beteiligt und vor allem für die Tiefensensibilität bedeutsam. Außerdem sind sie in der Lage, Flüssigkeit zu speichern, wodurch ein Drainageraum für das lymphatische System entsteht. Aber sie können ebenso Entzündungswege darstellen, da sie bei der Wanderung von freien Zellen und dem Austausch von Signalstoffen beteiligt sind. Entsprechend sind Apponeurosen auch Orte, an denen bestimmte Immunreaktionen erfolgen können. Zudem sind sie an der Wundheilung und Regeneration von Skelettmuskulatur beteiligt, wenn es zu Verletzungen kommt (Jirikowski, 2016).

2.4.2 Plantarapponeurose

Die Plantarapponeurose wurde bei der vorliegenden Untersuchung mithilfe des Myotons gemessen. Das grundlegende Verständnis über die Anatomie und Funktion der Plantarapponeurose hilft, die auftretenden Zusammenhänge in späteren Kapiteln dieser Arbeit nachvollziehen zu können. Die Plantarapponeurose, auch Plantarfaszie genannt, ist eine Bindegewebsstruktur, die flächig angeordnet ist und sich sehr oberflächlich befindet. Sie schützt und bedeckt die intrinsischen Muskeln des Fußes. Außerdem stützt sie das mediale Längsgewölbe des Fußes und ist an der Kraftübertragung vom Hinterfuß auf den Vorfuß beteiligt. Darüber hinaus ist sie erheblichen Kompressionsbelastungen vor allem während des Laufens durch das einwirkende Körpergewicht ausgesetzt (Benjamin, 2009). Die Plantarapponeurose bildet eine starke mechanische Verbindung zwischen dem Fersenbein (Calcaneus) und den Zehen (Phalangs). Sie bildet sich vorwiegend aus den medialen Fortsätzen des Tuberositas Calcaneus und bindet sich distal durch mehrere Ausläufer an die plantaren Teile des Vorfußes sowie an das mediale und laterale Septum. Die Faszie kann, wie in Abbildung 4 zu sehen ist, in drei Teile untergliedert werden: ein mediales, ein laterales und ein zentrales Band. Dem medialen Band wird zugeschrieben, an der Entwicklung der Plantaren Fasziiitis beteiligt zu sein. Anatomische Untersuchungen konnten zeigen, dass diese Struktur

auf der proximalen Ebene sehr dünn ist. Die Struktur des lateralen Bandes scheint dagegen sehr variabel zu sein. Sie kann an einigen Stellen sehr dick und auch dünn sein. Das laterale Band entsteht aus dem lateralen Rand des medialen Tuberkels und liefert damit einen partiellen Ursprung für den m. abductor digiti minimi. Das zentrale apponeurotische Band wird häufig strukturell aber auch auf funktioneller Ebene als Hauptbestandteil der Plantaraponeurose genannt und entstammt dem medialen Prozess des Calcaneum Tuberositas, womit er als partieller Ursprung des m. Flexor digitorum brevis dient (Wearing et al., 2006).



Es konnte eine Korrelation zwischen der Dicke der Plantarfaszie und des Paratenons nachgewiesen werden. Dieser Aspekt verdeutlicht, dass diese Struktur ebenso eine wichtige Rolle zur Unterstützung des Längsgewölbes des Fußes spielt und an der peripheren Bewegungskoordination beteiligt ist. Es konnte auch gezeigt werden, dass die Plantaraponeurose in der Lage ist, Dehnungsenergie zu speichern und in eine Vortriebskraft umzuwandeln (Shaw et al., 2008). Aus klinischer Sicht wird die Plantaraponeurose häufig als Ursache für Schmerzen im Bereich der Ferse angesehen. Plantare Fasziitis ist eine Überlastung des Gewebes und wird besonders häufig bei Läufern beobachtet (Warren, 1990). Die Dicke der Plantaraponeurose wird mit Ultraschall bestimmt. Dabei konnte herausgefunden werden, dass Patienten, bei denen eine Plantare Fasziitis diagnostiziert wurde, eine signifikant dickere Aponeurose aufweisen (Kane et al., 2001).

Funktionelle Anatomie von faserigen Bindegeweben

Aus biomechanischer Sicht ist die PA an ihrem distalen Ende durch die Plantarunterlagen der Mittelfußgelenke am proximalen Ende der Phalanxen befestigt. Diese Verbindung ist sehr stark. Wenn die Zehen ausgestreckt sind, zieht die PA um die Köpfe der Mittelfußknochen nach vorne. Diese Verbindung wirkt wie ein Kabel, welches auf eine Winde aufgewickelt ist. Die Spannung steigt an, weil sich der Abstand zwischen den Mittelfußköpfen und dem Kalkaneum verkürzt. Die Zehen werden beim Stehen und Gehen durch die Wirkung des Körpergewichts in eine gestreckte Position gezwungen. Durch diesen Mechanismus, welcher auch als Ankerwinde bekannt ist, wird das Fußgewölbe aufrecht erhalten, auch ohne die direkte Einwirkung eines Muskels (Hicks, 1954).

Histologisch betrachtet, wird die Plantarfaszie oft als dichtes Bindegewebe beschrieben und mit Sehnen und Bändern verglichen. In der Fachliteratur lässt sich finden, dass die Plantarfaszie den Bändern des Fußes ähnlich ist (Wright and Rennels, 1964). Wie auch bei Sehnen und Bändern besteht die Grundsubstanz der Plantaraponeurose aus verlängerten Fibrozyten, die in eine extrazelluläre Matrix eingebettet sind, welche hauptsächlich aus Kollagenfasern besteht. Die Kommunikation zwischen den Zellen funktioniert über Gap junctions. Die Plantaraponeurose enthält mehr Fibroblasten, als in Sehnen vorhanden sind; damit besitzt sie ähnlich wie Bänder eine größere sensorische Kapazität als Sehnen. Neben der Kraftübertragung ist die Plantarfaszie damit auch in der Lage, ihre Zusammensetzung als Reaktion auf äußere Einflüsse zu modulieren (Contri et al., 1994). Ligamente sind allerdings ebenso neurologisch gut innervierte Strukturen und besitzen freie Nervenendigungen aber auch eingekapselte Mechanorezeptoren (Petrie et al., 1998). So spielen sie vermutlich bei extremer Verformung oder Dehnung eine wichtige Rolle, um die Ligamentstruktur vor Verletzungen zu schützen. Außerdem wird vermutet, dass Nozizeptoren bei der Wahrnehmung von Schmerzen ein entscheidendes Element sind (McDougall et al., 1997). Aufgrund der Lokalisation des Schmerzes bei Plantarer Fasziitis wird davon ausgegangen, dass die Plantaraponeurose ebenso freie Nervenendigungen und Mechanorezeptoren enthält (Tountas and Fornasier, 1996), womit diese einmal mehr einer ligamentären Struktur ähnelt. Ein entscheidender Aspekt in dieser Arbeit stellen die ähnlichen mechanischen Eigenschaften der Plantaraponeurose und des vorderen Kreuzbandes dar. Wie in Abbildung 5 zu sehen ist, konnte für beide Strukturen eine nahezu identische Steifigkeit nachgewiesen werden. Ebenso ist die Belastbarkeit der Plantaraponeurose mit den ligamentären Strukturen des Knies zu vergleichen, was aus Abbildung 6 hervorgeht. Dabei fällt auf, dass Ligamente signifikant geringer belastbar sind als Sehnen (Wearing et al., 2006). In der vorliegenden Arbeit wird aufgrund dieser Informationen vermutet, dass die Plantarfaszie in Bezug auf ihre Steifigkeit mit dem vorderen Kreuzband verglichen werden kann und unter diesem Aspekt der Kategorie der Bänder zugeordnet wird. Um eine differenzierte Betrachtung von Sehnen und Bändern in dieser Arbeit vornehmen zu können, werden die Informationen über die Veränderun-

Funktionelle Anatomie von faserigen Bindegeweben

gen der Steifigkeit der Plantarapponeurose stellvertretend für das vordere Kreuzband betrachtet. Darüber hinaus können Hormone auch Faszien beeinflussen. Im Gewebe der Faszien konnten Östrogenrezeptoren identifiziert werden (von Heymann and Stecco, 2016). Zum Verhalten der Plantarapponeurose auf die Einwirkung weiblicher Geschlechtshormone im Verlauf eines Zyklus wird in Kapitel 4 näher eingegangen.

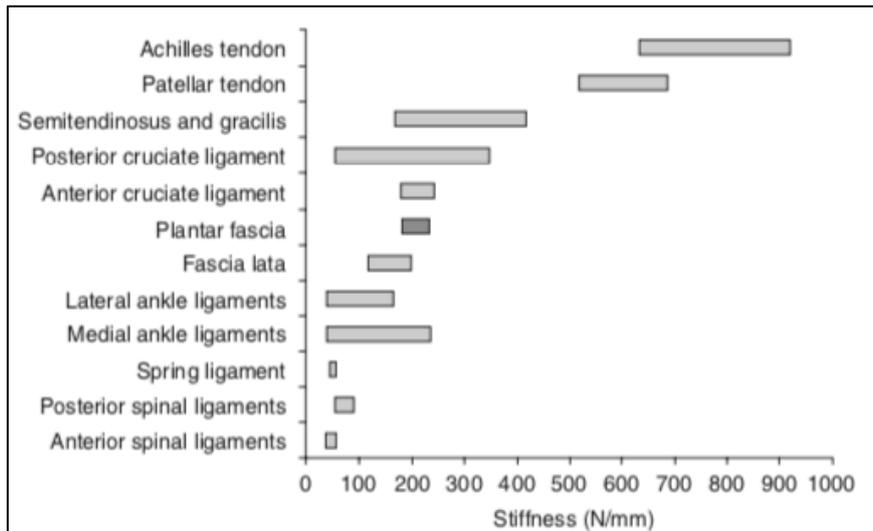


Abbildung 5: Steifigkeit fasriger Bindegewebe des menschlichen Körpers (entnommen aus Wearing et al., 2006)

Abbildungen 5 und 6 sollen die Ähnlichkeit der Plantarapponeurose und des vorderen Kreuzbandes im Hinblick auf Steifigkeit und Belastbarkeit zeigen. Damit soll begründet werden, weshalb die Plantarapponeurose in der vorliegenden Arbeit als bandähnliche Struktur behandelt wird.

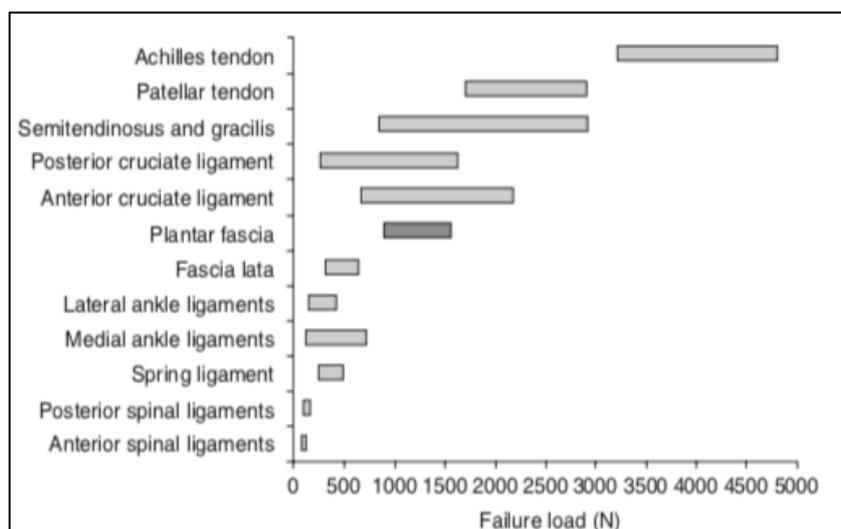


Abbildung 6: Belastbarkeit fasriger Bindegewebe des menschlichen Körpers (entnommen aus Wearing et al., 2006)

3 Physiologie des weiblichen Zyklus

Da in der vorliegenden Arbeit die Veränderungen von Bindegewebeigenschaften im Verlauf des weiblichen Zyklus untersucht werden, sind die Informationen in den folgenden Abschnitten wichtig, um ein Grundverständnis für den Ablauf des Zyklus sowie die damit im Zusammenhang stehenden weiblichen Geschlechtshormone zu erhalten. Schließlich nimmt dieses Kapitel Bezug auf das prämenstruelle Syndrom in Kapitel 3.4, welches durch unterschiedliche Beschwerdebilder in den Tagen vor und während der Menstruation gekennzeichnet ist (Zahradnik, 2004). Außerdem erfolgen ein Einblick in die Studienlage zum Thema körperlicher Aktivität in Verbindung mit dem weiblichen Zyklus in Kapitel 3.5 sowie die Erläuterung des Wirkmechanismus der oralen Kontrazeption in Kapitel 3.6.

3.1 Physiologie und Bedeutung

Der weibliche Zyklus kann als Regelkreislauf betrachtet werden und bereitet den Körper auf eine eventuell bevorstehende Schwangerschaft vor. Der erste Zyklus beginnt in der Pubertät in einem Alter von zehn bis sechzehn Jahren und endet mit der Menopause bei durchschnittlich 51 Jahren. Der Zyklus kann 21 bis 35 Tage andauern und inter- sowie intraindividuelle Variationen aufweisen. Ein idealtypischer Zyklus, welcher für die folgenden Abschnitte zur Erklärung verwendet wird, dauert 28 Tage (Thiyagarajan and Jeanmonod, 2018). Hormone wirken in diesem Kreislauf als Informationsträger und werden über Hypothalamus, Hypophyse und Ovar (Eierstock) reguliert. Eine detaillierte Beschreibung wird im Folgenden vorgenommen (Stauber et al., 2007, p. 78). Im Vorfeld werden Funktion und Bedeutung der einzelnen Hormone erläutert, die im Verlauf des weiblichen Zyklus über den Hypothalamus, die Hirnanhangdrüse und die Eierstöcke ausgeschüttet werden. Eine Übersicht zu Wirkung, Funktion und Ort der Hormonausschüttung findet sich in Tabelle 1. Der nachfolgende Unterpunkt erläutert die Entwicklungsformen einer Eizelle, da auf einzelne Entwicklungsphasen bei der Beschreibung der Hormone und in den einzelnen Zyklusphasen Bezug genommen wird.

3.1.1 Eizelle

Die Bildung der ersten Eizellen erfolgt schon vor der Geburt, sie werden als Primordialfollikel bezeichnet. Später wachsen sie unter Hormoneinfluss zu Primärfollikeln heran. In dieser Form ist es der Eizelle möglich, mehrere Jahre zu überdauern. In den Eierstöcken einer jungen Frau sind zum Ende der Pubertät rund 400 000 Primärfollikel enthalten. Unter dem Einfluss des follikelstimulierenden Hormons (FSH) entwickeln sich mehrere dieser Follikel zu

Sekundärfollikeln. Durch das zunehmende Wachstum des Epithelgewebes bildet sich ein Tertiärfollikel. Alle gebildeten Follikel dieser Art gehen bis auf einen zugrunde: Dieser entwickelt sich zum sprungreifen Eibläschen für den anstehenden Zyklus. Kurz vor dem Eisprung reift dieser Tertiärfollikel zum Graaf-Follikel. Nach dem Eisprung werden die Reste des Graaf-Follikels zum Gelbkörper (Schwegler and Lucius, 2016, pp. 468-469).

3.2 Zusammenspiel der Hormone des weiblichen Zyklus

Hormone des Hypothalamus

Der Hypothalamus stellt die oberste Instanz für die Kontrolle und Steuerung des weiblichen Zyklus dar. Er ist Teil des Zwischenhirns und empfängt zusätzlich Reize aus der Umwelt. Der Transfer von Hormonen geschieht über die Hirnanhangdrüse (Hypophyse) zum Eierstock (Ovar). Die Stimulation oder Hemmung der Hormonsekretion wird über den Blutspiegel der einzelnen Hormone gesteuert. Im Hypothalamus wird, wie in Tabelle 1 zu sehen ist, die Freisetzung des Gonadotropin-Releasing-Hormons (GnRH) und Oxytozin gesteuert. Das GnRH stimuliert den Hypophysenvorderlappen (HVL), wodurch dieser gonadotrope Hormone absondert. Dazu zählt das luteinisierende Hormon (LH) sowie das follikelstimulierende Hormon (FSH). Das Peptidhormon Oxytozin besitzt eine kontraktile Wirkung, die vor allem gegen Ende einer Schwangerschaft zur Regulation der Wehentätigkeit zum Ausdruck kommt (Stauber et al., 2007, p. 81).

Hormone der Hypophyse

Wie im vorigen Abschnitt erwähnt, bildet der Hypophysenvorderlappen aufgrund der Stimulierung von GnRH die gonadotropen Hormone LH und FSH, welche in Tabelle 1 aufgelistet sind. Die Konzentration des FSH steigt in der Follikelphase, der ersten Phase des weiblichen Zyklus, welche sich von Tag 0-14 erstreckt. Außerdem fördert es das Wachstum des Sekundär- und Tertiärfollikels. In Verbindung mit LH ist es zudem an der Östrogensynthese beteiligt. LH ist für die Auslösung des Eisprungs verantwortlich und ist während der Gelbkörperphase an der Bildung von Progesteron beteiligt. Die Konzentration des LH-Spiegels ist kurz vor dem Eisprung (Ovulation) am größten. Prolaktin ist physiologisch bei Stillenden und Schwangeren erhöht, da es die Milchproduktion der Brustdrüsen anregt. Aber es wird angenommen, dass es ebenso in der Nebenniere und in der Leber am androgenen Stoffwechsel beteiligt ist, da sich in diesen beiden Organen Prolaktinrezeptoren befinden (Stauber et al., 2007, p. 84).

Hormone des Ovars

Die in der Hypophyse ausgeschütteten Gonadotropine stimulieren den Eierstock. Tabelle 1 zeigt, dass im Ovar hauptsächlich Östrogene, Gestagene, Androgene und Inhibin wirken.

Physiologie des weiblichen Zyklus

Östrogene sind an der Ausbildung der weiblichen Geschlechtsmerkmale während der Pubertät beteiligt. Das Peaklevel wird während des Eisprungs erreicht. Dabei wird Östrogen mit einer Rate von 400 bis 900 Mikrogramm pro Tag ausgeschüttet (Martius et al., 1988, p. 14). Im Vergleich dazu wird Östrogen in der folliculären Phase mit einer Rate von 60 Mikrogramm pro Tag und in der Lutealphase mit 300 Mikrogramm pro Tag ausgeschüttet (Hewett, 2000). Die Östrogenlevelkonzentration im Verlauf des Zyklus kann in Abbildung 7 nachvollzogen werden. Gestagene sind auch unter dem Namen Gelbkörperhormone bekannt. Der wichtigste Vertreter ist das Progesteron. Während der Follikelphase nimmt die Konzentration, wie in Abbildung 7 ersichtlich, an Progesteron zu. Die Progesteronkonzentration steht in Korrelation mit der Entwicklung und Rückbildung des corpus luteum (Gelbkörper). Dieses Hormon ist auch für die Erhöhung der Körperkerntemperatur kurz nach dem Eisprung um 0,4-0,6 °C durch die Anregung des Wärmezentrums des Hypothalamus beteiligt. Aus diesem Grund kann durch das Messen der Basaltemperatur auch Kontrazeption betrieben und auf den Zeitpunkt des Eisprungs zurückgeschlossen werden (Stauber et al., 2007, p. 91). Das Messen der Basaltemperatur findet aus diesem Grund auch im Kontext der vorliegenden Arbeit statt. Das wichtigste Androgen ist Testosteron. Im Körper der Frau sind Androgene an der Vorstufe der Östrogensynthese beteiligt. Inhibin hat einen hemmenden Einfluss auf die Sekretion von FSH. Während der Follikelreifung steigt die Konzentration von Inhibin an. Dies hat zur Folge, dass die Reifung eines weiteren Follikels verhindert wird (ebd., p. 95).

Tabelle 1: Übersicht über den Ausschüttungsort der einzelnen Hormone (eigene Abbildung)

Ort	Hormon	Wirkung
Hypothalamus	Gonadotropin-Releasing-Hormon (GnRH)	Synthetisierung von LH und FSH
	Oxytozin	kontraktile
Hypophyse	follikelstimulierendes Hormon (FSH)	Wachstum Sekundär- und Tertiärfollikel, Östrogensynthese
	luteinisierendes Hormon (LH)	Östrogensynthese, Auslösung Eisprung, Bildung von Progesteron
	Prolaktin	Milchproduktion, beteiligt am androgenen Stoffwechsel
Eierstöcke (Ovar)	Östrogene	Ausbildung weiblicher Geschlechtsmerkmale
	Progesteron	Entwicklung und Rückbildung corpus luteum, Erhöhung Körperkerntemperatur
	Testosteron	Östrogensynthese
	Inhibin	Hemmender Einfluss auf die Sekretion von FSH

3.3 Phasen des weiblichen Zyklus

Die folgenden Unterkapitel setzen sich mit den einzelnen Phasen des weiblichen Zyklus auseinander. Die Beschreibung erfolgt in chronologischer Reihenfolge. Insgesamt werden drei Zyklusphasen voneinander unterschieden, wobei der Zeitraum der Menstruation zur Follikularphase gehört.

3.3.1 Menstruation (Tag 0-5)

Wenn der Progesteronspiegel abnimmt, kann die Gebärmutter Schleimhaut nicht länger aufrechterhalten werden. Der Abbau dauert von Tag 0 bis 5 und ist schließlich die Menstruation des Zyklus. Das Ausschwemmen der Gebärmutter Schleimhaut setzt ein, wenn weder Progesteron noch HCG (Human Choriongonadotropin), welches ein eingenisteter Embryo bilden würde, vorhanden sind. Über einen Zeitraum von fünf Tagen wird die Gebärmutter Schleimhaut allmählich ausgeschwemmt. Mit dem Einsetzen der Menstruationsblutung tritt das endokrine System erneut in Aktion. Schon vor dem ersten Tag beginnt die Hirnanhangdrüse mit der Ausschüttung von stetig zunehmenden Mengen von FSH, um die Reife von dutzend Follikeln im Eierstock voranzubringen und den Zyklus neu zu starten. Dieser Aspekt verdeutlicht die verzögerte Wirkung von Hormonen, womöglich ist diese Verzögerung auch im Zusammenhang mit einer Veränderung der Eigenschaften von Sehnen und Bändern zu messen (Reed and Carr, 2000; Thyagarajan and Jeanmonod, 2018).

3.3.2 Follikularphase (Tag 0-14)

Das erste Zeitfenster des weiblichen Zyklus wird auch als Follikel- oder proliferative Phase bezeichnet. Sie erstreckt sich von Tag 0, beginnend mit der Menstruation, bis Tag 14 des Zyklus und ist durch das Wachstum des Ovarialfollikels gekennzeichnet, welcher im Eierstock heranwächst und die Eizelle enthält. Unter dem Einfluss des follikelstimulierenden Hormons (FSH) wächst das Primordialfollikel in einem Eierstock heran. Diese vermehren sich weiter und bilden eine zweite Zellschicht. Sobald mehr als eine Zellschicht vorhanden ist, tragen diese Follikel den Namen Granulosazellen. Im nächsten Schritt verdichtet sich eine Schicht von faserigem Bindegewebe erneut um das Primordialfollikel und es entstehen Thekazellen. Die sich stetig vermehrenden Follikelzellen bilden Progesteron. Dieses Hormon trägt zur Eireifung bei. Die Granulosazellen produzieren das Hormon Östrogen, welches sich über die Blutbahn im Körper der Frau verteilt und die Gebärmutter Schleimhaut auf eine sich einnistende Eizelle vorbereitet (Marieb and Hoehn, 2010, p. 1056). Wenn die Follikelphase weiter fortschreitet, findet zum Ende eine negative Rückkopplung mit dem Hypophysenvorderlappen durch die hohen Östrogenwerte statt. Der Anstieg des Östrogenlevels erfolgt parallel zum Wachstum des dominanten Follikels und kann in Abbildung 7 nachvollzogen wer-

Physiologie des weiblichen Zyklus

den. Das Ziel in dieser Phase ist es, dass sich die Gebärmutter Schleimhaut (Endometrium) verdickt und eine vermehrte Durchblutung und die Ausbildung von Blutgefäßen einsetzen. Damit soll eine Umgebung geschaffen werden, in der sich eine befruchtete Eizelle einnisten kann (Reed and Carr, 2000).

3.3.3 Ovulationsphase (Tag 14)

Der Eisprung tritt am 14. Tag des Zyklus auf. Am Ende der proliferativen Phase sind die Östrogenwerte aufgrund der Reifung des Follikels sehr hoch, was in Abbildung 7 deutlich zu sehen ist. In den zwei Eierstöcken der Frau finden sich immer mehrere Follikel in unterschiedlichen Stadien des Reifungsprozesses. Aber nur ein dominanter Follikel kann sich durchsetzen und ist auf dem Höhepunkt seiner Reifung, wenn durch das LH der Stimulus für den Eisprung gegeben wird. Der dominante Follikel sondert Inhibin ab; dieses Hormon verhindert ein weiteres Ansteigen des FSH-Spiegels und unterdrückt dadurch die Reifung eines zweiten Follikels. Schließlich platzt der reife Follikel und gibt die Eizelle frei. Dieses Ereignis führt zu einem Abfall der Östrogenwerte am Ende des Eisprungs (Marieb and Hoehn, 2010, p. 1052; Thiyagarajan and Jeanmonod, 2018).

3.3.4 Lutealphase (Tag 14-28)

Die nächste Phase des weiblichen Zyklus erstreckt sich von Tag 14 bis 28. Sofern keine Befruchtung der Eizelle stattgefunden hat, löst sich die Eizelle in den darauffolgenden Stunden auf. Die verbliebenen Granulosa- und Thecazellen des dominanten Follikels im Eierstock stehen unter dem Einfluss eines hohen LH-Spiegels und bilden den Gelbkörper in der Rindenschicht der Eierstöcke aus. Dieser beginnt mit der Abgabe von Progesteron, dem dominanten Hormon dieser Phase, dessen Anstieg in Abbildung 7 veranschaulicht ist. Progesteron liefert eine negative Rückkopplung an die Hypophyse, wodurch die Produktion von FSH gestoppt und jede weitere Eireifung sowie ein erneuter Eisprung unterdrückt werden. Wenn keine Befruchtung der Eizelle stattgefunden hat, degeneriert der Gelbkörper innerhalb der nächsten zehn Tage. Damit endet auch dessen Sekretion von Progesteron. Die übrig gebliebenen Reste werden über eine narbige Umwandlung zum corpus albicans (Weißkörper). Progesteron erhöht die hypothalamische Temperatur, sodass auch die Körpertemperatur während der Lutealphase um ca. 0,5 Grad ansteigt (Marieb and Hoehn, 2010; Reed and Carr, 2000; Thiyagarajan and Jeanmonod, 2018, p. 1053).

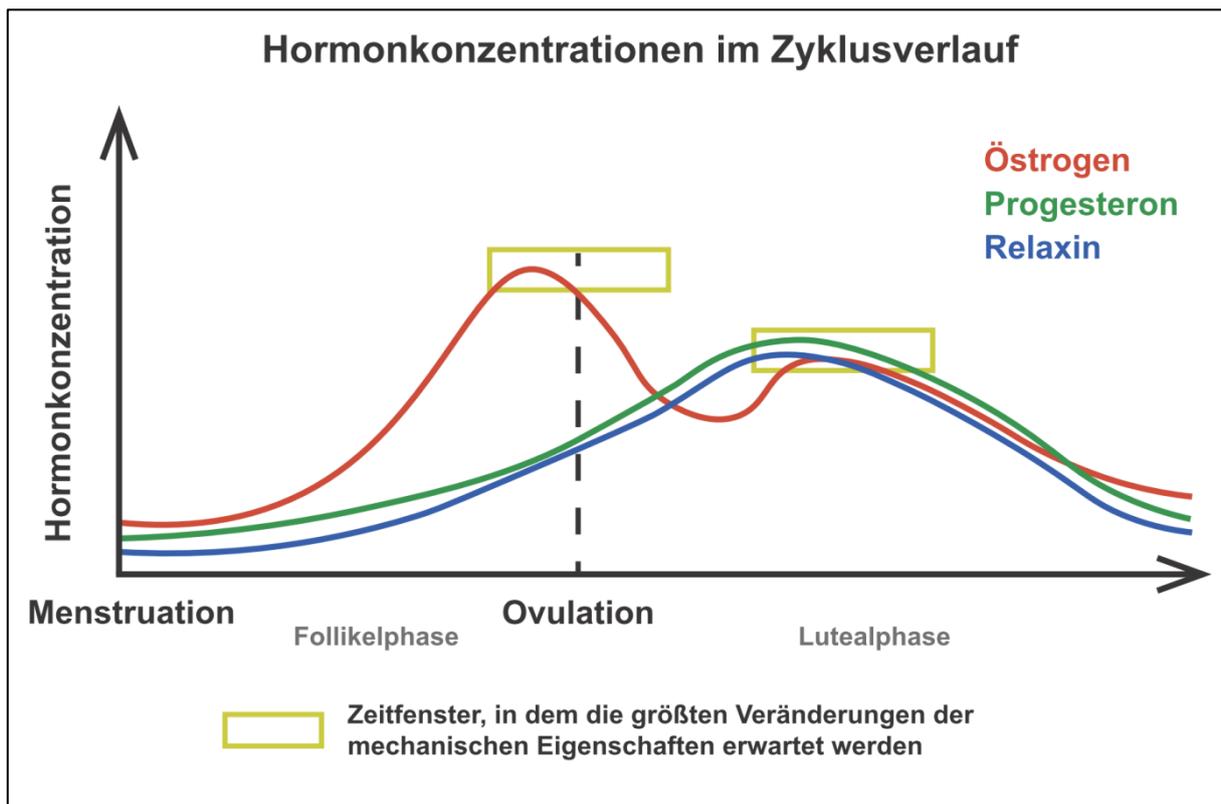


Abbildung 7: Schema zum Verlauf der Hormonlevelkonzentration (eigene Abbildung)

3.4 Das prämenstruelle Syndrom

Das prämenstruelle Syndrom (PMS) ist eines der häufigsten zyklusabhängigen Beschwerdebilder bei Frauen im Alter zwischen zwanzig und vierzig Jahren. Rund 20-30 % der Frauen sind im Verlauf der Lutealphase eines ovulatorischen Zyklus von leichten Formen des PMS betroffen. Schwere psychische und physische Veränderungen, die eine starke Beeinträchtigung des Alltags mit sich bringen, weisen nur 2,5-5 % der Frauen auf. Wie schwer das PMS auftritt, unterliegt interindividuell erheblichen Schwankungen (Zahradnik, 2004). Grundlage für das Auftreten eines PMS ist das unterschiedliche Zusammenwirken von Hormonen; daraus resultierend kann es zu Flüssigkeits- und Elektrolytverschiebungen im weiblichen Körper kommen (Stauber et al., 2007, p. 104). Erwähnte Hormonschwankungen können auf der endogenen Variation von Östrogen und Progesteron während des natürlichen Zyklus beruhen oder durch den exogenen Einfluss von synthetischen Hormonen durch orale Kontrazeptiva hervorgerufen werden. Symptome, welche kurz vor oder in den ersten Tagen der Menstruation auftreten, können unter anderen Gewichtszunahme, Stimmungsschwankungen, Müdigkeit und Schmerzen in Unterleib, Rücken, Brust oder Kopf sein. Diese Faktoren stehen in Zusammenhang mit einem Anstieg an traumatischen muskuloskelettalen Verletzungen

(Dickerson et al., 2003; Lebrun, 1993). Frauen, die körperlich aktiv sind, zeigen weniger PMS-Symptome, insbesondere klagen sie weniger über Kopf- und Regelschmerzen (Timonen and Procopé, 1971).

3.5 Studienlage zu körperlicher Aktivität und weiblichem Zyklus

Für die sporttreibende Frau kann der weibliche Zyklus zu gegensätzlichen physiologischen Aktionen führen, welche die sportliche Performance beeinflussen können. Die besten sportlichen Leistungen konnten in den Tagen kurz nach der Menstruation verzeichnet werden. Schlechtere Leistungen wurden dagegen in den ersten Tagen der Menstruation gemessen (Lebrun, 1993). Studien, die einen Anstieg des Verletzungsrisikos während der späten Lutealphase und in den ersten Tagen der Menstruation verzeichnen, gehen davon aus, dass Verletzungen, die innerhalb dieser Zyklusphasen auftreten, auf das prämenstruelle Syndrom zurückzuführen sind. Es konnte herausgefunden werden, dass Frauen mit PMS signifikant größere Gleichgewichtsschwankungen aufweisen. Außerdem zeigen sie eine größere Schwelle der passiven Kniegelenksbeweglichkeit als Frauen ohne PMS-Symptome (Fridén et al., 2003). Frauen, die orale Kontrazeptiva nehmen, sind einem geringeren Verletzungsrisiko ausgesetzt. Es wird vermutet, dass dies aufgrund der reduzierten Dysmenorrhoea und anderen prämenstruellen Symptomen der Fall ist. Auch der reduzierte Blutverlust aufgrund der Einnahme von oralen Kontrazeptiva könnte dazu beitragen, dass weniger Verletzungen auftreten (Lebrun, 1993). Diese Symptome scheinen außerdem einen negativen Einfluss auf die Koordination von Bewegung zu haben, wodurch ebenfalls das Risiko einer Verletzung ansteigt (Möller-Nielsen and Hammar, 1989). Auf Grundlage dieser Erkenntnisse besteht die Vermutung, dass Verletzungen, die in einem Zeitraum kurz vor bzw. während der Menstruation auftreten, nicht primär durch eine Veränderung der mechanischen Bindegewebeigenschaften aufgrund der hormonellen Situation im Körper von Frauen auftreten. Möglicherweise sind vielmehr psychische und physische Veränderungen, die der weibliche Organismus in dieser Zeit erfährt, ursächlich für ein erhöhtes Verletzungsrisiko. Unterstützt wird diese Vermutung dadurch, dass die Hormonlevel von Östrogen, Progesteron und Relaxin im Blut der Frau in diesem Zeitraum am geringsten sind und damit die Möglichkeit ausgeschlossen wird, dass eine hohe Hormonlevelkonzentration für das Verletzungsrisiko verantwortlich ist (Reed and Carr, 2000).

3.6 Orale Kontrazeption

Die orale Kontrazeption dient der Empfängnisverhütung und wird in Deutschland von ca. 60 % aller Frauen für diesen Zweck genutzt (Frank-Herrmann et al., n.d.). Die Hauptformen

der hormonellen Verhütungsmittel verhindern den Eisprung und werden aus diesem Grund als Ovulationshemmer bezeichnet. Es gibt auch Präparate, welche den Zervixschleimpfropf durch ein Angebot von Gestagenen für Spermien unpassierbar machen. Die Hauptbestandteile der Ovulationshemmer sind Östrogene und Gestagene, deren Wirkung darin besteht, die Abgabe von GnRH aus dem Hypothalamus zu hemmen. So wird die Bildung sprungreifer Eizellen und damit auch der Eisprung unterdrückt. Aufgrund der dauerhaft hochgehaltenen Hormonspiegel kann es ebenso zu entsprechenden Nebenwirkungen wie Kopfschmerzen, Abgeschlagenheit oder Übelkeit kommen (Schwegler and Lucius, 2016, p. 472).

Die Minipille greift in die Regulation des natürlichen Zyklus nur wenig ein. Die Östrogenproduktion während des Eisprungs wird nur in geringem Maß gehemmt. Auch die Gonadotropinspiegel bleiben weitgehend unberührt. Allerdings werden die LH-Gipfel deutlich vermindert oder sogar zeitlich verschoben. Dies zieht den Effekt nach sich, dass der Eisprung unregelmäßig erfolgt. Die Minipille bewirkt hauptsächlich physikochemische Veränderungen des Zervixsekrets und damit eine Blockierung für das Durchdringen von Spermien. Die häufigsten Nebenwirkungen bei Frauen, die diese Form der Pille nehmen, sind Durchbruchblutungen oder Schmierblutungen aufgrund der mangelnden Stimulierung des Corpus luteum durch LH und einer damit verbundenen Gelbkörperinsuffizienz (Rabe and Runnebaum, 2013, p. 34).

Die meisten Frauen nutzen die Pille nicht nur als Verhütungsmittel, sondern auch, um den Zyklus zu kontrollieren und prämenstruelle Symptome zu dämpfen. Die Effekte der Nutzung der Pille können gerade auch für Leistungssportlerinnen relevant sein. Einige Studien zeigen eine gesteigerte Leistungsfähigkeit aufgrund der Kontrolle der PMS-Symptomatik und des reduzierten Blutverlustes. Gerade für junge Frauen wird die Nutzung einer oralen Kontrazeption auch zur Bekämpfung von Hautproblemen zu einem relevanten Thema, denn Androgene wirken auf die Funktion der Talgdrüsen und Haarfollikel (Kerschler, 2009). Die Nutzung der Pille kann mit Vor- und Nachteilen verbunden sein. Die Reaktion des weiblichen Körpers auf die Nutzung der Pille kann, wie der vorherige Abschnitt zeigt, sehr variabel ausfallen. Dementsprechend sollte die Einnahme im klinischen Setting überwacht sein (Bennell et al., 1999). Grundsätzlich sollte die chemische Beeinflussung des gesamten Organismus durch die Einnahme von oralen Kontrazeptiva gründlich abgewogen werden, da mit der Einnahme ebenso erhebliche Nebenwirkungen wie Übelkeit, Erbrechen, Kopfschmerzen oder ein erhöhtes Risiko für andere Krankheitsbilder wie Thrombosen oder Schlaganfälle bestehen könnte (Goetzenjan et al., 2013).

4 Hormoneller Einfluss des weiblichen Zyklus auf die mechanischen Eigenschaften von faserigem Bindegewebe

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit der Frage, inwiefern weibliche Geschlechtshormone in der Lage sind, die mechanischen Eigenschaften von faserigen Bindegeweben zu beeinflussen. Dabei werden einzelne Hormone aufgegriffen und deren möglicher Wirkmechanismus am faserigen Bindegewebe beschrieben.

4.1 Einfluss von Östrogen

Zuerst wird der Einfluss von Östrogen beleuchtet, da dieses Hormon in Bezug auf eine Veränderung der mechanischen Eigenschaften von faserigen Bindegeweben die größte Evidenz aufweist. Der Begriff Östrogen wird dabei als Oberbegriff für die weiblichen Geschlechtshormone Östron, Östradiol und Östriol verwendet (Leblanc et al., 2017). Die erhöhte Verletzungsanfälligkeit des vorderen Kreuzbandes bei Frauen im Vergleich zu Männern scheint ein bedeutender Aspekt zu sein, weshalb weibliche Geschlechtshormone Bindegewebseigenschaften ändern. Dies wird auch mit dem Zeitpunkt des Zyklus in Verbindung gebracht. So zeigt das vordere Kreuzband zum Zeitpunkt der Ovulation eine erhöhte Laxizität im Vergleich zur Follikularphase (Wojtys et al., 1998a). Im Zusammenhang mit dem vorderen Kreuzband meint eine erhöhte Laxizität eine verminderte Steifigkeit dieser Struktur. Dies wird von anderen wie der Arbeitsgruppe von Heitz und Kollegen bestätigt, die ebenfalls eine gesteigerte Laxizität des vorderen Kreuzbandes im Verlauf des Zyklus im Zusammenhang mit dem Peaklevel von Östrogen feststellen konnten (Heitz et al., 1999). Grundsätzlich konnte außerdem gezeigt werden, dass weibliche Geschlechtshormone einen hemmenden Effekt auf Muskelfasern haben, um den Muskel vor Verletzungen oder Rupturen zu schützen (Kobori and Yamamuro, 1989). Eine ähnliche Wirkung des zirkulierenden Östrogens konnte für die Patellasehne bei Frauen nachgewiesen werden. Dabei hemmt das Hormon die Kollagensynthese und die Proliferation von Fibroblasten (Magnusson et al., 2016; Yu et al., 2001). Dies ist möglicherweise eine Erklärung für eine geringere Steifigkeit der Patellasehne bei hohen Östrogenkonzentrationen im Vergleich zum Zeitpunkt der Menstruation. Eine weitere Erklärung, warum Östrogen eine Modulation von Bindegewebseigenschaften bedingen könnte, ist die verringerte Aktivität des Enzyms Lysyl Oxidase in Zusammenhang mit einer hohen Östrogenkonzentration. Dieses Enzym sorgt für die Ausbildung von Crosslinks in faserigem Bindegewebe, womit dessen Steifigkeit nicht nur vom Kollagengehalt abhängig ist, sondern auch von der Dichte der Crosslinks innerhalb der Kollagenmoleküle (Lee et al., 2015a). Je weniger Crosslinks vorhanden sind, desto größer ist die Laxizität von faserigem Bindegewebe. Dieser Aspekt stützt die Vermutung, dass das Verletzungsrisiko ansteigt, wenn viel Östrogen im Blut ist, was zum Zeitpunkt der Ovulation der Fall ist.

Hormoneller Einfluss des weiblichen Zyklus auf die mechanischen Eigenschaften von faserigem Bindegewebe

Ähnliche Ergebnisse liefert die Studie von Park und seiner Arbeitsgruppe. Diese konnte eine gesteigerte Knielaxizität zum Zeitpunkt der Ovulation im Vergleich zur Lutealphase festhalten sowie eine um 17 % reduzierte Steifigkeit zwischen diesen Zeitpunkten (Park et al., 2009b). Dahingehend ähnliche Resultate liefert eine andere Studie, die den Zusammenhang der weiblichen Geschlechtshormone Progesteron sowie Östrogen und der Steifigkeit des vorderen Kreuzbandes während eines Zyklus untersucht. Die Ergebnisse zeigen eine negative Korrelation von erhöhten Progesteron- und Östrogenwerten in Verbindung mit der Steifigkeit des vorderen Kreuzbandes nahe dem Zeitpunkt der Ovulation (Romani et al., 2003). Auch für die Achillessehne konnte ein chronischer Einfluss von Östrogen mit einer verringerten Steifigkeit in Verbindung gebracht werden (Bryant et al., 2008). Zur Wirkung von Östrogen in Bezug auf die Eigenschaften von faserigem Bindegewebe bietet Tabelle 2 eine Zusammenfassung.

Im Gegensatz dazu konnte eine Untersuchung an Primaten keinen direkten Effekt von Östrogen auf die Eigenschaften des vorderen Kreuzbandes oder der Patellasehne nachweisen. Wentorf et al. (2006) sehen damit die Überlegung gestützt, dass Verletzungen am Kniebandapparat bei weiblichen Athleten kein direktes Resultat des Östrogens auf die Eigenschaften von Ligamenten sind. Ähnliches konnte die Studie von Hertel und Kollegen festhalten. Obwohl sich die Östrogen- und Progesteronspiegel gemäß den Zyklusphasen veränderten, konnte kein Zusammenhang mit der neuromuskulären Leistungsfähigkeit während des Zyklus sowie der Knielaxizität, die in dieser Untersuchung mit einem Arthrometer bestimmt wurde, festgehalten werden (Hertel et al., 2006). Im Vergleich zu Männern konnte bei Frauen eine gesteigerte Laxizität des vorderen Kreuzbandes über den gesamten Verlauf des Zyklus beobachtet werden. Die Autoren gehen allerdings davon aus, dass diese Unterschiede unabhängig von dem Einfluss des Östrogens auftreten und vielmehr individuelle anthropometrische Gegebenheiten für die erhöhte Laxizität verantwortlich sind. So besitzen Männer beispielsweise eine größere Querschnittsfläche dieses Gewebes, außerdem scheint es einen Zusammenhang zwischen Größe und Masse des Individuums und der Laxizität zu geben. Je größer und schwerer eine Person ist, desto steifer ist das Gewebe im Vergleich zu einer kleineren und leichteren Person (Pollard et al., 2006). Diese Studie betrachtete allerdings nicht den Einfluss einer oralen Kontrazeption und bezieht sich allein auf das vordere Kreuzband. Die Arbeitsgruppe von Burgess et al. hat den Zusammenhang von Menstruationsphasen sowie den dazugehörigen Hormonlevelkonzentrationen und den Eigenschaften von Sehnen untersucht. Auch hier konnten keine signifikanten Unterschiede der mechanischen Eigenschaften von Sehnen bei Frauen mit einem natürlichen Zyklus festgehalten werden. Auf Basis dieser Ergebnisse wird vermutet, dass Östrogen vielmehr einen chronischen als einen akuten Einfluss auf die Eigenschaften von Sehnen hat (Burgess et al., 2009). Aufgrund der Vermutung des chronischen Einflusses von Östrogen wurde in der vorliegenden Studie

Hormoneller Einfluss des weiblichen Zyklus auf die mechanischen Eigenschaften von faserigem Bindegewebe

ein Zeitraum ohne hormonelle Verhütungsmittel von mindestens sechs Monaten festgelegt. Damit soll ausgeschlossen werden, dass ein möglicher Zusammenhang übersehen wird, weil das Bindegewebe, in diesem Fall die Patellasehne, der Probandinnen zu wenig Zeit hatte, sich dem natürlichen Schwankungsverhalten der Hormone im Verlauf des Zyklus anzupassen.

Zusammenfassend lässt sich über den Einfluss von Östrogen festhalten, dass dieses Hormon bei Sehnen und Bändern veränderte mechanische Eigenschaften aufgrund einer Hemmung der Kollagensynthese bedingen könnte. Wenn eine Veränderung des Gewebes gezeigt werden konnte, wurde eine verringerte Steifigkeit dieser Gewebe in Zusammenhang mit hohen Östrogenwerten beobachtet.

4.2 Einfluss von Relaxin

In der Fachliteratur wird darauf hingewiesen, dass das Peptidhormon Relaxin bei schwangeren Frauen das Wachstum und die Umbildung von reproduktiven und anderen Geweben während der Schwangerschaft vorantreibt (Hsu et al., 2002). Dementsprechend besteht ein Zusammenhang zwischen der Relaxinkonzentration im Blut während der Schwangerschaft und einer Steigerung im Straight-leg-raise-Test. Aufgrund dieses Ergebnisses liegt die Vermutung nahe, dass Relaxin Auswirkungen auf die funktionellen Eigenschaften des Beckens hat und für eine Erhöhung der Laxizität der Strukturen in diesem Bereich verantwortlich ist (Vøllestad et al., 2012). Relaxin wird vom Gelbkörper allerdings auch in der späten Lutealphase eines natürlichen Zyklus produziert und ist dann entsprechend auch peripher messbar (vgl. Abbildung 7 zur Hormonlevelkonzentration im Verlauf des Zyklus). Daher besteht die Vermutung, dass Relaxin auch bei nicht schwangeren Frauen gewebmodellierende Effekte hervorrufen kann. Die Funktion von Relaxin wurde bisher nur im weiblichen Organismus nachgewiesen. Außerdem kann davon ausgegangen werden, dass Relaxin nicht allein wirkt, sondern in Verbindung mit anderen Hormonen und Wachstumsfaktoren wie dem IGF-1 (Einspanier and Ivell, 2000). Einen zusammenfassenden Überblick über die Wirkung von Relaxin bietet Tabelle 2. In Bezug auf die Architektur von Sehnen konnte ein Effekt auf die Kollagensynthese gezeigt werden. Eine reduzierte Steifigkeit der Patellasehne steht in Verbindung mit einer erhöhten Relaxinkonzentration (Kobori and Yamamuro, 1989). Der Effekt des Peptidhormons ist von der Konzentration von Progesteron und Östrogen abhängig. Eine hohe Konzentration dieser Hormone fördert die Wirkung von Relaxin (Dehghan et al., 2014). Auch hier wird ein Zusammenhang zwischen der Zyklusphase und der Beeinflussung des faserigen Bindegewebes vermutet. Da hohe Konzentrationen von Östrogen und Progesteron einen positiven Effekt auf das Peptidhormon besitzen, besteht der Rückschluss darin, dass die größte Wirkung von Relaxin zum Zeitpunkt der Ovulation und kurz danach in der Luteal-

Hormoneller Einfluss des weiblichen Zyklus auf die mechanischen Eigenschaften von faserigem Bindegewebe

phase zum Ausdruck kommt, in welcher auch die Relaxinkonzentration ihren Peak erreicht (vgl. Abbildung 7).

Allerdings konnte der Einfluss von Relaxin nicht für alle bindegewebigen Strukturen gleichermaßen nachgewiesen werden. Im Vergleich zur Achillessehne zeigte sich ein größerer Effekt an der Patellasehne in Bezug auf die Modulation der Steifigkeit. Aufgrund der selektiven Wirkung wird davon ausgegangen, dass dies von den intrinsischen Eigenschaften der Sehne abhängt (Pearson et al., 2011). In der Untersuchung muss beachtet werden, dass zwei Sehnen unterschiedlicher Lokalisation verglichen wurden. Im Vergleich zu Männern konnten zudem bei Frauen an den Zellen des vorderen Kreuzbandes eine signifikant größere Anzahl von Relaxinrezeptoren gefunden werden, während die Rezeptoren für Östrogen bei Männern und Frauen ähnlich verteilt waren (Faryniarz et al., 2006). Dies könnte ein Indiz für die höhere Stoffwechselaktivität von Ligamenten im Vergleich zu Sehnen sein (Amiel et al., 1983). Es besteht der Verdacht, dass die höhere Anzahl der Relaxin-Rezeptoren an den Zellen des vorderen Kreuzbandes bei Frauen eine Erklärung für die Modulation der zellulären Antwort auf Östrogen und damit eine weitere mögliche Ursache für das erhöhte Verletzungsrisiko von Frauen im Vergleich zu Männern in Bezug auf das vordere Kreuzband und den Einfluss weiblicher Geschlechtshormone darstellt (Faryniarz et al., 2006). Bei der Untersuchung der peripheren Gelenkbeweglichkeit von schwangeren Frauen konnte eine Steigerung während der Schwangerschaft allerdings nicht in Korrelation mit einer erhöhten Konzentration von Relaxin gebracht werden. Es wird angenommen, dass eine erhöhte Gelenkbeweglichkeit nicht ursächlich durch eine Erhöhung der Relaxinlevelkonzentration während der Schwangerschaft hervorgerufen wird (Schauberger et al., 1996). Allerdings lässt sich die Hormonsituation im Körper von schwangeren und nicht schwangeren Frauen nicht gleichsetzen. Aus diesem Grund wurde für die vorliegende Untersuchung eine bestehende oder vergangene Schwangerschaft ausgeschlossen, um keine Verzerrung der Daten hervorzurufen. In Anbetracht der oben aufgeführten Fachliteratur könnte dennoch ein Einfluss von Relaxin auf die Bindegewebe von nicht schwangeren Frauen bestehen.

4.3 Wachstumsfaktoren und sonstige Einflussfaktoren

Die Hemmwirkung von Östrogenen auf die Kollagensynthese wurde bereits beleuchtet. Der Mechanismus dahinter könnte entweder eine direkte oder indirekte Unterdrückung von IGF-1 sein, einem insulinähnlichen Wachstumsfaktor, der mit Beginn der Menstruation ansteigt und sich in der frühen und späten Lutealphase wieder verringert (Hansen et al., 2008). Gründe für eine veränderte Kollagensynthese des faserigen Bindegewebes können dementsprechend auch mit einer veränderten Biovariabilität dieses Wachstumsfaktors einhergehen. Es wird vermutet, dass eine geringe Kollagenproduktion in Verbindung mit hohen IGF-1-Werten

Hormoneller Einfluss des weiblichen Zyklus auf die mechanischen Eigenschaften von faserigem Bindegewebe

eine gesteigerte Knielaxizität bedingen kann (Shultz et al., 2012). Erhöhte Werte dieses Hormons stehen in Zusammenhang mit einem Rückgang der Zugfestigkeit des Bindegewebes und einer daraus resultierenden verringerten Steifigkeit. Genannte Effekte zum Einfluss von IGF-1 können in Tabelle 2 nachvollzogen werden. Auch der transformierende Wachstumsfaktor TGF führt zu einer gesteigerten Kollagensynthese. Gegenätzlich dazu konnte für den epidermalen Wachstumsfaktor EGF ein negativer Effekt auf den Kollagengehalt in Sehnen und Bändern nachgewiesen werden (Hagerty et al., 2012). Die Erkenntnisse über die Auswirkung von Wachstumsfaktoren auf die Kollagensynthese legen nahe, dass deren Einfluss in Bezug auf die Veränderung der mechanischen Eigenschaften von faserigen Bindegeweben nicht unterschätzt werden sollte. Es wurde zudem die Hypothese überprüft, inwiefern ein akutes Training die Synthese von myofibrillären Proteinen und intramuskulärem Kollagen bei Frauen stimuliert. In Abhängigkeit von der Zyklusphase wurde ein unterschiedliches Ausmaß der Veränderung vermutet. Die Ergebnisse zeigen allerdings keinen Zusammenhang zwischen Zyklusphase und der myofibrillären Proteinsynthese sowie der Muskelkollagensynthese bei Frauen in Abhängigkeit der Zyklusphase. Die betreffende Studie hebt hervor, dass Veränderungen der weiblichen Sexualhormone während eines Zyklus keinen Einfluss auf die Syntheseraten nach akuter körperlicher Aktivität zeigen (Miller et al., 2006). Damit liegt die Vermutung nahe, dass mögliche Veränderungen mechanischer Bindegewebeigenschaften im Verlauf des Zyklus tatsächlich von den Hormonen bewirkt werden und das Ausmaß der körperlichen Aktivität nicht die Auswirkungen der Hormone am Bindegewebe beeinflusst.

Außerdem konnten Untersuchungen zeigen, dass die Achillessehne bei weiblichen Ratten ein besseres Heilungsverhalten nach einer Ruptur aufweist als die der männlichen Tiere. Dabei war die Muskelfasergröße bei den weiblichen Ratten besser erhalten, außerdem wiesen sie an der Stelle der Verletzung vermehrt Kollagen Typ III auf, als das bei den männlichen Tieren der Fall war (Fryhofer et al., 2016). Die Vermutung liegt nahe, dass weibliche Geschlechtshormone möglicherweise einen Einfluss auf das Heilungsverhalten von Sehnen und Bändern haben. Es konnten jedoch keine Aussagen dazu gefunden werden, inwiefern die Zyklusphase ein besseres Heilungsverhalten bedingen könnte.

4.4 Einfluss einer oralen Kontrazeption

Orale Kontrazeptiva stehen in dem Verdacht, die Kollagensyntheserate in Sehnen, Knochen, Muskeln und faserigem Bindegewebe zu beeinflussen. Dieser Effekt wird auf die geringere Bioverfügbarkeit von IGF-1 zurückgeführt (Hansen et al., 2009b). Das heißt, es ist weniger IGF-1 vorhanden, wenn orale Kontrazeptiva zugeführt werden, was sich positiv auf die Kollagensynthese auswirkt. Damit würde sich die Zugfestigkeit von faserigem Bindegewebe

Hormoneller Einfluss des weiblichen Zyklus auf die mechanischen Eigenschaften von faserigem Bindegewebe

erhöhen. Diese Vermutung wird durch die nachfolgende Studie gestützt, denn grundsätzlich scheint die Einnahme von oralen Kontrazeptiva einen Einfluss auf die Sehneneigenschaften zu haben. Es konnte gezeigt werden, dass Frauen, welche hormonelle Verhütungsmittel zu sich nehmen, eine geringere Belastung der Achillessehne während maximal ausgeführter Plantarflexionen aufweisen als Frauen, die nicht unter dem Einfluss dieser Präparate stehen. Es wird angenommen, dass die geringere Belastung auf die Achillessehne ein Resultat rezeptorbezogener Effekte im Hinblick auf die Kollagensyntheserate darstellen (Bryant et al., 2008). Demgegenüber konnte jedoch gezeigt werden, dass die Einnahme der Pille keine Auswirkungen auf die Struktur oder die biomechanischen Eigenschaften der Patellasehne hat (Hansen et al., 2013b). Ebenso konnte keine protektive Wirkung einer oralen Kontrazeption im Hinblick auf Verletzungen am vorderen Kreuzband nachgewiesen werden (Ruedl et al., 2009). Im Vergleich zu Nutzern einer oralen Kontrazeption konnten bei Frauen mit natürlichem Zyklus über den gesamten Zyklusverlauf Schwankungen im Hinblick auf die Elastizität des vorderen Kreuzbandes sowie bei der Kraft zum Beugen des Knies und der Kniebeugungsstreckungshysterese festgehalten werden. Bei den Probandinnen, die orale Kontrazeptiva einnehmen, konnten dagegen keine Schwankungen beobachtet werden (Lee et al., 2014). Diese Ergebnisse deuten ebenso auf die unterschiedliche Einwirkung einer oralen Kontrazeption im Hinblick auf die veränderten Eigenschaften von Sehnen und Bändern hin. Die Auswirkungen einer oralen Kontrazeption sollen in vorliegender Untersuchung durch die Unterscheidung in eine Versuchsgruppe, welche keine oralen Verhütungsmittel zu sich nimmt, und einer Kontrollgruppe, die orale Kontrazeptiva einnehmen, aufgezeigt werden.

4.5 Differenzierte Betrachtung spezifischer Bindegewebe

Nachfolgende Unterkapitel beschäftigen sich mit der Auswirkung von Geschlechtshormonen auf die verschiedenen Bindegewebsstrukturen, die in der vorliegenden Arbeit untersucht wurden. Das vordere Kreuzband wird ebenfalls erwähnt, da diese Struktur in Verbindung mit der Auswirkung weiblicher Geschlechtshormone im Verlauf des Zyklus am häufigsten untersucht wurde.

4.5.1 Vorderes Kreuzband

Kapitel 2 über den Aufbau von Sehnen, Bändern und Apponeurosen kann entnommen werden, dass diese zwar eine grobe Ähnlichkeit aufweisen, aber im Hinblick auf zelluläre Bestandteile und den strukturellen Aufbau erhebliche Unterschiede aufweisen. Bänder besitzen im Vergleich zu Sehnen eine größere Tendenz, Cross Links und eine gesteigerte metabolische Aktivität auszubilden (Amiel et al., 1983). Es besteht die Möglichkeit, dass die erhöhte metabolische Sensibilität von Bändern ebenso eine gesteigerte Wirkung von Hormonen zu-

Hormoneller Einfluss des weiblichen Zyklus auf die mechanischen Eigenschaften von faserigem Bindegewebe

lässt. Dies könnte das erhöhte Verletzungsrisiko des vorderen Kreuzbandes im Vergleich zur Achillessehne bei Frauen erklären. Bänder haben eine erhöhte Tendenz, Cross Links auszubilden. In Verbindung mit dem Effekt von Lysyl Oxidase bei hohen Östrogenwerten scheint sich dies negativ auf die Bandfestigkeit auszuwirken. Dabei führt die Aktivität dieses Enzyms zur vermehrten Ausbildung von Cross Links, was normalerweise Verbindungen zwischen Kollagenen hervorruft und für Steifigkeit sorgt. Unter dem Einfluss von Östrogen wird jedoch die Aktivität von Lysyl Oxidase und damit auch die Entstehung von vielen Cross Links in einem Ligament gehemmt, was eine gesteigerte Laxizität des vorderen Kreuzbandes bedingen könnte und ein höheres Verletzungsrisiko dieser Struktur impliziert. So zeigt das vordere Kreuzband zum Zeitpunkt der Ovulation eine erhöhte Laxizität im Vergleich zur Follikularphase. In dieser Phase erreichen ebenso die Östrogenwerte ihr Peaklevel, wie in Abbildung 7 nachvollzogen werden kann (Wojtys et al., 1998a).

4.5.2 Achillessehne

Entgegengesetzt zu der Häufigkeit von Verletzungen des vorderen Kreuzbandes treten Achillessehnenrupturen weitaus häufiger bei Männern als bei Frauen auf, das Verhältnis liegt bei 1:81 (Vosseller et al., 2013). Ursache für dieses Verhältnis könnte sein, dass die Achillessehne dem chronischen Einfluss von Östrogen ausgesetzt ist und dadurch weniger steif ist (Bryant et al., 2008). Eine verringerte Steifigkeit könnte sich in diesem Fall schützend auswirken. Diese Vermutung konnte in einer anderen Untersuchung an der Achillessehne von Mäusen bestätigt werden. Dabei zeigt die Achillessehne der weiblichen Maus verringerte viskoelastische Eigenschaften, was dazu führt, dass diese möglicherweise eine stärkere Beständigkeit gegen Verformung unter Krafteinwirkung und eine effizientere Energieübertragung ermöglicht (Pardes et al., 2016). Im Gegensatz dazu zeigt eine andere Arbeitsgruppe, dass die Steifigkeit der Achillessehne nicht vom Geschlecht beeinflusst wird, sondern von der Muskelkraft. Es konnte kein Unterschied zwischen der Steifigkeit und der maximalen isometrischen Kraft bei Männern und Frauen gezeigt werden. Allerdings variierte die Steifigkeit innerhalb der Individuen (Morrison et al., 2015). Bei dieser Untersuchung wurde nur eine einmalige Messung durchgeführt. Das heißt es konnten keine Rückschlüsse über Schwankungen im Hinblick auf den weiblichen Zyklus getroffen werden. Aus der Studie konnten ebenso keine Informationen entnommen werden, ob weibliche Probanden rekrutiert wurden, die einen natürlichen Zyklus haben oder die Pille nehmen. Die aufgeführten Studien lassen die Vermutung zu, dass die Achillessehne bei Nutzern einer oralen Kontrazeption weniger steif sein müsste als bei denjenigen, die einen natürlichen Zyklus aufweisen, da der chronische Einfluss des Östrogens über die Pille eine geringere Steifigkeit bedingen würde.

Hormoneller Einfluss des weiblichen Zyklus auf die mechanischen Eigenschaften von faserigem Bindegewebe

4.5.3 Patellasehne

Eine erhöhte Relaxinkonzentration konnte im Zusammenhang mit einer reduzierten Steifigkeit der Patellasehne nachgewiesen werden (Kobori and Yamamuro, 1989). Eine ähnliche Wirkung konnte für Östrogen an der Patellasehne von Frauen nachgewiesen werden. Dabei hemmt das Hormon die Kollagensynthese und die Proliferation von Fibroblasten (Magnusson et al., 2016; Yu et al., 2001). Dies wäre möglicherweise eine Erklärung für eine geringere Steifigkeit der Patellasehne bei hohen Östrogenkonzentrationen. Für die vorliegende Untersuchung würde aufgrund der genannten Fachliteratur ein Effekt um den Zeitpunkt des Eisprungs oder kurz danach auftreten und eine geringere Steifigkeit implizieren als in der Phase der Menstruation.

4.5.4 Plantarapponneurose

Auch die Plantarfaszie scheint von der Wirkung der weiblichen Geschlechtshormone im Verlauf des Zyklus beeinflusst. Studien konnten zeigen, dass die Fußlänge zum Zeitpunkt der Ovulation im Vergleich zur Menstruation signifikant zunimmt. Dieses Phänomen wird auf die gesteigerte Elastizität der Plantarapponneurose während des Eisprungs zurückgeführt. Im Zusammenhang mit dieser mechanischen Veränderung dieses Bindegewebes wurde ebenso eine negative Beeinflussung des Gleichgewichtsverhaltens und der posturalen Stabilität festgestellt (Petrofsky and Lee, 2015). Werden Männer und Frauen im Hinblick auf das Gleichgewichtsverhalten und die Fußlänge verglichen, unterscheiden sie sich zum Zeitpunkt der Menstruation nicht. Die Unterschiede werden erst während des Eisprungs sichtbar. Dieser Aspekt bekräftigt zum einen den Einfluss weiblicher Geschlechtshormone auf die Mechanik des Bindegewebes und verdeutlicht die Relevanz des Zeitpunktes der Wirkung dieser Hormone im Verlauf des weiblichen Zyklus. Außerdem stellt die Verminderung der Gleichgewichtsfähigkeit einen wichtigen Aspekt in Bezug auf das Sturz- und Verletzungsrisiko von Frauen zum Zeitpunkt der Ovulation dar (Lee and Petrofsky, 2018).

4.5.5 Fasziale Strukturen

Ebenso konnte gezeigt werden, dass es bei Männern und Frauen Unterschiede im Hinblick auf myofasziale Schmerzen gibt. Dementsprechend leiden erwachsene Frauen häufiger unter diesem Beschwerdebild als Männer. Aus diesem Grund wird davon ausgegangen, dass hormonelle Einflussfaktoren in diesem Zusammenhang ebenso relevant sein könnten. Östrogen und Relaxin sind beispielsweise am Aufbau der extrazellulären Matrix sowie dem Kollagenumbau beteiligt und tragen damit zur Funktion des myofaszialen Gewebes bei. Darüber hinaus hemmen Östrogen und Relaxin Entzündungsaktivitäten und beeinflussen damit die Sensibilisierung von Fasziennozizeptoren. Es konnten Östrogen- sowie Relaxin-Rezeptoren

Hormoneller Einfluss des weiblichen Zyklus auf die mechanischen Eigenschaften von faserigem Bindegewebe

an Fasziendfibroblasten am Bein gefunden werden (Fede et al., 2016). Möglicherweise sind dementsprechend auch Muskeln von der Auswirkung weiblicher Geschlechtshormone betroffen.

Zusammenfassung

Die letzten Abschnitte verdeutlichen die kontroverse Studienlage zum Einfluss weiblicher Geschlechtshormone im Hinblick auf die Veränderung der mechanischen Eigenschaften von Sehnen und Bändern. Es konnten positive Zusammenhänge aufgrund der Fluktuation von Hormonen während des weiblichen Zyklus und damit verbunden eine gesteigerte Laxizität und verminderte Steifigkeit an Strukturen wie der Patellasehne, dem vorderen Kreuzband, der Plantarapponneurose und der Achillessehne gezeigt werden (Bryant et al., 2008; Kobori and Yamamuro, 1989). Allerdings scheint sich eine Verminderung der Steifigkeit unterschiedlich auf das Verletzungsrisiko genannter Strukturen auszuwirken. Die Achillessehne zeigt eine deutlich geringere Anfälligkeit für Verletzungen als das vordere Kreuzband (Vosseller et al., 2013). Demgegenüber stehen Untersuchungen, die keinen Einfluss entsprechender Hormone auf die ligamentären Eigenschaften gezeigt haben (Hertel et al., 2006; Wentorf et al., 2006). Ebenso gegensätzliche Aussagen lassen sich zum Einfluss der Einnahme der Pille zeigen (Bryant et al., 2008; Hansen et al., 2013b). Die verschiedenen Hormone scheinen in Abhängigkeit voneinander zu reagieren (Dehghan et al., 2014). Aus diesem Grund ist es nicht möglich, ein Hormon und dessen konkreten Einfluss zu differenzieren. Doch für die Hormongruppe der Östrogene sowie für das Peptidhormon Relaxin scheint die beste Evidenz zu bestehen. In Abbildung 7 sind die Zeitfenster markiert, in denen, ausgehend von genannter Fachliteratur, der größte Einfluss der Hormone auf das Bindegewebe vermutet werden kann. Hinzu kommt, dass sich Bänder und Sehnen aufgrund ihres Aufbaus und ihrer zellulären Bestandteile voneinander unterscheiden (Amiel et al., 1983). Damit reagieren sie anscheinend auch unterschiedlich auf den Einfluss von Hormonen.

Tabelle 2: Übersicht zur Wirkung von Hormonen auf Bindegewebeeigenschaften (eigene Darstellung)

Östrogen	Relaxin	Wachstumsfaktoren
<ul style="list-style-type: none"> • Steigerung Laxizität in: • → vorderem Kreuzband • verringerte Steifigkeit: • → Patellasehne • → Achillessehne • → Plantarapponneurose 	<ul style="list-style-type: none"> • Steigerung Laxizität in: • vorderem Kreuzband • verringerte Steifigkeit Patellasehne 	<ul style="list-style-type: none"> • hohes IGF-1: → hemmt Kollagenproduktion • → Rückgang Zugfestigkeit von Bindegeweben

Hormoneller Einfluss des weiblichen Zyklus auf die mechanischen Eigenschaften von faserigem Bindegewebe

<ul style="list-style-type: none"> • hemmt Kollagensynthese • hemmt Proliferation von Fibroblasten • hemmt Lysyl Oxidase 	<ul style="list-style-type: none"> • hemmt Kollagensynthese • gewebsmodellierend • wirkt in Verbindung mit anderen Hormonen • selektive Wirkung 	<ul style="list-style-type: none"> • TGF: • → steigert Kollagensynthese
<ul style="list-style-type: none"> • negative Beeinflussung des Gleichgewichts • Peak zum Zeitpunkt der Ovulation 	<ul style="list-style-type: none"> • Peak nach der Ovulation in der Lutealphase 	<ul style="list-style-type: none"> • EGF • → hemmt Kollagensynthese • IGF-Peak um den Zeitpunkt der Ovulation

4.6 Erklärungsmodell für den Einfluss von Hormonen auf die Veränderung der mechanischen Eigenschaften von faserigen Bindegeweben

Das vorherige Kapitel hat sich mit dem Einfluss von weiblichen Geschlechtshormonen des Zyklus und deren Auswirkung auf unterschiedliche faserige Bindegewebe wie dem vorderen Kreuzband, der Achillessehne, der Patellasehne sowie der Plantarapponose beschäftigt. Dabei wurde die Studienlage zu diesem Gebiet näher beleuchtet. Darauf basierend wird für die vorliegende Arbeit davon ausgegangen, dass weibliche Geschlechtshormone das Potential besitzen, Bindegewebeigenschaften zu verändern. Dementsprechend beschäftigt sich das vorliegende Kapitel mit der Frage, welche Mechanismen eine Veränderung der Bindegewebeigenschaften bedingen können. Für eine bessere Darstellung wird ein mögliches Erklärungsmodell beschrieben, welches in Abbildung 8 dargestellt ist und einen zusammenfassenden Überblick mit den wichtigsten Einflussfaktoren bietet, die eine Veränderung der mechanischen Eigenschaften von faserigen Bindegeweben bedingen könnten. Im folgenden Abschnitt wird die schematische Darstellung detaillierter beschrieben.

Die Voraussetzung dafür, dass Hormonschwankungen einen Einfluss auf die Eigenschaften von faserigem Bindegewebe haben, sind Rezeptoren im Gewebe. Studien belegen das Vorhandensein von Östrogen, Relaxin aber auch Progesteronrezeptoren. Diese Nachweise wurden für den menschlichen Organismus vor allem für das vordere Kreuzband erbracht (Seneviratne et al., 2004). Rezeptoren für die weiblichen Geschlechtshormongruppen der Progesterone und Östrogene konnten am vorderen Kreuzband bei Männern und Frauen nachgewiesen werden. Diese waren an der Synovialauskleidung, an den Fibroblasten des vorderen Kreuzbandes und an Zellen in den Blutgefäßwänden dieses Ligaments lokalisiert. In Zusammenhang mit dem erhöhten Verletzungsrisiko von Frauen in Bezug auf das vordere Kreuzband besteht der Rückschluss darin, dass das Verletzungsrisiko nicht nur von anatomischen Differenzen abhängt, sondern ebenso durch die unterschiedliche hormonelle Situa-

Hormoneller Einfluss des weiblichen Zyklus auf die mechanischen Eigenschaften von faserigem Bindegewebe

tion im Körper von Männern und Frauen geprägt ist. Für das weibliche Geschlechtshormon Östrogen besteht die größte Evidenz in Zusammenhang mit der Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften von faserigem Bindegewebe (Liu et al., 1996). Der Regulationsmechanismus für die Reaktion von Bindegewebe auf Sexualhormone ist einzigartig. Neben Östrogen als Haupteinflussfaktor besteht in der aktuellen Fachliteratur ebenso entsprechende Evidenz für das Hormon Progesteron. Beide Hormone können die Genexpression innerhalb hormonabhängiger Gewebe modulieren, wenn sie an spezifische intrazelluläre Rezeptoren gebunden sind (Sciore et al., 1998). Neben der Beeinflussung der Expression von Rezeptoren stellt der Effekt von Lysyl Oxidase, ein Enzym welches in der Lage ist, Cross Links auszubilden und damit die Steifigkeit von Gewebe zu erhöhen, ebenso einen entscheidenden Aspekt für das Erklärungsmodell dar (Lee et al., 2015a). Weiterhin besteht die Annahme, dass Sexualhormone durch die Fluktuation von Kollagen, die Architektur von faserigem Bindegewebe und damit dessen biomechanische Eigenschaften beeinflussen können (Hansen et al., 2009b). Für das Hormon Relaxin konnte ein Einfluss auf die Patellasehne nachgewiesen werden. Dabei steht eine hohe Konzentration dieses Hormons im Zusammenhang mit einer reduzierten Steifigkeit der Patellasehne (Pearson et al., 2011). In Verbindung mit einer erhöhten Relaxinkonzentration konnten auch erhöhte Progesteronwerte festgehalten werden (Dehghan et al., 2014). Die Vermutung liegt nahe, dass die beiden Hormone in ihrer Wirkung auf die Beeinflussung der Steifigkeit von Sehnen zusammenwirken könnten. Unterstützt wird diese Vermutung weiterhin, dass beide Hormone zu einer ähnlichen Zeit im Verlauf des weiblichen Zyklus ihr Peaklevel erreichen wie aus Abbildung 7 hervorgeht. Die Relaxinrezeptoren können unter dem Einfluss von Progesteron und Östrogen hochreguliert werden und dadurch eine größere Wirkung entfalten. Die Herunterregulierung dieser Rezeptoren erfolgt durch Testosteron, wodurch sich die geringe Inzidenz einer kontaktlosen Knieverletzung bei Männern erklären könnte (Dehghan et al., 2014). Die Lokalisation von Relaxinrezeptoren im vorderen Kreuzband bekräftigt die Vermutung des Zusammenhangs der rezeptorabhängigen Modulation von faserigem Bindegewebe (Pearson et al., 2011). Ebenso konnten Östrogen und Progesteronrezeptoren an der Sehne des m. tibialis posterior sowie an der Sehne des Musculus flexor digitorum longum nachgewiesen werden (Bridgeman et al., 2010). Beide Sehnen sind nahe der Achillessehne lokalisiert. Möglicherweise lassen sich entsprechende Erkenntnisse im Zusammenhang mit dem vorderen Kreuzband ebenso auf faserige Bindegewebe der unteren Extremität wie der Achillessehne übertragen. Obwohl Sehnen und Bänder gleichermaßen Rezeptoren für weibliche Geschlechtshormone enthalten und dadurch die Vermutung nahe liegt, dass Hormone in beiden Geweben Veränderungen der mechanischen Eigenschaften mit sich bringen, sollte eine differenzierte Betrachtung dieser Strukturen erfolgen. Trotz vieler Ähnlichkeiten sind Bänder im Hinblick auf ihren Metabolismus aktiver als

Hormoneller Einfluss des weiblichen Zyklus auf die mechanischen Eigenschaften von faserigem Bindegewebe

Sehnen (Amiel et al., 1983). Dementsprechend könnten Bänder ebenso stärker auf den Einfluss von Hormonen reagieren als Sehnen.

Darüber hinaus konnten Östrogenrezeptoren im Faszien­gewebe lokalisiert werden. Dabei war die Expression des Hormonrezeptors in den Fibroblasten der jeweiligen Faszien konzentriert. Relaxinrezeptoren waren auch in Blutgefäßen und Nerven sichtbar. Gezeigt werden konnte das Vorhandensein beider Rezeptoren für die Kruralfaszie des Beins, der Rektusscheide des Bauches und der fascia latae des Oberschenkels (Fede et al., 2016). Daraus resultierend besteht die Vermutung, dass Hormone ebenso muskuläre Strukturen beeinflussen können.

Auffällig ist, dass jeweils eine hohe Konzentration von weiblichen Sexualhormonen mit der Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften von faserigen Bindegeweben assoziiert ist. Dementsprechend konnte für die Plantarapponneurose gezeigt werden, dass diese zum Zeitpunkt des Eisprungs eine erhöhte Elastizität aufweist (Lee and Petrofsky, 2018). Aus diesem Grund ist die Phase des Zyklus ebenso ein Aspekt des Erklärungsmodells. So ist zum Zeitpunkt der Ovulation besonders Östrogen erhöht, während Relaxin und Progesteron im Verlauf der Lutealphase ansteigen, wie in Abbildung 7 zu sehen ist.

Das Verhalten der Rezeptoren im Hinblick auf die Nutzung einer oralen Kontrazeption stellt einen weiteren wichtigen Aspekt in Bezug auf das Erklärungsmodell dar. Es treten Veränderungen im Metabolismus von Fibroblasten des vorderen Kreuzbandes auf, wenn zusätzlich exogenes Östrogen wie in oralen Kontrazeptiva das Zusammenwirken von Östrogen und Progesteron beeinflusst (Yu et al., 2001). Orale Kontrazeptiva haben vermutlich einen hemmenden Effekt auf die Kollagen-Syntheserate in Sehnen, Knochen, Muskeln und faserigem Bindegewebe (Hansen et al., 2009b). In Verbindung zu diesem Aspekt konnten mehrere Studien zeigen, dass durch die Nutzung von oralen Verhütungsmitteln das Verletzungsrisiko insbesondere von Rupturen des vorderen Kreuzbandes um 20 % sinkt (Herzberg et al., 2017). Das Wachstumshormon IGF-1 hat laut Fachliteratur ebenso einen Einfluss. Frauen, welche orale Kontrazeptiva nehmen, weisen niedrigere IGF-1-Werte auf, als jene, die einen natürlichen Zyklus haben (Shultz et al., 2012). Damit ist ein weiterer Unterschied zwischen Frauen, die die Pille nehmen, und denjenigen, die einen natürlichen Zyklus haben, im Hinblick auf Veränderungen der mechanischen Eigenschaften von Bindegeweben erbracht. Die Einnahme von oralen Kontrazeptiva scheint sich anders auf Sehnen und Bänder auszuwirken als ein natürlicher Zyklus, was im Erklärungsmodell unter Abbildung 8 durch die Pfeilrichtung dargestellt wird.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass eine hohe Konzentration von Östrogen, auch von Progesteron in Verbindung mit Relaxin zu modulierenden Effekten durch das Vorhandensein von Rezeptoren an faserigem Bindegewebe führen könnte. Mögliche Veränderun-

Hormoneller Einfluss des weiblichen Zyklus auf die mechanischen Eigenschaften von faserigem Bindegewebe

gen im Hinblick auf die Steifigkeit von faserigen Bindegeweben scheinen von der Phase des Zyklus abhängig zu sein. Entsprechende Veränderungen werden zum Zeitpunkt des Eisprungs und etwas später, in der Lutealphase, erwartet, da rezeptorwirksame Hormone zu diesen Zeitpunkten die höchste Konzentration aufweisen. Zudem könnten sich unterschiedliche faserige Bindegewebe wie Sehnen, Bänder, Aponeurosen und Muskeln in ihren Anpassungsphänomenen aufgrund unterschiedlicher zellulärer Bestandteile voneinander unterscheiden. Ein weiterer Einflussfaktor in diesem Zusammenhang könnte die Lokalisation der unterschiedlichen Gewebe sein. Darüber hinaus scheint die Einnahme von oralen Kontrazeptiva faserige Bindegewebe nicht im selben Ausmaß zu beeinflussen wie ein natürlicher Zyklus (Fede et al., 2016; Lee et al., 2015b; Liu et al., 2018). Wenn das Zusammenspiel der einzelnen Hormone tatsächlich die beschriebene Veränderung an faserigen Bindegeweben hervorrufen kann, müsste dies auch messbar sein. Auf Basis dieser Mechanismen kann vermutet werden, dass sich in der vorliegenden Untersuchung die Versuchsgruppe und die Kontrollgruppe voneinander unterscheiden müssten. Die Auswirkung von Hormonen im Hinblick auf die mechanischen Eigenschaften von faserigen Bindegeweben sowie die Beeinflussung einer oralen Kontrazeption hätte außerdem unterschiedliche Auswirkungen auf das Verletzungsrisiko haben.

Hormoneller Einfluss des weiblichen Zyklus auf die mechanischen Eigenschaften von faserigem Bindegewebe

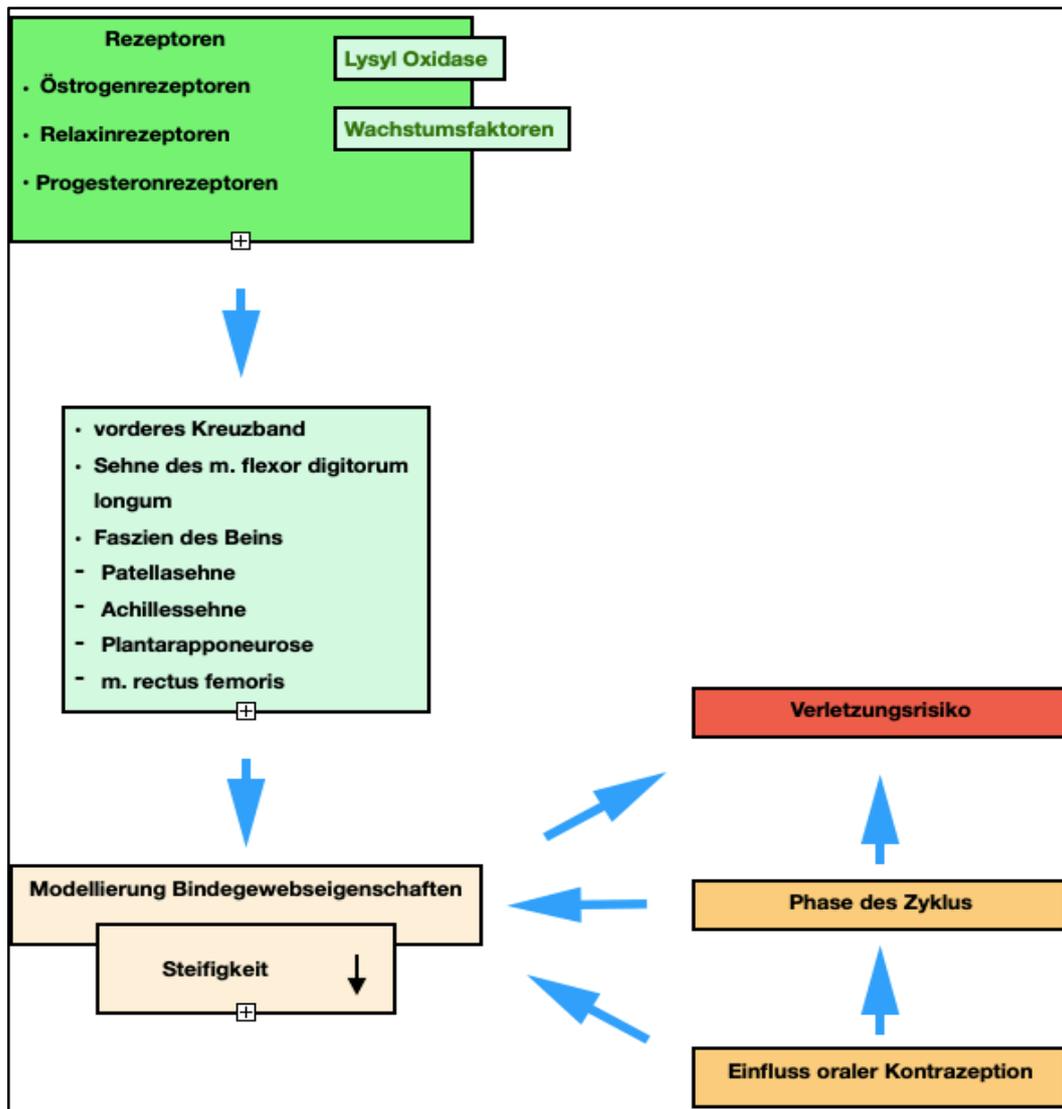


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Erklärungsmodells

5 Fragestellung und Hypothesen

Auf Grundlage des Erklärungsmodells aus dem vorherigen Kapitel scheinen Hormone, die im Verlauf des weiblichen Zyklus ausgeschüttet werden, die Fähigkeit zu besitzen, faserige Bindegewebe wie das vordere Kreuzband, die Patellasehne, die Achillessehne, die Plantarapponose und Muskeln in ihren mechanischen Eigenschaften zu beeinflussen. Darüber hinaus scheint die Einnahme von oralen Kontrazeptiva einen hemmenden Einfluss auf die Kollagensyntheserate zu haben (Hansen et al., 2009a) und damit ein niedrigeres Verletzungsrisiko zu bedingen (Herzberg et al., 2017). Aus diesen Aspekten ergeben sich folgende Fragen:

Verändern Achillessehne, Patellasehne, Plantarapponose und der m. rectus femoris im Verlauf eines Zyklus ihre mechanischen Eigenschaften?

Kann eine Versuchsgruppe von Frauen mit einem natürlichen Zyklus von einer Kontrollgruppe, welche orale Kontrazeptiva einnimmt, im Verlauf eines Zyklus im Hinblick auf die Steifigkeit der Plantarapponose, der Achillessehne, der Patellasehne und des m. rectus femoris voneinander unterschieden werden?

Die relevanten Hormone, welche die Eigenschaften von faserigen Bindegeweben beeinflussen, werden zu unterschiedlichen Zeitpunkten des weiblichen Zyklus ausgeschüttet (vgl. Abbildung 7). Aus diesem Grund besteht die Annahme, dass die Wirkung dieser Hormone womöglich nicht zu einem bestimmten Zeitpunkt messbar ist, sondern über den Verlauf des Zyklus beobachtet werden kann. Der Zeitraum, in dem eine mögliche Veränderung der Gewebeeigenschaften zu erwarten wäre, ist entsprechend in dem Schema markiert und schließt den Zeitpunkt des Eisprungs sowie die anschließende Lutealphase ein. Wenn abgebildete Hormone die Steifigkeit der oben genannten faserigen Bindegewebe beeinflussen können, sollte diese Veränderung auch messbar sein. Außerdem scheint durch die Einnahme der Pille weniger Kollagen im Bindegewebe zu fluktuieren wodurch weniger metabolische Aktivität vermutet werden könnte. Dies könnte eine geringere Schwankung der Messwerte der Kontrollgruppe erklären (Hansen et al., 2009a). Dementsprechend liegt die Vermutung nahe, dass ein größeres Schwankungsverhalten des natürlichen Zyklus im Vergleich zum hormonell gesteuerten Zyklus vorliegt. Dadurch ergeben sich folgende Hypothesen:

H0: Die Gruppe des natürlichen Zyklus schwankt weniger oder genauso wie die Gruppe der oralen Kontrazeption in Bezug auf die Steifigkeiten der Gewebe.

H1: Die Gruppe des natürlichen Zyklus schwankt mehr als die Gruppe der oralen Kontrazeption.

Während der Menstruation sind die Hormonlevel am geringsten, aus diesem Grund stellen die Messwerte dieses Zeitraums die Baseline dar. Eine Änderung der Steifigkeit der Achilles-

Fragestellung und Hypothesen

und der Patellasehne sowie der Plantarapponose wird in der Mitte des Zyklus, um den Zeitpunkt der Ovulation, erwartet (Wojtys et al., 1998b). Park und Kollegen betiteln die Ovulationsphase auch mit der Phase, in der die Laxizität am größten sei (Park et al., 2009a). In dieser Phase ist das Maximum der Östrogenkonzentration im Blut erreicht, was ebenfalls in Abbildung 7 veranschaulicht ist. Dies legt nahe, dass die Steifigkeit der zu messenden Strukturen verringert ist (Diedrich, 2006, p. 75). Gestützt wird diese Annahme dadurch, dass mit einer erhöhten Östrogenkonzentration ebenso eine verringerte Aktivität von Lysyl Oxidase assoziiert ist. Diese bildet normalerweise Cross Links aus und trägt damit zur Steifigkeit bei. In Verbindung mit einer hohen Östrogenkonzentration liegt der Rückschluss nahe, dass weniger Cross Links gebildet werden und damit die Steifigkeit faseriger Bindegewebe um den Zeitpunkt der Ovulation reduziert ist (Lee et al., 2015a). Außerdem stehen hohe Östrogenwerte in Zusammenhang mit einer Reduktion der Proliferation von Fibroblasten und damit einer signifikanten Reduzierung von Kollagen (Yu et al., 2001). In einer Metaanalyse konnte zudem festgehalten werden, dass das Verletzungsrisiko zum Zeitpunkt der Ovulation und im Anschluss an die Ovulation am höchsten ist (Zazulak et al., 2006). Damit müssten sich die NZ und die OK insbesondere während des Eisprungs und danach voneinander unterscheiden können, wie die markierten Bereiche in Abbildung 7 zum Schema der Hormonlevelkonzentration zeigen. Eine Betrachtung während der Lutealphase scheint ebenso induziert, da in dieser Phase ein Anstieg von Progesteron und Relaxin zu erwarten ist und hierbei ebenso veränderte Messwerte im Vergleich zu den ersten Zyklustagen auftreten könnten (Silvers and Mandelbaum, 2007). Aus diesen Überlegungen ergeben sich für die vorliegende Arbeit weitere Hypothesen:

H0: Es gibt keinen Zusammenhang zwischen dem Zeitpunkt des Zyklus und der Veränderung der Bindegewebseigenschaften. Die Steifigkeit der faserigen Bindegewebe zum Zeitpunkt der Ovulation oder in der Lutealphase unterscheidet sich nicht im Vergleich zum Beginn des Zyklus während der Menstruation.

H1: Es gibt einen Zusammenhang zwischen dem Zeitpunkt des Zyklus und der Veränderung von Bindegewebseigenschaften. Die Steifigkeit ist zum Zeitpunkt der Ovulation und in der Lutealphase geringer als zu Beginn des Zyklus während der Menstruation.

Aus den vorherigen Kapiteln lässt sich entnehmen, dass eine Vielzahl an Untersuchungen am vorderen Kreuzband durchgeführt wurde und entsprechende Nachweise für eine nachlassende Laxizität zum Zeitpunkt der Ovulation erbracht werden konnte (Park et al., 2009b). Um in der vorliegenden Untersuchung eine differenzierte Betrachtung von Sehnen und Bändern vorzunehmen, wird stellvertretend für die Steifigkeit des vorderen Kreuzbandes die Plantarapponose gemessen. Hintergrund ist die mechanische Ähnlichkeit dieser beiden Strukturen im Hinblick auf die Steifigkeit (Wearing et al., 2006).

Fragestellung und Hypothesen

Entsprechende Untersuchungen für das Verhalten von Sehnen, insbesondere der Achillessehne, wurden bis zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht häufig durchgeführt. Es besteht die Annahme, dass die Veränderungen, die im Verlauf des Zyklus auftreten, auch auf die Achillessehne übertragen werden können.

Außerdem besteht weiterhin die Frage, inwiefern Plantarapponeurose, Achillessehne, Patellasehne und der m. rectus femoris denselben Anpassungsphänomenen unterliegen. Aufgeführte Fragen und Hypothesenpaare sollen in der vorliegenden Arbeit untersucht und überprüft werden. Das folgende Kapitel schildert die verwendete Methodik.

6 Methodik

6.1 Studienplanung

Die Planung der Studie begann im Oktober 2018. Anfang 2019 war die Planung durch ein positives Ethikvotum (Anhang 08) und die Rekrutierung der Probandinnen abgeschlossen. Die Studie konnte dann von Mitte April bis Anfang Juni durchgeführt werden. Als Basis der Studie dienen eine Versuchsgruppe von Probandinnen mit natürlichem Zyklus und eine Kontrollgruppe mit Probandinnen, welche die Pille zur oralen Kontrazeption nutzen. Aufgrund der wiederholten Messungen an derselben Population und den zwei Gruppen lässt sich die Untersuchung einem kombinierten Quer- und Längsschnittdesign zuordnen. Die Probandinnen konnten den Versuchsgruppen nicht randomisiert zugeordnet werden, da jeweils das Einbeziehungsweise Ausschlusskriterium die Einnahme oder Nichteinnahme der Pille darstellt. Aus diesem Grund liegt ein quasi-experimenteller Versuchsaufbau vor. Die Studienplanung lässt sich zur Veranschaulichung in unterschiedliche Phasen aufteilen, welche in den nachfolgenden Abschnitten näher erläutert werden.

Übersichtsphase

Die Übersichtsphase schließt eine umfassende Sichtung und kritische Auseinandersetzung mit Fachliteratur zum Thema ein. Die Suchbegriffe, welche am häufigsten verwendet wurden, sind in deutsch und englisch in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Deutsche und englische Suchbegriffe

deutsch	englisch
Sehne	tendon
faseriges Bindegewebe	fibrous connective tissue
Band	ligament
Apponeurose	apponeurosis
vorderes Kreuzband	anterior cruciate ligament
Patellasehne	patellar tendon
Plantarfaszie	plantar fascia
weiblicher Zyklus	female cycle
Steifigkeit	stiffness
Verletzungsrisiko	risk of injury

weibliche Geschlechtshormone	female sex hormone
orale Verhütungsmittel	oral contraceptives
natürlicher Zyklus	natural cycle

Wissenschaftlich häufig verwendete methodische Werkzeuge wurden auf ihren Nutzen für die aktuelle Studie überprüft. Demnach wurde in vielen Untersuchungen für die Messung der Laxizität des vorderen Kreuzbandes ein Arthrometer verwendet. Dieses Messgerät schien demnach auch für die vorliegende Untersuchung geeignet, die Laxizität des vorderen Kreuzbandes über den Verlauf des Zyklus messen zu können. Aus diesem Grund wurde eine Anfrage über die Firma Storz zur Leihgabe eines Arthrometers gestellt, die jedoch absagen musste. Aus diesem Grund wurde entschieden, statt des vorderen Kreuzbandes die Plantarapponneurose in die Messung aufzunehmen. Die Wahl des Myotons als alleiniges Messgerät basiert dementsprechend auf der Absage der Firma Storz für die Verwendung des zusätzlichen Messinstruments in Form des Arthrometers. Außerdem wurden weitere zur Verfügung stehende Ressourcen der Technischen Universität Chemnitz auf Basis der Rechercheergebnisse abgeglichen. Einige Studien waren in der Lage, Blut- und Urinproben der Probandinnen zu entnehmen und beispielsweise die Hormonkonzentration im Blut und den Zeitpunkt des Eisprungs genau bestimmen zu können (Deie et al., 2002). Diese Möglichkeit ist an der TU Chemnitz nicht gegeben. Dementsprechend mussten lediglich Basalthermometer zur besseren Eingrenzung des Eisprungs bestellt werden.

Praktische Auseinandersetzung

Die folgende Phase ist von der praktischen Auseinandersetzung mit der Messtechnik und der Durchführbarkeit der geplanten Untersuchung geprägt. Entsprechende Messpunkte zum Ansetzen des Myotons wurden erprobt. Darüber hinaus war ebenso die Positionierung der Probandinnen während der Messungen ein wichtiger Aspekt in dieser Phase. Die Verwendung des Myotons bedarf etwas Übung, um reliabel messen zu können. Auch die Standardisierung der Sitzposition der Probandinnen und damit verbundene Gelenkwinkelstellungen mussten entsprechend standardisiert werden. Die Ergebnisse dieser Phase sind in Kapitel 6.4 (Untersuchungsablauf) detailliert beschrieben.

Organisationsphase

In der Organisationsphase der Studienplanung wurde ein Ethikantrag gestellt, um den Probandinnen Sicherheit ihrer persönlichen Daten zu gewährleisten und die Unbedenklichkeit der zu verwendeten Messtechnik transparent zu gestalten. In diese Phase lässt sich zudem die Rekrutierung der Probandinnen einordnen. Um eine adäquate Anzahl an Freiwilligen generieren zu können, wurden Aufrufe in Facebook-Gruppen der TU-Chemnitz und über für

diese Art von Studien eingerichtete Mailinglisten gestartet. Der Probandenaufwurf sowie die Probandeninformation befinden sich in Anhang09 und Anhang10. Zudem lässt sich die persönliche Rekrutierung von Probandinnen in diese Phase einordnen. Das Probandenkollektiv wurde aufgrund der Forschungsfrage eingeschränkt, um mögliche Einflussfaktoren auf die Messergebnisse einzugrenzen. Im Hinblick auf den Einfluss von Hormonen kommen ausschließlich weibliche Testpersonen in Frage. Die Informationen zur Auswahl der Probandinnen sind im nachfolgenden Kapitel 6.2 (Probandenkollektiv) zusammengefasst.

6.2 Probandenkollektiv

Für die Studie wurden Probandinnen im Alter zwischen 18 und 35 Jahren angesprochen. Es wurde eine Versuchsgruppe weiblicher Probanden akquiriert, die keine hormonellen Verhütungsmittel seit mindestens sechs Monaten einnehmen, denn es konnte gezeigt werden, dass Östrogen einen chronischen Effekt auf die Eigenschaften von faserigem Bindegewebe zu haben scheint (Burgess et al., 2010). Außerdem sollten alle Probandinnen einen regelmäßigen Zyklus innerhalb der letzten drei Monate aufweisen. Im Gegenzug wurde eine Kontrollgruppe generiert, die Kontrazeptiva zu sich nehmen, da gezeigt werden konnte, dass hormonelle Verhütungsmittel die natürlichen Hormonschwankungen während des Zyklus und die damit einhergehenden Auswirkungen auf die Bindegewebeigenschaften beeinflussen. Damit scheint die Einnahme von oralen Verhütungsmitteln mit einem geringeren Verletzungsrisiko, insbesondere von Rupturen des vorderen Kreuzbandes, assoziiert zu sein (Hansen et al., 2009a). Die Probandinnen sollten mindestens achtzehn Jahre und älter sein, da vermutet wird, dass der Effekt von Östrogen auf die Eigenschaften des faserigen Bindegewebes bei jüngeren Frauen noch nicht vollständig ausgeprägt sein könnte. Die Sensibilität der Östrogenrezeptoren in faserigem Bindegewebe steigt mit Alter und Anzahl der natürlichen Zyklen (Eiling et al., 2006). Darüber hinaus sollten in beiden Gruppen keine akuten oder vergangene Verletzungen von Bindegewebsstrukturen der unteren Extremitäten vorliegen. Es konnte gezeigt werden, dass die Achillessehne nach einem operativen Eingriff nicht im selben Ausmaß auf eine Knieflexion in Bezug auf eine Reduktion der Spannung reagiert wie eine nicht operierte Sehne. Dieses Verhalten wird mit der Tatsache begründet, dass die Sehne während einer Operation eine Elongation erfährt und aus diesem Grund keine spannungsreduzierenden Effekte bei einer Flexion des Knies dokumentiert werden konnten (Orishimo et al., 2008). Das Verhalten von faserigen Bindegeweben nach einem operativen Eingriff oder einer Verletzung könnte die Messergebnisse mit dem Myoton verzerren. Außerdem wurde eine vergangene oder bestehende Schwangerschaft in beiden Gruppen ausgeschlossen, da die vorliegende Arbeit sich nicht mit den Auswirkungen einer Schwangerschaft auf das mechanische Verhalten von Bindegeweben auseinandersetzt.

Methodik

Insgesamt nehmen an der Untersuchung 21 Probandinnen teil, wobei dreizehn Probandinnen zur Versuchsgruppe zählen, welche keine oralen Kontrazeptiva nehmen, acht Probandinnen gehören zur Kontrollgruppe, die alle die Pille zur Kontrazeption nutzen. Das Durchschnittsalter beträgt $24,1 \pm 2,9$ Jahre. Die Probandinnen haben eine mittlere Körpergröße von $1,68 \pm 0,05$ m und ein Gewicht von $63,2 \pm 7,2$ kg. Daraus ergibt sich ein BMI von $22,3 \pm 2,3$ kg/m². Keine der Probandinnen war zum Zeitpunkt der Messungen schwanger und es lagen auch keine vergangenen Schwangerschaften vor. Außerdem hatte keine der Probandinnen ein diagnostiziertes PMS-Syndrom. Achtzehn der insgesamt 21 Probandinnen gaben an, Beschwerden während ihrer Periode zu haben. Am häufigsten, insgesamt dreizehnmal, wurden Unterleibsschmerzen angegeben, gefolgt von Rückenschmerzen und Ziehen in den Brüsten was jeweils auf sieben Probandinnen zutraf. Sechs Probandinnen klagten über Stimmungsschwankungen während der Menstruation. Auch Müdigkeit, Kopfschmerzen, Übelkeit und Schwindel zählten zu den benannten Symptomen. Alle Beschwerdesymptome waren im Bereich gering bis mittel ausgeprägt. Alle Probandinnen treiben außerdem regelmäßig mindestens einmal in der Woche Sport. Sieben Probandinnen gehen regelmäßig laufen, ebenso beliebt ist allgemeines Fitnesstraining. Außerdem sind Schwimmen und Triathlon bei den Probandinnen häufig ausgeübte Sportarten. Darüber hinaus wurden Reiten, Turnen, Volleyball, Tanzen, Yoga und Golf genannt. Acht Probandinnen sind in einer Sportart aktiv, während alle anderen auch eine zweite Sportart intensiv betreiben. Es fällt auf, dass Ausdauersportarten bei den Probandinnen im Allgemeinen sehr beliebt sind.

In beiden Gruppen gaben jeweils vier Probandinnen an, sich in den letzten zehn Jahren Bindegewebsverletzungen zugezogen zu haben. Darunter zählten Risse des vorderen Kreuzbandes sowie Bänderrisse- und Zerrungen im Sprunggelenk, schließlich eine Verletzung des Meniskus. Es war zu beobachten, dass in der Gruppe der Probandinnen, welche die Pille nehmen, häufiger Verletzungen vorkamen. Das Verhältnis lag dabei bei 1:2. Bei der Versuchsgruppe lag das Verhältnis dagegen bei 4:13. Inwiefern die Einnahme der Pille die Verletzungshäufigkeit bedingt, wird im nachfolgenden Kapitel diskutiert.

Tabelle 4 zeigt vergleichend die Ergebnisse von Versuchs- und Kontrollgruppe. Es fällt auf, dass die Gruppen bezogen auf Alter, Größe, Gewicht und BMI nur geringfügige Unterschiede aufweisen. Die Versuchsgruppe zeigt eine deutliche Schwankung bei der Länge des Zyklus. Das Minimum betrug 28 Tage, während das Maximum im Zeitraum der Messung bei 42 Tagen lag. Im Durchschnitt zeigt die Versuchsgruppe eine Zykluslänge von 30,2 Tagen und mit einem mittleren Schwankungsbereich von 2-6 Tagen einen längeren Zyklus als die Kontrollgruppe, deren Zyklus durch die Einnahme der Pille ohne weitere Schwankungen bei 28 Tagen liegt. Vier Probandinnen der Versuchsgruppe gaben weiterhin an, noch nie die Pille genommen zu haben, während die anderen in einem Zeitraum zwischen sechs Monaten und

sechs Jahren keine oralen Kontrazeptiva mehr zu sich nehmen. Die Kontrollgruppe gab an, in einem Zeitraum zwischen 1-8 Jahren regelmäßig die Pille zur Kontrazeption zu nutzen.

Tabelle 4: Vergleich von Versuchs- und Kontrollgruppe

	natürlicher Zyklus	orale Kontrazeption
Anzahl Probanden	13	8
Alter in Jahren	24,6	23,4
Größe in m	1,68	1,69
Gewicht in kg	62,7	64,0
BMI in kg/m ²	22,2	22,5
Zyklusdauer in Tagen	30,2	28
Sport in der Woche in h	5,4	4,2

6.3 Messzeitpunkte

Um eine Veränderung von Bindegewebeigenschaften im Verlauf darstellen zu können, werden die Probandinnen über einen Zeitraum von fünf Wochen an fünfzehn Tagen gemessen. Dies ergibt einen Rhythmus von zwei bis drei Tagen in der Woche. Die Probandinnen starten an einem beliebigen Tag ihres Zyklus. Diese Vorgehensweise soll sicherstellen, dass zum Abschluss der Messungen mit randomisierten Daten hinsichtlich der Zyklustage gearbeitet werden kann. Außerdem steigt damit die Wahrscheinlichkeit, dass in den jeweiligen Gruppen jeder Zyklustag am Ende des Messzeitraumes einmal vertreten ist. Mit vorgegebenen Mess Tagen zu bestimmten Phasen des Zyklus besteht das Risiko, entscheidende Schwankungen in den Messwerten zu übersehen oder spezifische Phasen zu verpassen, da die Dauer des natürlichen Zyklus individuellen Schwankungen unterliegen kann. Äußere Einflussfaktoren wie Stress, Essstörungen, Leistungssport oder Übergewicht können vor allem einen natürlichen Zyklus beeinflussen (Hawkins and Matzuk, 2008). Die Probandinnen sollen den Zeitpunkt der Menstruation in einem Zykluskalender angeben (vgl. Anhang 03), denn dieser Zeitraum stellt die jeweilige Baseline der Messwerte dar. Die Hormonlevel sind in diesem Zeitfenster im Vergleich zu den folgenden Phasen des Zyklus am geringsten. Dementsprechend wird davon ausgegangen, dass die Steifigkeit der zu messenden Gewebe am höchsten ist (Fillenberg, 2017)

6.4 Untersuchungsablauf

Am Tag der ersten Messung ist jede Probandin dazu angehalten, eine Einverständniserklärung über die freiwillige Teilnahme an der Untersuchung sowie die Datenschutzerklärung zu unterschreiben. Außerdem wird ein allgemeiner Fragebogen ausgeteilt, um entsprechende Informationen in Bezug auf das Zyklusverhalten und der Einnahme von Medikamenten oder Krankheiten der Probandinnen zu erhalten (Anhang 01). Die Messpunkte an der Plantarapponeurose (AP), Achillessehne (AS), Patellasehne (PS) sowie an der Oberschenkelmuskulatur (RF) werden mit einem hautfreundlichen Stift standardisiert markiert. Mit dem Myoton erfolgt jeweils eine Messung an den dafür vorgesehenen Stellen. Die Funktionsweise und die verwendeten Messeinstellungen des Messgerätes werden im nachfolgenden Abschnitt 6.5 erläutert. Auch auf die genaue Identifizierung der Messpunkte und die Platzierung der Probandin im Verlauf der Messung wird eingegangen. Darüber hinaus bekommt jede Probandin ein Basalthermometer, um täglich die morgendliche Temperatur bestimmen zu können. Die Temperaturkurve kann später dazu verwendet werden, um den jeweiligen Zyklus entsprechend zu überwachen und eventuell eine Bestimmung des Zeitpunktes der Ovulation vornehmen zu können. Für jede Probandin gibt es ein Probandentagebuch (Anhang 02), das für jeden Messtag ausgefüllt werden kann. Dementsprechend werden jeweils sportliche Aktivitäten in den letzten 24 Stunden und eventuelle Beschwerden im Zusammenhang mit dem Zyklus vermerkt. Ausreißer in den Messwerten können später mit den Aufzeichnungen abgeglichen werden. Alle weiteren Messungen nach der eben beschriebenen Eingangsmessung unterliegen dem gleichen Schema. Im Labor wird zuerst überprüft, inwiefern bei der Probandin alle Messpunkte noch vorhanden sind. Anschließend legt sich die Probandin mit dem Bauch auf eine Liege. In dieser Position verbleibt die Probandin etwa fünf Minuten, um dem Bindegewebe Zeit zu geben, sich an die Raumtemperatur anzupassen. In dieser Zeit wird die Probandin über ihr Befinden und die gemessenen Basaltemperaturen der letzten Tage befragt. Alle Hinweise werden in das Probandentagebuch eingetragen. Als erstes erfolgt die Messung der Plantarapponeurose (PA). Anschließend wird die Probandin gebeten, auf dem Hocker vor der selbstgebauten Messapparatur Platz zu nehmen. Dann werden in dieser Reihenfolge die Achillessehne (AS), die Patellasehne (PS) und der m. rectus femoris (RF) gemessen. Insgesamt dauert die Messung der vier Gewebe etwa 10-15 Minuten.

6.5 Messmethodik

6.5.1 Myoton

Methodik

Funktionsweise

Nach den Aussagen des Herstellers ist das Myoton ein handliches Messgerät, welches noninvasiv verschiedene Eigenschaften des faserigen Bindegewebes messen kann. Die Messtechnik erlaubt es, den Spannungszustand aber auch viskoelastische Eigenschaften von Geweben zu bestimmen. Das Myoton lässt Messungen an allen oberflächlich gelegenen Muskeln, Sehnen und anderen Bindegewebsstrukturen zu. Im Bereich der unteren Extremität eignet sich aus diesem Grund die Achillessehne, da diese gut zu palpieren ist und nur wenig Fettgewebe zwischen dem zu messenden Gewebe und dem Ansatzpunkt des Myotons auf der Hautoberfläche liegt. Für die nachfolgenden Kapitel ist die Möglichkeit, die biomechanischen Eigenschaften messen zu können, von entscheidender Bedeutung. Besonders die dynamische Steifigkeit (S), welche in Newton pro Meter (N/m) angegeben wird, ist in der vorliegenden Arbeit ein wichtiger Messwert. Die Messtechnik des Myotons basiert auf schnellen mechanischen Impulsen, die unter einer konstanten Kompressionskraft, die auf das subkutane Bindegewebe über der Sehne oder dem zu messenden Muskel appliziert wird. Die Impulse werden über einen kleinen Stößel ausgeübt, der am Myoton befestigt ist (Abbildung 9). Nach einem kurzen mechanischen Impuls gibt der Muskel oder die Sehne eine Antwort in Form einer Oszillation aus. Diese wird über den am Myoton befindlichen Beschleunigungssensor gemessen (Peipsi et al., 2012; Schneider et al., 2015). Für die vorliegende Untersuchung wurden folgende Geräteeinstellungen gewählt:

- Taptime 15 ms
- Intervall 1 sec.
- Impuls 15 HZ
- Multi 5
- Del 0,7 s

Plantarapponeurose, Achillessehne, Patellasehne und m. rectus femoris wurden in dieser Reihenfolge je zweimal hintereinander gemessen.



Abbildung 9: Myoton (entnommen aus Peipsi et al., 2012)

Das Myoton kommt in unterschiedlichen Gebieten zum Einsatz. Im klinischen Alltag wird das handliche Messgerät dazu verwendet, muskuläre Störungen, die mit dem Auftreten von neurologischen Erkrankungen wie einer Demenz assoziiert sind, zu identifizieren (Drenth et al., 2018). Außerdem wird es in der Weltraumforschung verwendet, um die Veränderung der muskulären Bedingungen außerhalb der Schwerkraft zu kontrollieren (Schoenrock et al., 2018). Ein weiterer großer Einsatzbereich des Myotons sind sportmedizinische und therapeutische Gebiete. Beispielsweise können muskuläre Asymmetrien und Seitendifferenzen gemessen werden (Mooney et al., 2013). Darüber hinaus wird das Messgerät zur Verletzungsprävention im trainingswissenschaftlichen Kontext, aber auch im Bereich des Leistungssports genutzt (Pożarowszczyk et al., 2017).

Studien belegen eine gute Inter- und Intratester Reliabilität der Messungen mit dem Myoton. An der Achillessehne konnte ein Intraklassen-Korrelationskoeffizient von 0,87 und ein minimal detectable change (MDC) von 45 N/m innerhalb der jeweiligen Untersucher gezeigt werden (Liu et al., 2018). Auch die Messung von Muskeln kann durch eine gute bis sehr gute Intertester Reliabilität bestätigt werden (0,80 - 0,93) (Bizzini and Mannion, 2003). Unter Betrachtung der aktuellen Studien mit dem Myoton liegen die Messschwankungen innerhalb eines Tages (between day reliability) mit einem Intra-Klassen-Koeffizienten von 0,72-0,9 ebenfalls sehr gut. Der prozentuale Standardfehler beträgt zwischen 1,5 % und 11,9 %. In den betrachteten Untersuchungen wurde die Achillessehne gemessen (Feng et al., 2018; Ko et al., 2018; Pruyn et al., 2016). In Anbetracht der aktuellen Studienlage über das Myoton

scheint es ein geeignetes Messinstrument zu sein, um schnell und effizient Informationen über die Steifigkeit von Bindegeweben zu gewinnen. Da es sich gleichermaßen zur Messung von Sehnen, Bändern und Muskeln eignet, lässt es eine kombinierte Datenaufnahme verschiedener Areale zu.

6.5.2 Identifizierung der Messpunkte

Kapitel 6.4 beschäftigte sich mit dem Untersuchungsablauf. Um an jedem Messtag die jeweiligen Messpunkte standardisiert messen zu können, auch wenn eine längere Pause zwischen den Messungen lag und die Punkte neu bestimmt werden müssen, wird nun die angewandte Methodik für die Identifizierung der Messpunkte erläutert. Für eine standardisierte Identifizierung wird sich an anatomisch markanten Punkten der Probandinnen oder an vorgegebenen Messprotokollen orientiert. Dabei werden alle Punkte am Tag der ersten Messung in der hier abgebildeten Reihenfolge bestimmt. Begonnen wird dementsprechend für alle Messungen bei der Markung des Messpunktes der PA. Um den Messpunkt für die Plantarapponeurose zu markieren, wird die Probandin gebeten, sich in Bauchlage auf einer Liege zu platzieren, sodass die Füße am Ende entspannt von der Kante hängen können. Der Testleiter misst die Länge des Fußes vom Calcaneus bis zur Lücke der ersten und zweiten Zehe. Anschließend wird die Hälfte dieser Strecke markiert. Der Testleiter bringt den Fuß unter Spannung, um die Plantarapponeurose besser sehen zu können. Der Messpunkt wird dann auf der gespannten Apponeurose gesetzt, wie in Abbildung 10 zu sehen ist.



Abbildung 10: Messpunkt für die Plantarapponeurose (eigene Abbildung)

Methodik

Anschließend wird der Messpunkt für die Achillessehne markiert. Dafür verbleibt die Probandin in Bauchlage. Es wird die Strecke vom Calcaneus bis zur Kniekehle gemessen. Von dieser Strecke werden 10 % gebildet. Es wird zudem der Übergang von Calcaneus zur Achillessehne palpiert und mit einem Punkt markiert (vgl. Abbildung 11). Von diesem werden anschließend die vorher errechneten 10 % weiter in Richtung Achillessehne abgetragen. In Abbildung 11 ist der Messpunkt für das Myoton mit einem Kreuz dargestellt.



Abbildung 11: Messpunkt für die Achillessehne (eigene Abbildung)

Um den Messpunkt für die Patellasehne bestimmen zu können, wird die Probandin gebeten, sich auf die Kante der Liege zu setzen und die Beine locker hängen zu lassen. Zuerst erfolgt die Palpation der Patellaspitze, welche in Abbildung 12 mit einem Punkt markiert ist. Von dieser werden 2 cm nach unten abgemessen, um die Patellasehne markieren zu können. Das Kreuz auf Abbildung 12 ist dementsprechend der Messpunkt für das Myoton.

Der vierte Messpunkt liegt auf der Oberschenkelmuskulatur, dafür befindet sich die Probandin in Rückenlage. Im ersten Schritt erfolgt die Bestimmung der Länge der bereits palperten Patellaspitze und der spina iliaca anterior superior (SIAS). Im zweiten Schritt werden von der gemessenen Länge 33 % gebildet. Das Ergebnis wird anschließend von der Patellaspitze in Richtung Oberschenkelmuskulatur abgetragen und 2 cm nach rechts verrückt, damit der Muskelbauch getroffen wird. Der Messpunkt für den m. rectus femoris ist ebenso in Abbildung 12 ersichtlich.



Abbildung 12: Messpunkte für Patellasehne und m. rectus femoris (eigene Abbildung)

Alle Punkte werden mit einem hautfreundlichen Stift markiert. Um die Stellen an den folgenden Messtagen erneut identifizieren zu können, wird die Probandin gebeten, sie in Abständen erneut zu markieren. So kann gewährleistet werden, dass das gemessene Areal zu den unterschiedlichen Messzeitpunkten gleich bleibt.

6.5.3 Positionierung der Probandin

An allen Messtagen wird die gleiche Positionierung der Probandinnen gewährleistet. Die Plantarapponose wird in Bauchlage gemessen. Dabei liegt die Probandin auf einer Liege, wobei die Füße locker über der Kante hängen. Während der Messung wird die Probandin gebeten, den Fuß nicht anzuspannen. Für die Messung der weiteren Punkte nimmt die Probandin auf einem Hocker vor einer selbstgebauten Konstruktion Platz (vgl. Abbildung 13). Dabei wird der rechte Fuß auf die Holzplattform gestellt, so dass die Ferse bis an die dafür vorgesehene keilförmige Einkerbung reicht, welche in der Abbildung in schwarz zu sehen ist. Auf der Holzplattform lässt sich der Fußwinkel standardisiert einstellen. In der vorliegenden Untersuchung wird der Fuß um 20° plantarflektiert. Mithilfe der Orthese wird anschließend das Kniegelenk in einem 90° -Winkel positioniert. Die Orthese dient zudem einer Ruhigstellung des Beines während der Messung an der Achillessehne. Außerdem konnte gezeigt werden, dass ab einem Kniewinkel von 45° - 50° bei gesunden Achillessehnen die Spannung signifikant abnimmt (Orishimo et al., 2008). Die Winkelstellung des Fußes beruht auf einer

Methodik

Untersuchung von Davis et al. Diese Arbeitsgruppe hat herausgefunden, dass eine Plantarflexion des Fußes ab 25° die Achillessehnenanspannung eliminiert. Der kleinste Winkel, der in dieser Untersuchung gemessen wurde und bei dem eine Nullspannungslänge erreicht wurde, war 15° (Davis et al., 1999). Die Arbeitsgruppe um François Hug erforschte ebenfalls die so genannte „slack length“ oder Nullspannungslänge der Achillessehne und stieß auf vergleichbare Ergebnisse. Laut dieser Studie liegt die slack length der Achillessehne bei einem Knie, welches 90° flektiert ist, bei $25,5 \pm 7,6^\circ$ (Hug et al., 2013). Eine Plantarflexion des Fußes von 20° und ein Knieflexionswinkel von 90° scheinen aus diesem Grund für die Messungen dieser Untersuchung angebracht, um die Spannung der Achillessehne zu reduzieren und die tatsächliche Steifigkeit messen zu können. Darüber hinaus ist bei diesem Winkel die Faltenbildung der Haut an der Achillessehne noch nicht so stark und das Myoton kann für die Messung entsprechend gut positioniert werden.

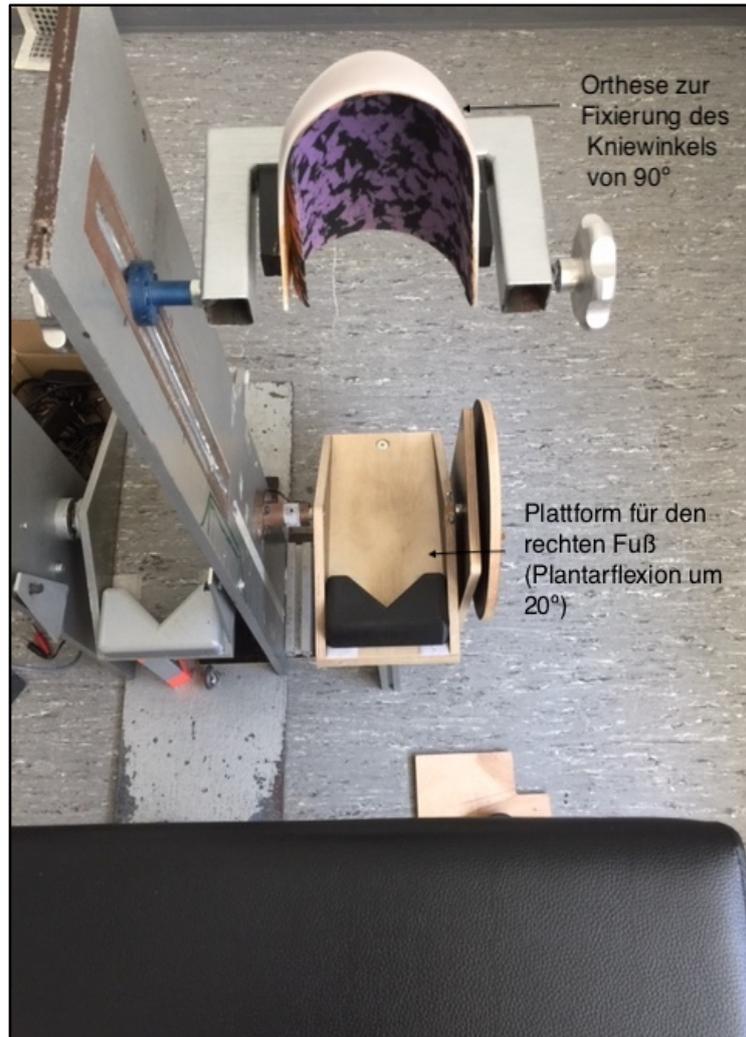


Abbildung 13: Messapparatur für die Messung von AS, PS, RF (eigene Abbildung)

6.6 Voruntersuchungen

Die Veränderung der Körpertemperatur während des Zyklus könnte die mechanische Veränderung des Bindegewebes bedingen. Kurz vor dem Eisprung steigt die Basaltemperatur um $0,4-0,6^\circ$ an (Davis and Fugo, 1948). In diesem Zusammenhang kann vermutet werden, dass das Bindegewebe auf diese Temperaturveränderung mit einer verringerten Steifigkeit reagiert, was ebenfalls eine mögliche Erklärung für das erhöhte Verletzungsrisiko in dieser Zeit darstellen könnte. Um den Einfluss der Temperatur auszuschließen, wurden im Vorfeld der Studie Probemessungen durchgeführt, welche diesen Aspekt betrachtet haben. Dementsprechend wurde mithilfe einer Infrarotlampe die Achillessehne fünf Minuten erwärmt. Vor und nach der Erwärmung wurde die Steifigkeit mit dem Myoton bestimmt. Es wäre zu erwarten gewesen, dass die Steifigkeit durch die Erwärmung signifikant abnimmt, wenn die Temperatur einen Einflussfaktor für die Messungen der vorliegenden Untersuchung darstellt. Die Messungen haben jedoch keine Unterschiede gezeigt. Infolgedessen sind in der vorliegen-

Methodik

den Untersuchung keine Veränderungen aufgrund des Anstiegs der Körperkerntemperatur zu erwarten, wie es im Verlauf eines natürlichen Zyklus kurz vor dem Zeitpunkt der Ovulation der Fall ist. Darüber hinaus wurde eine körperliche Erwärmung in Form von drei Minuten Kniebeugen erwirkt, um die Reaktion des Bindegewebes auf eine mechanische Erwärmung von außen einzubeziehen. Die Messung mit dem Myoton vor- und nachher ergab in diesem Fall eine erhöhte Steifigkeit. Eine mögliche Erklärung für dieses Phänomen könnte auf die Funktion von Sehnen zurückzuführen sein, da Bewegung akute Auswirkungen auf Bindegewebe hat (Zschäbitz, 2005). Aufgrund dieser Ergebnisse werden die Probandinnen gebeten, für drei Minuten ruhig zu liegen, um das faserige Bindegewebe im Ruhezustand messen zu können und keine verfälscht hohen Werte zu messen, weil die Probandinnen vorher beispielsweise länger gelaufen sind.

7 Datenaufbereitung und statistische Auswertung

Das vorliegende Kapitel beschreibt, wie mit den gesammelten Daten verfahren wurde. Die Messwerte des Myotons wurden mit der entsprechenden Software ausgelesen und in Excel exportiert, um eine Auswertung der Daten vornehmen zu können. Mithilfe des Probandentagebuches, in dem alle Untersuchungszeitpunkte und die Temperaturen vermerkt wurden, konnten die Messwerte den einzelnen Probandinnen zugeordnet werden. Um die Daten übersichtlich zu gestalten und eine statistische Auswertung vornehmen zu können, wurde für die Gruppe mit dem natürlichen Zyklus (NZ) und der Gruppe Frauen, welche orale Kontrazeptiva (OK) einnehmen, die einzelnen Messwerte für die vier gemessenen Bindegewebe nach Zyklustagen sortiert. Damit sollten Verlaufskurven beschrieben werden können. Für die statistische Auswertung wurden von jeder Probandin die Zyklusphasen der Menstruation, des Eisprungs und der Lutealphase zusammengefasst. Dabei wurde die Phase der Menstruation mit den Tagen 1-5 verknüpft. Für das Zeitfenster der Ovulation wurden die Zyklustage 13-18 und für die Lutealphase entsprechend die Tage 20-25 kombiniert. Mit dieser Einteilung sollte der Fragestellung nachgegangen werden, inwiefern es Unterschiede in Bezug auf die Zyklusphasen gibt. Vor der Anwendung statistischer Testverfahren wurde der Datensatz auf Normalverteilung geprüft. Ebenso wurde für jedes der vier Gewebe der Gesamtmittelwert über den Verlauf des Zyklus von jeder Probandin gebildet, um Mittelwertunterschiede zwischen den Gruppen einfacher testen zu können. In Anhang11 befindet sich eine Tabelle, welche die Rohdaten und die jeweiligen zusammengefassten Schritte der Datenaufbereitung enthält. Zusätzlich wurden die gemessenen Basaltemperaturen für jede Probandin im Probandentagebuch vermerkt. Stellvertretend wurde auch eine Temperaturkurve von einer Probandin abgebildet, die im Ergebnisteil in Kapitel 8.2 zu finden ist.

8 Ergebnisse

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit den Ergebnissen der Untersuchung und soll die ausgewerteten Daten präsentieren. Für eine übersichtliche Darstellung ist die Gruppe mit natürlichem Zyklus (NZ) in den Abbildungen blau gekennzeichnet. Die Gruppe der Frauen mit oraler Kontrazeption (OK) erscheint in orange.

8.1 Steifigkeit mittels Myoton

8.1.1 Verlaufskurven der Steifigkeit

Bevor auf die Ergebnisse der statistischen Auswertung eingegangen wird, werden vorab die Verlaufskurven der Steifigkeit gezeigt. In Abbildung 14 ist die Verlaufskurve einer Probandin für die Achillessehne aus der Gruppe des natürlichen Zyklus zu sehen. Die Zyklustage 4 und 6 haben zwei Messwerte, da die Probandin über einen Zeitraum von fünf Wochen in den nächsten Zyklus übergegangen ist.

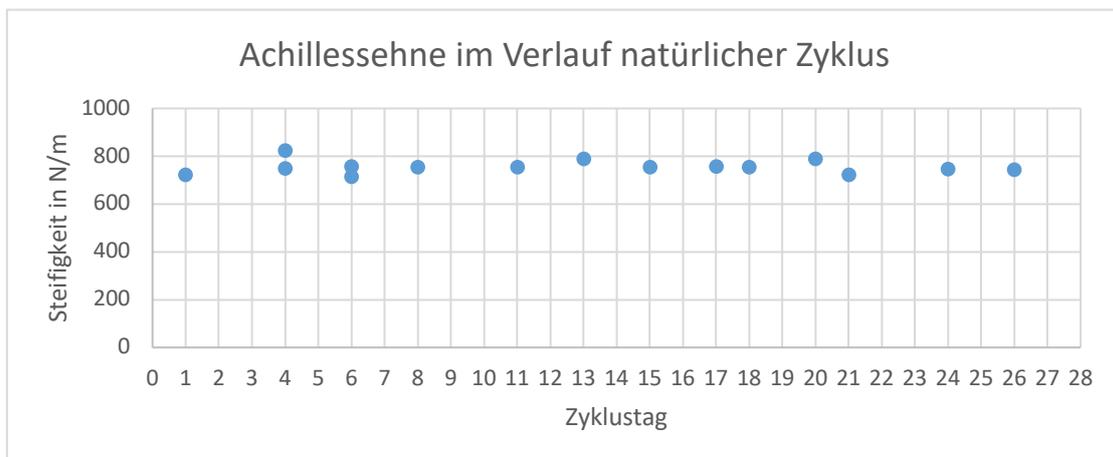


Abbildung 14: Steifigkeit der Achillessehne im Verlauf, Probandin der Gruppe mit natürlichem Zyklus

Abbildung 15 zeigt im Vergleich die Verlaufskurve einer Probandin aus der Gruppe der OK. Hier ist ebenso die Achillessehne dargestellt. In beiden Abbildungen ist zu sehen, an welchen Zyklustagen die Probandin gemessen wurde und wie viele Tage zwischen den Messungen pausiert wurde. Die Punkte schwanken in beiden Abbildungen ähnlich. Es sind keine Ausreißer zu erkennen.

Ergebnisse

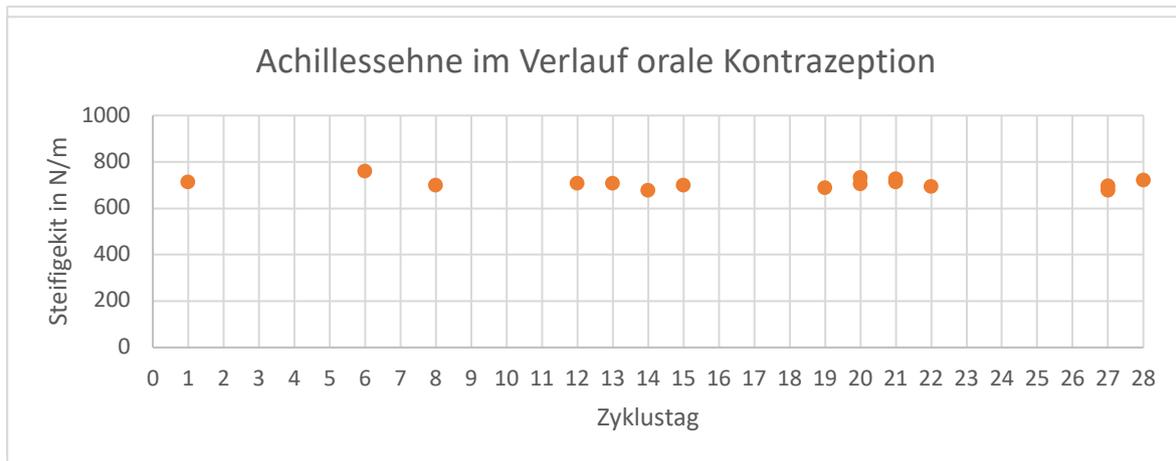


Abbildung 15: Steifigkeit der Achillessehne im Verlauf, Probandin der Gruppe mit oraler Kontrazeption

Abbildungen 14 und 15 zeigen den Messverlauf von jeweils zwei ausgewählten Probandinnen. Für die vorliegende Arbeit ist auch der Verlauf der Steifigkeit innerhalb der gesamten Gruppe von Bedeutung. Abbildung 16 bietet für alle Probandinnen der Gruppe mit natürlichem Zyklus den Verlauf der Steifigkeit der Achillessehne in Abhängigkeit der prozentualen Zykluslänge der Probandinnen. Die prozentuale Darstellung der Zykluslänge ist insbesondere für die Probandinnen der Gruppe des natürlichen Zyklus relevant, da diese unterschiedliche Zykluslängen aufweisen und die prozentuale Darstellung einen vergleichenden Überblick über den Verlauf der Steifigkeit innerhalb, aber auch zwischen den Gruppen ermöglicht. Abbildung 16 zeigt einen homogenen Verlauf der Steifigkeit der Achillessehne mit wenigen Ausreißern.

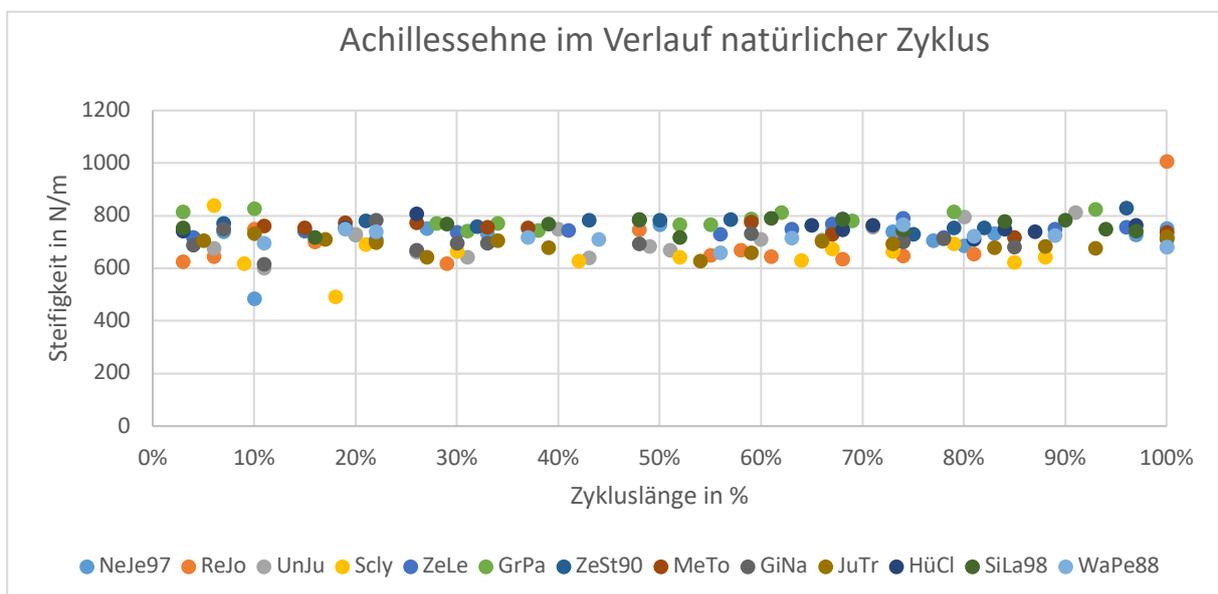


Abbildung 16: Verlauf der Steifigkeit der Achillessehne in Abhängigkeit der prozentualen Zykluslänge

Ergebnisse

Die gleiche Verlaufskurve ist in Abbildung 17 für die Frauen mit oraler Kontrazeption zu sehen. Die Punktwolke erscheint, ebenso wie Abbildung 16, über den Verlauf homogen, mit wenigen Ausreißern. Die Verlaufskurven für die Achillessehne sind für die vorliegende Arbeit von besonderer Bedeutung, da es im Vergleich zu Bändern wie etwa dem vorderen Kreuzband nur wenige Untersuchungen gibt.

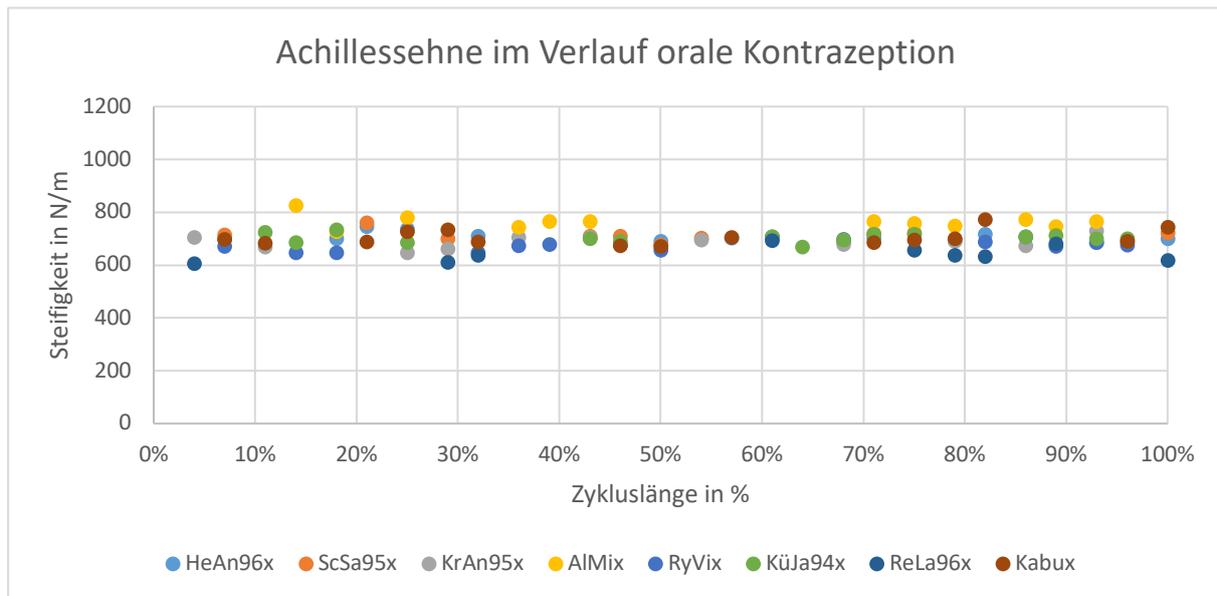


Abbildung 17: Verlauf der Steifigkeit der Achillessehne in Abhängigkeit der prozentualen Zykluslänge

8.1.2 Ergebnisse der statistischen Auswertung für die Zyklusphasen

Die statistische Auswertung der gemessenen Steifigkeiten der Gewebe wurde mit der Software SPSS vorgenommen. Es wurden zwei verschiedene Datensätze für die Auswertung erstellt. Dabei sind im ersten Datensatz die drei Zyklusphasen für die unterschiedlichen Gewebe eingeschlossen. Im zweiten Datensatz sind dagegen die Gewebe ohne Trennung der einzelnen Zyklusphasen dargestellt. Beide Datensätze sind im Anhang (A 04, A 05) hinterlegt. Der folgende Abschnitt stellt die Ergebnisse der Daten mit Unterteilung der verschiedenen Zyklusphasen dar.

Im ersten Schritt wurde innerhalb der zwei Versuchsgruppen auf Mittelwertdifferenzen geprüft. Vorab wurden beide Gruppen im Hinblick auf ihre Normalverteilung mithilfe des Shapiro-Wilk-Tests untersucht, da dieser im Vergleich zu anderen Tests über große statistische Power verfügt (Razali and Wah, n.d.). Außerdem wurde zusätzlich auf Varianzhomogenität geprüft. Der Test auf Normalverteilung und die optische Prüfung der Boxplots (vgl. Anhang 06) ergab, dass die Daten in der Versuchsgruppe und in der Kontrollgruppe normalver-

Ergebnisse

teilt sind. In Tabelle 5 sind die Signifikanzen dargestellt, wobei deutlich wird, dass keine statistische Signifikanz vorliegt. Jedoch hat die Analyse der Varianzhomogenität ergeben, dass die Werte zum Zeitpunkt des Eisprungs für das Gewebe der Achillessehne nicht varianzhomogen sind. Aus diesem Grund wurde gesondert für dieses Gewebe ein Welch-Test durchgeführt, da dieser im Vergleich zur herkömmlichen ANOVA robust gegen Varianzhomogenität ist (Mendes and Akkartal, 2009). Der Welch-Test ergab schließlich auch für die auffälligen Daten der Achillessehne keine Signifikanzen mehr. Damit kann insgesamt trotzdem davon ausgegangen werden, dass eine Gleichheit der Mittelwerte für die einzelnen Gewebe zu den Phasen der Menstruation, des Eisprungs und der Lutealphase besteht.

Tabelle 5: P-Werte des Shapiro-Wilk-Tests zur Prüfung auf Normalverteilung

Shapiro-Wilk		
Zyklusphase_Gewebe	Signifikanz_NZ	Signifikanz_OK
Menstruation_Plantarapponeurose	0,338	0,409
Menstruation_Achillessehne	0,761	0,504
Menstruation_Patellasehne	0,774	0,527
Menstruation_Rectus femoris	0,211	0,922
Eisprung_Plantarapponeurose	0,217	0,704
Eisprung_Achillessehne	0,119	0,499
Eisprung_Patellasehne	0,451	0,109
Eisprung_Rectus femoris	0,620	0,686
Lutealphase_Plantarapponeurose	0,291	0,799
Lutealphase_Achillessehne	0,847	0,125
Lutealphase_Patellasehne	0,122	0,112
Lutealphase_Rectus Femoris	0,566	0,234

Aufgrund der vorliegenden Normalverteilung wurde für beide Gruppen zur weiteren statistischen Auswertung ein t-Test für abhängige Stichproben durchgeführt. Nachfolgende Tabelle zeigt die Auswertung für die Frauen mit einem NZ. Dabei sind alle Phasen nicht signifikant bis auf den Zeitpunkt der Menstruation im Vergleich zur Lutealphase für die Plantarapponeurose.

Tabelle 6: p-Werte des t-Tests für abhängige Stichproben für die Gruppe des natürlichen Zyklus

t-Test für die Gruppe natürlicher Zyklus		
Phasen und Gewebe	N	p-Wert
ZP_ME_PA & ZP_EP_PA	12	0,102
ZP_ME_PA & ZP_LP_PA	13	0,031
ZP_EP_PA & ZP_LP_PA	12	0,603

Ergebnisse

ZP_ME_AS & ZP_ES_AS	12	0,773
ZP_ME_AS & ZP_LP_AS	13	0,926
ZP_ES_AS & ZP_LP_AS	12	0,687
ZP_ME_PS & ZP_ES_PS	12	0,891
ZP_ME_PS & ZP_LP_PS	13	0,219
ZP_ES_PS & ZP_LP_PS	12	0,144
ZP_ME_RF & ZP_ES_RF	12	0,496
ZP_ME_RF & ZP_LP_RF	13	0,755
ZP_ES_RF & ZP_LP_RF	12	0,594

Um Bezug auf das signifikante Ergebnis der Plantarapponeurose zu nehmen, ist in Abbildung 18 das Gewebe der Plantarapponeurose für die Zeitpunkte Menstruation (ME), Eisprung (ES) und Lutealphase (LP) vergleichend für die Gruppe Frauen mit einem NZ und OK gegenübergestellt.

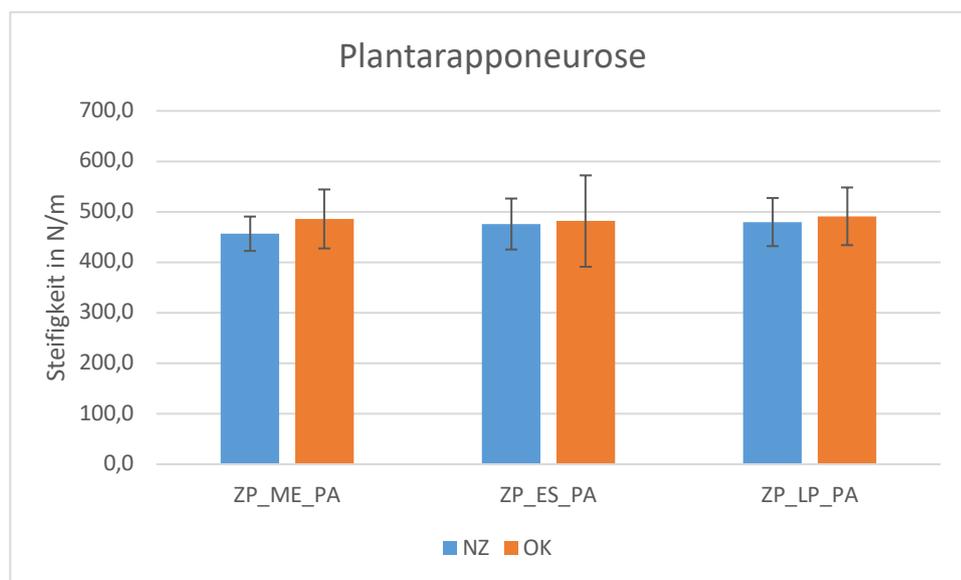


Abbildung 18: Steifigkeit der Plantarapponeurose im Vergleich zwischen NZ und OK zu den Zeitpunkten Menstruation (ME), Eisprung (ES) und Lutealphase (LP)

Die Statistik für die Frauen, welche die Pille einnehmen, ist in Tabelle 7 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass keine Phasen und Gewebe signifikant sind – bis auf die Phase des Eisprungs im Vergleich zur Lutealphase bei der Patellasehne.

Ergebnisse

Tabelle 7: p-Werte des t-Tests für abhängige Stichproben der Gruppe mit oraler Kontrazeption

t-Test für die Gruppe orale Kontrazeption		
Phasen und Gewebe	N	p-Wert
ZP_ME_PA & ZP_EP_PA	7	0,992
ZP_ME_PA & ZP_LP_PA	8	0,797
ZP_EP_PA & ZP_LP_PA	7	0,780
ZP_ME_AS & ZP_ES_AS	7	0,770
ZP_ME_AS & ZP_LP_AS	8	0,549
ZP_ES_AS & ZP_LP_AS	7	0,661
ZP_ME_PS & ZP_ES_PS	7	0,193
ZP_ME_PS & ZP_LP_PS	8	0,866
ZP_ES_PS & ZP_LP_PS	7	0,040
ZP_ME_RF & ZP_ES_RF	7	0,229
ZP_ME_RF & ZP_LP_RF	8	0,985
ZP_ES_RF & ZP_LP_RF	7	0,367

Aufgrund der statistischen Signifikanz in der Gruppe der OK ist in Abbildung 19 die Steifigkeit der Patellasehne über die Zyklusphasen im Vergleich der zwei Versuchsgruppen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Balken der Gruppe mit oraler Kontrazeption zum Zeitpunkt des Eisprungs und der Lutealphase geringfügig mehr voneinander abweichen, als die anderen Zeitpunkte und im Vergleich zur Gruppe mit dem natürlichen Zyklus betrachtet.

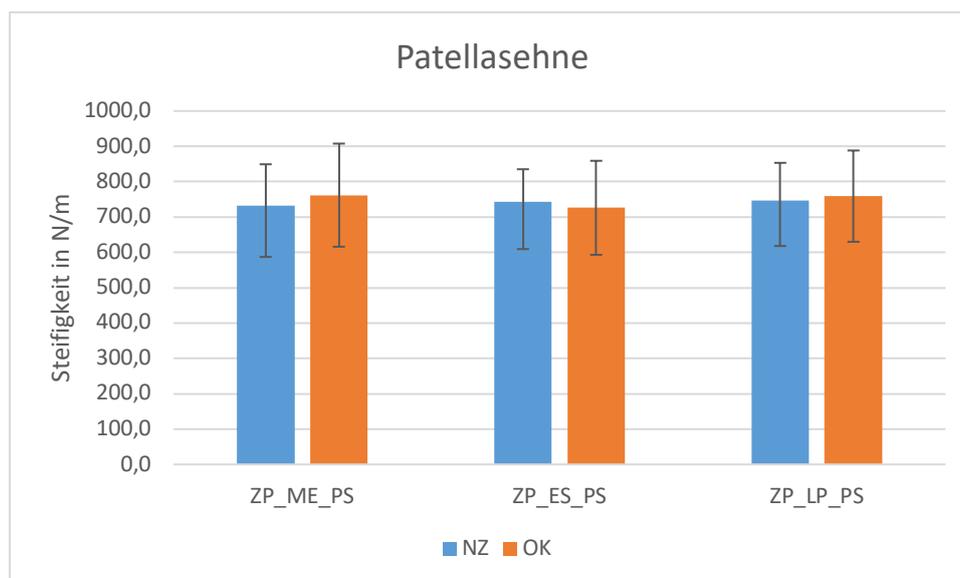


Abbildung 19: Steifigkeit der Patellasehne im Vergleich zu NZ und OK zu den Zeitpunkten Menstruation (ME), Eisprung (ES) und Lutealphase (LP)

Ergebnisse

In der Untersuchung wurden ebenso die Achillessehne und der m. rectus femoris gemessen. Beide Gewebe zeigen keine signifikanten Mittelwertunterschiede innerhalb der Gruppen. Die Ergebnisse der Achillessehne sind in Abbildung 20 dargestellt, da dies für die spätere Diskussion relevant wird. Die Darstellung des Muskels findet sich im Anhang (A 07).

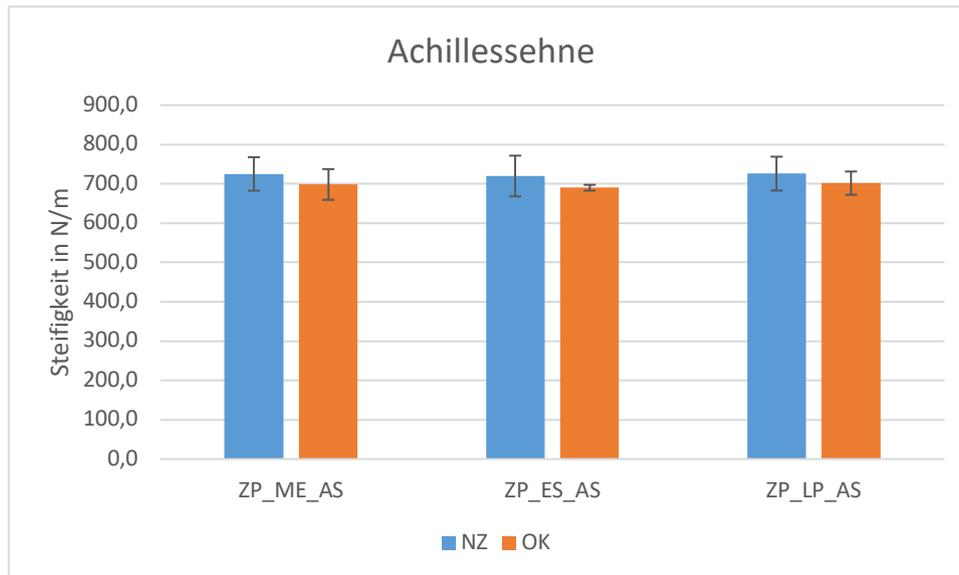


Abbildung 20: Steifigkeit der Patellasehne im Vergleich zu NZ und OK zu den Zeitpunkten Menstruation (ME), Eisprung (ES) und Lutealphase (LP)

Um beide Gruppen miteinander vergleichen zu können, wurde aufgrund von Signifikanzen bei der Varianzhomogenität als Post-Hoc-Test der Welch-Test durchgeführt. Dieser wurde für alle Variablen angewandt, da der Test bei einer signifikanten Varianzhomogenität robust ist. Die entsprechende Statistik ist in Tabelle 8 aufgeführt. Es wird deutlich, dass zwischen NZ und OK keine statistische Signifikanz vorliegt. Die Gruppen unterscheiden sich nicht im Hinblick auf die Mittelwerte der einzelnen Gewebe zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Zyklus.

Tabelle 8: P-Werte des Welch-Tests zwischen den beiden Versuchsgruppen

Welch-ANOVA		
Zyklusphase_Gewebe	Test	P-Wert
ZP_ME_PA	Welch-Test	0,226
ZP_ME_AS	Welch-Test	0,160
ZP_ME_PS	Welch-Test	0,643
ZP_ME_RF	Welch-Test	0,119
ZP_EP_PA	Welch-Test	0,880
ZP_ES_AS	Welch-Test	0,074

Ergebnisse

ZP_ES_PS	Welch-Test	0,781
ZP_ES_RF	Welch-Test	0,131
ZP_LP_PA	Welch-Test	0,644
ZP_LP_AS	Welch-Test	0,143
ZP_LP_PS	Welch-Test	0,830
ZP_LP_RF	Welch-Test	0,096

Abbildungen 18 bis 20 zeigen bereits die graphische Darstellung der Ergebnisse. In den Graphiken lassen sich aufgrund der gruppierten Anordnung der Säulen in den jeweiligen Diagrammen ebenso die Unterschiede der einzelnen Gewebe während der drei Zyklusphasen zwischen den zwei Versuchsgruppen betrachten. Die gruppierten Säulendiagramme werden in Kapitel 9 diskutiert.

8.1.3 Statistische Auswertung der gemessenen Gewebe über den gesamten Zyklus

Der zweite Datensatz enthält die Mittelwerte der getesteten Gewebe für jede Probandin ohne die Unterteilung in Zyklusphasen. Im Vorfeld konnte festgestellt werden, dass die Daten einer Normalverteilung unterliegen – bis auf die Mittelwerte der Plantarapponose für die Gruppe des NZ. Dieser Aspekt kann in Tabelle 9 nachvollzogen werden. Nach optischer Prüfung über das Boxplot wird jedoch auch für diese Daten von einer Normalverteilung ausgegangen. Der Test über die Homogenität der Varianzen war ebenso nicht signifikant. Die Darstellung aller Boxplots ist im Anhang zu finden. Ebenso wie der Test auf Varianzhomogenität für diesen Datensatz.

Tabelle 9: p-Werte des Shapiro-Wilk-Tests beider Gruppen über alle gemessenen Gewebe

Zeitpunkt	Shapiro-Wilk	
	P Wert_NZ	P Wert_OK
PA_MW	0,048	0,932
AS_MW	0,229	0,172
PS_MW	0,404	0,302
RF_MW	0,918	0,316

Für die statistische Prüfung von Mittelwertunterschieden innerhalb der Gruppen konnte aus diesem Grund ein t-Test für beide Gruppen für verbundene Stichproben durchgeführt werden. Für die Versuchsgruppe ist die Auswertung in TabelleTabelle 10 dargestellt. Dabei sind alle Mittelwertvergleiche unter den Geweben statistisch signifikant, abgesehen von den Mittelwerten von Patella- und Achillessehne.

Ergebnisse

Tabelle 10: p-Werte des t-Tests für abhängige Stichproben über den gesamten Zyklus der gemessenen Gewebe der Gruppe mit natürlichem Zyklus

t-Test bei gepaarten Stichproben NZ	
Gewebe	P-Wert
PA_MW - AS_MW	0,000
PA_MW - PS_MW	0,000
PA_MW - RF_MW	0,000
PS_MW - AS_MW	0,664
PS_MW - RF_MW	0,000
AS_MW - RF_MW	0,000

Der statistische Output für die Gruppe der OK ist in Tabelle 11 dargestellt. Auch hier unterscheiden sich alle Mittelwerte für die Gewebe signifikant – bis auf die Mittelwerte von Patella- und Achillessehne.

Tabelle 11: p-Werte des t-Tests für abhängige Stichproben über den gesamten Zyklus der gemessenen Gewebe für die Gruppe der oralen Kontrazeption

t-Test bei gepaarten Stichproben OK	
Gewebe	P-Wert
PA_MW - AS_MW	0,000
PA_MW - PS_MW	0,002
PA_MW - RF_MW	0,000
PS_MW - AS_MW	0,278
PS_MW - RF_MW	0,000
AS_MW - RF_MW	0,000

Für die statistische Prüfung zwischen den zwei Gruppen wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) durchgeführt. Tabelle 12 zeigt das Ergebnis der ANOVA, wobei es zwischen den Gruppen keine statistische Signifikanz im Hinblick auf Mittelwertunterschiede der getesteten Gewebe gibt. Aus diesem Grund muss H_0 , dass es keinen Unterschied zwischen den Gruppen gibt, angenommen werden.

Tabelle 12: Statistische Auswertung zwischen den Versuchsgruppen für die gemessenen Gewebe

Einfaktorielle ANOVA	
Gewebe	P-Wert
PA_MW	0,428
AS_MW	0,160

Ergebnisse

RF_MW	0,111
PS_MW	0,762

Abbildung 21 stellt die Ergebnisse der statistischen Auswertung dar. Sowohl der geringe Mittelwertunterschied zwischen NZ und OK bei der Achilles- und Patellasehne als auch die minimalen Mittelwertunterschiede zwischen den Gruppen aufgrund der Gruppierung der Säulen sind zu erkennen.

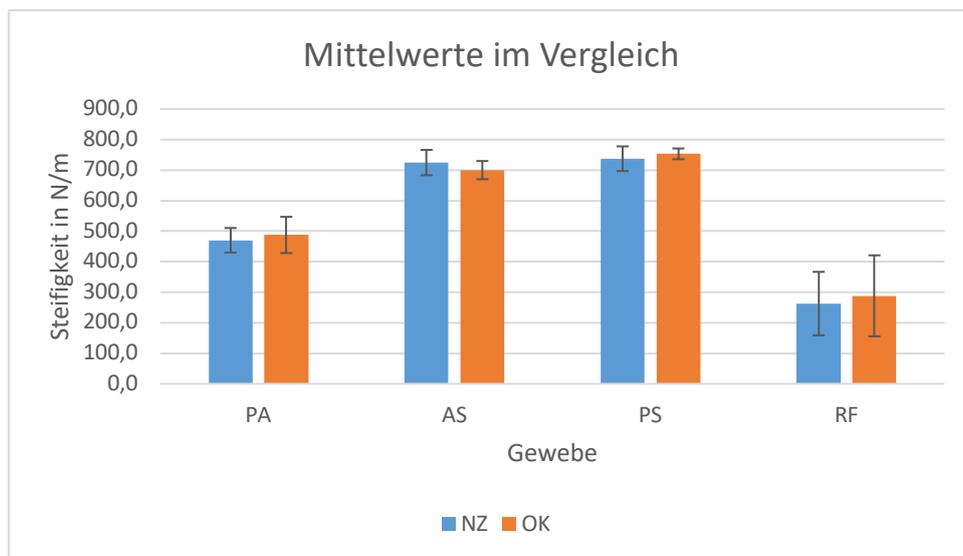


Abbildung 21: Mittlere Steifigkeiten von PA, AS, PS, RF im Vergleich zwischen den Versuchsgruppen

In Tabelle 13 sind die Variationskoeffizienten der beiden Gruppen für die gemessenen Gewebe im Vergleich abgebildet. Die Gruppe des natürlichen Zyklus zeigt über alle Gewebe einen größeren Variationskoeffizienten als die Gruppe der oralen Kontrazeption – außer bei dem Gewebe der Plantarapponeurose.

Tabelle 13: Variationskoeffizienten von PA, AS, PS und RF im Vergleich zwischen der Gruppe mit natürlichem Zyklus (NZ) und oraler Kontrazeption (OK)

Gruppe	PA		AS		PS		RF	
	NZ	OK	NZ	OK	NZ	OK	NZ	OK
Varianzkoeffizient_MW	7,75 %	8,13 %	4,84 %	3,37 %	6,46 %	4,79 %	7,76 %	7,10 %

8.2 Temperaturkurvenverlauf

Die Probandinnen haben während des Untersuchungszeitraumes ihre Basaltemperatur mit einem entsprechenden Thermometer gemessen. Dabei war vor allem in der Versuchsgruppe eine Abschätzung des Zeitpunktes des Eisprungs von Bedeutung. In Abbildung 22 ist der Temperaturkurvenverlauf stellvertretend für eine Probandin aus der Gruppe des natürlichen Zyklus dargestellt. Es wurde eine Probandin gewählt, bei der alle Werte für die Darstellung vollständig vorhanden waren. In der Graphik ist die Temperatur in Abhängigkeit vom Zyklustag dargestellt. Bei dieser Form der Darstellung findet häufig die symptomthermale Methode Anwendung, bei der anhand der Temperaturkurve auf den Zeitpunkt des Eisprungs und damit auf fruchtbare bzw. unfruchtbare Tage im Zyklus einer Frau geschlossen werden kann. Dementsprechend wird diese Methode auch zur Empfängnisverhütung eingesetzt. Die Regel besagt, dass der Eisprung erfolgt, wenn ein niedriger Wert gemessen wurde, die Temperatur im Anschluss daran um 0,4-0,6 °C ansteigt und auf einem hohen Niveau bleibt (Freundl, 2003). Für die Ergebnisauswertung wurde allerdings gegen die Nutzung der Temperaturkurve entschieden. Die Eingrenzung der jeweiligen Zyklusphasen wurde für jede Probandin standardisiert vorgenommen.

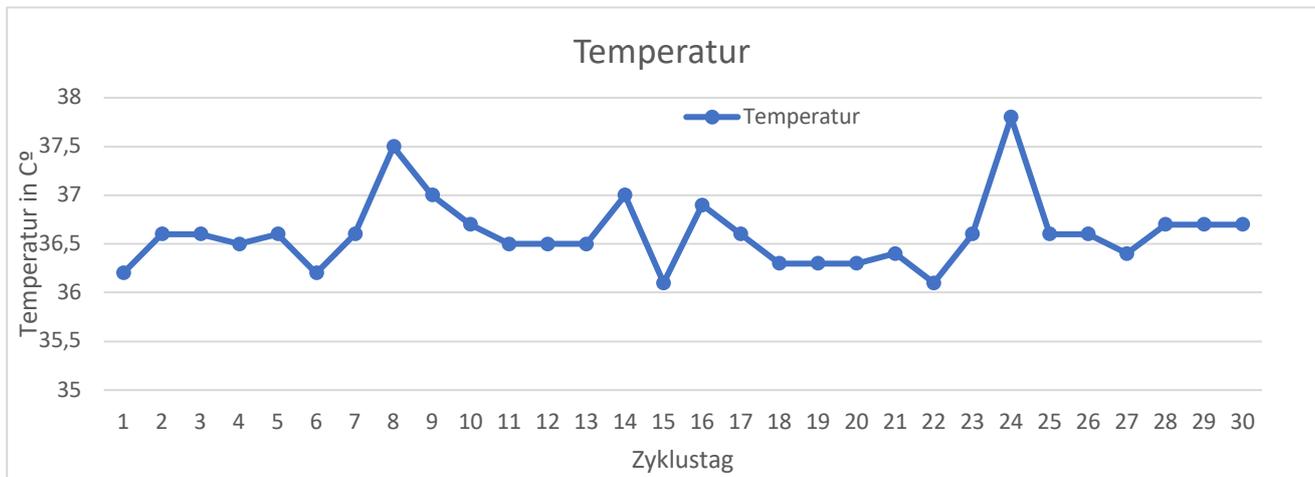


Abbildung 22: Temperaturverlauf während des Zyklus einer Probandin aus der Gruppe mit natürlichem Zyklus

9 Diskussion

9.1 Vorbemerkung

Die vorliegende Studie untersuchte die Steifigkeit mithilfe des Myotons von unterschiedlichen faserigen Bindegeweben im Verlauf des weiblichen Zyklus. Zu den Geweben zählen die Plantarapponose, die Achillessehne, die Patellasehne sowie der m. rectus femoris. Die Unterscheidung in eine Gruppe Frauen mit einem natürlichen Zyklus (NZ) und denjenigen, welche als orale Kontrazeption (OK) die Anti-Baby-Pille nehmen, sollte den Einfluss eines natürlichen Zyklus im Vergleich zu einem über eine orale Kontrazeption gesteuerten Zyklus auf die mechanischen Eigenschaften der faserigen Bindegewebe zeigen. Die Probandinnen wurden dabei über einen fünfwöchigen Untersuchungszeitraum an fünfzehn Tagen gemessen. Die Relevanz der Untersuchung zeigt sich aufgrund der kontroversen Studienlage zum Einfluss von weiblichen Geschlechtshormonen in Bezug auf das Verletzungsverhalten faseriger Bindegewebsstrukturen von Frauen. Dabei konnten mehrere Untersuchungen in Bezug auf das vordere Kreuzband zum einen ein erhöhtes Verletzungsrisiko von Frauen im Vergleich zu Männern (Hewett et al., 2005) zeigen und zum anderen konnte ein Zusammenhang des Verletzungsrisikos mit dem Zeitpunkt des Zyklus erbracht werden. Demnach zeigt sich eine Häufung von Rupturen des vorderen Kreuzbandes insbesondere zum Zeitpunkt des Eisprungs (Constantini et al., 2005). Inwiefern die hormonelle Situation im Körper von Frauen Sehnen beeinflusst, ist jedoch nicht so häufig erforscht. Der Einfluss von weiblichen Geschlechtshormonen auf bandähnliche Strukturen wie der Plantarapponose, aber insbesondere auf Sehnen wie die Achillessehne und die Patellasehne werden in diesem Kapitel diskutiert. Dabei wird Bezug auf die Ergebnisse des vorherigen Kapitels genommen, auf deren Basis die Fragestellungen und aufgestellten Hypothesen aus Kapitel 5 diskutiert werden.

9.2 Ergebnisdiskussion

9.2.1 Steifigkeit

Aufgrund der vorliegenden Fachliteratur besteht die Annahme, dass sich Sehnen – ähnlich wie es bereits für Bänder wie dem vorderen Kreuzband nachgewiesen werden konnte – aufgrund der Fluktuation von weiblichen Geschlechtshormonen im Verlauf eines natürlichen Zyklus im Hinblick auf ihre mechanischen Eigenschaften anpassen können. Die folgenden Abschnitte beschäftigen sich insbesondere mit der Steifigkeit von Patellasehne, Achillessehne und der Plantarapponose. Der m. rectus femoris wird nur kurz aufgeführt, da dieser in die Untersuchung einbezogen wurde, um den Einfluss der Oberschenkelmuskulatur auf die Patellasehne betrachten zu können. Die Frage, inwiefern eine Änderung des Muskeltonus

Diskussion

auch eine Veränderung der Steifigkeit der Patellasehne bedingt, wird im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit diskutiert.

Sehnen

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit den gemessenen Sehnen in der Untersuchung, darunter zählen die Achilles- und die Patellasehne. Unter Betrachtung der Mittelwerte der Steifigkeiten, die im Ergebnisteil unter Abbildung 21 zu finden sind, wird deutlich, dass sich beide Gewebe nicht stark voneinander unterscheiden. Beide Sehnen sind deutlich steifer als die Plantarapponurose und der Muskel am Oberschenkel. Die gemittelte Steifigkeit der Patellasehne der Gruppe mit OK ist mit 753,1 N/m am größten im Vergleich zu den anderen faserigen Bindegewebsstrukturen; für die Gruppe des natürlichen Zyklus liegt der Wert bei 737,2 N/m. Damit sind beide Mittelwerte etwas höher als die Steifigkeit der Achillessehne, die für den NZ bei 724,5 N/m und für die OK bei 699,8 N/m liegt. Ursache für die höheren Werte der Patellasehne im Vergleich zur Achillessehne ist, dass die Achillessehne durch die Plantarflexion des Fußes von 25° in ihrer Ruhelänge (Hug et al., 2013), die Patellasehne durch den 90°-Winkel des Knies einer Grundspannung ausgesetzt war. Aufgrund der Versuchsanordnung war zu erwarten, dass die Werte aus diesem Grund dicht beieinander liegen würden.

Anpassungen von Achilles- und Patellasehne könnten auch vom Trainingszustand der Probandinnen abhängig sein. Sehnen adaptieren an ein Training mit erhöhter Steifigkeit, wohingegen Immobilisation und Inaktivität mit einem Verlust der Steifigkeit einhergeht, die aus einer verringerten Kollagensynthese resultiert (Magnusson et al., 2016). Außerdem sind in den nachfolgenden Tagen an eine chronische Belastung einer Sehne die Syntheseraten erhöht, was ebenso zu einer höheren Steifigkeit führen kann (Rosso et al., 2010). Untersuchungen der Auswirkung von langjährigen regelmäßigen Läufen konnten zeigen, dass sich das Bindegewebe von Frauen im Vergleich zu Männern gedämpfter an eine Belastung anpasst. Aber im Vergleich zu Untrainierten ist der Durchmesser von Achilles- und Patellasehne größer als bei Trainierten (Westh et al., 2008). Dies verdeutlicht ebenso den Aspekt der Anpassung von körperlicher Aktivität auf die betreffenden Areale. Das unterschiedliche Pensum und die Art der körperlichen Aktivität der Probandinnen könnten daher Messergebnisse verzerren oder mögliche Effekte in Bezug auf die Bildung der Mittelwerte verdecken. Unter Betrachtung der Variationskoeffizienten in Tabelle 13 wird ersichtlich, dass alle gemessenen Strukturen weniger als 10 % in Bezug auf die Steifigkeit der Gewebe schwanken. Möglicherweise wäre die Schwankung für einige Gewebe noch geringer, wenn Probandinnen aus derselben Sportart akquiriert werden, da in diesem Fall davon ausgegangen werden kann, dass das faserige Bindegewebe denselben Trainingsreizen und Belastungen ausgesetzt ist. In diesem Zusammenhang wäre möglicherweise eine Einteilung in High-impact- und Low-impact-Sportarten für künftige Forschungen relevant. Die Frage, inwieweit aufgeführte Belas-

Diskussion

tungsformen die Steifigkeit von faserigen Bindegeweben verändern, wird aktuell in einer Untersuchung an der TU Chemnitz durch Alexander Kube erforscht. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass menschliche Sehnen metabolisch aktiv sind und durch mechanische Beanspruchung steifer und durch Inaktivität flexibler werden (Kjaer, 2004). Dieser Aspekt stellt einen weiteren Grund dar, Probanden hinsichtlich ihrer sportlichen Aktivität zu unterteilen. Schließlich ist anzumerken, dass die Achillessehne in der Tabelle zu den Variationskoeffizienten für beide Gruppen jeweils die geringsten Schwankungen zeigt – beide unter 5 % im Vergleich zu den anderen Geweben. Der NZ schwankt mit 4,84 % und die Gruppe der OK mit 3,37 %. Dieser Aspekt bestätigt den positiven Einfluss der standardisierten Messposition für die Achillessehne.

Bänder

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Plantarapponeurose diskutiert. Wie aus der Erörterung der Fachliteratur hervorging, weist sie Ähnlichkeiten zum vorderen Kreuzband auf. Da zudem ihr struktureller Aufbau mit einem Band verglichen werden kann, wird sie in dieser Untersuchung als Struktur mit bandähnlichen Eigenschaften betrachtet (Wearing et al., 2006). Darüber hinaus war die Messung der Plantarapponeurose in dieser Studie ein Versuch, eine weitere Bindegewebsstruktur abzubilden, die als Band betrachtet werden kann. Außerdem ist die Plantarapponeurose weniger anfällig für Störungen durch beteiligte Muskulatur. Die Mittelwerte der beiden Gruppen für die Steifigkeit der Plantarapponeurose über den gesamten Verlauf des Zyklus unterscheiden sich nur geringfügig, wobei die OK mit 487,6 N/m eine etwas höhere Steifigkeit zeigt als die Gruppe des NZ mit 470,0 N/m. Dieser Aspekt kann in Abbildung 21 graphisch nachvollzogen werden. Im Vergleich zu den beiden Sehnen, deren Steifigkeiten im Bereich um 700 N/m liegen, ist die bandähnliche Struktur der Plantarapponeurose damit weitaus weniger steif. Dies zeigt, dass Sehnen und Bänder trotz ihrer groben Ähnlichkeit einzigartige histologische und biochemische Eigenschaften aufweisen. Selbst zwischen einzelnen Bändern (Kollateral- und vorderes Kreuzband) und Sehnen (Patella und Achilles) konnten kleinere Unterschiede nachgewiesen werden. Ursächlich für die Differenzierung von Sehnen und Bändern könnte sein, dass Bänder womöglich größeren Beanspruchungen während der Entwicklung ausgesetzt sind. So müssen sie das Gelenkwachstum kompensieren, während bei Sehnen als Teil eines Komplexes mit einem Muskel möglicherweise ein geringeres Anpassungspotenzial erforderlich ist (Amiel et al., 1983). Außerdem sind Bänder metabolisch aktiver als Sehnen. Sie enthalten etwas weniger Kollagen und dafür mehr Glykosaminoglykane. Darüber hinaus wurden in Bändern vermehrt Kollagene identifiziert, die auf Cross Links ansprechen (ebd). Aufgrund dieser Besonderheiten von Sehnen im Vergleich zu Bändern konnte vermutet werden, dass die Plantarapponeurose möglicherweise im Verlauf des Zyklus größere Schwankungen zeigt, als es bei den beiden gemessenen Sehnen der Fall ist. Diese Vermutung konnte bestätigt werden. Wie die Be-

Diskussion

rechnung des Variationskoeffizienten in Tabelle 13 über die Gewebe zeigt, liegt die Schwankung für die Gruppe mit NZ bei 7,75 % und für die Gruppe der OK bei 8,13 %. Die Variationskoeffizienten für die beiden Sehnen liegen dagegen in beiden Gruppen unter 6,5 %. Die höhere Schwankung im Vergleich zu den Sehnen könnte allerdings ebenso auf die Messposition der Probandin zurückzuführen sein, denn die Messung wurde in Bauchlage vorgenommen, wobei die Fußsohle über den Rand einer Liege hängend gemessen wurde. Einige Probandinnen waren an der Fußsohle für die Messung sehr empfindlich und konnten teilweise den Fuß nur mit Schwierigkeiten ohne Spannung halten oder aus diesem Grund nur schwer die Messposition beibehalten. Damit wäre die Schwankung zufällig bedingt.

M. rectus femoris

Erwartungsgemäß fielen die Werte des Muskels am Oberschenkel unter den gemessenen Geweben am niedrigsten aus. Dabei liegt der Wert für die Gruppe der oralen Kontrazeption mit 288,2 N/m etwas höher als die Steifigkeit der Versuchsgruppe mit 262,7 N/m. Der leicht höhere Wert der OK könnte an der Einnahme der Pille liegen. Dieser Aspekt soll allerdings im Folgenden diskutiert werden. Zunächst soll die Frage geklärt werden, inwiefern eine Änderung des Muskeltonus auch eine Veränderung der Steifigkeit der Patellasehne in dieser Untersuchung bedingt. Unter dem Blickpunkt der Veränderung der Steifigkeit über die Zykluszeitpunkte von Patellasehne und m. rectus femoris ist davon auszugehen, dass in dieser Untersuchung der Muskeltonus keine Veränderung der Steifigkeit der Patellasehne bedingt. Im Hinblick auf die Mittelwerte im Verlauf des Zyklus geht eine Erhöhung der Steifigkeit des m. rectus femoris nicht mit einer Erhöhung der Steifigkeit der Patellasehne einher. Dies ist weder für die Gruppe mit NZ noch für die OK der Fall. Damit kann ausgeschlossen werden, dass der Muskel die Patellasehne beeinflusst und somit möglicherweise eine Veränderung der mechanischen Eigenschaften impliziert.

9.2.2 Einfluss oraler Kontrazeptiva

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung zeigen, dass unter der angewendeten Messtechnik keine signifikanten Unterschiede zwischen der Versuchsgruppe und der Kontrollgruppe hinsichtlich einer Veränderung der Bindegewebeigenschaften aufgetreten sind (vgl. Tabelle 12). Im Hinblick auf die aufgestellten Hypothesen dieser Arbeit muss die Nullhypothese angenommen werden: Die Versuchsgruppen unterscheiden sich im Verlauf des Zyklus im Hinblick auf die Steifigkeit der gemessenen Gewebe nicht. Auf Grundlage der Fachliteratur wurde von einem Unterschied zwischen den Gruppen ausgegangen. Unter Betrachtung der Gruppenmittelwerte für jedes Gewebe lässt sich jedoch eine Tendenz erkennen. Die Gruppe des natürlichen Zyklus weist in allen Geweben bis auf die mittlere Steifigkeit der

Diskussion

Achillessehne eine geringere Steifigkeit auf als die Kontrollgruppe. Dies ist graphisch in Abbildung 21 ersichtlich.

Grund für die tendenziell höhere mittlere Steifigkeit der OK über die Gewebe bis auf die Achillessehne der Gruppe mit natürlichem Zyklus könnte der Einfluss der Pille sein, wie eine Untersuchung am Knie vermuten lässt. Hewett und Kollegen konnten zeigen, dass die Nutzung von oralen Verhütungsmitteln den Hormonspiegel während des Zyklus konstant hält. Dadurch kann das Kniegelenk entweder passiv oder aktiv stabilisiert werden. Demnach wiesen Frauen, welche orale Kontrazeptiva einnehmen, geringere Schlagkräfte und reduzierte Valgus- und Varusmomente am Knie auf und zeichneten sich im Vergleich zur Kontrollgruppe mit einem natürlichen Zyklus durch eine erhöhte einseitige Stabilität im Bein und durch eine geringere Knielaxizität aus, welche mit einem Arthrometer bestimmt wurde (Hewett, 2000).

Inwiefern diese Ergebnisse auf die vorliegende Untersuchung zu übertragen sind, bleibt jedoch fraglich. In der Studie von Hewett (2000) wurde das vordere Kreuzband untersucht; aus diesem Grund können die Ergebnisse möglicherweise eher auf die vorliegenden Ergebnisse der Plantarapponose übertragen werden, da diese große Ähnlichkeiten mit dem vorderen Kreuzband aufweist (Wearing et al., 2006). Die Arbeitsgruppe von Bryant et al. konnte zeigen, dass die Achillessehnenbelastung, welche während der Durchführung von maximalen isometrischen Plantarflexionen berechnet wurde, bei Nutzerinnen einer oralen Kontrazeption eine signifikant niedrigere Achillessehnenbelastung zeigte, als bei jenen, die einen natürlichen Zyklus haben. Bei Nichtanwenderinnen einer oralen Kontrazeption konnten keine Veränderungen des Belastungsverhaltens der Achillessehne nachgewiesen werden. Die Forscher vermuten, dass die Veränderung des Belastungsverhaltens durch die Wirkung von Östrogen auf die Kollagensynthese zurückzuführen ist (Bryant et al., 2008). Inwiefern ein niedrigeres Belastungsverhalten mit einer verringerten Steifigkeit einhergeht, konnte der aufgeführten Studie nicht entnommen werden. Jedoch könnte dies einen Erklärungsversuch darstellen, die niedrigeren Steifigkeiten der Achillessehnenanspannung der Kontrollgruppe im Vergleich zur Versuchsgruppe zu begründen. Diesem Aspekt ist hinzuzufügen, dass erhöhte Steifigkeiten bei Sehnen auch eine Reaktion dieses Bindegewebes auf ein hohes Belastungsvolumen darstellen (Heinemeier and Kjaer, 2011). Alle Probandinnen sind sportlich aktiv, jedoch gaben in der Gruppe des natürlichen Zyklus sieben von dreizehn Probandinnen an, im Triathlon oder im Laufsport aktiv zu sein. In der Gruppe der oralen Kontrazeption gaben lediglich zwei Probandinnen das Laufen als Sportart an. Damit liegt die Vermutung nahe, dass die tendenziell höheren Werte der Gruppe des NZ in Bezug auf die mittlere Steifigkeit der Achillessehne auf deren regelmäßige Belastung zurückzuführen sind. Kjaer beschreibt, dass körperliche Aktivität dazu beiträgt, den Metabolismus und die Durchblutung in Sehnen

Diskussion

anzuregen, was zu einer chronischen Erhöhung der Kollagenen-Umsetzung führt und damit dazu beitragen kann, Sehneneigenschaften zu modifizieren (Kjaer, 2004).

Eine Untersuchung der Muskelkraft im Verlauf des Zyklus konnte zeigen, dass Frauen mit einem natürlichen Zyklus einen Kraftanstieg von ca. 11 % der Quadrizepsmuskulatur des Oberschenkels zum Zeitpunkt der Ovulation erbringen können, was bei Frauen, welche orale Kontrazeptiva einnehmen, nicht der Fall ist. Hinzu kommt, dass sich die Entspannungseigenschaften in der Phase des Eisprungs erhöhen (Sarwar et al., 1996). In Anbetracht der mittleren Steifigkeit des m. rectus femoris der Gruppe mit natürlichem Zyklus könnte der niedrigere Wert im Vergleich zur Gruppe der oralen Kontrazeption ebenso auf die besseren Entspannungseigenschaften während des natürlichen Zyklus übertragen werden. Die Einnahme der Pille könnte damit die größere Spannung im Muskelgewebe bedingen.

Weiterhin ist anzumerken, dass verschiedene Präparate der Pille mit unterschiedlichen Konzentrationen von Hormonen auch unterschiedlich starke Auswirkungen auf die Eigenschaften von Bindegewebe haben könnten. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Variation der synthetischen Gestagene differenzierte Auswirkungen auf die myofibrilläre Protein-Abbauraten in Muskeln hat. Ähnliche Unterschiede könnten auch in Bezug auf die Steifigkeit von Sehnen und Bändern möglich sein (Hansen and Kjaer, 2014). Dies könnte ein Grund dafür sein, weshalb beispielsweise die Gruppe der OK in Bezug auf die Steifigkeit der Achillessehne geringere Werte aufweist als die Versuchsgruppe des natürlichen Zyklus.

Außerdem sollte bedacht werden, dass ebenso andere Faktoren mit der Auswirkung von Hormonen auf eine Veränderung der mechanischen Eigenschaften von Bindegewebe interagieren könnten. Solche Faktoren können individuelle Variationen im Verlauf des Zyklus aufgrund von Schwankungen des Körpergewichtes oder Flüssigkeitskonzentration, aber auch Veränderungen der Muskelsteifigkeit aufgrund von sportlicher Aktivität sein (Shultz et al., 2010).

Außerdem wurde vermutet, dass die Gruppe mit natürlichem Zyklus größere Schwankungen in ihren Messwerten aufweisen werde als die Probandinnen mit oraler Kontrazeption. Dies kann aufgrund der berechneten Variationskoeffizienten in Tabelle 12 über alle Gewebe bis auf die Plantarapponeurose bestätigt werden. In diesem Fall schwankt die Gruppe der OK mit 8,13 % mehr als die Gruppe mit NZ mit 7,75 %. Da für die Mehrheit der gemessenen Gewebe die Gruppe des natürlichen Zyklus tendenziell mehr schwankt als die Kontrollgruppe, wird H1 angenommen: Die Gruppe des natürlichen Zyklus schwankt mehr als die Gruppe der oralen Kontrazeption. Es ist anzumerken, dass die Variationskoeffizienten jedoch dicht beieinander liegen und statistisch keine signifikante Unterscheidung zwischen den Gruppen gezeigt werden konnte. Aus diesem Grund kann nicht eindeutig differenziert werden, inwiefern die geringere Schwankung tatsächlich durch den Einfluss der Pille bedingt ist. Auffällig

ist, dass die Schwankungsdifferenz zwischen den beiden Gruppen für die Plantarapponeurose mit 0,38 % deutlich geringer ist als für die Sehnen, deren Schwankungsdifferenzen bei 1,47 % (AS) und 1,67 % (PA) liegen. Dieser Aspekt stellt vermutlich weniger ein Unterscheidungskriterium zwischen den beiden Gruppen dar, sondern könnte neben anderen die Differenzierung von Sehnen und Bändern verdeutlichen. Jedoch könnten die Schwankungen auch zufällig bedingt und aufgrund der kleinen Stichprobengröße (n für NZ = 13; n für OK = 8) für beide Gruppen entstanden sein. Die Verlaufskurven der Achillessehne für die beiden Gruppen in Abbildung 16 Abbildung 17, in denen die Steifigkeit in Abhängigkeit der prozentualen Zykluslänge abgebildet ist, lässt vermuten, dass die Gruppe der oralen Kontrazeption weniger schwankt. Es ist zu erkennen, dass die Werte der einzelnen Probandinnen über den Verlauf des Zyklus dichter beisammen liegen.

9.2.3 Zeitpunkt des Zyklus

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen, wie aus Tabelle 8 hervorgeht, dass es zwischen den beiden Versuchsgruppen bezogen auf die gemessenen Gewebe keine signifikanten Unterschiede in den Zyklusphasen Menstruation, Eisprung und Lutealphase gibt. Für diesen Fall muss H_0 angenommen werden, welche besagt, dass es keinen Zusammenhang zwischen Zeitpunkt des Zyklus und einer Veränderung der Bindegewebeigenschaften gibt. Wenn jedoch innerhalb der Gruppen auf statistische Signifikanz getestet wird, zeigt sich, dass jeweils ein Gewebe in den Gruppen eine statistische Signifikanz in Bezug auf die Zyklusphase aufweist. Für die Gruppe mit natürlichem Zyklus konnte, wie die p -Werte in Tabelle 6 veranschaulichen, dokumentiert werden, dass sich die Mittelwerte der Plantarapponeurose zum Zeitpunkt der Menstruation und der Lutealphase unterscheiden ($p = 0,031$). Für alle anderen Gewebe konnte kein Unterschied zu unterschiedlichen Zeitpunkten des Zyklus gezeigt werden. Entgegengesetzt der Erwartungen war die Steifigkeit der PA zum Zeitpunkt der Menstruation mit 459,2 N/m niedriger als in der Lutealphase mit 480,2 N/m. Andere Untersuchungen zum Verlauf des Zyklus konnten niedrigere Werte stets zu Zeitpunkten finden, zu denen auch die Hormonlevelkonzentration erwartungsgemäß am höchsten ist. Die Studie von Petrofsky und Lee konnte eine gesteigerte Elastizität der Plantarfaszie zum Zeitpunkt der Ovulation im Vergleich zur frühen Follikularphase zeigen. Diese Untersuchung hat die Lutealphase nicht in den Blick genommen. Außerdem wurde durch die Messung der Fußlänge und der Bestimmung der Dicke der Plantarfaszie mithilfe von Ultraschall auf die Elastizität und nicht auf die Steifigkeit geschlossen (Petrofsky and Lee, 2015). Dementsprechend wäre auch für die vorliegende Untersuchung zu erwarten gewesen, dass zum Zeitpunkt der Menstruation höhere Werte als in Ovulations- und Lutealphase gemessen werden.

In der Gruppe der oralen Kontrazeption zeigten die Mittelwerte der Patellasehne zum Zeitpunkt des Eisprungs und der Lutealphase eine Signifikanz ($p = 0,04$). Die jeweiligen p -Werte

sind in Tabelle 7 ersichtlich, wobei in diesem Fall der Zeitraum der Ovulation mit 726,0 N/m signifikant unter dem der Lutealphase mit 753,0 N/m lag. Da die restlichen Strukturen und Zeitpunkte nicht signifikant waren, könnten die beiden aufgetretenen Unterschiede in den Gruppen ebenso zufällig bedingt sein. Da beide Gruppen kleine Stichproben enthalten (NZ, n = 13; OK, n = 8), sind Ausreißer möglich. Die Tendenz der Studie besteht darin, dass sich die Gruppen nicht unterscheiden, was auch für den Zeitpunkt des Zyklus innerhalb der Gruppen gilt. Die Verlaufskurven unter Abbildung 16 und 17 der Achillessehne in Abhängigkeit der prozentualen Zykluslänge zeigen ebenso deutlich, dass sich die Punktwolke in beiden Gruppen homogen über den Verlauf des Zyklus verteilt. Es sind keine Tendenzen zu erkennen, die darauf schließen lassen, dass die Steifigkeit zu einem bestimmten Zeitpunkt des Zyklus erheblichen Änderungen unterliegt. Die Arbeitsgruppe um Karageanes et al. kam bei ihrer Untersuchung der Laxizität des vorderen Kreuzbandes ebenso zu dem Ergebnis, dass der Menstruationszyklus keinen Einfluss auf die Kreuzbandlaxizität bei weiblichen Athleten hat (Karageanes et al., 2000). Demgegenüber stehen allerdings Untersuchungen von Romani und Kollegen, welche die Laxizität des vorderen Kreuzbandes mit einem Arthrometer testeten und dagegen einen Zusammenhang zwischen der Östrogen- bzw. Progesteronkonzentration im Blut und der Steifigkeit des vorderen Kreuzbandes feststellen konnten (Romani et al., 2003). Ebenso konnte die Untersuchung von Heitz und Kollegen eine erhöhte Kreuzbandlaxizität im Zusammenhang mit erhöhten Östrogenwerten zum Zeitpunkt des Eisprungs und der Lutealphase nachweisen (Heitz et al., 1999). Allerdings wurde für diese Untersuchungen ein Arthrometer verwendet und ausschließlich das vordere Kreuzband betrachtet. Es konnten keine Studien gefunden werden, die das Myoton als Messgerät für die Steifigkeit nutzten. Möglicherweise liefert das Arthrometer andere Ergebnisse als das Myoton. Die Ergebnisse implizieren jedoch, dass die gemessenen Strukturen differenziert voneinander betrachtet werden sollten, da sie zumindest laut den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung anscheinend nicht denselben Schwankungen im Verlauf des Zyklus unterliegen. Auffällig ist, dass in der Gruppe des NZ die bandähnliche Struktur der Plantarapponevrose signifikante Ergebnisse zeigt, in der Gruppe der oralen Kontrazeption jedoch die Achillessehne. Dies lässt die Vermutung zu, dass die Einnahme der Anti-Baby-Pille Sehnen und Bänder nicht im gleichen Ausmaß beeinflussen würde und ein natürlicher Zyklus womöglich primär Bänder und weniger Sehnen beeinflusst. Möglicherweise ist dieser Aspekt auf das unterschiedliche Vorhandensein von Rezeptoren in Muskeln, Sehnen und Bändern zurückzuführen. Jedoch sollte bedacht werden, dass die Eingrenzung der Zeitpunkte im Verlauf des Zyklus für die vorliegende Studie standardisiert erfolgt ist. In der Gruppe des natürlichen Zyklus können die einzelnen Phasen jedoch unterschiedlichen Schwankungen unterliegen (Raith-Paula et al., 2013a). Auch bei der vorliegenden Untersuchung war eine Schwankung der Zykluslänge zu beobachten. Dabei waren Zykluslängen der Gruppe mit natürlichem Zyklus

lus zwischen 28 und 41 Tagen aufgetreten. Ebenso kann der Ovulationszeitpunkt einer großen Variabilität unterliegen. Eine Untersuchung von Fehring et al. konnte zeigen, dass nur 25 % der Frauen ihren Eisprung zwischen dem 10. und dem 17. Zyklustag haben (Fehring et al., 2006). Da in der vorliegenden Untersuchung keine Blutproben oder Ovulationskits verwendet wurden, um den Zeitpunkt des Eisprungs bei den einzelnen Probandinnen genauer einzugrenzen, besteht die Möglichkeit, bestimmte Zeitpunkte verpasst zu haben und fälschlicherweise spezifische Werte nicht eingeschlossen oder ausgeschlossen zu haben. Dieser Aspekt könnte ebenso einen Erklärungsversuch darstellen, weshalb keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen beobachtet werden konnten. Möglicherweise lassen sich außerdem keine eindeutigen Ergebnisse liefern, weil der Einfluss von Hormonen auf das Gewebe chronisch sein könnte (Burgess et al., 2010). Dies lässt die Vermutung zu, dass im Verlauf eines Zyklus keine Unterschiede auftreten, sondern stattdessen über mehrere Jahre hinweg messbar wären.

9.2.4 Verletzungsrisiko

Inwiefern eine verringerte Steifigkeit im Falle der Versuchsgruppe außer in Bezug auf die Achillessehne ein erhöhtes Risiko für Verletzungen darstellt, ist unklar. Im Hinblick auf das vordere Kreuzband wird vermutet, dass eine erhöhte Bandlaxizität ebenso eine protektive Wirkung haben könnte, da es vielmehr zu einer Elongation kommt als zu einer Ruptur bei Belastungen. Entgegengesetzt zu dieser Vermutung könnte eine propriozeptive Rückkopplung über die im Kreuzband vorhandenen Nozirezeptoren durch eine höhere Laxizität auch eine negative Beeinflussung erfahren (Petersen and Zantop, 2009, p. 24). Das Verletzungsrisiko in den Zyklusphasen könnte ebenso auf die Auswirkung von Östrogen auf die Muskelfunktion und die Kraft von Sehnen und Bändern zurückzuführen sein (Sarwar et al., 1996). Lebrun et al. konnten außerdem Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit von Athletinnen zeigen, wobei ein signifikanter Rückgang der maximalen Sauerstoffaufnahme während der Lutealphase verzeichnet werden konnte (Lebrun, 1993). Die Erhöhung des Verletzungsrisikos in den einzelnen Zyklusphasen scheint multifaktoriellen Gründen zu unterliegen. Demnach scheinen Östrogen, Progesteron und Relaxin die neuromuskuläre Funktionsfähigkeit zu beeinflussen, was für eine Häufung von Verletzungen zu bestimmten Zeitpunkten während des Zyklus sprechen würde, da sie die ligamentöse Laxizität erhöhen. Außerdem konnte festgestellt werden, dass PMS bei einigen Frauen das Verletzungsrisiko beeinflussen kann. Frauen, die unter PMS leiden, haben ein schlechteres Gleichgewicht und eine verminderte Körperwahrnehmung als Frauen, die kein PMS zeigen. Dies wurde vor allem in der Phase der Menstruation und in der späten Lutealphase festgestellt (Hewett, 2000). In der vorliegenden Studie gaben zwar alle Frauen an, kein diagnostiziertes PMS zu haben, allerdings verwiesen alle Probandinnen bis auf zwei an, während und um den Zeitraum der Menstruation

Diskussion

an diversen Symptomen oder Schmerzen zu leiden. In diesem Fall kann aber keine Differenzierung in den Versuchsgruppen vorgenommen werden, da jeweils eine Probandin aus NZ und OK keine Probleme hatten.

Aufgrund der vorliegenden Daten und vielfältigen Umweltfaktoren können keine Rückschlüsse auf das Verletzungsrisiko gezogen werden – weder innerhalb einer Gruppe noch zwischen den Gruppen. Außerdem kommt der entscheidende Faktor hinzu, dass der Verletzungsmechanismus einer Ruptur des vorderen Kreuzbandes ebenso auf anatomische Differenzen von Männern und Frauen zurückzuführen ist. Videoanalysen konnten unterschiedliche Hüft- und Kniewinkel insbesondere bei der Landung nach Sprüngen zeigen. Frauen haben darüber hinaus während eines Richtungswechsels oft eine aufrechtere Körperhaltung als Männer mit einer geringeren Beugung von Hüfte und Knie. Damit tritt ein übermäßiger Valgus am Knie auf und bedingt so die Verletzung des vorderen Kreuzbandes (Ireland, 2002). Es lässt sich festhalten, dass alle Ergebnisse im Zusammenhang mit der hormonellen Auswirkung während des Zyklus von Frauen jedoch nur auf minimalen Veränderungen basieren und Frauen in jeder Phase des Menstruationszyklus unabhängig von der Nutzung der Pille Weltrekorde aufstellen konnten (Lebrun, 1994). Ein wichtiger Aspekt besteht zudem in der Erkenntnis, dass insbesondere Sehnen auf körperliche Belastung mit einer Trainingsanpassung hinsichtlich Durchblutung, Metabolismus sowie Kollagen-Syntheserate reagieren. Diese Adaptationen erhöhen die Resistenz gegenüber Überlastung sowie daraus resultierenden Verletzungen (Kjaer, 2004). Damit sollte der Nutzen von körperlicher Aktivität und dem Risiko einer Verletzung abgewogen werden, wobei anscheinend ein richtiges Training zur Verletzungsprävention beitragen kann.

9.2.5 Temperatur

Die Probandinnen sollten ihre Basaltemperatur messen, um den Zeitpunkt des Eisprungs für die Ergebnisauswertung besser eingrenzen zu können. Eine Untersuchung von Freund et al. zeigt, dass durch die symptothermale Methode in neunzehn von zwanzig Zyklen der Zeitpunkt der Ovulation identifiziert werden konnte. Allerdings waren alle Probandinnen dieser Studie als Ausbilderinnen dieser Methode trainiert und brachten eine hohe Motivation mit (Freundl et al., 1984). Dementsprechend war der Temperaturkurvenverlauf für die vorliegende Arbeit ein guter, nichtinvasiver, kostenökonomischer und zeitsparender Ansatz, den Eisprung der Probandinnen identifizieren zu können. Diese Methode konnte aber für eine nähere Auswertung und Eingrenzung des Eisprungs nicht herangezogen werden, da es nur drei Probandinnen während des Messzeitraumes schafften, jeden Tag unter Einhaltung der Regeln zur Standardisierung die Morgentemperatur zu messen. Bis auf eine Probandin war das Messen für alle neu und wurde aus diesem Grund häufig vergessen. Möglicherweise war auch die Motivation für die Probandinnen, täglich um dieselbe Uhrzeit zu messen, nicht

gegeben. Im Einzelgespräch mit den Probandinnen konnte herausgefunden werden, dass das tägliche Messen häufig als „störend“ oder „belastend“ wahrgenommen wurde. Damit konnte, wie die Temperaturkurve in Abbildung 22 zeigt, keine eindeutige Identifizierung des Zeitpunktes des Eisprungs vorgenommen werden. Normalerweise steigt die Körperkerntemperatur der Frau nach erfolgtem Eisprung um 0,2 bis 0,4 °C an und bleibt auf diesem Niveau bis zur folgenden Menstruation (Freundl, 2003). Das Messen der Morgentemperatur war für die vorliegende Untersuchung nicht gewinnbringend. Im Vorfeld sollte den Probandinnen möglicherweise ein bestimmter Übungszeitraum mit dem Thermometer eingeräumt werden. Außerdem sollte für künftige Untersuchungen abgewogen werden, wie wichtig die Eingrenzung des Eisprungs ist. Dementsprechend sollte man sich eventuell nicht nur auf die Messung mit einem Thermometer verlassen.

9.3 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich über den gesamten Verlauf des Zyklus keine signifikanten Mittelwertunterschiede beim Vergleich der Gewebe ergaben. Dies bedeutet, dass die Gruppe des natürlichen Zyklus nicht von der Gruppe mit oraler Kontrazeption abweicht. Die gemessenen Gewebe unterscheiden sich auch in Anbetracht der Zyklusphasen Menstruation, Eisprung und Lutealphase zwischen den beiden Versuchsgruppen nicht voneinander. Innerhalb der Gruppen konnten jedoch signifikante Mittelwertunterschiede vereinzelter Gewebe in bestimmten Zyklusphasen nachgewiesen werden. Für die Gruppe des natürlichen Zyklus zeigte die Plantarapponeurose im Vergleich von Menstruation und Lutealphase signifikante Unterschiede. In der Gruppe der oralen Kontrazeption erbrachte die Patellasehne zum Zeitpunkt des Eisprungs im Vergleich zur Lutealphase signifikante Ergebnisse. Aufgrund der vorliegenden Fachliteratur wird jedoch davon ausgegangen, dass diese Ergebnisse multifaktoriellen Erklärungen unterliegen, ebenso von zufälligen Einflussfaktoren bedingt sein könnten und damit nicht auf die alleinige Nutzung der Anti-Baby-Pille zurückzuführen sind. Jedoch konnten die Ergebnisse Tendenzen aufzeigen, welche möglicherweise in Verbindung mit weiblichen Geschlechtshormonen gebracht werden können. Dementsprechend konnte eine Tendenz für geringere Steifigkeiten über die Gewebe für die Gruppe des natürlichen Zyklus erbracht werden. Außerdem zeigt die Gruppe des natürlichen Zyklus über die gemessenen Gewebe einen größeren Variationskoeffizienten und damit eine höhere Schwankung im Vergleich zur Gruppe der oralen Kontrazeption. Da es sich dabei um minimale Effekte handelt, sollte mit den Ergebnissen jedoch kritisch umgegangen werden.

Erkenntnisse dieser Arbeit:

- Es liegt eine Tendenz für eine geringere Steifigkeit faseriger Bindegewebe bei einem natürlichen Menstruationszyklus vor

Diskussion

- Tendenziell zeigt sich eine größere Schwankung der gemessenen Werte über die Gewebe der Gruppe mit dem natürlichen Zyklus
- Über den gesamten Verlauf des Zyklus konnten keine signifikanten Mittelwertunterschiede der gemessenen Gewebe zwischen den Gruppen gezeigt werden
- Die Unterteilung in Zyklusphasen wies keine signifikanten Unterschiede der Mittelwerte zu unterschiedlichen Zeitpunkten des Zyklus zwischen den Gruppen auf
- Die Messung der Basaltemperatur war für die vorliegende Untersuchung nicht gewinnbringend

10 Methodenkritik

Das vorliegende Kapitel setzt sich kritisch mit der durchgeführten Untersuchung auseinander. Dabei werden sowohl die Untersuchungszeitpunkte als auch die Messvorrichtung sowie die Verwendung des Myotons als Messgerät für die Steifigkeit und schließlich das Messen der Basaltemperatur durch die Probandinnen kritisch hinterfragt. Im Zusammenhang damit werden auch die Vorteile der angewendeten Messtechnik aufgezeigt und positive Aspekte der Studiendurchführung thematisiert.

10.1 Untersuchungszeitpunkte

Die hohe Messdichte von fünfzehn Messungen innerhalb von fünf Wochen war für einige Probandinnen schwer zu realisieren. Dementsprechend lagen zwischen den Messungen teilweise weniger als 24 h (16 h) oder es kam zu langen Abständen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Terminen (8 d). Es ist unklar, inwiefern sehr kurze oder zu lange Messabstände eine Veränderung der mechanischen Eigenschaften am Bindegewebe zeigen können. Insbesondere bei zu langen Abständen besteht die Gefahr, eventuelle Unterschiede zu übersehen. Jedoch kann dieser Aspekt durch die Bildung von Mittelwerten über den gesamten Messzeitraum sowie durch das Zusammenfassen von Messtagen pro Probandin ausgeglichen werden. Teilweise war es den Probandinnen auch nicht möglich, konstante Tageszeiten für die Messungen beizubehalten. Ebenso konnten vorheriges Training oder Wettkämpfe (Halbmarathon, Triathlon) teilweise nicht vermieden werden, da die Probandinnen alle einen aktiven Lebensstil führen. Aufgrund der hohen Anzahl der Messungen konnten keine erheblichen Einschränkungen des normalen Alltags der Probandinnen vorgenommen werden. Es ist jedoch positiv hervorzuheben, dass es trotz der hohen Messdichte erstmalig gelungen ist, Verlaufsmessungen über mindestens fünf Wochen von 21 Probandinnen an unterschiedlichen Geweben zu erheben. Darüber hinaus wurde zusätzlich in zwei Gruppen unterschieden, was eine differenzierte Betrachtung der unterschiedlichen hormonellen Situation im Körper von Frauen, welche die Pille zur Empfängnisverhütung nutzen, und jenen mit natürlichem Zyklus zuließ. Künftige Untersuchungen sollten die Phasen individuell für die Probandinnen einteilen und keine standardisierten Zeiträume wählen.

10.2 Messvorrichtung

Die Messplatte (vgl. Abbildung 13), auf der die Probanden ihren Fuß abstellen sollten, um den Winkel von 25 Grad für die Plantarflexion des Fußes zu gewährleisten, hat sich in der ersten Messwoche verschoben, sobald das Gewicht des Fußes auf die Plattform wirkte. Dies hatte zur Folge, dass der Winkel bei den Messungen teilweise deutlich geringer war als 25°.

In den Daten zeigte sich dies in erhöhten Werten für die Achillessehne, da sie nicht mehr in ihrer Ruhespannungslänge von 25° gemessen wurde (Hug et al., 2013). Gleichzeitig geht daraus hervor, dass der gewählte Winkel von 25° Unterschiede im Hinblick auf die Messwerte des Myotons zeigt. Ab der zweiten Messwoche wurde die Platte für die Winkeleinstellung des Fußes anders fixiert, sodass keine Abweichungen mehr möglich waren. Die Probandinnen, bei denen der Winkel nicht korrekt eingestellt war, wurden gebeten, eine zusätzliche Messung zu machen, um den Wert entsprechend ersetzen zu können. Bei jenen Probandinnen, welchen es nicht möglich war, einen zusätzlichen Wert zu messen, wurde die fehlerhafte Messung aus dem Zeitraum der ersten Messwoche aus den Daten eliminiert. Achillessehne und Patellasehne sowie der m. rectus femoris wurden gemessen, während die Probandinnen in der Messvorrichtung fixiert waren. Allerdings ist anzumerken, dass die Achillessehne in Ruhespannung gemessen wurde, die Patellasehne jedoch durch die Position in der Messvorrichtung keine Ruhespannungslänge erreicht hat. Durch den Kniewinkel von 90 Grad ist anzunehmen, dass die Patellasehne im Gegensatz zur Achillessehne unter mehr Spannung gestanden hat. Es ist unklar, inwiefern sich eine Spannung auf der Patellasehne möglicherweise in höheren Messwerten ausdrückt. Künftige Untersuchungen sollten möglichst alle Gewebe in Ruhespannung messen.

Es ist jedoch anzumerken, dass sich die Messvorrichtung positiv auf den Untersuchungsablauf auswirkte. Die Probandinnen mussten für die Messungen lediglich einmal die Position wechseln, da Achillessehne, Patellasehne und Muskel in derselben Position gemessen wurden. Insbesondere die Plattform des Fußes hat insgesamt dazu beigetragen, dass wenig Schwankungen der Messungen an der Achillessehne vorhanden waren, wie die Variationskoeffizienten in Tabelle 13 zeigen.

10.3 Myoton

Im Vergleich zu anderen Methoden ist das Myoton ein nichtinvasives und kostenökonomisches Verfahren, um die Steifigkeit von Geweben schnell zu bestimmen. Allerdings können individuell verschieden dicke Bindegewebsschichten die Messung verfälschen. Insbesondere die Messung an der Achillessehne kann durch die Plantarflexion des Fußes zu ungenauen Messergebnissen führen – besonders, wenn es zu vermehrter Faltenbildung der Haut kommt. Teilweise waren erhebliche Schwankungen bei den zwei Messwiederholungen zu beobachten. Insbesondere der Messpunkt für die Plantarapponeurose an der Fußsohle gestaltete sich diesbezüglich schwierig, da einige Probandinnen eine empfindliche Fußsohle haben und aus diesem Grund entweder Schwierigkeiten hatten, den Fuß zu entspannen oder in derselben Messposition zu bleiben. Damit fiel die Variabilität an einer Messstelle bei einer Probandin insbesondere an der Plantarapponeurose an einem Tag teilweise sehr hoch

aus. Dies war jedoch nur bei vereinzelt Messungen der Fall und ist mit großer Wahrscheinlichkeit nicht auf die Messtechnik zurückzuführen, sondern kann mit ungewollten Bewegungen der Probandin während der Messung begründet werden. Für die vorliegende Untersuchung war besonders die schnelle Messung mit dem Myoton sehr vorteilhaft. Dadurch konnte das Messen von vier Geweben innerhalb von fünf bis zehn Minuten realisiert werden. Die Probandinnen konnten die Messungen in den Alltag integrieren, was dazu geführt hat, dass ebenso eine hohe Motivation der Probandinnen während der Messungen vorhanden war und es keine Abbrüche während der Messungen aufgrund eines zu hohen Zeitfaktors gab.

Im Zusammenhang mit dem Myoton sind auch die dazugehörigen Messpunkte, welche an den vier Geweben jeweils am ersten Messtag standardisiert bestimmt wurden, kritisch zu betrachten. Die Punkte wurden mit einem hautfreundlichen Tattoostift aufgetragen und die Probandinnen wurden gebeten, die Punkte regelmäßig zu prüfen. Allerdings waren die Messpunkte teilweise durch sportliche Aktivitäten nicht mehr sichtbar oder es wurde vergessen, sie nachzuzeichnen. In diesem Fall mussten die einzelnen Punkte neu bestimmt werden. Besonders an der Plantarapponose war der Messpunkt häufig nicht mehr vorhanden. Aufgrund der standardisierten Markierung der Punkte ist anzunehmen, dass es zu keinen erheblichen Abweichungen gekommen ist. Allerdings kann eine fehlerhafte oder ungenaue Markierung durch die Versuchsleiterin nicht ausgeschlossen werden. Jedoch hat die Methode der Markierung der Messpunkte in den meisten Fällen gut funktioniert. Möglicherweise sollte den Probandinnen jeweils ein Stift für die Markierung der Messzeitpunkte zur Verfügung gestellt werden, denn nicht jede Probandin hatte einen Tattoostift mit entsprechender Haltbarkeit zur Verfügung. Der größte Kritikpunkt an der Messung mit dem Myoton ist jedoch, dass es keinen Anhaltspunkt für die tatsächliche Messung der Steifigkeit gibt. Eine laufende Untersuchung einer Arbeitsgruppe der Bewegungswissenschaften der TU Chemnitz konnte zeigen, dass die Messergebnisse für die Steifigkeit mit dem Myoton nicht mit dem Goldstandard zur Bestimmung der Steifigkeit via Ultraschall korrelieren (Seynnes et al., 2014). Es wird angenommen, dass das Myoton eine Kombination aus Materialeigenschaften und dem Spannungszustand des jeweiligen Gewebes misst. Die Ergebnisse sind aus diesem Grund vom Entspannungszustand des jeweiligen Gewebes, aber auch von der Gelenkwinkelstellung abhängig. In der vorliegenden Untersuchung waren daher insbesondere die Werte für die Patellasehne sehr hoch, da sich diese durch die 90°-Stellung des Knies in einer Vordehnung befand. Der Einfluss der Gelenkwinkelstellung konnte in vorliegender Studie durch die Standardisierung der Messposition der Probandinnen jedoch weitgehend ausgeschlossen werden. Anzumerken ist zudem auch, dass das Myoton in der Lage ist, Phänomene von Gewebeveränderungen abzubilden. Damit ist es mithilfe des Myotons möglich, gesunde Achillessehnen von denen mit Tendinomyopathie zu unterscheiden (Orner et

al., 2018). Welche Faktoren jedoch die Messung mit dem Myoton darüber hinaus beeinflussen können, ist unklar.

10.4 Temperaturmessung

Die Temperaturmessung sollte für die vorliegende Arbeit dazu dienen, den Zeitpunkt des Eisprungs besser eingrenzen zu können. Dabei wurden die Probandinnen dazu angehalten, jeden Tag die Temperatur oral für je drei Minuten zur selben Uhrzeit zu messen. Die Messung sollte zudem immer vor dem Aufstehen erfolgen, um die Werte nicht zu verfälschen. Jedoch konnten große Messschwankungen registriert werden. Wie in den Ergebnissen in Abbildung 22 zu sehen ist, kann mithilfe der Temperaturkurve keine eindeutige Identifizierung des Eisprungs vorgenommen werden. Die Messungen wurden durch Vergessen oder Mängel in der vorgeschriebenen Anwendung verzerrt. Teilweise wurden keine drei Minuten gemessen und die Messzeitpunkte unterlagen teilweise einer Differenz von mehreren Stunden. Zudem ist es für die korrekte Darstellung der Temperaturkurve wichtig, vom Beginn eines Zyklus an zu messen, doch wenn die Probandinnen mitten in einem Zyklus mit der Untersuchung begonnen haben, fehlen teilweise die ersten Zyklustage. Doch für eine richtige Anwendung der Messung der Temperatur kann diese Methode möglicherweise dazu dienen, den Zyklus besser überwachen zu können. Künftige Untersuchungen sollten den Probandinnen möglicherweise einen gewissen Übungszeitraum mit dem Thermometer geben, damit eine Messroutine entwickelt werden kann. Es könnte zudem helfen, den Temperaturverlauf über mehrere Zyklen aufzuzeichnen. Um den Zeitpunkt des Eisprungs besser identifizieren zu können, scheint es sinnvoll zu sein, das Thermometer schon drei bis vier Zyklen im Vorfeld einer solchen Untersuchung an die Probandinnen zu verteilen, da es trotz der aufgefallenen Probleme in der vorliegenden Untersuchung eine kostengünstige und verhältnismäßig schnelle Methode ist, um den Eisprung zu bestimmen. Die Temperaturmessung ist allerdings stark von der Compliance der Probandinnen abhängig. Den bereits genannten Aspekten hinzuzufügen ist, dass bei genauer Ausführung der symptothermalen Methode ebenso eine Schleimbeobachtung des Zervixsekrets während des Zyklus durchgeführt wird, um neben der Messung der Temperatur noch ein zweites Merkmal analysieren zu können. Durch die Beobachtung des Zervixschleims in Verbindung mit dem Messen der Temperatur kann der Eisprung mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit verifiziert werden. Ein bis zwei Tage vor der Ovulation, zeitgleich mit dem Östrogenpeak, ist der Zervixschleim am spinnbarsten. „Spinnbarkeit ist dabei die Fähigkeit einer flüssigen Substanz, sich in Fäden auseinanderziehen zu lassen“ (Raith-Paula et al., 2013b, p. 37). Die Kombination aus Temperaturmessung und der Überwachung des Zervixsekretes erfordert allerdings von den Probandinnen eine sehr

Methodenkritik

hohe Compliance. Für die Anwendung in künftigen Untersuchungen ist in diesem Zusammenhang außerdem die Zumutbarkeit dieser Methodik für die Probandinnen zu hinterfragen.

11 Limitationen

Es ist anzumerken, dass für die Untersuchung alle in Frage kommenden Ressourcen der TU Chemnitz auf ihren Nutzen überprüft wurden. Die Limitationen sind aus diesem Grund entweder auf fehlende Ressourcen oder unbeeinflussbare Umweltfaktoren zurückzuführen. Demnach konnten nicht alle Variablen überprüft werden, welche eine Veränderung der Steifigkeit der Gewebe bedingen könnten. Beispielsweise konnten keine Messungen zum Flüssigkeitshaushalt oder zum Ernährungszustand der Probandinnen vorgenommen werden. Entsprechende Variablen fallen während des Menstruationszyklus individuell unterschiedlich aus (Shultz et al., 2010). Inwiefern Wasserhaushalt oder Nahrungsaufnahme eine Veränderung der Eigenschaften des faserigen Bindegewebes bedingen könnten, wurde in der vorliegenden Untersuchung nicht betrachtet, könnte aber für künftige Forschungsarbeiten relevant sein. Um den Zeitpunkt der Ovulation einzugrenzen, haben die Probandinnen ihre Basaltemperatur gemessen, Nutzen und Funktion für diese Untersuchung wurden bereits im vorherigen Kapitel kritisch betrachtet. Die Temperaturmessung kann aber darüber hinaus nicht sicherstellen, dass im Untersuchungszeitraum bei jeder Probandin tatsächlich ein Eisprung stattgefunden hat. Andere Untersuchungen zu dieser Thematik verwendeten Ovulationskits, um den Zeitpunkt des Eisprungs sicher eingrenzen zu können (Hertel et al., 2006). Zudem wurde in anderen Studien der Hormonstatus mit Bluttests und Urinproben überprüft (Hansen et al., 2009a).

12 Fazit und Ausblick

Die vorliegende Studie unternimmt den Versuch, den Einfluss von weiblichen Geschlechtshormonen auf faserige Bindegewebe, insbesondere Sehnen, zu ergründen. Erstmals wurden an einem Probandenkollektiv mehrere Gewebe im Verlauf eines Menstruationszyklus gemessen. Die zusätzliche Unterscheidung in eine Versuchs- und Kontrollgruppe sollte darüber hinaus die Auswirkung eines natürlichen Zyklus im Vergleich zu einem Zyklus, welcher durch die Einnahme der Pille gesteuert ist, aufzeigen. Es konnten keine signifikanten Unterschiede im Verlauf des Zyklus bei der Betrachtung der einzelnen Zyklusphasen innerhalb der beiden Gruppen gezeigt werden. Auch die Betrachtung von Versuchs- und Kontrollgruppe brachten bei keinem der untersuchten Gewebe signifikante Unterschiede. Allerdings zeigen die Mittelwerte der beiden Gruppen über die vier Gewebe, dass es eine Tendenz für erhöhte Steifigkeiten gibt, wenn die Pille eingenommen wird. Künftige Studien sollten diesen Aspekt näher betrachten. Zum Einfluss eines geringeren Verletzungsrisikos durch die Einnahme von oralen Kontrazeptiva kann keine klare Aussage getroffen werden. Ebenso sollten auch Untersuchungen an anderen Geweben vorgenommen werden. Den Ergebnissen dieser Untersuchung kann entnommen werden, dass es für die Messung mit dem Myoton nicht nötig zu sein scheint, auf den Zeitpunkt des Zyklus bei weiblichen Probandinnen zu achten. Inwiefern andere Messgeräte die Steifigkeit von faserigen Bindegeweben sensibler bestimmen können, sollte jedoch bedacht werden. Außerdem ist anzunehmen, dass das Myoton eine Kombination der Materialeigenschaften und dem Spannungszustand misst. Für die genaue Ermittlung der Steifigkeit sollte in künftigen Forschungsarbeiten Ultraschall verwendet werden.

Die Einnahme der Pille scheint das Potenzial zu besitzen, auf die Eigenschaften von faserigen Bindegeweben einzuwirken. Dementsprechend scheint es sinnvoll zu sein, eine differenzierte Betrachtung von Probandinnen mit natürlichem Zyklus und solchen, die die Pille nehmen, vorzunehmen. Inwiefern eine höhere Steifigkeit durch die Einnahme von oralen Kontrazeptiva Verletzungen vorbeugen kann, bleibt unklar. Ein weiteres Ziel sollte es demnach sein, in künftigen Forschungen das Verletzungsrisiko von faserigen Bindegeweben von Frauen näher zu untersuchen und Frauen dabei zu helfen, eine Verletzungsprävention betreiben zu können. Die Auswirkungen von oralen Verhütungsmitteln auf die mechanischen Eigenschaften faseriger Bindegewebe sollte weiterhin Bestandteil künftiger Forschungsarbeiten sein. In künftigen Untersuchungen obliegt es dem Forscher abzuwägen, inwiefern es sinnvoll ist, die Menstruationszyklusphase der Probandinnen standardisiert zu testen, um mögliche Effekte durch die Wirkung von oralen Verhütungsmitteln oder den Zeitpunkt des Zyklus zu eliminieren. Die Einschätzung aktueller Fachliteratur im Hinblick auf die Auswirkung oraler Kontrazeptiva wird durch die unterschiedliche Zusammensetzung der Hormonpräparate erschwert. Studien, welche spezifisch die Wirkung dieser Präparate untersuchen

Fazit und Ausblick

wollen, sollten mit entsprechenden Kontrollgruppen arbeiten. Ziel sollte es sein, eine bessere wissenschaftliche Basis über die Wechselwirkung von Hormonen bei trainierenden Frauen zu erlangen (Lebrun, 1994). Die vorliegende Untersuchung konnte nur minimale Tendenzen zeigen, inwiefern diese für den Breitensport relevant sind und das Verletzungsrisiko von Frauen beeinflussen ist fraglich. Ein wichtiger Aspekt ist zudem die Erkenntnis, dass insbesondere Sehnen auf körperliche Belastung mit einer Trainingsanpassung hinsichtlich Durchblutung, Metabolismus sowie Kollagen-Syntheserate reagieren. Diese Adaptationen erhöhen die Resistenz gegenüber Überlastung sowie daraus resultierenden Verletzungen (Kjaer, 2004). Dementsprechend scheint körperliche Aktivität die mechanischen Eigenschaften von faserigen Bindegeweben, insbesondere Sehnen, positiv zu beeinflussen. Daraus resultierend ist anzunehmen, dass es Frauen helfen könnte, ein geeignetes Training zu absolvieren, um sich vor Verletzungen des Sehnen- und Bandapparates zu schützen. Der Einflussfaktor der körperlichen Aktivität besitzt ein größeres Potenzial, Verletzungen präventiv entgegenwirken zu können, als es eine Einnahme der Pille und die minimalen Hormonschwankungen im Verlauf des weiblichen Zyklus zu haben scheinen.

13 Literaturverzeichnis

- Ackermann, P.W., Salo, P., Hart, D.A., 2016. Tendon Innervation, in: Ackermann, P.W., Hart, D.A. (Eds.), *Metabolic Influences on Risk for Tendon Disorders*, *Advances in Experimental Medicine and Biology*. Springer International Publishing, Cham, pp. 35–51.
- Amiel, D., Frank, C., Harwood, F., Fronck, J., Akeson, W., 1983. Tendons and ligaments: A morphological and biochemical comparison. *Journal of Orthopaedic Research* 1, 257–265.
- Benjamin, M., 2009. The fascia of the limbs and back – a review. *Journal of Anatomy* 214, 1–18.
- Bennell, K., White, S., Crossley, K., 1999. The oral contraceptive pill: a revolution for sports-women? *British Journal of Sports Medicine* 33, 231–238.
- Berg, F. van den, Cabri, J.M., 1999. *Angewandte Physiologie, Bd.1, Das Bindegewebe des Bewegungsapparates verstehen und beeinflussen*. Thieme.
- Bizzini, M., Mannion, A.F., 2003. Reliability of a new, hand-held device for assessing skeletal muscle stiffness. *Clinical Biomechanics* 18, 459–461.
- Bray, R.C., Salo, P.T., Lo, I.K., Ackermann, P., Rattner, J.B., Hart, D.A., 2005. Normal Ligament Structure, Physiology and Function. *Sports Medicine and Arthroscopy Review* 13, 127.
- Bridgeman, J.T., Zhang, Y., Donahue, H., Wade, A.M., Juliano, P.J., 2010. Estrogen Receptor Expression in Posterior Tibial Tendon Dysfunction: A Pilot Study. *Foot Ankle Int.* 31, 1081–1084.
- Bryant, A.L., Clark, R.A., Bartold, S., Murphy, A., Bennell, K.L., Hohmann, E., Marshall-Gradisnik, S., Payne, C., Crossley, K.M., 2008. Effects of estrogen on the mechanical behavior of the human Achilles tendon in vivo. *Journal of Applied Physiology* 105, 1035–1043.
- Burgess, K.E., Pearson, S.J., Onambélé, G.L., 2010. Patellar Tendon Properties With Fluctuating Menstrual Cycle Hormones. *The Journal of Strength & Conditioning Research* 24, 2088.
- Burgess, K.E., Pearson, S.J., Onambélé, G.L., 2009. Menstrual cycle variations in oestradiol and progesterone have no impact on in vivo medial gastrocnemius tendon mechanical properties. *Clinical Biomechanics* 24, 504–509.

Literaturverzeichnis

- Constantini, N.W., Dubnov, G., Lebrun, C.M., 2005. The Menstrual Cycle and Sport Performance. *Clinics in Sports Medicine* 24, e51–e82.
- Contri, M.B., Guerra, D., Vignali, N., Taparelli, F., Marcuzzi, A., Caroli, A., Ronchetti, I.P., 1994. Ultrastructural and immunocytochemical study on normal human palmar aponeuroses. *The Anatomical Record* 240, 314–321.
- Davis, M.E., Fugo, N.W., 1948. THE CAUSE OF PHYSIOLOGIC BASAL TEMPERATURE CHANGES IN WOMEN. *J Clin Endocrinol* 8, 550–563.
- Davis, W.L., Singerman, R., Labropoulos, P.A., Victoroff, B., 1999. Effect of Ankle and Knee Position on Tension in the Achilles Tendon. *Foot Ankle Int.* 20, 126–131.
- Dehghan, F., Muniandy, S., Yusof, A., Salleh, N., 2014. Sex-Steroid Regulation of Relaxin Receptor Isoforms (RXFP1 & RXFP2) Expression in the Patellar Tendon and Lateral Collateral Ligament of Female WKY Rats. *Int J Med Sci* 11, 180–191.
- Deie, M., Sakamaki, Y., Sumen, Y., Urabe, Y., Ikuta, Y., 2002. Anterior knee laxity in young women varies with their menstrual cycle. *Int Orthop* 26, 154–156.
- Dickerson, L.M., Mazyck, P.J., Hunter, M.H., 2003. Premenstrual syndrome. *Am Fam Physician* 67, 1743–1752.
- Diedrich, K., 2006. *Gynäkologie und Geburtshilfe*. Springer-Verlag.
- Doral, M.N., Alam, M., Bozkurt, M., Turhan, E., Atay, O.A., Dönmez, G., Maffulli, N., 2010. Functional anatomy of the Achilles tendon. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 18, 638–643.
- Drenth, H., Zuidema, S.U., Krijnen, W.P., Bautmans, I., Schans, C. van der, Hobbelen, H., 2018. Psychometric Properties of the MyotonPRO in Dementia Patients with Paratonia. *GER* 64, 401–412.
- Eiling, E., Bryant, A.L., Petersen, W., Murphy, A., Hohmann, E., 2006. Effects of menstrual-cycle hormone fluctuations on musculotendinous stiffness and knee joint laxity. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 15, 126–132.
- Einspanier, A., Ivell, R., 2000. Multitalent Relaxin: Wegbereiter reproduktionsbiologischer Prozesse. *Reproduktionsmedizin* 16, 208–215.
- Evans, W.H., Martin, P.E.M., 2002. Gap junctions: structure and function (Review). *Molecular Membrane Biology* 19, 121–136.

- Faryniarz, D.A., Bhargava, M., Lajam, C., Attia, E.T., Hannafin, J.A., 2006. Quantitation of estrogen receptors and relaxin binding in human anterior cruciate ligament fibroblasts. *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Animal* 42, 176–181.
- Fede, C., Albertin, G., Petrelli, L., Sfriso, M.M., Biz, C., De Caro, R., Stecco, C., 2016. Hormone Receptor Expression in Human Fascial Tissue. *Eur J Histochem* 60.
- Fehring, R.J., Schneider, M., Raviele, K., 2006. Variability in the Phases of the Menstrual Cycle. *Journal of Obstetric, Gynecologic, & Neonatal Nursing* 35, 376–384.
- Feng, Y.N., Li, Y.P., Liu, C.L., Zhang, Z.J., 2018. Assessing the elastic properties of skeletal muscle and tendon using shearwave ultrasound elastography and MyotonPRO. *Scientific Reports* 8, 17064.
- Fillenberg, S., 2017. Der menstruelle Zyklus, in: *Basiswissen Gynäkologie und Geburtshilfe*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 133–138.
- Frank, C.B., 2004. Ligament structure, physiology and function. *Journal of Neuron Interact* 4, 3.
- Frank-Herrmann, P., Gnoth, G., Baur, S., Schmoll, A., Godehardt, E., Strowitzki, T., Freundl, G., n.d. Zyklusverhalten nach Absetzen von oralen Kontrazeptiva. 2006 3, 54–57.
- Freundl, C., Suberg, D., Flynn, A.M., Diemer, H.P., 1984. Natürliche Familienplanung (symptothermale Methode) und objektive Ovulationsparameter - eine Pilotstudie. *Geburts-hilfe Frauenheilkd* 44, 368–374.
- Freundl, G., 2003. Natürliche Familienplanung und „nichthormonale Kontrazeption“. *Gynäkologie* 36, 1099–1112.
- Fridén, C., Saartok, T., Bäckström, C., Leanderson, J., Renström, P., 2003. The influence of premenstrual symptoms on postural balance and kinesthesia during the menstrual cycle. *Gynecological Endocrinology* 17, 433–440.
- Fryhofer, G.W., Freedman, B.R., Hillin, C.D., Salka, N.S., Pardes, A.M., Weiss, S.N., Farber, D.C., Soslowsky, L.J., 2016. Postinjury biomechanics of Achilles tendon vary by sex and hormone status. *Journal of Applied Physiology* 121, 1106–1114.
- Goeckenjan, M., Merkle, E., Rabe, T., 2013. Kontrazeption bei Mädchen und Jugendlichen. *Gynäkologische Endokrinologie* 11, 25–31.
- Goodenough, D.A., Paul, D.L., 2009. Gap Junctions. *Cold Spring Harb Perspect Biol* 1, a002576.

- Häfelinger, U., Schuba, V., 2013. Koordinationstherapie: propriozeptives Training. Meyer & Meyer Verlag.
- Hagerty, P., Lee, A., Calve, S., Lee, C.A., Vidal, M., Baar, K., 2012. The effect of growth factors on both collagen synthesis and tensile strength of engineered human ligaments. *Biomaterials* 33, 6355–6361.
- Hansen, M., Coupe, C., Hansen, C.S.E., Skovgaard, D., Kovanen, V., Larsen, J.O., Aagaard, P., Magnusson, S.P., Kjaer, M., 2013a. Impact of oral contraceptive use and menstrual phases on patellar tendon morphology, biochemical composition, and biomechanical properties in female athletes. *Journal of Applied Physiology* 114, 998–1008.
- Hansen, M., Coupe, C., Hansen, C.S.E., Skovgaard, D., Kovanen, V., Larsen, J.O., Aagaard, P., Magnusson, S.P., Kjaer, M., 2013b. Impact of oral contraceptive use and menstrual phases on patellar tendon morphology, biochemical composition, and biomechanical properties in female athletes. *Journal of Applied Physiology* 114, 998–1008.
- Hansen, M., Kjaer, M., 2014. Influence of Sex and Estrogen on Musculotendinous Protein Turnover at Rest and After Exercise. *Exercise and Sport Sciences Reviews* 42, 183.
- Hansen, M., Koskinen, S.O., Petersen, S.G., Doessing, S., Frystyk, J., Flyvbjerg, A., Westh, E., Magnusson, S.P., Kjaer, M., Langberg, H., 2008. Ethinyl oestradiol administration in women suppresses synthesis of collagen in tendon in response to exercise. *The Journal of Physiology* 586, 3005–3016.
- Hansen, M., Miller, B.F., Holm, L., Doessing, S., Petersen, S.G., Skovgaard, D., Frystyk, J., Flyvbjerg, A., Koskinen, S., Pingel, J., Kjaer, M., Langberg, H., 2009a. Effect of administration of oral contraceptives in vivo on collagen synthesis in tendon and muscle connective tissue in young women. *Journal of Applied Physiology* 106, 1435–1443.
- Hansen, M., Miller, B.F., Holm, L., Doessing, S., Petersen, S.G., Skovgaard, D., Frystyk, J., Flyvbjerg, A., Koskinen, S., Pingel, J., Kjaer, M., Langberg, H., 2009b. Effect of administration of oral contraceptives in vivo on collagen synthesis in tendon and muscle connective tissue in young women. *Journal of Applied Physiology* 106, 1435–1443.
- Haus, J., Halata, Z., Refior, H.J., 1992. Propriozeption im vorderen Kreuzband des menschlichen Kniegelenkes - morphologische Grundlagen. *Z Orthop Ihre Grenzgeb* 130, 484–494.

Literaturverzeichnis

- Hawkins, S.M., Matzuk, M.M., 2008. The Menstrual Cycle. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1135, 10–18.
- Heinemeier, K.M., Kjaer, M., 2011. In vivo investigation of tendon responses to mechanical loading. *Journal of Neuron Interact* 11, 115–123.
- Heitz, N.A., Eisenman, P.A., Beck, C.L., Walker, J.A., 1999. Hormonal Changes Throughout the Menstrual Cycle and Increased Anterior Cruciate Ligament Laxity in Females. *J Athl Train* 34, 144–149.
- Hertel, J., Williams, N.I., Olmsted-Kramer, L.C., Leidy, H.J., Putukian, M., 2006. Neuromuscular performance and knee laxity do not change across the menstrual cycle in female athletes. *Knee Surg Sports Traumatol Arthr* 14, 817–822.
- Herzberg, S.D., Motu'apuaka, M.L., Lambert, W., Fu, R., Brady, J., Guise, J.-M., 2017. The Effect of Menstrual Cycle and Contraceptives on ACL Injuries and Laxity: A Systematic Review and Meta-analysis. *Orthop J Sports Med* 5.
- Heßling, A., Bundeszentrale für Gesundheitliche Aufklärung (Eds.), 2011. *Verhütungsverhalten Erwachsener 2011: aktuelle repräsentative Studie im Rahmen einer telefonischen Mehrthemenbefragung*, 1. Aufl. ed, Repräsentativbefragungen Forschung und Praxis der Sexualaufklärung und Familienplanung. BZgA, Köln.
- Hewett, T.E., 2000. Neuromuscular and Hormonal Factors Associated With Knee Injuries in Female Athletes. *Sports Med* 29, 313–327.
- Hewett, T.E., Myer, G.D., Ford, K.R., Heidt, R.S., Colosimo, A.J., McLean, S.G., van den Bogert, A.J., Paterno, M.V., Succop, P., 2005. Biomechanical Measures of Neuromuscular Control and Valgus Loading of the Knee Predict Anterior Cruciate Ligament Injury Risk in Female Athletes: A Prospective Study. *Am J Sports Med* 33, 492–501.
- Hewett, T.E., Zazulak, B.T., Myer, G.D., 2007a. Effects of the Menstrual Cycle on Anterior Cruciate Ligament Injury Risk: A Systematic Review. *Am J Sports Med* 35, 659–668.
- Hewett, T.E., Zazulak, B.T., Myer, G.D., 2007b. Effects of the Menstrual Cycle on Anterior Cruciate Ligament Injury Risk: A Systematic Review. *Am J Sports Med* 35, 659–668.
- Hicks, J.H., 1954. The mechanics of the foot. *J Anat* 88, 25-30.1.
- Hsu, S.Y., Nakabayashi, K., Nishi, S., Kumagai, J., Kudo, M., Sherwood, O.D., Hsueh, A.J.W., 2002. Activation of Orphan Receptors by the Hormone Relaxin. *Science* 295, 671–674.

- Hug, F., Lacourpaille, L., Maïsetti, O., Nordez, A., 2013. Slack length of gastrocnemius medialis and Achilles tendon occurs at different ankle angles. *Journal of Biomechanics* 46, 2534–2538.
- Illert, M., Kutz-Buschbeck, J.P., 2006. *Neuro- und Sinnesphysiologie*. Springer Berlin Heidelberg.
- Ireland, M.L., 2002. The female ACL: why is it more prone to injury? *Orthopedic Clinics* 33, 637–651.
- Jirikowski, G.F., 2016. Faszien und Aponeurosen des Bewegungsapparats. *Manuelle Medizin* 54, 10–13.
- Kane, D., Greaney, T., Shanahan, M., Duffy, G., Bresnihan, B., Gibney, R., FitzGerald, O., 2001. The role of ultrasonography in the diagnosis and management of idiopathic plantar fasciitis. *Rheumatology (Oxford)* 40, 1002–1008.
- Karageanes, S.J., Blackburn, K., Vangelos, Z.A., 2000. The Association of the Menstrual Cycle with the Laxity of the Anterior Cruciate Ligament in Adolescent Female Athletes. *Clinical Journal of Sport Medicine* 10, 162.
- Kerscher, M., 2009. Hormonelle Kontrazeption. *Gynäkologische Endokrinologie* 7, 17–24.
- Khan, K.M., Maffulli, N., 1998. Tendinopathy: An Achilles' Heel for Athletes and Clinicians. *Clinical Journal of Sport Medicine* 8, 151.
- Kjaer, M., 2004. Anpassung der Sehnen an körperliche Belastung. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* 55.
- Kjaer, M., Bachl, N., Lorenz, C., Nehrer, S., Halbwirth, F., 2018. Mechanische Belastung und Bindegewebe, in: Bachl, N., Löllgen, H., Tschann, H., Wackerhage, H., Wessner, B. (Eds.), *Molekulare Sport- und Leistungsphysiologie: Molekulare, zellbiologische und genetische Aspekte der körperlichen Leistungsfähigkeit*. Springer Vienna, Vienna, pp. 139–169.
- Klein, D., Laube, W., Schomacher, J., Voelker, B., 2011. *Biomechanik, Bewegungslehre, Leistungsphysiologie, Trainingslehre*. Georg Thieme Verlag.
- Ko, C.-Y., Choi, H.-J., Ryu, J., Kim, G., 2018. Between-day reliability of MyotonPRO for the non-invasive measurement of muscle material properties in the lower extremities of patients with a chronic spinal cord injury. *Journal of Biomechanics* 73, 60–65.
- Kobori, M., Yamamuro, T., 1989. Effects of gonadectomy and estrogen administration on rat skeletal muscle. *Clin Orthop Relat Res* 306–311.

- Langberg, H., Rosendal, L., Kjær, M., 2001. Training-induced changes in peritendinous type I collagen turnover determined by microdialysis in humans. *The Journal of Physiology* 534, 297–302.
- Leblanc, D.R., Schneider, M., Angele, P., Vollmer, G., Docheva, D., 2017. The effect of estrogen on tendon and ligament metabolism and function. *The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology*, Special issue from CSR2015 conference 172, 106–116.
- Lebrun, C.M., 1994. The effect of the phase of the menstrual cycle and the birth control pill on athletic performance. *Clin Sports Med* 13, 419–441.
- Lebrun, C.M., 1993. Effect of the Different Phases of the Menstrual Cycle and Oral Contraceptives on Athletic Performance. *Sports Medicine* 16, 400–430.
- Lee, C.A., Lee-Barthel, A., Marquino, L., Sandoval, N., Marcotte, G.R., Baar, K., 2015a. Estrogen inhibits lysyl oxidase and decreases mechanical function in engineered ligaments. *Journal of Applied Physiology* 118, 1250–1257.
- Lee, C.A., Lee-Barthel, A., Marquino, L., Sandoval, N., Marcotte, G.R., Baar, K., 2015b. Estrogen inhibits lysyl oxidase and decreases mechanical function in engineered ligaments. *Journal of Applied Physiology* 118, 1250–1257.
- Lee, H., Petrofsky, J., 2018. Differences Between Men and Women in Balance and Tremor in Relation to Plantar Fascia Laxity During the Menstrual Cycle. *Journal of Athletic Training* 53, 255–261.
- Lee, H., Petrofsky, J.S., Daher, N., Berk, L., Laymon, M., 2014. Differences in anterior cruciate ligament elasticity and force for knee flexion in women: oral contraceptive users versus non-oral contraceptive users. *Eur J Appl Physiol* 114, 285–294.
- Li, Z., Yang, G., Khan, M., Stone, D., Woo, S.L.-Y., Wang, J.H.-C., 2004. Inflammatory Response of Human Tendon Fibroblasts to Cyclic Mechanical Stretching. *Am J Sports Med* 32, 435–440.
- Liu, C.L., Li, Y.P., Wang, X.Q., Zhang, Z.J., 2018. Quantifying the Stiffness of Achilles Tendon: Intra- and Inter-Operator Reliability and the Effect of Ankle Joint Motion. *Med Sci Monit* 24, 4876–4881.
- Liu, S.H., Al-Shaikh, R., Panossian, V., Yang, R.-S., Nelson, S.D., Soleiman, N., Finerman, G.A.M., Lane, J.M., 1996. Primary immunolocalization of estrogen and progesterone target cells in the human anterior cruciate ligament. *Journal of Orthopaedic Research* 14, 526–533.

- Liu, S.H., Al-Shaikh, R.A., Panossian, V., Finerman, G.A.M., Lane, J.M., 1997. Estrogen Affects the Cellular Metabolism of the Anterior Cruciate Ligament: A Potential Explanation for Female Athletic Injury. *The American Journal of Sports Medicine* 25, 704–709.
- Magnusson, S.P., Heinemeier, K.M., Kjaer, M., 2016. Collagen Homeostasis and Metabolism, in: *Metabolic Influences on Risk for Tendon Disorders, Advances in Experimental Medicine and Biology*. Springer, Cham, pp. 11–25.
- Marieb, E.N., Hoehn, K., 2010. *Human anatomy & physiology*, 8th ed. ed. Pearson Cummings, San Francisco.
- Martin, R.B., Burr, D.B., Sharkey, N.A., Fyhrie, D.P., 2015. Mechanical Properties of Ligament and Tendon, in: *Skeletal Tissue Mechanics*. Springer, New York, NY, pp. 175–225.
- Martius, G., Husslein, P., Martius, H. (Eds.), 1988. *Lehrbuch der Geburtshilfe: einschließlich der geburtshilflichen Operationen ; für die Ausbildung des Studenten ; für die Weiterbildung des Arztes ; mit Lernzielangaben und 421 Prüfungsfragen*, 12., neubearb. Aufl. ed. Thieme, Stuttgart.
- McDougall, J.J., Bray, R.C., Sharkey, K.A., 1997. Morphological and immunohistochemical examination of nerves in normal and injured collateral ligaments of rat, rabbit, and human knee joints. *The Anatomical Record* 248, 29–39.
- Mendeş, M., Akkartal, E., 2009. ANOVA F ve Welch Testi ile Bunların Permutasyon Versiyonlarının 1. Tip Hata ve Testin Gücü Bakımından Karşılaştırılması. *Kafkas Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*.
- Miller, B.F., Hansen, M., Olesen, J.L., Flyvbjerg, A., Schwarz, P., Babraj, J.A., Smith, K., Rennie, M.J., Kjaer, M., 2006. No effect of menstrual cycle on myofibrillar and connective tissue protein synthesis in contracting skeletal muscle. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism* 290, E163–E168.
- Möller-Nielsen, J., Hammar, M., 1989. Women's soccer injuries in relation to the menstrual cycle and oral contraceptive use. *Med Sci Sports Exerc* 21, 126–129.
- Mooney, K., Warner, M., Stokes, M., 2013. Symmetry and within-session reliability of mechanical properties of biceps brachii muscles in healthy young adult males using the MyotonPRO device 1, 1–11.
- Morrison, S.M., Dick, T.J.M., Wakeling, J.M., 2015. Structural and mechanical properties of the human Achilles tendon: Sex and strength effects. *Journal of Biomechanics* 48, 3530–3533.

- Müller, K.H., Knopp, W., 1984. Die Rupturen der Sehnen am Streckapparat des Kniegelenkes. *Unfallchirurgie* 10, 254–261.
- O'Brien, M., 2005. The Anatomy of the Achilles Tendon. *Foot and Ankle Clinics* 10, 225–238. <https://doi.org/10.1016/j.fcl.2005.01.011>
- Orishimo, K.F., Burstein, G., Mullaney, M.J., Kremenic, I.J., Nesse, M., McHugh, M.P., Lee, S.J., 2008. Effect of Knee Flexion Angle on Achilles Tendon Force and Ankle Joint Plantarflexion Moment During Passive Dorsiflexion. *The Journal of Foot and Ankle Surgery* 47, 34–39.
- Orner, S., Kratzer, W., Schmidberger, J., Grüner, B., 2018. Quantitative tissue parameters of Achilles tendon and plantar fascia in healthy subjects using a handheld myotonometer. *Journal of Bodywork and Movement Therapies* 22, 105–111.
- Pardes, A.M., Freedman, B.R., Fryhofer, G.W., Salka, N.S., Bhatt, P.R., Soslowsky, L.J., 2016. Males have Inferior Achilles Tendon Material Properties Compared to Females in a Rodent Model. *Ann Biomed Eng* 44, 2901–2910.
- Park, S.-K., Stefanyshyn, D., Loitz-Ramage, B., Hart, D., Ronsky, J., 2009a. Changing Hormone Levels During the Menstrual Cycle Affect Knee Laxity and Stiffness in Healthy Female Subjects. *American Journal of Sports Medicine* 37, 588–598.
- Park, S.-K., Stefanyshyn, D.J., Loitz-Ramage, B., Hart, D.A., Ronsky, J.L., 2009b. Changing Hormone Levels during the Menstrual Cycle Affect Knee Laxity and Stiffness in Healthy Female Subjects. *Am J Sports Med* 37, 588–598.
- Pearson, S.J., Burgess, K.E., Onambélé, G.L., 2011. Serum relaxin levels affect the in vivo properties of some but not all tendons in normally menstruating young women. *Experimental Physiology* 96, 681–688.
- Peipsi, A., Kerpe, R., Jäger, H., Soeder, S., Gordon, C., Schleip, R., 2012. Myoton Pro: A Novel Tool for the Assessment of Mechanical Properties of Fascial Tissues. *Journal of Bodywork and Movement Therapies* 16, 527.
- Petersen, W., Tillmann, B., 2002. Anatomie und Funktion des vorderen Kreuzbandes. *Orthopädie* 31, 710–718.
- Petersen, W., Zantop, T., 2009. Das vordere Kreuzband: Grundlagen und aktuelle Praxis der operativen Therapie ; mit 29 Tabellen. Deutscher Ärzteverlag.
- Petersen, Zantop, Rosenbaum, Raschke, 2005. Rupturen des vorderen Kreuzbandes bei weiblichen Athleten. 2005 56, 157–164.

- Petrie, S., Collins, J.G., Solomonow, M., Wink, C., Chuinard, R., D'Ambrosia, R., 1998. Mechanoreceptors in the human elbow ligaments. *The Journal of Hand Surgery* 23, 512–518.
- Petrofsky, J., Lee, H., 2015. Greater Reduction of Balance as a Result of Increased Plantar Fascia Elasticity at Ovulation during the Menstrual Cycle. *Tohoku J. Exp. Med.* 237, 219–226.
- Pollard, C.D., Braun, B., Hamill, J., 2006. Influence of gender, estrogen and exercise on anterior knee laxity. *Clinical Biomechanics* 21, 1060–1066.
- Pożarowszczyk, B., Pawlaczyk, W., Smoter, M., Zarzycki, A., Mroczek, D., Kumorek, M., Witkowski, K., Adam, K., 2017. Effects of Karate Fights on Achilles Tendon Stiffness Measured by Myotonometry. *Journal of Human Kinetics* 56, 93–97.
- Pruyn, E.C., Watsford, M.L., Murphy, A.J., 2016. Validity and reliability of three methods of stiffness assessment. *Journal of Sport and Health Science* 5, 476–483.
- Rabe, T., Runnebaum, B., 2013. Kontrazeption: Methoden, Indikation, Kontraindikation. Springer-Verlag.
- Raith-Paula, E., Frank-Herrmann, P., Freundl, G., Strowitzki, T., 2013a. Zyklusformen im Leben einer Frau, in: *Natürliche Familienplanung heute*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 133–142.
- Raith-Paula, E., Frank-Herrmann, P., Freundl, G., Strowitzki, T., 2013b. Physiologische Grundlagen der Natürlichen Familienplanung, in: *Natürliche Familienplanung heute*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 17–29.
- Razali, N.M., Wah, Y.B., n.d. Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests 14.
- Reed, B.G., Carr, B.R., 2000. The Normal Menstrual Cycle and the Control of Ovulation, in: De Groot, L.J., Chrousos, G., Dungan, K., Feingold, K.R., Grossman, A., Hershman, J.M., Koch, C., Korbonits, M., McLachlan, R., New, M., Purnell, J., Rebar, R., Singer, F., Vinik, A. (Eds.), *Endotext*. MDTText.com, Inc., South Dartmouth (MA).
- Romani, W., Patrie, J., Curl, L.A., Flaws, J.A., 2003. The Correlations between Estradiol, Estrone, Estriol, Progesterone, and Sex Hormone-Binding Globulin and Anterior Cruciate Ligament Stiffness in Healthy, Active Females. *Journal of Women's Health* 12, 287–298.
- Rosso, Gösele, Weisskopf, Valderrabano, 2010. *Die Biomechanik der Achillessehne* 1, 20–23.

- Ruedl, G., Ploner, P., Linortner, I., Schranz, A., Fink, C., Sommersacher, R., Pocecco, E., Nachbauer, W., Burtscher, M., 2009. Are oral contraceptive use and menstrual cycle phase related to anterior cruciate ligament injury risk in female recreational skiers? *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 17, 1065–1069.
- Sarwar, R., Niclos, B.B., Rutherford, O.M., 1996. Changes in muscle strength, relaxation rate and fatiguability during the human menstrual cycle. *The Journal of Physiology* 493, 267–272.
- Schauberger, C.W., Rooney, B.L., Goldsmith, L., Shenton, D., Silva, P.D., Schaper, A., 1996. Peripheral joint laxity increases in pregnancy but does not correlate with serum relaxin levels. *American Journal of Obstetrics and Gynecology* 174, 667–671.
- Schleip, R., Baker, A., 2015. *Faszien in Sport und Alltag*. Riva Verlag.
- Schneider, S., Peipsi, A., Stokes, M., Knicker, A., Abeln, V., 2015. Feasibility of monitoring muscle health in microgravity environments using Myoton technology. *Med Biol Eng Comput* 53, 57–66.
- Schoenrock, B., Zander, V., Dern, S., Limper, U., Mulder, E., Verakšič, A., Viir, R., Kramer, A., Stokes, M.J., Salanova, M., Peipsi, A., Blottner, D., 2018. Bed Rest, Exercise Countermeasure and Reconditioning Effects on the Human Resting Muscle Tone System. *Front. Physiol.* 9.
- Schünke, M., 2014. *Topografie und Funktion des Bewegungssystems: Funktionelle Anatomie*. Georg Thieme Verlag.
- Schwegler, J.S., Lucius, R., 2016. *Der Mensch - Anatomie und Physiologie*, 6., überarbeitete Auflage. ed. Georg Thieme Verlag, Stuttgart New York.
- Sciore, P., Frank, C.B., Hart, D.A., 1998. Identification of sex hormone receptors in human and rabbit ligaments of the knee by reverse transcription-polymerase chain reaction: Evidence that receptors are present in tissue from both male and female subjects. *Journal of Orthopaedic Research* 16, 604–610.
- Seneviratne, A., Attia, E., Williams, R.J., Rodeo, S.A., Hannafin, J.A., 2004. The Effect of Estrogen on Ovine Anterior Cruciate Ligament Fibroblasts: Cell Proliferation and Collagen Synthesis. *Am J Sports Med* 32, 1613–1618.
- Seynnes, O.R., Bojsen-Møller, J., Albracht, K., Arndt, A., Cronin, N.J., Finni, T., Magnusson, S.P., 2014. Ultrasound-based testing of tendon mechanical properties: a critical evaluation. *Journal of Applied Physiology* 118, 133–141.

- Shaw, H.M., Vázquez, O.T., McGonagle, D., Bydder, G., Santer, R.M., Benjamin, M., 2008. Development of the human Achilles tendon enthesis organ. *Journal of Anatomy* 213, 718–724.
- Shultz, S.J., Levine, B.J., Nguyen, A.-D., Kim, H., Montgomery, M.M., Perrin, D.H., 2010. A comparison of cyclic variations in anterior knee laxity, genu recurvatum, and general joint laxity across the menstrual cycle. *Journal of Orthopaedic Research* 28, 1411–1417.
- Shultz, S.J., Wideman, L., Montgomery, M.M., Beasley, K.N., Nindl, B.C., 2012. Changes in serum collagen markers, IGF-I, and Knee joint laxity across the menstrual cycle. *Journal of Orthopaedic Research* 30, 1405–1412.
- Silvers, H.J., Mandelbaum, B.R., 2007. ACL Injury in the Female Athlete. *British Journal of Sports Medicine*.
- Stauber, M., Weyerstahl, T., Beham, A. (Eds.), 2007. *Gynäkologie und Geburtshilfe: 213 Tabellen ; [mit Video-CD-ROM: Filme zu Spontangeburt und Sectio], 3., aktualisierte Aufl. mit Video-CD-ROM. ed, Duale Reihe. Thieme, Stuttgart.*
- Suominen, H., Kiiskinen, A., Heikkinen, E., 1980. Effects of physical training on metabolism of connective tissues in young mice. *Acta Physiologica Scandinavica* 108, 17–22.
- Tesarz, J., 2010. Die Fascia thoracolumbalis als potenzielle Ursache für Rückenschmerzen: anatomische Grundlagen und klinische Aspekte. *Osteopathische Medizin* 11, 28–34.
- Thiyagarajan, D.K., Jeanmonod, R., 2018. Physiology, Menstrual Cycle, in: *StatPearls*. StatPearls Publishing, Treasure Island (FL).
- Timonen, S., Procopé, B.-J., 1971. Premenstrual Syndrome and Physical Exercise. *Acta Obstetrica et Gynecologica Scandinavica* 50, 331–337.
- Tountas, A.A., Fornasier, V.L., 1996. Operative Treatment of Subcalcaneal Pain. *Clinical Orthopaedics and Related Research (1976-2007)* 332, 170–178.
- Ulreich, N., Kainberger, F., Huber, W., Nehrer, S., 2002. Die Achillessehne im Sport. *Radio- loge* 42, 811–817.
- Vøllestad, N.K., Torjesen, P.A., Robinson, H.S., 2012. Association between the serum levels of relaxin and responses to the active straight leg raise test in pregnancy. *Manual Therapy* 17, 225–230.
- von Heymann, W., Stecco, C., 2016. Fasziale Dysfunktionen. *Manuelle Medizin* 54, 303–306.

Literaturverzeichnis

- Vosseller, J.T., Ellis, S.J., Levine, D.S., Kennedy, J.G., Elliott, A.J., Deland, J.T., Roberts, M.M., O'Malley, M.J., 2013. Achilles Tendon Rupture in Women. *Foot Ankle Int.* 34, 49–53.
- Wang, J.H.-C., 2006. Mechanobiology of tendon. *Journal of Biomechanics* 39, 1563–1582.
- Warren, B.L., 1990. Plantar Fasciitis in Runners. *Sports Med* 10, 338–345.
- Wearing, S.C., Smeathers, J.E., Urry, S.R., Hennig, E.M., Hills, A.P., 2006. The Pathomechanics of Plantar Fasciitis. *Sports Med* 36, 585–611.
- Wentorf, F.A., Sudoh, K., Moses, C., Arendt, E.A., Carlson, C.S., 2006. The Effects of Estrogen on Material and Mechanical Properties of the Intra- and Extra-articular Knee Structures. *Am J Sports Med* 34, 1948–1952.
- Westh, E., Kongsgaard, M., Bojsen-Moller, J., Aagaard, P., Hansen, M., Kjaer, M., Magnusson, S.P., 2008. Effect of habitual exercise on the structural and mechanical properties of human tendon, in vivo, in men and women. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 18, 23–30.
- Wojtys, E.M., Huston, L.J., Boynton, M.D., Spindler, K.P., Lindenfeld, T.N., 2002. The Effect of the Menstrual Cycle on Anterior Cruciate Ligament Injuries in Women as Determined by Hormone Levels. *Am J Sports Med* 30, 182–188.
- Wojtys, E.M., Huston, L.J., Lindenfeld, T.N., Hewett, T.E., Greenfield, M.L.V.H., 1998b. Association Between the Menstrual Cycle and Anterior Cruciate Ligament Injuries in Female Athletes. *The American Journal of Sports Medicine* 26, 614–619.
- Wright, D.G., Rennels, D.C., 1964. A Study of the Elastic Properties of Plantar Fascia. *JBJS* 46, 482.
- Yu, W.D., Panossian, V., Hatch, J.D., Liu, S.H., Finerman, G.A.M., 2001. Combined Effects of Estrogen and Progesterone on the Anterior Cruciate Ligament. *Clinical Orthopaedics and Related Research®* 383, 268.
- Zahradnik, H.-P., 2004. Prämenstruelles Syndrom. *Gynäkologische Endokrinologie* 2, 64–69.
- Zalpour, C., Augustin, M., Raichle, G. (Eds.), 2006. *Anatomie, Physiologie: Lehrbuch für Physiotherapeuten, Masseur, medizinische Bademeister und Sportwissenschaftler*, 2., überarb. und erg. Aufl. ed, Für die Physiotherapie. Elsevier, Urban & Fischer, München.
- Zantop, T., Petersen, W., 2007. Anatomische Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes. *Arthroskopie* 20, 94–104.

Literaturverzeichnis

Zazulak, B.T., Paterno, M., Myer, G.D., Romani, W.A., Hewett, T.E., 2006. The Effects of the Menstrual Cycle on Anterior Knee Laxity. *Sports Med* 36, 847–862.

Zschäbitz, A., 2005. Anatomie und Verhalten von Sehnen und Bändern. *Orthopäde* 34, 516–525.

14 Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen Hilfsmittel als angegeben verwendet habe. Insbesondere versichere ich, dass ich alle wörtlichen und sinngemäßen Übernahmen aus anderen Werken als solche kenntlich gemacht habe.

Ort, Datum: Chemnitz, den XX.XX.XXXX

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'W. Oebe'.

Unterschrift: _____

15 Anhang

A01 Fragebogen

Probandennummer:

Alter:

Größe:

Gewicht:

1. Nimmst du regelmäßig die Pille?

Ja Nein

1.1 Wenn Ja, wie lange nimmst du die Pille:

_____ Jahre

1.2 Wenn Nein, wie lange nimmst du die Pille nicht:

_____ Jahre

2. War dein Zyklus in den letzten 6 Monaten regelmäßig?

Ja Nein

2.1 Wie lange dauert normalerweise dein Zyklus?

_____ Tage

2.3 Welchen Schwankungen unterlag dein Zyklus in den letzten 6 Monaten?

0 Tage 1-3 Tage 4-8 Tage 8-12Tage mehr als 12 Tage

3. Hast du kurz vor oder während deiner Periode Beschwerden?

Ja Nein

3.1 Wenn ja, hast du eines dieser Beschwerdesymptome?

Unterleibsschmerzen

Rückenschmerzen

Kopfschmerzen

Müdigkeit

Anhang

ziehen in den Brüsten

Stimmungsschwankungen

sonstiges: _____

3.2 Wie stark sind die Beschwerden ausgeprägt (markiere die Stelle auf der Skala):

Gering mittel stark sehr stark

| _____ |

3.3 Hast du ein diagnostiziertes PMS (Prämenstruelles Syndrom)?

Ja Nein

4. reibst du regelmäßig Sport?

Ja Nein

4.1 Welche Sportart (en) betreibst du regelmäßig?

1) _____ 2) _____

4.2 Wie häufig und wie viele Stunden pro Woche treibst du diese Sportart?

1) _____ 2) _____

4.3 Wie viele Jahre bist du in der Sportart aktiv?

1) _____ Jahre 2) _____ Jahre

5. Hattest du Bindegewebs-Verletzungen der unteren Extremitäten, seit du die Pille regelmäßig nimmst/ nicht nimmst? Wenn ja, welche?

6. Warst oder bist du schwanger?

Ja Nein

Anhang

Anhang03 Menstruationskalender

Menstruationskalender

Probandinnenkürzel: _____

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
April																																
Mai																																
Juni																																
Juli																																

Erläuterung:

Bitte kreuze die Tage an, in denen Du während dieser Studie Deine Periode hattest. Dies dient als Orientierung, um die Messdaten passend in den Zyklus einzuordnen.

Vielen Dank! ☺

Stärke deiner Periode

x = leicht

xx = normal

xxx = stark

Anhang

Anhang04 Datensatz SPSS mit Zyklusphasen

Proband	ZP_Me_PA	ZP_ME_AS	ZP_ME_PS	ZP_ME_RF	ZP_EP_PA	ZP_ES_AS	ZP_ES_PS	ZP_ES_RF	ZP_LP_PA	ZP_LP_AS	ZP_LP_PS	ZP_LP_RF
1	450,5	758,3	703,9	228,0	509,4	766,0	629,7	221,1	508,7	716,3	689,3	230,2
2	500,9	669,5	657,8	255,6	517,6	683,7	684,3	245,1	550,0	658,5	654,4	254,9
3	434,1	643,4	590,5	324,4	413,8	675,5	670,8	319,1	437,2	723,4	628,6	322,9
4	428,8	683,7	792,2	248,2	462,5	643,1	815,1	281,7	463,8	661,6	837,7	272,1
5	433,0	735,0	901,6	305,8	427,6	762,7	867,8	310,7	492,1	752,4	867,3	292,9
6	467,1	789,7	846,7	257,1	454,4	788,0	782,4	250,6	457,2	815,2	823,3	234,8
7	516,4	762,8	830,2	270,8	558,5	773,3	822,9	271,9	520,3	745,4	827,9	272,1
8	499,9	753,8	731,0	321,1	558,9	766,7	736,5	332,0	575,2	727,6	759,0	327,6
9	419,2	686,1	857,7	268,4	436,0	700,2	855,9	236,7	435,3	694,7	857,0	260,3
10	424,8	756,1	594,3	184,6					473,8	750,0	602,1	187,3
11	475,5	722,8	748,2	302,2	488,6	656,1	656,4	282,5	471,5	698,6	727,3	284,1
12	469,0	737,2	756,1	236,8	425,4	744,2	792,0	244,2	425,9	771,3	859,6	256,6
13	416,6	728,9	519,4	231,0	457,9	679,5	594,6	212,5	425,1	723,3	580,0	223,0
14P	550,4	698,4	840,8	294,5	518,7	695,3	819,7	342,2	528,4	703,1	890,3	283,9
15	537,9	712,7	667,7	276,4	523,4	695,0	664,6	296,0	502,2	714,3	663,6	287,4
16	504,3	685,7	577,5	269,6	643,3	698,9	620,6	249,5	590,6	680,6	626,7	251,8
17	513,5	776,3	850,7	303,5					513,9	751,5	797,5	294,0
18	522,2	665,9	840,2	262,5	450,3	678,9	765,3	257,9	438,4	688,6	816,0	286,8
19	390,2	713,4	695,9	286,5	399,5	688,2	626,2	329,3	412,6	713,1	643,4	285,1
20	426,5	644,2	615,5	299,6	372,8	692,6	616,9	298,7	495,9	650,5	662,9	310,4
21	442,0	690,6	1007,0	284,5	463,8	682,0	969,2	289,0	447,0	712,3	972,6	278,3

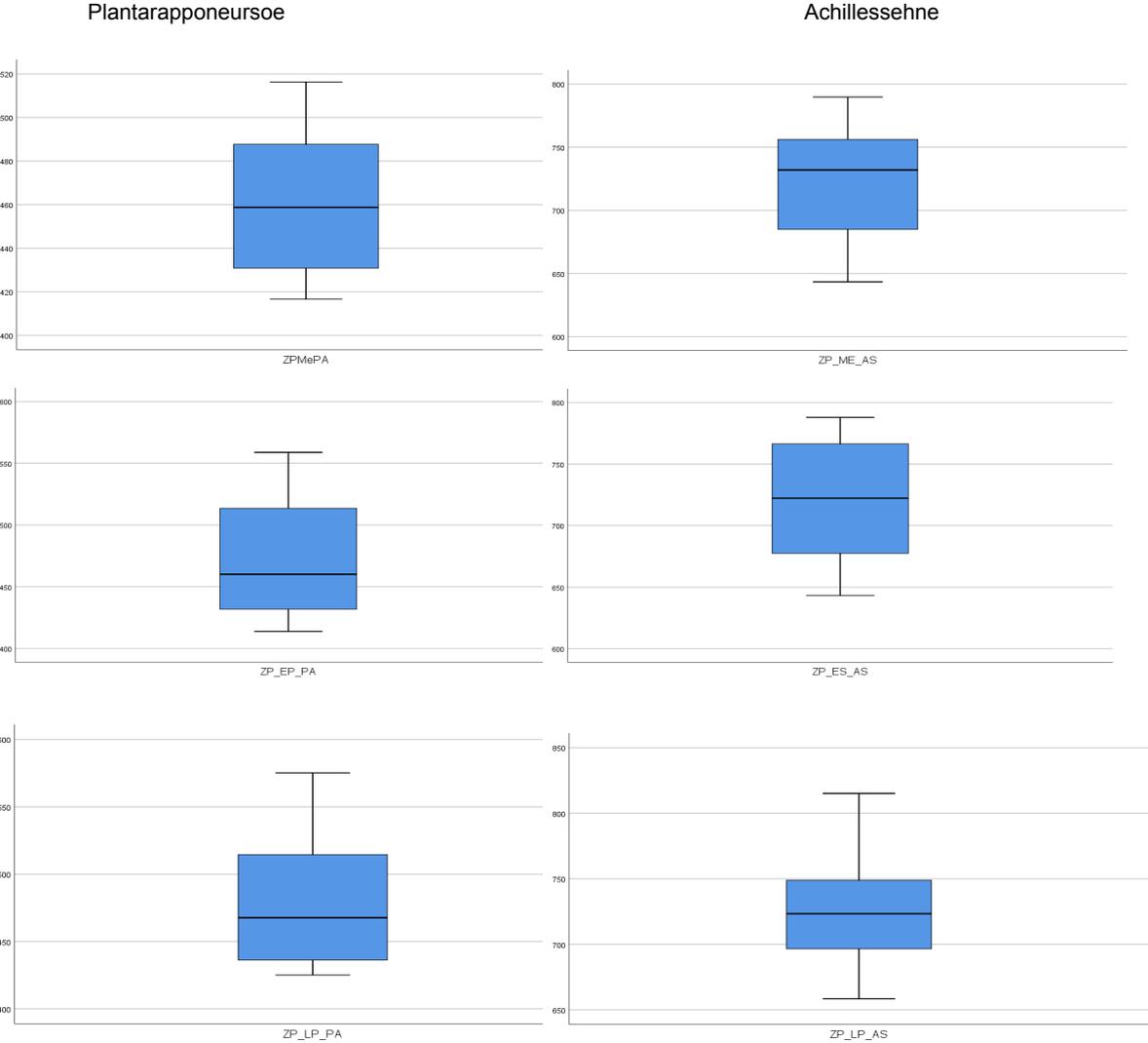
Anhang

Anhang05 Datensatz SPSS ohne Zyklusphasen

Proband	Gruppe	PA_MW	AS_MW	PS_MW	RF_MW
1	1	489,5	746,9	674,3	226,4
2	1	522,8	670,6	665,5	251,9
3	1	428,4	680,8	630,0	322,1
4	1	451,7	662,8	815,0	267,3
5	1	450,9	750,0	878,9	303,1
6	1	459,6	797,6	817,5	247,5
7	1	531,7	760,5	827,0	271,6
8	1	544,7	749,4	742,2	326,9
9	1	430,2	693,7	856,8	255,1
10	1	449,3	753,1	598,2	185,9
11	1	478,5	692,5	710,6	289,6
12	1	440,1	750,9	802,6	245,9
13	1	433,2	710,6	564,7	222,2
14	2	532,5	698,9	850,2	306,9
15	2	521,2	707,3	665,3	286,6
16	2	579,4	688,4	608,2	256,9
17	2	513,7	763,9	824,1	298,7
18	2	470,3	677,8	807,2	269,1
19	2	400,8	704,9	655,2	300,3
20	2	431,7	662,4	631,8	302,9
21	2	450,9	695,0	982,9	283,9

Anhang06 Boxplots

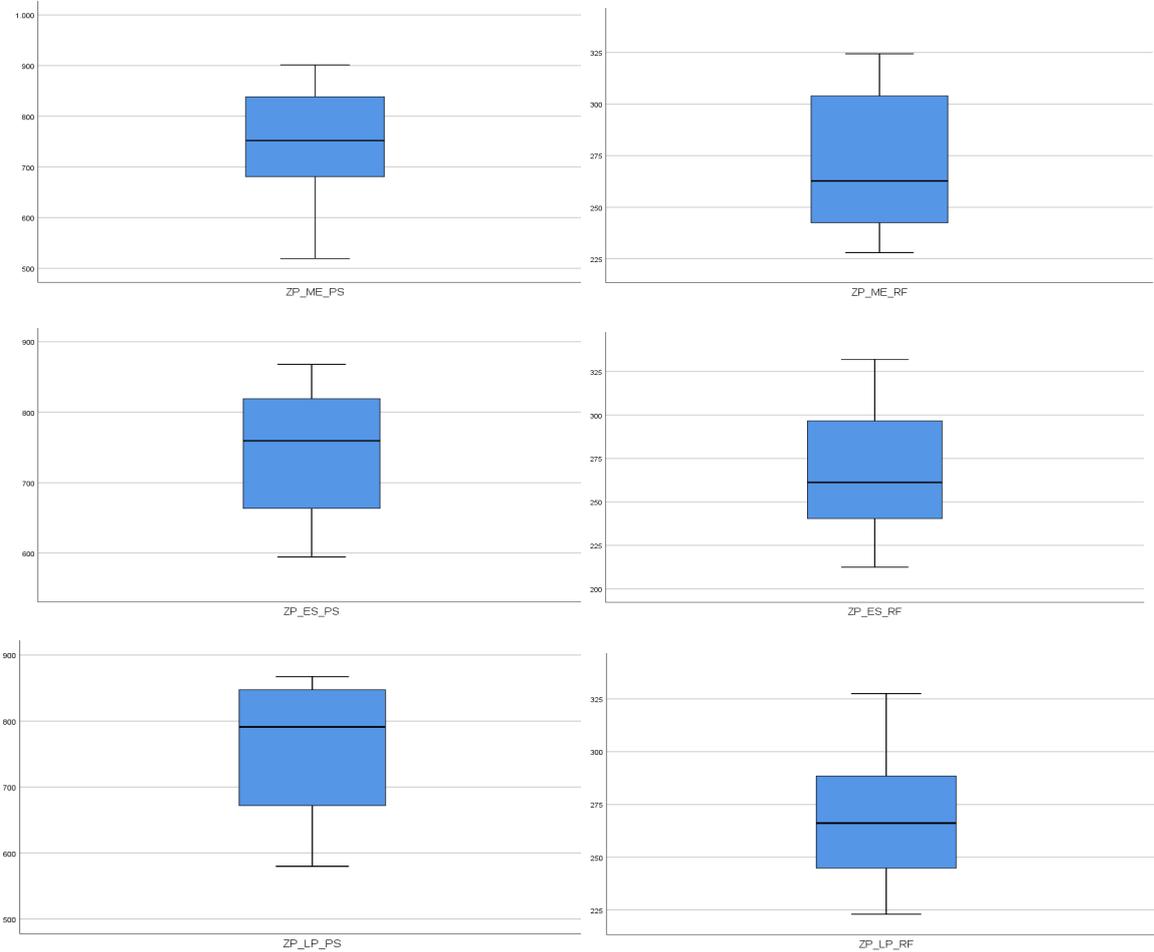
Boxplots natürlicher Zyklus



Boxplots natürlicher Zyklus

Patellasehne

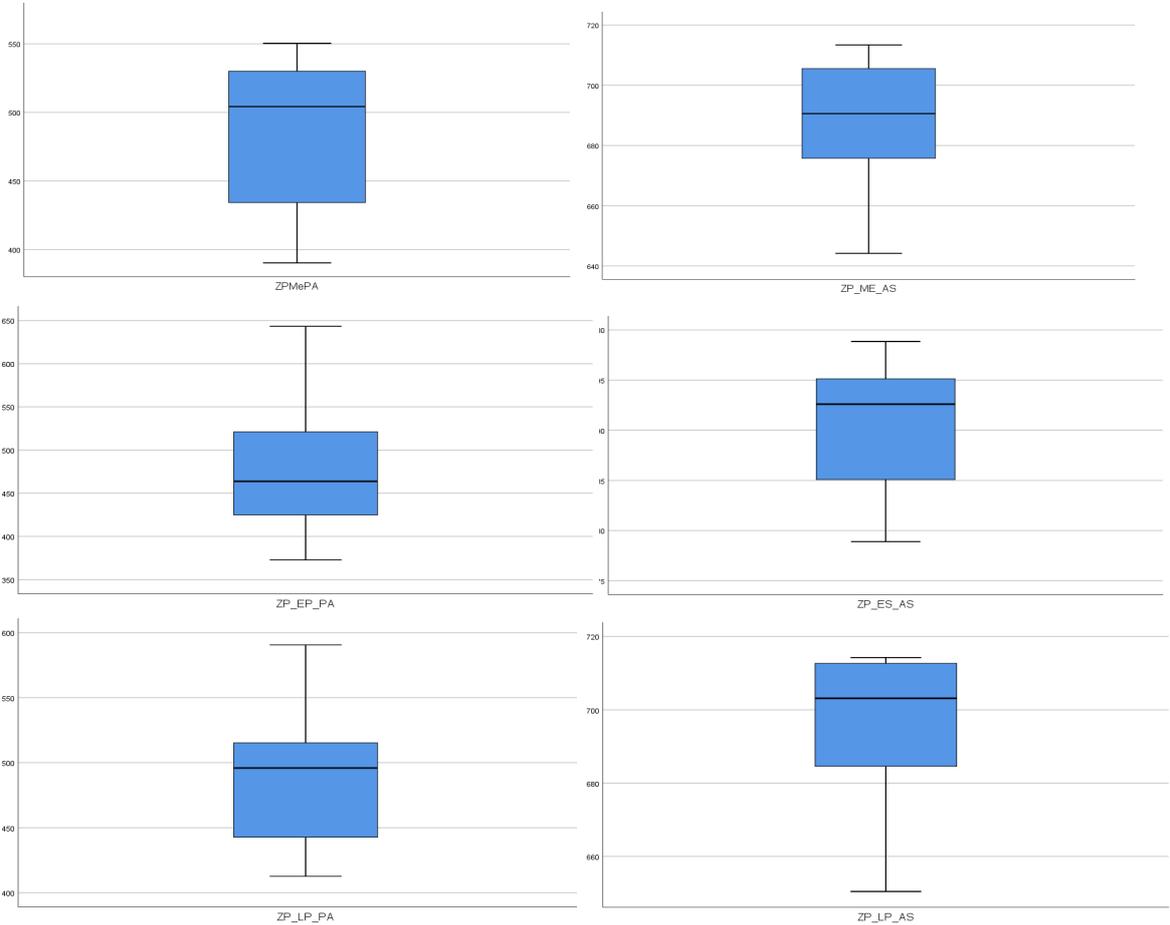
m. rectus femoris



Boxplots orale Kontrazeption

Plantarapponeurose

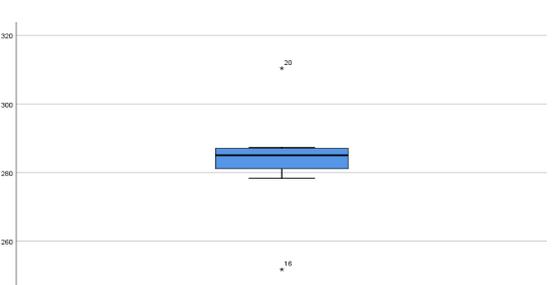
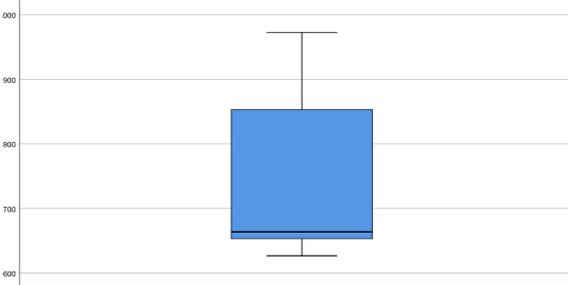
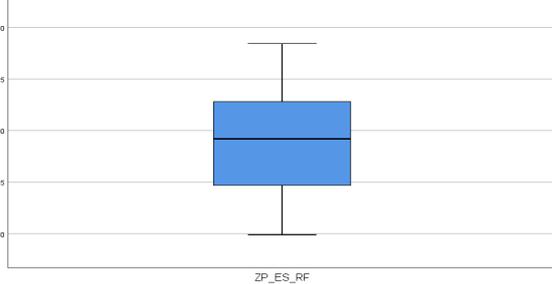
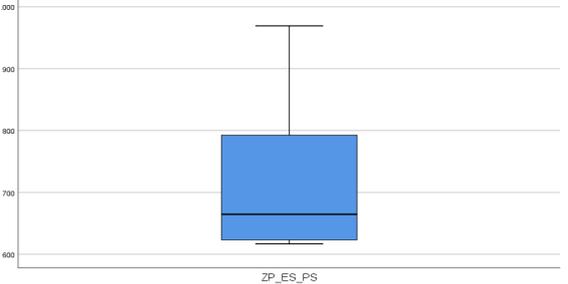
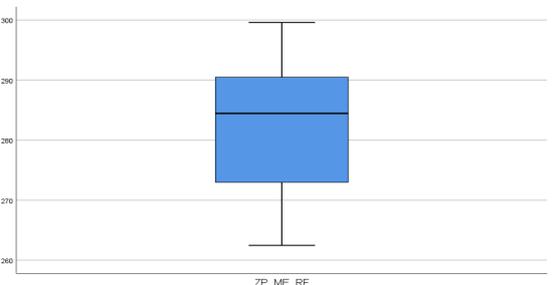
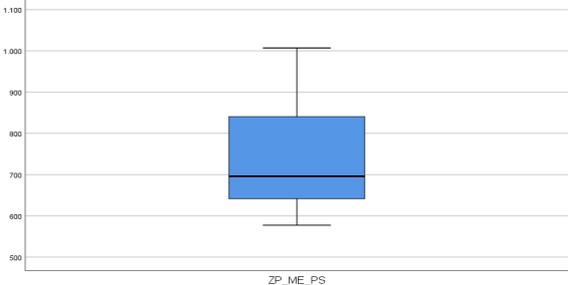
Achillessehne



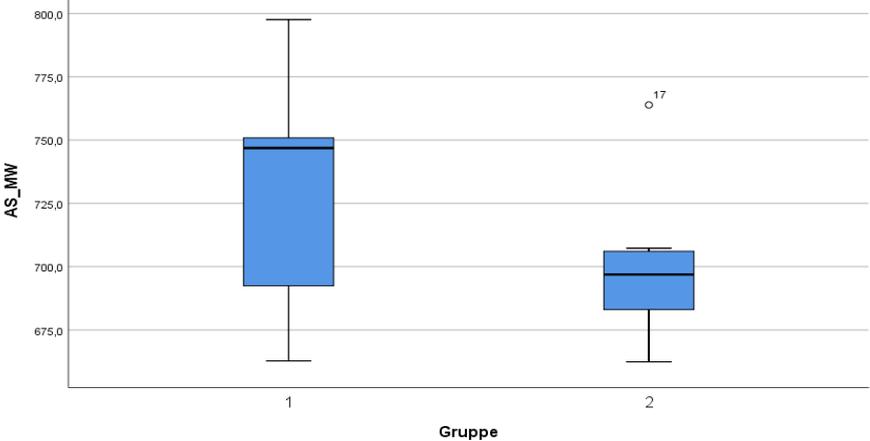
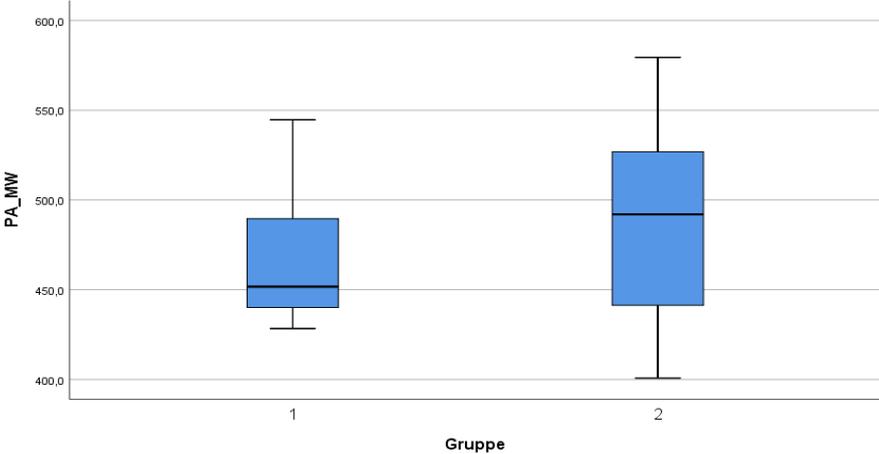
Boxplots orale Kontrazeption

Patellasehne

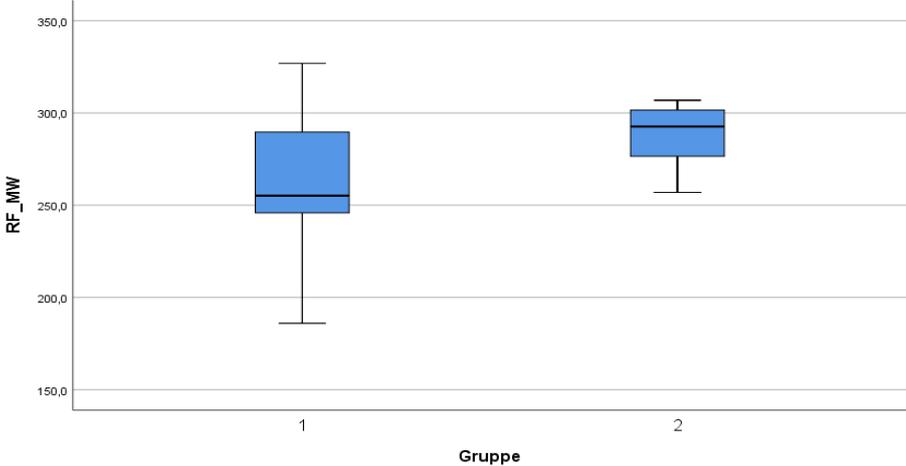
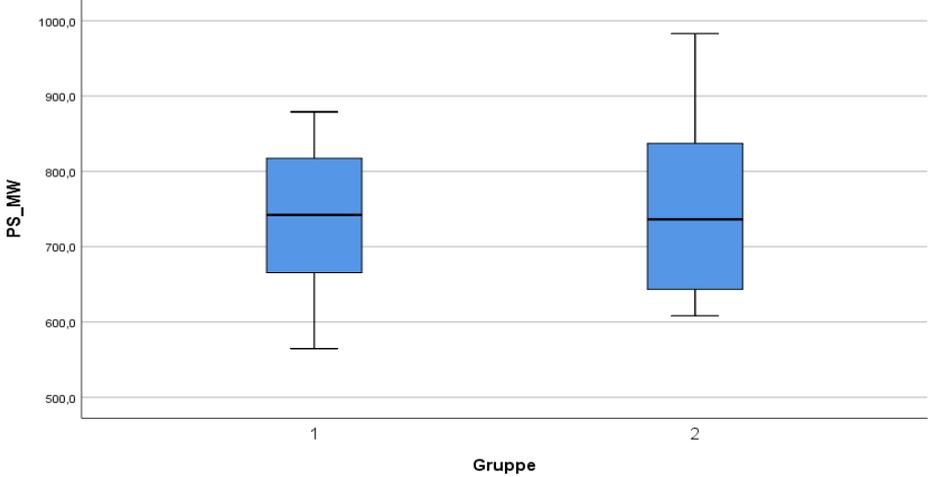
m. rectus femoris



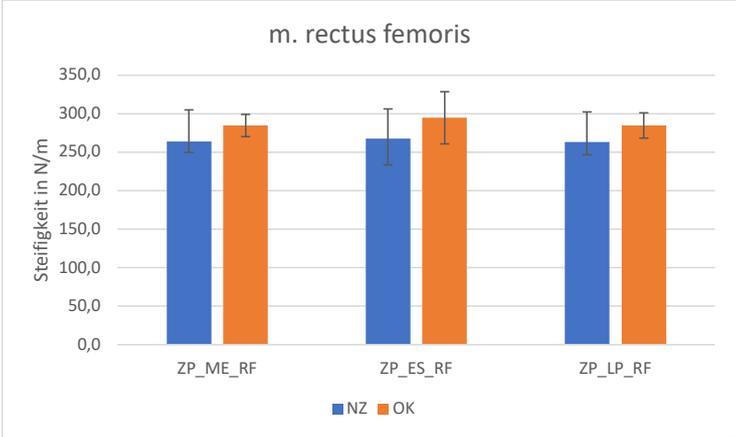
Boxplots natürlicher Zyklus und orale Kontrazeption im Vergleich
Plantarapponeurose (PA) und Achillessehne (AS)



Boxplots natürlicher Zyklus und orale Kontrazeption im Vergleich
Patellasehne (PS) und m.rectus femoris (RF)



Anhang07 Gruppiertes Balkendiagramm m. rectus femoris



Anhang

Weitere Anhänge sind auf dem beigelegten USB- Stick zu finden.

Anhang08 Ethikvotum

Anhang09 Probandenaufruf

Anhang10 Probandeninformation mit Einwilligung und Datenschutz

Anhang11 Rohdaten