

Aus der Klinik für Strahlentherapie und Radioonkologie (Direktor: Prof. Dr. med. M. Hecht,
ehem. Direktor: Prof. Dr. med. Ch. Rube)

und

der Klinik für Unfall-, Hand- und Wiederherstellungschirurgie (Direktor: Prof. Dr. med. T. Pohlemann)
des Universitätsklinikums des Saarlandes, Homburg/Saar

**Lässt sich die Wirkung der Strahlentherapie bei schmerzhafter
plantarer Faszioopathie durch statische und dynamische
Pedobarographie objektivieren?**

**Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin
der medizinischen Fakultät**

der UNIVERSITÄT DES SAARLANDES

2024

vorgelegt von: Christine Laura Huss
geb. am 08.09.1994 in Wiesbaden

Tag der Promotion: 25.07.2024

Dekan: Prof. Dr. Michael D. Menger

1. Berichterstatter: Prof. Dr. Marcus Niewald

2. Berichterstatter: Prof. Dr. Bergita Ganse

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----|--|----|
| 1 | ZUSAMMENFASSUNG | 4 |
| | 1.1 Deutsche Zusammenfassung. | 4 |
| | 1.2 Abstract | 6 |
| 2 | EINLEITUNG | 8 |
| | 2.1 Definition | 8 |
| | 2.2 Ätiologie | 9 |
| | 2.3 Pathogenese | 9 |
| | 2.4 Symptomatik | 10 |
| | 2.5 Diagnostik | 11 |
| | 2.6 Differentialdiagnosen | 11 |
| | 2.7 Therapie | 12 |
| | 2.8 Stellenwert der Radiatio | 13 |
| | 2.9 Funktion des Fußes (Gangzyklus) | 16 |
| | 2.10 Ziel der Studie | 18 |
| 3 | MATERIAL UND METHODIK | 18 |
| | 3.1 Studiendesign | 18 |
| | 3.2 Ein- und Ausschlusskriterien | 18 |
| | 3.3 Visuelle Analog Skala | 19 |
| | 3.4 Calcaneodynie Score nach Rowe | 19 |
| | 3.5 Fußdruckmessung | 20 |
| | 3.5.1 Dynamische Messung | 20 |
| | 3.5.2 Statische Messung | 22 |
| | 3.6 Radiatio | 23 |
| | 3.7 Statistische Auswertung | 23 |
| 4 | ERGEBNISSE | 24 |
| 5 | DISKUSSION | 35 |
| 6 | LITERATURVERZEICHNIS | 39 |
| 7 | PUBLIKATIONEN | 42 |
| 8 | DANK | 43 |
| 9 | LEBENS LAUF | 44 |
| 10 | ANHANG | 46 |
| | 10.1 Relevante Studienbögen für die Dissertation | 46 |
| | 10.1.1 Aufklärungsbogen | 46 |
| | 10.1.2 VAS-Skala | 49 |

| | | |
|--------|-----------------|----|
| 10.1.3 | CS-Score | 50 |
| 10.2 | Abkürzungsliste | 51 |

1 Zusammenfassung

1.1 Zusammenfassung

Zielsetzung: Ziel dieser Studie ist es, Parameter für eine objektivere Beurteilung des Erfolgs einer Strahlentherapie der schmerzhaften plantaren Faszioopathie zu finden. Als neues Verfahren wird dabei die dynamische und statische Pedobarographie für diese Fragestellung eingeführt. Bisher stand nur die subjektive Einschätzung der Patienten bezogen auf Schmerz und Funktionalität des betroffenen Fußes, quantifiziert durch die Visuelle Analog-Skala (VAS) und den Calcaneodynie-Scores nach Rowe [31], zur Verfügung. Bildgebende Verfahren erlauben keine Rückschlüsse auf den Lokalzustand, da die Beschwerdepersistenz und die Morphologie des Sporns in der Bildgebung nicht korrelieren.

Patienten und Methodik: Es wurden prospektiv und konsekutiv 30 Patienten mit klinisch und radiologisch nachgewiesenem Fersensporn und somit Indikation nach Aufklärung und schriftlicher Zustimmung zur Radiotherapie eingeschlossen. Ausschlusskriterien waren Vorerkrankungen am betroffenen Fuß, wie Traumata, Erkrankungen des rheumatischen Formenkreises, der peripheren arteriellen Verschlusskrankheit oder der schweren venösen Insuffizienz. Zudem eine vorangegangene Radiatio im Bereich des Fußes, Schwangere, Patientinnen in der Stillzeit und Patienten mit einer schweren psychischen Erkrankung oder einer gesetzlichen Betreuung in Gesundheitsangelegenheiten durch Fremde.

Die Untersuchungen umfassten neben ausführlicher Anamnese und körperlicher Untersuchung semiquantitative Parameter, wie der Graduierung des Ausgangsschmerzniveaus mit der VAS-Skala und dem Calcaneodynie-Score nach Rowe, die statische und dynamische Pedobarographie mit dem mobilen Drucksohlensystem (Fa. Moticon, München). Erhobene Parameter umfassten „Cadence“, „Average Total Force“, „Double Support Time“ und Andere. Die Intervention bestand bei allen Patienten in der Strahlentherapie über seitliche Gegenfelder mit einer Gesamtdosis von 3.0Gy bei zweimal wöchentlichen Einzelfractionen von 0.5Gy unter Anwendung von Photonen der Grenzenergie 6MV eines Linearbeschleunigers. Drei Monate nach Radiatio wurden die Patienten erneut nach gleichbleibendem Protokoll evaluiert.

Das Studienprotokoll folgt den Vorgaben der Deklaration von Helsinki in Ihrer aktuellen Version und wurde durch die zuständige Ethikkommission genehmigt (Ärztchamber des Saarlandes: 178/16).

Ergebnisse: Vor der radiotherapeutischen Intervention korrelierten folgende pedobarographische Messwerte mit den subjektiven Patientenangaben: „Cadence“ zur VAS, „Average Total Force“ zum Calcaneodynie-Score nach Rowe. Der Parameter „Double Support Time“ entwickelte sich parallel zu den Messwerten der VAS-Skala ohne das Signifikanzniveau zu erreichen.

Drei Monate nach der Intervention gaben die Mehrzahl der Patienten eine Besserung des klinischen Zustandes an, der sich auch deutlich in den subjektiven Scores zeigte (Schmerz: der mittlere VAS-Wert sank von 61 auf 28 Punkte, der mittlere Calcaneodynie-Score stieg von 48 auf 68 Punkte). Diese Änderungen ließen sich aber weder in der statischen noch in der dynamischen Pedobarographie objektivieren.

Schlussfolgerung: Die Sensitivität des eingesetzten Pedobarographie Systems ist derzeit nicht ausreichend, um belastbar auf die klinischen Parameter Schmerz und Funktionalität nach der Radiatio des schmerzhaften Fersensporns rückschließen zu können. Eine höhere Auflösung der Messsohle könnte aber gegebenenfalls in der Zukunft zu einer anderen Einschätzung führen.

1.2 Abstract

Objective: This study was about evaluating a new method of objective measuring the effectiveness of the radiotherapy for the painful plantar fasciitis. In this case we tried to elaborate a new, more objective method using the dynamic and static pedobarography. Until now the only way of disclosing the effectiveness of the radiotherapy of the plantar fasciitis was the subjective perception of the patient telling the investigator if he has recovered from the pain after the radiotherapy or not and if he did how much benefit he would get out of this therapy due to the decrease of the pain and the gain of functionality of the effected foot using the C'VAS-Scale as well as the Calcaneodynia-Score according to Rowe [31]. Imaging processes are not indicative of the local conditions, for the persistence of symptoms and the morphology of the plantar fasciitis do not correlate with the results of the diagnostic imaging.

Patients and methods: 30 patients with clinical and radiological diagnosed plantar heel spur and therefore indication for radiation were included in this prospective and consecutive study after obtaining their written consent.

Exclusion criteria were previous medical conditions of the effected foot, trauma, rheumatic diseases, periphery artery occlusive disease or severe chronic venous insufficiency.

Besides obtaining medical history, physical examination and using semiquantitative parameters such as the Visual-Analogue-Scale and the Calcaneodynia-Score in order to graduate the state of the foot functionality and the baseline pain levels, the dynamic and static gait analysis by means of dynamic and static pedobarography was used for examination.

Collected parameters were "Cadence", "Average Total Force", "Double Support Time" and others. The radiotherapy took place with the overall dose of 3Gy, split up in single fractions of 0,5 Gy applied two times a week using photons with 6 MV border energy of a linear accelerator. The patients were investigated and measured by the consistent protocol three month after radiotherapy.

The assenting opinion of the ethics commission of the medical chamber of Saarland, Germany (178/16) were given, the requirements of the declaration of Helsinki were respected.

Results: Indeed, there could be shown a statistically relevant correlation between the parameters of the gait analysis and the patient's statement regarding pain history or foot functionality (e.g. "Cadence" and VAS-Scale, "Average Total Force" and Calcaneodynia-Score) pre-radiation. Furthermore, there can be found a tendency of correlation between "Double Support Time" and VAS-Scale.

Three months after radiotherapy most of the patients experienced a significant reduction of pain and gain of foot functionality (the mean of VAS-Scale reduced from 61 to 28 points, the mean of Calcaneodynie-Score increased

from 48 to 68 points). Unfortunately, a correlation with the results of the pedobarography at the same time were not found.

Conclusion: The sensitivity of the used system of pedobarography is currently not sufficient to conclude to the clinical parameters pain and functionality of the effected foot after the radiotherapy of the plantar fasciitis in a reliable modality.

With further investigation in terms of sensitivity of the gait analysis instrument there may be a chance to get more detailed information and find some more useful parameters to use to objectify the effectiveness of the radiotherapy of the plantar fasciitis.

2 EINLEITUNG



Abb.1 Röntgenbild eines Fußes mit plantarem Fersensporn, J. Lengerke, Feb. 2009[20]

2.1. Definition

Die plantare Fasziiitis hat eine Prävalenz von 10%. Etwa 15 % aller Erwachsenen beklagen Fußschmerzen, welche auf diese zurückgeführt werden können. Es handelt sich hierbei um Verknöcherungen der Sehnenansätze am Calcaneus, dem Fersenbein, welche sowohl kranial, auch als Haglund-Exostose bezeichnet, als auch plantar auftreten können. Der kraniale Fersensporn bezieht sich auf den Ansatz der Achillessehne am dorsalen Anteil des Tuber calcanei, der plantare Fersensporn, den Ansatz der Plantaraponeurose am Processus medialis tuberis calcanei.[14] Zur Diagnosestellung der Plantarfasziitis oder auch Plantarasziopathie ist ein bildgebender Nachweis des oben genannten Sachverhaltes nicht zwingend erforderlich. In dieser Studie werden ausschließlich Patienten mit röntgenologisch nachgewiesenem plantarem Fersensporn untersucht. Die Begriffe werden in dieser Arbeit jedoch synonym verwendet.

2.2 Ätiologie

Ursächlich für diese Erkrankung der unteren Extremität sind zum Beispiel Fußdeformitäten, wie der Hohlfuß, pes excavatus, und der Plattfuß, pes planus, nicht selten auch in Kombination mit dem Knickfuß, pes valgus, anzutreffen, welcher dann auch als Knick-Plattfuß, pes planovalgus, bezeichnet wird.[9] Der pes excavatus zeichnet sich durch ein überhöhtes Fußlängsgewölbe aus. Dieses kann angeboren sein oder durch eine Dysbalance der Muskelkräfte des Fußes und des Unterschenkels entstehen. Wohingegen beim pes planus ein abgeflachtes Fußlängsgewölbe zu finden ist, welches ebenfalls angeboren oder durch zum Beispiel Bindegewebs- und Muskelschwächen sowie Gelenkentzündungen wie die rheumatoide Arthritis erworben sein kann.

Zudem gilt Übergewicht (BMI >30 kg/m²) als ein weiterer, die Plantarfasziitis begünstigender Faktor.[7] Dies kann zu Fehlhaltung sowie Fehlstellung führen, welches sich bei konsekutiver Belastung der Gelenke über einen längeren Zeitraum zu einer plantaren Fasziiitis entwickeln kann.

Überwiegend gehende und stehende Tätigkeiten können ebenso das Risiko zur Entwicklung einer Entzündung des Sehnenansatzes der plantaren Faszie am Fersenbein erhöhen.

Fehlbelastungen des Fußes, ausgelöst zum Beispiel durch das Tragen von ungeeignetem und unpassendem Schuhwerk oder Überbelastung durch die Ausübung von Leistungssport begünstigen die Entstehung einer Plantarfasziitis. So konnte eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von einer Plantarfasziopathie bei Leistungssportlern gezeigt werden.

Des Weiteren kann die übersteigerte Pronation des Fußes, zum Teil durch die oben genannten Faktoren bedingt, als Verursacher dieses Krankheitsbildes gewertet werden.[7] Diese Stellung des Fußes zeigten 81-86 % der Patienten, welche Symptome aufwiesen, die auf die Existenz einer plantaren Ossifikation hinweisend sein können. [7]

2.3 Pathogenese

Während des Stehens und Gehens kommt es zu einer höheren Spannung über dem Längsgewölbe des Fußes, welches durch verschiedene anatomische Strukturen sowohl aktiv als auch passiv gespannt wird und zusammen mit dem Quergewölbe zur Stabilisierung des Fußes und zur Verteilung des Körpergewichts auf diesen beiträgt. Das Längsgewölbe wird sowohl aktiv, durch die tiefen Flexoren der Unterschenkelmuskulatur sowie der kurzen Fußmuskeln, als auch passiv, vom Ligamentum plantare longum und der Aponeurosis plantaris, gebildet. [9]

Wenn es durch Belastung durch längeres Gehen und Stehen oder Fehlstellungen des Fußes zur erhöhten Spannung des Längsgewölbes kommt, kann das Gewölbe abflachen und die Plantaraponeurose, das Ligamentum plantare longum und die Ursprünge der kurzen Fußmuskeln gereizt werden.

Dies führt, wenn es über einen länger andauernden Zeitraum geschieht, zu repetitiven Mikrotraumen.[9] Das Gewebe verliert an Elastizität und Spannkraft und wird auf Dauer geschädigt. Daraufhin können fibröse Narben entstehen. Im chronischen Stadium kommt es zur Entzündung der Plantaraponeurose, der plantaren Fasziiitis. Die genaue Pathogenese der Kalzifikation und der konsekutiven heterotopen Ossifikation, welche, wie oben bereits erläutert, zur Diagnosestellung der Plantarfasziitis aber nicht zwingend vorhanden sein müssen, um Symptome zu verursachen, ist bis heute nicht eindeutig geklärt.[9] Man vermutet, dass die Einwanderung von Entzündungszellen und die Bildung von fibrinösem Gewebe auf Dauer zu Kalzifizierung sowie Ossifikation der Sehnenansätze führen.

2.4 Symptomatik

Häufige Symptome sind starker lokaler Schmerz in Form von Druckdolenz und die damit einhergehenden Einschränkungen in der Bewegung und im Alltag. Es bietet sich jedoch ein sehr heterogenes Bild der Beschwerden.[9] Dies trägt unter anderem dazu bei, dass zwischen Diagnosestellung und hinreichender Therapie oft eine längere Zeitspanne zu finden ist und es insbesondere den Ausschluss verschiedener Differentialdiagnosen, auf die im weiteren Verlauf dieser Arbeit noch genauer eingegangen wird, sicherzustellen gilt.

Ein weiteres typisches Symptom ist der sogenannte Anlaufschmerz am Morgen, direkt nach dem Aufstehen, welcher durch die erste Belastung des Fußes verursacht wird.[7,9] Dies ist dadurch zu erklären, dass der Fuß während einer mehrstündigen Ruhephase in einer plantar gebeugten Haltung (Plantarflexion) verweilt und damit die Plantarfaszie weder unter Spannung steht, noch gedehnt wird.[9] Steht der Betroffene morgens auf, wird der Fuß initial nach dorsal gebeugt (Dorsalflexion) und die Plantaraponeurose unter Spannung gesetzt.[9]

Die Schmerzen können aber auch den Tag über andauern, in Ruhephasen auftreten oder gegen Abend zunehmen. Die Erkrankung kann sich schleichend, über mehrere Jahre hinweg, entwickeln oder sich plötzlich, nach einem extrem belastenden Ereignis, wie zum Beispiel nach einer langen Wanderung eines ungeübten Läufers, manifestieren.

Des Weiteren gibt es ebenso unterschiedliche Auslöser für die Beschwerden und verschiedene Ausprägungsgrade der Einschränkung. Der Schmerz kann isoliert lokal auftreten, in Richtung des Vorfußes ziehen oder in Richtung des Unterschenkels. Er kann durch leichte Belastung, wie Gehen, durch starke Belastung wie Springen oder idiopathisch, ohne auslösenden Faktor entstehen.

Dies kann zu ausgeprägten Einschränkungen im Beruf und der Freizeit führen. Die Bandbreite ist weit gefasst; von leichter Einschränkung beim Sport über Einschränkung der Funktionalität (Zehenstand/-gang und Hackenstand/-gang) bis hin zur Arbeitsunfähigkeit. Die Erkrankten sind bezüglich Bewegungsfreiheit stark eingeschränkt.

2.5 Diagnostik

Als diagnostische Methoden stehen neben der ausführlichen Anamnese der Beschwerden und Einschränkungen sowie der detaillierten Erfassung der Schmerzlokalisierung, -qualität und -intensität mittels Calcaneodynie-Score (modifiziert nach Heyd et al. (Radiology, 2001) und visueller Analogskala (nach Hayes und Patterson, 1921) auch bildgebende Verfahren zu Verfügung. [35] [31] [34] [16]

Ein konventionelles Röntgenbild kann Aufschluss geben.[9] Allerdings zeigt sich nicht bei allen Patienten, die über die für die Plantarfasziitis typischen Symptome klagen, auch im Röntgenbild die typische knöcherne Ausziehung an der Plantaraponeurose. Auch muss bei auf der Röntgenaufnahme sichtbarem Fersensporn nicht zwingend die typische Symptomatik vorhanden sein.[9] Ebenfalls korreliert die Ausprägung der Ossifikation in der bildgebenden Diagnostik häufig nicht mit dem Ausmaß des vom Patienten angegebenen Beschwerdebildes.

Eine weitere Möglichkeit zur Diagnosesicherung stellt die Magnet-Resonanz-Tomographie (MRT) dar. Wobei diese Methode lediglich als eine Ergänzung zur eigentlichen Diagnostik gesehen werden kann, da sie vor allem Weichteil-assoziierte Pathologien identifiziert und so zum Ausschluss von Differentialdiagnosen verwendet werden kann.[5,9]

2.6 Differenzialdiagnosen

Wenn ein Patient einige der vorangestellten Symptome erläutert, sollten zusätzlich die neben der Diagnose der Plantarfasziopathie möglichen Differentialdiagnosen geprüft werden.

Es besteht die Möglichkeit, dass die umschriebenen Symptome von Problemen mit dem Nervus tibialis herrühren und somit einem anderen Krankheitsbild und einer daraus resultierenden anderen Therapie zugeführt werden müssen. [7]

Außerdem können auch die Ankylosierende Spondylitis, die Osteoarthritis und das Reiter Syndrom ursächlich sein.[9]

Weitere Differentialdiagnosen kann die rheumatoide Arthritis, bei bilateralen Beschwerden, oder auch ein Abszess des plantaren Weichgewebes, bei an Diabetes mellitus erkrankten Patienten, ähnliche Symptome hervorrufen.[9]

Des Weiteren muss immer auch an die Möglichkeit einer Infektion oder sogar an das Vorhandensein eines malignen Prozesses gedacht werden, besonders bei Auftreten von B-Symptomatik, wie Fieber (> 38 Grad), Nachtschweiß und Gewichtsverlust (> 10 % des Körpergewichts in 6 Monaten).[9]

2.7 Therapie

In der Therapie der Plantarfasziitis geht es vor allem darum, die Schmerzen und die Entzündung zu behandeln und die Auslöser, wie zum Beispiel den übermäßigen Stress, dem das Gewebe ausgesetzt ist, zu beseitigen. Ein wichtiger Punkt ist die Funktionalität und die Belastbarkeit des Fußes wiederherzustellen.

Einen großen Stellenwert haben hierbei die konservativen Behandlungsoptionen. Nur wenn diese versagen, sollte die Möglichkeit einer Operation in Betracht gezogen werden.[7,9]

Als symptomatische Therapie kommen dabei nicht-steroidale Antirheumatika (NSAR) zum Einsatz.[7,9,13] Hiermit kann über die Dauer der Einnahme, unter Beachtung der unerwünschten Arzneimittelwirkungen und der Auswirkungen der kontinuierlichen Einnahme dieser Medikamentengruppe, die Entzündung im Gewebe vermindert und der Schmerz reduziert werden. Allerdings ist dies keine kausale Therapie und es konnte in der Studie von Donley et al. 2007, bei der 29 Patienten mit Nachtschienen und Stretching behandelt wurden und zusätzlich einen Placebo oder NSAR erhalten haben, zwar eine Verbesserung der Schmerzsymptomatik im Vergleich zur Placebo-Gruppe gezeigt werden, allerdings keine statistisch signifikanten Vorteile gegenüber dieser.[13]

Zuvor erwähnte Dehnübungen, bei welchen der Patient angeleitet wird die Flexibilität der plantaren Faszie adäquat zu beüben, ist eine weitere, leicht durchführbare Methode die Beschwerden zu verbessern.[7,9–11,22] Sie ist außerdem nebenwirkungsfrei, schnell zu erlernen und flexibel in den Alltag zu integrieren, erfordert jedoch die uneingeschränkte Compliance des Patienten, da nur ein kontinuierlich durchgeführtes Training den gewünschten Erfolg bringen kann. Eine adäquate Analgesie ist für eine uneingeschränkte Compliance unverzichtbar.

Eine weitere Behandlungsoption stellen Schienen, welche zur Nacht am Fuß getragen werden, dar. Diese beugen einer zu starken Plantarflexion des Fußes in der Nacht vor, sodass eine Kontraktion der Faszie verhindert und die morgendlichen Schmerzen reduziert werden können.[9,22]

Häufig werden über Tag Einlegesohlen verwendet, welche in festes Schuhwerk eingesetzt werden und mit einer Aussparung im Bereich des plantaren Fersenspornes versehen sind.[22] So kann der Überbeanspruchung der Faszie entgegengewirkt und der Schmerz beim Gehen vermindert werden. Auch diese Möglichkeit der Behandlung erfordert die Compliance des Patienten, da die Einlagen und Schienen dauerhaft angewendet werden müssen, um einen signifikanten Effekt zu erzielen.

Eine kurzfristige, nebenwirkungsreichere Methode zur Reduktion der Symptomatik ist die Injektion von Steroiden in die plantare Faszie.[7,8,22] Allerdings birgt diese das Risiko der Atrophie des plantaren Fettpolsters sowie der Ruptur der Faszie. Das Risiko der Ruptur kann jedoch durch die Injektion im Bereich des medialen Anteils der Ferse vermindert werden.[1]

Für Patienten, bei denen die konservativen Therapieoptionen erfolglos bleiben, eröffnet sich auch die Möglichkeit zur ESWT (extracorporeal shock wave therapy).[9,22] Bei dieser Methode werden energetische Stoßwellen (mechanisch-akustische Impulse) in das Gewebe gesendet, welche dort einen Gewebsschaden verursachen. Dieser wiederum stimuliert Neovaskularisierung, also die Neubildung von Gefäßen, und die Heilung mittels lokaler Wachstumsfaktoren. Es besteht jedoch das Risiko einer dauerhaften Schädigung der plantaren Faszie bei Applikation von zu hochenergetischen Impulsen.

Letztlich bleibt für Patienten, deren Beschwerden auf konservative Therapiemethoden dauerhaft (>1 Jahr) nicht ansprechen, die Möglichkeit der Operation.[9,22] Intraoperativ erfolgt die Fasziotomie von weniger als der Hälfte der Faszie, da sonst das Risiko bestünde, das Längsgewölbe zu kompromittieren. Eine Abtragung der Ossifikation hat sich als nicht sinnvoll erwiesen, da in Studien gezeigt werden konnte, dass in circa der Hälfte der Fälle der knöcherne Anbau sich nicht in derselben Gewebsschicht wie die plantare Faszie befand, was die Vermutung zulässt, dass er nicht immer kausal für die Ausprägung der Symptomatik verantwortlich gemacht werden kann.

2.8 Stellenwert der Radiatio

In diesem Kapitel soll gesondert auf die gängige Therapiemethode der lokalen Bestrahlung der Plantarfasziitis eingegangen werden, da sie für diese Arbeit in besonderem Maße relevant ist.

Die Radiatio der Plantarfasziitis hat sich in den vergangenen Jahren als eine sehr vielversprechende, nebenwirkungsarme Option herausgestellt, welche für den Patienten aufgrund des geringen Aufwands und der guten Wirkung von großem Vorteil sein kann.[12,29,33] Dabei sollte nach Ansicht der Autoren in den ersten 6 Monaten nach Auftreten der Symptomatik mit der Strahlentherapie begonnen werden.[24]

Strahlenbiologische Untersuchungen haben gezeigt, dass niedrige Dosen einer ionisierenden Strahlung eine Entzündungshemmung und damit Schmerzlinderung bewirken können. Die Wirkmechanismen sind noch nicht vollständig verstanden, bisherige Daten deuten darauf hin, dass eine Beeinflussung der Makrophagenfunktion, der Apoptose und der Zytokinsekretion hierfür verantwortlich sein können. Verminderte Adhärenz der Makrophagen am Endothel. Zunahme des aktivitätsinduzierten Zelltodes in polymorphnukleären Zellen. Verminderung der Adhäsion von Granulozyten an Endothelzellen. Maximum dieser antientzündlichen Effekte liegen bei einer Einzeldosis von 0,3-0,7 Gy.[2,15,30]

Leitlinienkonform (S2k-Leitlinie der DEGRO (Deutsche Gesellschaft für Radioonkologie)) [25] wird die Strahlentherapie nach einer Schmerzdauer von minimal drei Monaten (in dieser Zeit sollten orthopädische Standardtherapiemethoden ausgenutzt sein) mit einer Gesamtdosis von 3-6 Gy bei zweimal wöchentlichen Einzelfraktionen a 0,5-1 Gy durchgeführt. Die Bestrahlung erfolgt entweder mittels Orthovolttherapie über ein plantares Stehfeld oder mittels Megavolttherapie über seitliche Gegenfelder, wobei die Dosis auf den ICRU-Referenzpunkt in der Mitte der Fersen normiert wird. Zur Anwendung kommen hier Photonen der Grenzenergie 4 oder 6MV eines Linearbeschleunigers. In dieser Studie wurde ausschließlich Megavolttherapie durchgeführt.

Patienten im Alter von unter 30 Jahren sollten aus Überlegungen des Strahlenschutzes (geringe Belastung der Gonaden, Cancerogenität) möglichst nicht behandelt werden. Hier sind gelegentlich z.B. bei jungen Berufssportlern mit entsprechenden Beschwerden anderweitige ethische Abwägungen durchzuführen. Patienten im Alter zwischen 30 und 40 Jahren sollten nach Ausschöpfung der konservativen Behandlungsmöglichkeiten strahlentherapiert werden.[25]

Zahlreiche retrospektive Daten zeigen die gute Effektivität der Strahlentherapie.[25] Niewald et al. konnten 2012 die Überlegenheit einer Dosis von 6.0 Gy gegenüber einer solchen von 0.6 Gy zeigen und somit die Wirksamkeit der Strahlentherapie nachweisen. Heyd et al. (2001) und Ott et al. (2013/2014) zeigten die Äquieffektivität einer Strahlentherapie mit einer Gesamtdosis von 3 Gy mit einer zur damaligen Zeit Standarddosierung von 6 Gy. [26–28] Danach wurde im allgemeinen Konsens die Gesamtdosis auf 3.0 Gy festgelegt.



Abb. 2 Orthovolt-Strahlentherapie der Plantarfasziopathie [38]



Abb. 3 Moderner Linearbeschleuniger [39]



Abb.4 Simulationsbild der Strahlentherapie der Plantarfasziitis (Klinik für Strahlentherapie und Radioonkologie, UKS Homburg)

2.9 Funktion des Fußes (Gangzyklus)

Es folgt eine kurze Zusammenfassung der Funktion des Fußes und den Abrollvorgang während des aufrechten Gangs, da dies für einige der Untersuchungsmethoden dieser Studie, der statischen und der dynamischen Pedobarographie, von zentraler Bedeutung ist.

Bei dem Fuß handelt es sich um einen komplexen Teil des menschlichen Skeletts. Im Laufe der Evolution musste sich aus dem Greif- und Kletterwerkzeug ein Funktionselement entwickeln, welches den aufrechten Stand und Gang ermöglicht.[14] Dies hatte eine anatomische Modulation zur Folge, im Zuge derer sich nicht nur die Stellung der Fußknochen zueinander änderte, sondern auch die Anzahl der Knochen des Fußes.[14]

Diese Extremität ist besonders exponiert in Bezug auf Schädigungen in Form von Verletzungen der knöchernen Strukturen, Bänder und Muskeln durch zum Beispiel häufiges Umknicken, Über- und Fehlbelastung, die zu Krankheitsbildern wie unter anderem dem Hallux valgus oder der plantaren Fasziitis führen können. Zusätzlich wird der Fuß durch Alterungsprozesse in Mitleidenschaft gezogen. Mit zunehmendem Lebensalter kommt es zu einer Abflachung des Fußlängsgewölbes, einer Verringerung des plantaren Fettpolsters sowie einer Verminderung der koordinativen Beweglichkeit.

Der aufrechte Gang des Menschen setzt sich aus einer zyklischen Abfolge bestimmter Bewegungen zusammen, an der sowohl der knöcherne Teil des Fußes als auch der Bandapparat und die muskuläre Kraft beteiligt sind.[14,18] Ein Gangzyklus setzt sich aus zwei Phasen zusammen; der Standphase, die 62 % des Zyklus ausmacht und der Schwungphase, welche 38 % eines Schrittes in Anspruch nimmt. Die Standphase lässt sich noch in einen monopodalen und einen bipedalen Teil aufgliedern.[14]

In der unten eingefügten Abbildung ist der Gangzyklus schematisch dargestellt. Hier für das rechte Bein. Die bipedale Phase, also die Phase des Schrittes, in der beide Füße Bodenkontakt halten ist hier gelb dargestellt, blau die Standphase des rechten Fußes und ohne farbliche Markierung die Schwungphase, beides angelegt an den Fortschritt des Gangzyklus in Prozent. Die Phasen lassen sich noch weiter unterteilen (nach Perry 1992), was aber hier nicht gesondert angeführt wird, da es für die Auswertung dieser Studie nicht relevant ist.

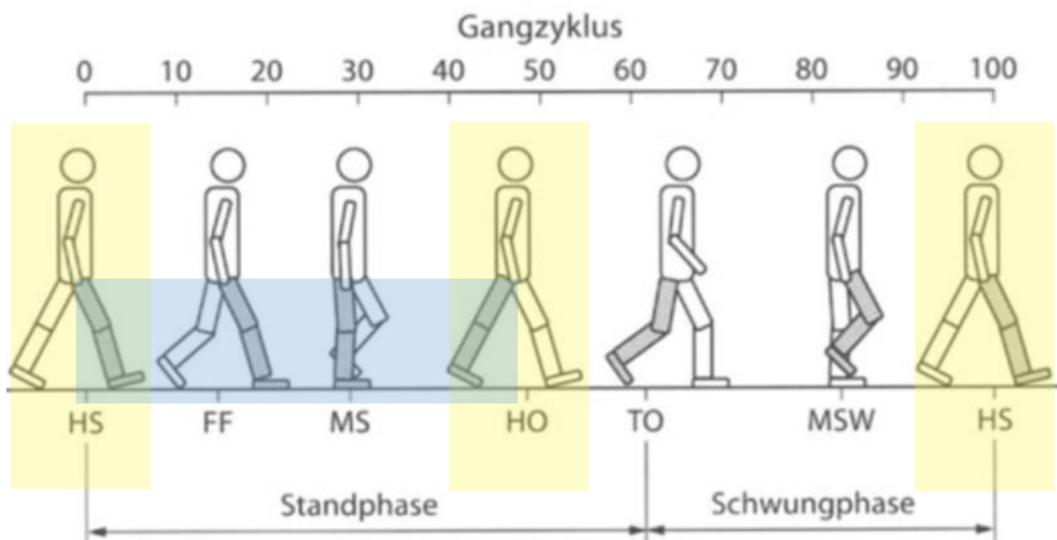


Abb. 5 Gangzyklus rechtes Bein (Abbildung aus Beckers & Deckers, „Ganganalyse und Gangschulung-Therapeutische Strategien für die Praxis“, 1997, S.19 kombiniert mit eigenen farblichen Darstellungen)

2.10 Ziel der Studie

Das Ziel der Studie ist es, die Belastung des Fußes vor und drei Monate nach Bestrahlung der Plantarfasziopathie mittels der statischen und dynamischen Pedobarographie zu messen und parallel dazu die Schmerzintensität der Patienten mittels visuellen Analogskala und Calcaneodynie-Score zu erfassen, sodass versucht werden soll, einen objektiveren Wirksamkeitsparameter als bisher zu erarbeiten.

3. Material und Methoden

3.1 Studiendesign

Es handelt sich hierbei um eine prospektive Beobachtungsstudie. Die eingeschlossenen Patienten werden über den definierten Zeitraum von drei Monaten nach Radiatio weiter beobachtet, anamnestiziert und untersucht.

3.2 Ein- und Ausschlusskriterien

Eingeschlossen wurden 30 Patienten/-innen mit Plantarfasziitis, welche den klinischen Nachweis eines plantaren Fersenspornes mit einer Anamnesedauer von ≥ 3 Monaten hatten, inklusive der typischen klinischen Symptomatik (Druckdolenz am Tuber calcanei), der typischen funktionellen Defizite (Einschränkung der schmerzfreien Gehstrecke) sowie einem radiologischen Nachweis der Ossifikation in Form eines konventionellen Röntgenbildes. Außerdem sollten die Patienten einen Karnofsky-Index von ≥ 70 % aufweisen, 40 Jahre oder älter sein und natürlich die schriftliche Einwilligung gegeben haben. Zudem war es wichtig, dass die Schuhgröße zwischen 36-40 (EU) lag, da sich die Größen des Instruments zur dynamischen Fußdruckmessung (Sohlen) in diesem Bereich bewegen.

Aus der Studie ausgeschlossen waren Patienten mit Vorerkrankungen am betroffenen Fuß, wie Traumata, Erkrankungen des rheumatischen Formenkreises, der peripheren arteriellen Verschlusskrankheit oder der schweren venösen Insuffizienz. Außerdem Patienten mit vorangegangener Radiatio in dem Bereich, Schwangere, Patientinnen in der Stillzeit und Patienten mit einer schweren psychischen Erkrankung oder einer gesetzlichen Betreuung in Gesundheitsangelegenheiten durch Fremde.

Ziel war es, ein geeignetes Patientenkollektiv zu generieren mit hoher Compliance und wenig Störfaktoren, welches sich eignete einer Strahlentherapie zugeführt zu werden, um so ein möglichst gute Widerspiegelung der zugrundeliegenden Erkrankung, der plantaren Fasziitis, in den gewählten Untersuchungsmethoden zu gewährleisten.

Alle eingeschlossenen Patienten/-innen wurden im Vorhinein vollumfänglich über die Bestrahlung, den Hintergrund der Studie, die erforderliche, durch den Patienten zu leistende Mitarbeit und über Datenschutz und -weitergabe aufgeklärt, sowie über die Möglichkeit, die Einwilligung jederzeit und ohne die Angabe von Gründen zurückziehen zu können.

3.3 Visuelle-Analog-Skala

Nach Aufklärung und Einverständnis erfolgte die Erfassung der Schmerzintensität mittels der visuellen Analogskala (nach Hayes und Patterson, 1921). [34] [16] Hierbei handelt es sich um ein gängiges Verfahren die Intensität der Beschwerden eines Patienten, unabhängig davon welche Erkrankung vorliegt und losgelöst von Sprach- und mathematischen Grundkenntnissen, zu eruieren.

Die Wertung wird anhand von Zahlen (0-10 oder 0-100) oder von Smileys vorgenommen, welche von „keinem Schmerz“ (VAS= 0, lachender Smiley) bis zu dem „stärksten vorstellbaren Schmerz“ (VAS= 100, weinender Smiley) reicht. Ein Beispiel wird im Anhang Abschnitt 9 eingefügt. Diese Erhebung der Schmerzintensität wurde insgesamt zweimal durchgeführt. Zunächst zu Beginn, vor der Bestrahlung und abschließend, drei Monate nach Bestrahlung. Eine Verringerung des Wertes auf der visuellen Analogskala bedeutet somit eine Schmerzbesserung.

3.4 Calcaneodynie-Score nach Rowe

Ebenso wurde zeitgleich eine Erfassung der Funktionseinschränkung des Fußes durch die Plantarfasziopathie mit Hilfe des Calcaneodynie-Scores vorgenommen. Der Calcaneodynie-Score nach Rowe dient zur Erfassung des Ausmaßes der Veränderung, welche durch die Schmerzhaftigkeit der Ferse verursacht wird. [31] [35] Er berechnet sich aus fünf Einzelkriterien, die jeweils je nach Ausprägung individuell bepunktet und am Ende zu einem Gesamtergebnis addiert werden. Diese sind: die Schmerzen, die Benutzung von Hilfsmitteln, die Einschränkung im Beruf, die Einschränkung im Alltag/Sport und das Gangbild. In der Summe sind maximal 100 Punkte zu erzielen, welche die vollständige Beschwerdefreiheit und die gesamte Funktionsfähigkeit ohne

etwaige Einschränkungen darstellen. Im Gegensatz dazu steht der Summenscore von 0 Punkten. Hier besteht eine komplette Funktionslosigkeit und damit massive Einschränkung in allen Bereichen des alltäglichen Lebens sowie das Vorhandensein verschiedener Schmerzqualitäten wie Belastungs-, Ruhe-, Dauer-, Nacht- und Anlaufschmerz. Diese Bestandsaufnahme erfolgt ebenso insgesamt zweimal; zu Beginn, vor der Radiatio, sowie drei Monate danach. Ein Beispiel wird ebenfalls im Anhang Abschnitt 9 eingefügt. Eine Zunahme des Calcaneodynie-Scores bedeutet somit eine Befundbesserung.

3.5 Fußdruckmessung

Zur Ganganalyse wird zum einen eine statische Pedobarographie, mit einer Stand- und einer Gangphase, und zum anderen eine kontinuierliche, dynamische Methode, mit einem standardisiertem Gangparcours, verwendet.

3.5.1 Dynamische Messung

Bei der dynamischen Fußdruckmessung erfolgt die Erfassung der Daten mittels Einlegesohlen (OpenGO, Motionicon), welche in das Schuhwerk des Patienten eingelegt werden.[40] Hier ist es besonders wichtig, dass sowohl die richtige Größe der Sohlen gewählt wird, als auch das richtige Schuhwerk. Es sollte sich um feste, gut sitzende Schuhe handeln, beispielsweise Turnschuhe, um eine möglichst genaue Messung zu gewährleisten. Die Messung erfolgt hier mit 16 Drucksensoren mit variierbarer Abtastfrequenz 10-100 Hz. Aufgenommene Parameter sind hier unter anderen die „Bounding Box anterior-posterior/medial-lateral“, die durchschnittliche Abweichung der Druckmittelpunkte nach anterior/posterior beziehungsweise medial/lateral. Der Parameter „COP Velocity“, stellt die Geschwindigkeit der Veränderung des „Center of Pressure“, des plantaren Druckschwerpunktes dar. Der Parameter „COP STD“ beschreibt die Standardabweichung des plantaren Druckschwerpunktes. Der Parameter „AVG/MAX Total Force“, spiegelt während der Standphasen die durchschnittliche beziehungsweise maximale „Ground Reaction Force“ wider, also die Bodenreaktionskraft. Genauer also die Kraft, welche beim Gang von dem gemessenen Fuß auf den Untergrund übertragen wird. Der Parameter „Cadence“ zeigt die Schrittfrequenz an. „Double Support Time“, beschreibt die Zeit, in der das Gewicht von beiden Füßen getragen wird und in der somit beide Füße Bodenkontakt aufweisen. Der Parameter „Stance Time“, beschreibt die Zeit, in der die Position eines Fußes nicht geändert wird.

Gait Report

Name
Date of birth
Date 20.12.2016, 09:42:04

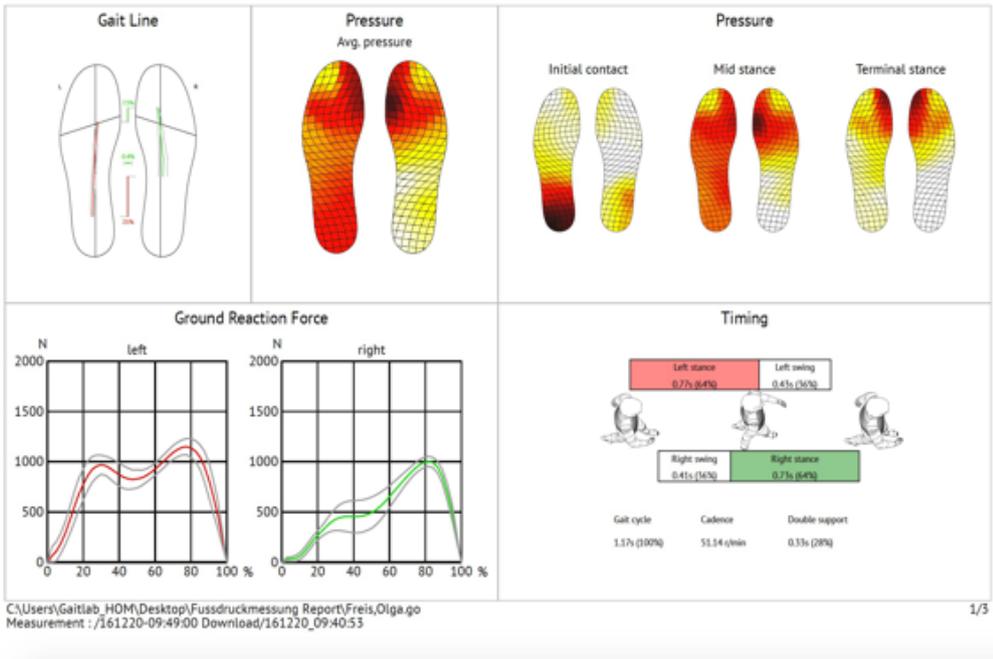


Abb.6 Gait Report, dynamische Fußdruckmessung, OpenGO, Moticon, exemplarisch von einem Studienpatienten im UKS in Homburg



Abb.7 dynamische Fußdruckmessung, Sohlen, Moticon, Unfallchirurgie, UKS in Homburg

3.5.2 Statische Messung

Die statische Pedobarographie erfolgt mittels einer stationären Kraftmessplatte (FMD-S®; Zebris®). Hier werden eine 10-sekündige Standphase sowie fünf Schritte pro Extremität aufgezeichnet. Das System arbeitet mit 2560 Sensoren und einer Abtastrate von 120 Hz. Übermittelt und verarbeitet werden die erfassten Daten über das Programm Zebris®. Die für diese Arbeit relevanten, aufgenommenen Parameter sind unter anderem die „Gait Line Length“, welche die translationale Veränderung des Druckschwerpunktes des Fußes während der Standphase beschreibt. Ein weiterer wichtiger Parameter ist die „Contact Time“, die Kontaktzeit des Fußes mit der Platte. Der Parameter „Max Force Heel Strike/Toe Off“ beschreibt die maximale Kraft beim Aufsetzen der Ferse beziehungsweise beim Abheben der Zehen. „COP Sway Area“ ist ein Parameter, der den Pendelbereich des „Center of Pressure“, also des plantaren Druckschwerpunktes abbildet. Die „COP Velocity“ stellt die Geschwindigkeit der Veränderung des „Center of Pressure“, des plantaren Druckschwerpunktes dar, welche somit den Abrollprozess beschreibt. Der Parameter „Total Load Distribution/Load Distribution Heel“, bildet die Verteilung der Last über den ganzen Fuß beziehungsweise über die Ferse ab.



Abb. 8 statische Fußdruckmessung, Kraftmessplatte, Unfallchirurgie, UKS in Homburg

3.6 Radiatio

Die Strahlentherapie wird leitlinienkonform (Zitat DEGRO Leitlinie 2018) mit einer Gesamtdosis von 3 Gy bei zweimal wöchentlichen Einzelfractionen a 0,5 Gy durchgeführt. Angewendet wird eine Photonenstrahlung der Grenzenergie 6 MV in Gegenfeldtechnik. Das Zielvolumen umfasst die gesamte Plantaraponeurose von der dorsalen Begrenzung des Calcaneus bis in den Mittelfuß. Das Zielvolumen wird durch Aufnahmen am Gerät dokumentiert.

Es besteht die Möglichkeit einer Re-Radiatio nach frühestens drei Monaten, falls es nicht zu einer suffizienten Reduktion der Symptome oder Verbesserung der Funktionalität der betroffenen Extremität gekommen ist.[32]

In Studien hat sich diese Form der Behandlung als sehr effiziente und nebenwirkungsarme Methode herausgestellt. Typische unerwünschte Wirkungen können die initiale Verstärkung von Schmerzen (ungünstiger prognostischer Faktor) sein, aber auch eine kurzzeitige Funktionseinschränkungen, sowie ein minimales Risiko für maligne Neubildungen im bestrahlten Bereich, wobei die Wahrscheinlichkeit hierfür sehr gering ist.[32]

3.7 Statistische Auswertung

In der statistischen Auswertung werden Korrelationskoeffizienten genutzt, um die Beziehung zweier Variablen zueinander zu beschreiben.

Die hier verwendeten sind zum einen, Kendall's Tau, ein Rangkorrelationskoeffizient, welcher den Unterschied in den Rängen nutzt. Gut verwendbar bei kleineren Stichproben.

Zum anderen, Spearman's Rho, ein Rangkorrelationskoeffizient, welcher auch die Differenz der Ränge nutzt. Die Korrelation wird anhand zuvor vergebener Ränge berechnet, wobei der genaue Abstand der Datenpunkte nicht relevant ist.

4. Ergebnisse

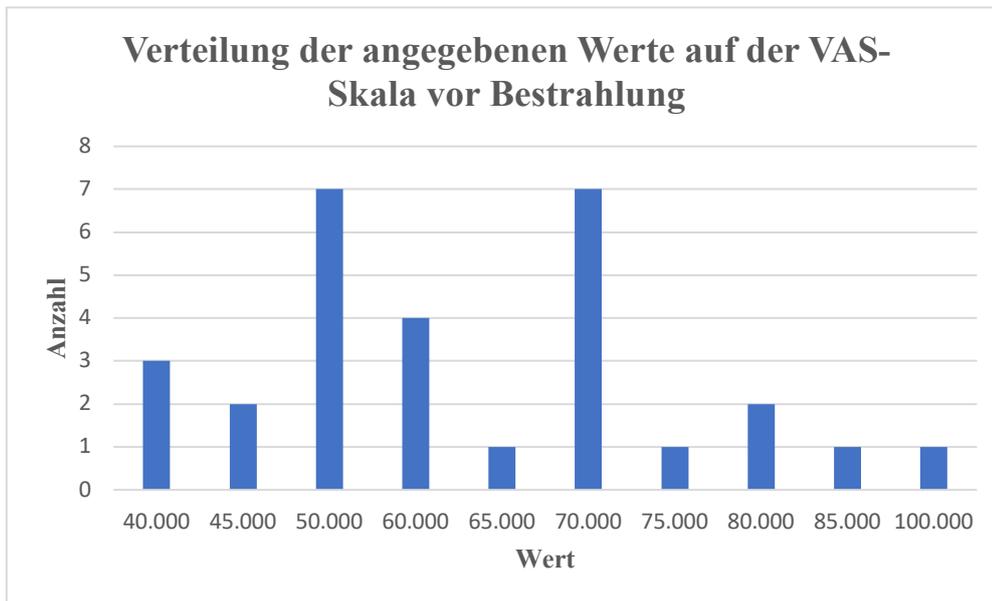


Abb.9 Verteilung angegebenen Werte auf der VAS-Skala vor Bestrahlung

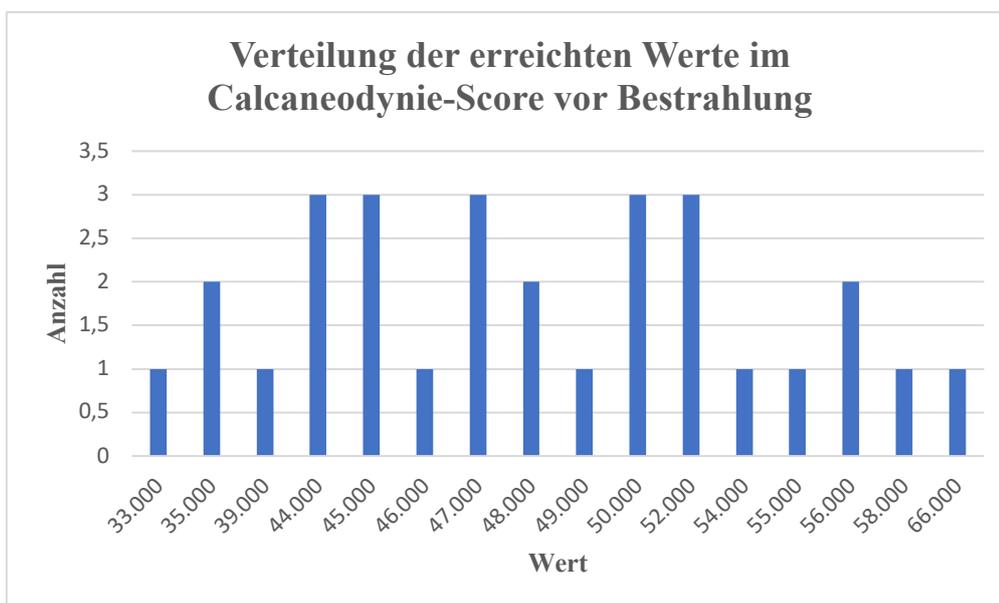


Abb.10 Verteilung der erreichten Werte im Calcaneodynie-Score vor Bestrahlung

Bei der Betrachtung der Scores zeigt sich, dass zum Zeitpunkt vor Bestrahlung die meisten Patienten in etwa 50 Punkte (10 % der Values zwischen 45-52) in dem Calcaneodynie-Score erreichen. Drei Monate nach Radiatio dann 95 (17.86 %, 10 Values). Ähnliche Ergebnisse finden sich bei der visuellen Analog-Skala. Hier geben 24 % beziehungsweise 14 % der Patienten Werte von 5 beziehungsweise 7 von 10 zum Zeitpunkt vor der

Bestrahlung an. Drei Monate danach liegt die häufigste Angabe (35,71 %) bei 0, gefolgt von 4 von 10 bei 21,43 % der Patienten.



Abb.11 Verteilung der angegebenen Werte auf der VAS-Skala nach Bestrahlung

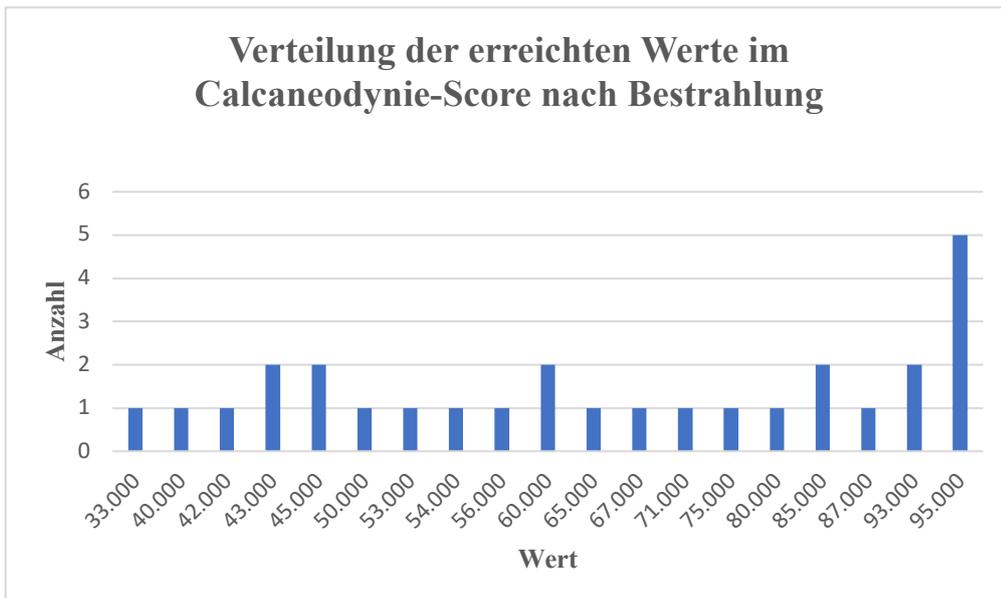


Abb.12 Verteilung der erreichten Werte im Calcaneodynie-Score nach Bestrahlung

Vergleicht man nun die Ergebnisse der visuellen Analog-Skala der 28 eingeschlossenen Patienten von drei Monaten nach Radiatio mit denen davor, so zeigt sich eine Verbesserung um 30 Punkte bei 14 % und bei je 10,71 % um 40 beziehungsweise 80 Punkte. Bei 24 von 28 Patienten kam es durch die Bestrahlung zu einer Schmerzreduktion, bei zwei Patienten blieben die Beschwerden gleich und bei zwei Patienten kam es zu einer Verstärkung des Schmerzes.

Der Calcaneodynie-Score zeigt ähnliche Ergebnisse. Hier kam es bei 21 Patienten zu einer Erhöhung der Funktionalität und einer Verminderung der Beschwerden, bei einem Patienten blieb das Ergebnis gleich, bei sechs Patienten kam es zu einer Verschlechterung der Fußfunktionalität. Bei 10,71 % erhöhte sich der Score um 28 Punkte, bei je 7,14 % um 46 beziehungsweise 52 Punkte. Ein Patient zeigte eine Verbesserung um 62 Punkte, ein Patient eine Verschlechterung um 26 Punkte.

Im Durchschnitt wurden im Calcaneodynie-Score vor Radiatio 48 Punkte (SD: 7,13) erreicht. Der kleinste angegebene Wert betrug 33, der höchste 66 Punkte. Drei Monate nach Bestrahlung lag das durchschnittliche Ergebnis bei 67,85 Punkten (SD: 21,1). Es wurden mindestens 33 und maximal 95 Punkte erreicht. Somit kam es zu einer Veränderung um 19,82 Punkte (SD: 22,92). Maximalwerte waren eine Erniedrigung um 26 Punkte und Erhöhung um 62 Punkte.

Bei der visuellen Analog-Skala wurden vor Bestrahlung durchschnittlich 61,2 Punkte angegeben (SD: 14,98), mindestens 40 und maximal 100. Drei Monate nach Bestrahlung lag der Durchschnittswert bei 24,75 (SD: 25,46), der Kleinste bei 0, der Größte bei 78. Dies zeigt im Verlauf eine Veränderung um 36,5 (SD: 30,6). Extremwerte waren eine Erniedrigung um 100 Punkte, beziehungsweise eine Erhöhung des Wertes um 30 Punkte.

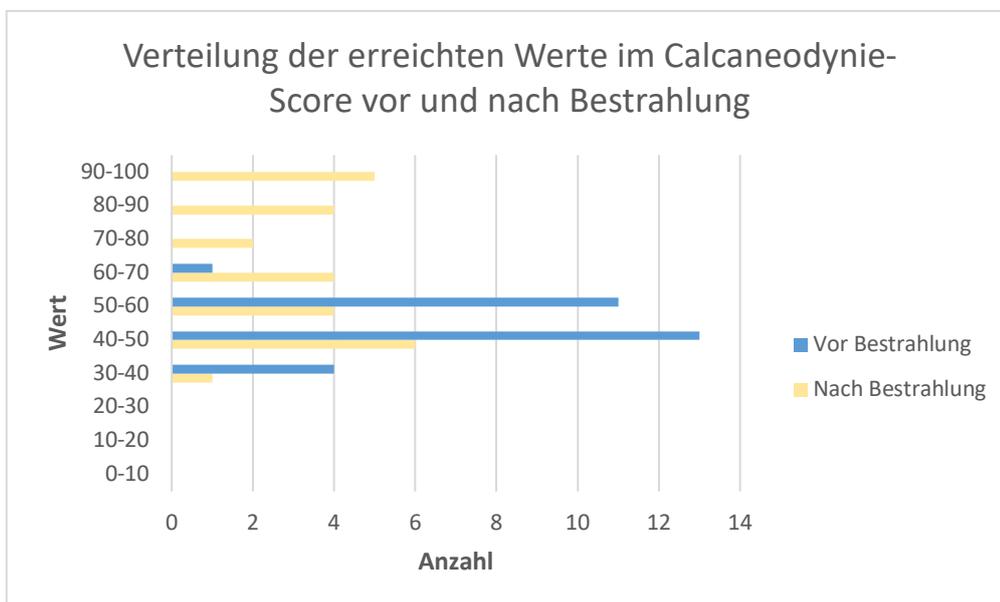


Abb. 13 Verteilung der erreichten Werte im Calcaneodynie-Score vor und nach Radiatio

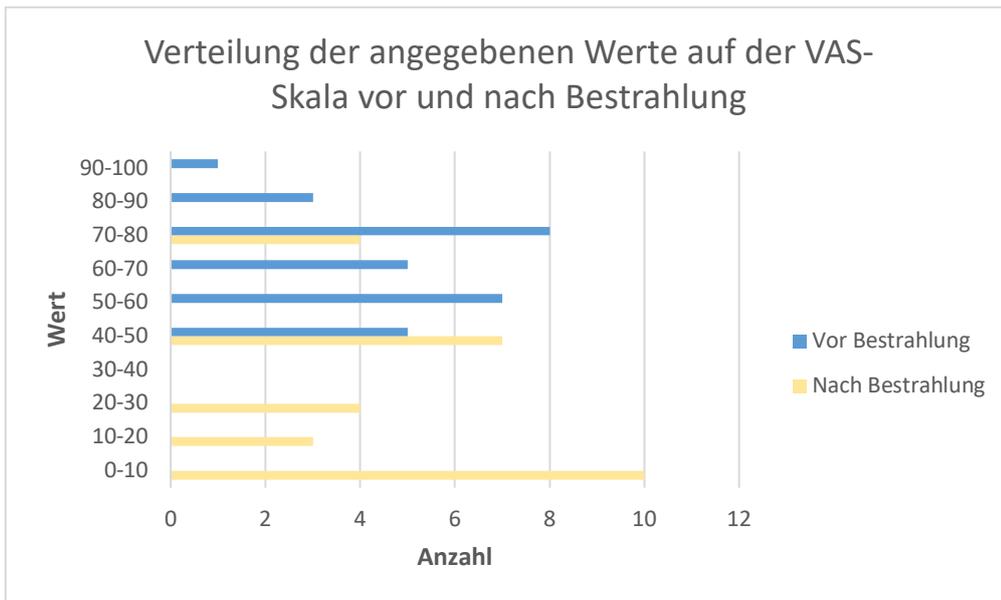


Abb. 14 Verteilung der angegebenen Werte auf der visuellen Analogskala vor und nach Radiatio

Betrachtet man die Daten der dynamischen Pedobarographie von vor der Bestrahlung in Bezug auf die Variable "Bounding Box", die durchschnittliche Abweichung der Druckmittelpunkte, ergibt sich sowohl medial/lateral als auch anterior/posterior keine Korrelation zu Visueller-Analog-Skala oder Calcaneodynie-Score (Abb.15). Medial/Lateral liegt der p-Wert bei 0.48 bzw. 0.991 (wählt man die Differenz) und 0.716 bzw. 0.73 (wählt man den Quotienten). In anteriorer/posteriorer Ausrichtung bei 0.352 bzw. 0.096 (Differenz) und 0.443 beziehungsweise 0.112 (Quotient).

| Anzahl/ Fehlende Spearman's rho Kendall's tau | VAS vor Radiatio | CS vor Radiatio |
|--|--|---|
| Bounding box anterior-posterior Differenz | 21/8 .214 (p=.352) .157 (p=.334) | 21/8 .372 (p=.096) .293 (p=.068) |
| Bounding box anterior-posterior Quotient | 21/8 .177 (p=.443) .147 (p=.368) | 21/8 .357 (p=.112) .273 (p=.089) |
| Bounding box medial-lateral Differenz | 21/8 .163 (p=.480) .127 (p=.440) | 21/8 -.003 (p=.991) .000 (p>.999) |

| | | |
|---|--|--|
| Bounding box medial-lateral Quotient | 21/8 .084 (p=.716) .096 (p=.563) | 21/8 .080 (p=.732) .049 (p=.781) |
|---|--|--|

Abb.15 Der Parameter „Bounding box“ vor Bestrahlung

| Anzahl/ Fehlende Spearman´s rho Kendall´s tau | VAS vor Radiatio | CS vor Radiatio |
|---|--|--|
| Center Pressure Sway Area anterior-posterior Difference | 21/8 -.015 (p=.950) -.005 (p>.999) | 21/8 -.139 (p=.548) -.107 (p=.516) |
| Center of Pressure Sway Area anterior-posterior Quotient | 21/8 -.048 (p=.836) -.036 (p=.847) | 21/8 -.151 (p=.513) -.117 (p=.477) |

Abb.16 Der Parameter „Center of Pressure Sway Area“ vor Bestrahlung

Die Geschwindigkeit der Veränderung des plantaren Druckschwerpunktes, die „Center of Pressure Sway Area anterior-posterior“ zeigt keinen statistisch signifikanten Zusammenhang mit der VAS oder des CS, p-Werte von 0.95 bzw. 0.548 (Differenz) und 0.836 bzw. 0.513 (Quotient) (Abb.16).

| Anzahl/ Fehlende Spearman´s rho Kendall´s tau | VAS vor Radiatio | CS vor Radiatio |
|--|--|--|
| Average Total Force Differenz | 25/4 -.071 (p=.735) -.061 (p=.689) | 25/4 -.116 (p=.582) -.075 (p=.615) |
| Average Total Force Quotient | 25/4 -.018 (p=.932) -.021 (p=.901) | 25/4 -.153 (p=.466) -.092 (p=.535) |

Abb.17 Der Parameter „Average Total Force“ vor Bestrahlung

Zwischen „Average Total Force“, der durchschnittlichen „Ground Reaction Force“, die Bodenreaktionskraft, die Kraft, welche beim Gang von dem gemessenen Fuß auf den Untergrund übertragen wird, und VAS bzw. CS

zeigt sich vor Bestrahlung keine Korrelation. Die p-Werte sind hier bei 0.735 bzw. 0.582 (Differenz) und 0.932 bzw. 0.466 (Quotient) (Abb.17).

| Anzahl/ Fehlende Spearman's rho Kendall's tau | VAS vor Radiatio | CS vor Radiatio |
|--|--|---|
| Cadence | 24/5 .564 (p=.004) .429 (p=.004) | 24/5 -.017 (p=.939) .007 (p=.980) |

Abb.18 Der Parameter „Cadence“ vor Bestrahlung

Eine statistisch signifikante Korrelation findet man zwischen der „Cadence“, der Schrittfrequenz, und der Visuellen-Analog-Skala (p-Wert: 0.004), nicht jedoch mit dem Calcaneodynie-Score (p-Wert: 0.939) (Abb.18).

| Anzahl/ Fehlende Spearman's rho Kendall's tau | VAS vor Radiatio | CS vor Radiatio |
|--|--|--|
| Double Support Time | 24/5 -.386 (p=.062) -.286 (p=.054) | 24/5 .328 (p=.118) .252 (p=.089) |

Abb.19 Der Parameter „Double Support Time“ vor Bestrahlung

Zudem zeigte sich keine statistisch signifikante Korrelation, jedoch eine Tendenz zwischen „Double Support Time“, der Zeit, in beide Füße das Körpergewicht tragen, und der Visuellen-Analog-Skala, (p-Wert: 0.062). Wieder ist dies nicht zusammenhängend mit dem Calcaneodynie-Score, (p-Wert: 0.118) (Abb.19).

| Anzahl/ Fehlende Spearman's rho Kendall's tau | VAS vor Radiatio | CS vor Radiatio |
|--|--|--|
| Stance Time Differenz | 24/5 .188 (p=.378) .144 (p=.339) | 24/5 .003 (p=.989) .023 (p=.894) |

| | | |
|---------------------------------|---------------|---------------|
| Stance Time Quotient | 24/5 | 24/5 |
| | .177 (p=.409) | .005 (p=.982) |
| | .130 (p=.390) | .035 (p=.833) |

Abb.20 Der Parameter „Stance Time“ vor Bestrahlung

In Bezug auf die „Stance-Time“, Zeit in der die Position des Fußes nicht geändert wird, zeigt sich ebenfalls keine Korrelation (Abb.20). Hier p-Werte von 0.378 bzw. 0.989 (Differenz) und 0.409 bzw. 0.982 (Quotient).

| Anzahl/ Fehlende Spearman's rho Kendall's tau | VAS vor Radiatio | CS vor Radiatio |
|--|--|--|
| Center of Pressure Sway Area medial-lateral Differenz | 21/8 .228 (p=.318) .117 (p=.479) | 21/8 .116 (p=.616) .107 (p=.516) |
| Center of Pressure Sway Area medial-lateral Quotient | 21/8 .224 (p=.328) .147 (p=.368) | 21/8 .085 (p=.713) .049 (p=.781) |

Abb.21 Der Parameter „Center of Pressure Sway Area“ vor Bestrahlung

Betrachtet man die Daten der statischen Fußdruckmessung von vor der Bestrahlung zeigt der Parameter „Center of Pressure Sway Area“, der Pendelbereich des plantaren Druckschwerpunktes in mediolateraler Richtung keinen Zusammenhang zu VAS bzw. dem CS, die p-Werte liegen bei 0.318 bzw. 0.616 (Differenz) und 0.328 bzw. 0.713 (Quotient) (Abb.21).

| Anzahl/ Fehlende Spearman's rho Kendall's tau | VAS nach Radiatio | CS nach Radiatio |
|--|--|---|
| Center of Pressure Velocity Differenz | 21/8 .019 (p=.935) .015 (p=.948) | 21/8 .189 (p=.412) .126 (p=.442) |
| Center of Pressure Velocity Quotient | 13/16 .013 (p=.966) -.030 (p=.943) | 13/16 .329 (p=.272) .210 (p=.350) |

Abb.22 Der Parameter „Center of Pressure Velocity“ nach Bestrahlung

Drei Monate nach Bestrahlung zeigt der Parameter der dynamischen Pedobarographie „Center of Pressure Velocity“, der Veränderung des plantaren Druckschwerpunktes und der VAS-Skala, beziehungsweise dem Calcaneodynie-Score nach Bestrahlung gibt es keine Korrelation (p-Wert: 0.935, p-Wert: 0, 412) (Abb.22).

| Anzahl/ Fehlende Spearman´s rho Kendall´s tau | VAS nach Radiatio | CS nach Radiatio |
|--|--|--|
| Average Total Force Differenz | 20/9 -.279 (p=.233) -.214 (p=.199) | 20/9 .441 (p=.052) .313 (p=.058) |

Abb.23 Der Parameter „Average Total Force“ nach Bestrahlung

Das gleiche gilt für die VAS-Skala und die „Average Total Force“ (p-Wert: 0.233). Zwischen dieser und dem Calcaneodynie-Score besteht jedoch eine Korrelation (p-Wert: 0.052) (Abb.23).

| Anzahl/ Fehlende Spearman´s rho Kendall´s tau | VAS nach Radiatio | CS nach Radiatio |
|--|--|--|
| Max Total Force Differenz | 20/9 -.325 (p=.161) -.248 (p=.136) | 20/9 .351 (p=.129) .260 (p=.116) |

Abb.24 Der Parameter „Max Total Force“ nach Bestrahlung

Zwischen „Max Total Force“, also der maximal ausgeübten Kraft, und der VAS-Skala sowie dem Calcaneodynie-Score nach Bestrahlung gibt es keinen Zusammenhang (p-Wert: 0.161, p-Wert: 0,129) (Abb.24).

| Anzahl/ Fehlende Spearman´s rho Kendall´s tau | VAS nach Radiatio | CS nach Radiatio |
|--|--|--|
| Double Support Time | 20/9 .173 (p=.467) .137 (p=.420) | 20/9 -.223 (p=.345) -.145 (p=.390) |

Abb. 25 Der Parameter „Double Support Time“ nach Bestrahlung

Ebenso korreliert der Parameter „Double Support Time“ nicht mit den Angaben auf der VAS-Skala oder dem Calcaneodynie-Score nach Radiatio (p-Wert: 0,467, p-Wert: 0,345) (Abb.25).

Bezüglich der Daten der statischen Pedobarographie drei Monate nach Bestrahlung lässt sich keine statistisch signifikante Korrelation zwischen dem Parameter „Center of Pressure Sway Area medio-lateral“ und der VAS-Skala sowie des Calcaneodynie-Scores darstellen (p-Wert: 0,470, p-Wert: 0,269) (Abb.26).

| Anzahl/ Fehlende Spearman's rho Kendall's tau | VAS nach Radiatio | CS nach Radiatio |
|--|---|---|
| Center of Pressure Sway Area medial-lateral Differenz | 21/8 .167 (p=.470) .143 (p=.381) | 21/8 -.252 (p=.269) -.173 (p=.286) |
| Center of Pressure Sway Area medial-lateral Quotient | 18/11 .141 (p=.577) .094 (p=.616) | 18/11 -.229 (p=.361) -.169 (p=.347) |

Abb.26 Der Parameter "Center of Pressure Sway Area" nach Bestrahlung

Wenn man nun die Daten, welche zu den beiden Zeitpunkten, also vor Bestrahlung sowie drei Monate danach, erhoben wurden, vergleichen möchte, kann man sich die Zusammenhänge der Veränderung der Werte mittels deren Differenz voneinander anschauen. Hier ergibt sich sowohl bei der Betrachtung des Calcaneodynie-Scores, als auch der Visuellen Analogskala bei der dynamischen Pedobarographie kein statistisch signifikanter Zusammenhang.

| Anzahl/ Fehlende Spearman's rho Kendall's tau | VAS-Skala | Calcaneodynie-Score |
|--|---|---|
| Bounding Box Length Differenz | 16/13 -.068 (p=.803) -.085 (p=.680) | 16/13 .202 (p=.454) .134 (p=.496) |

| | | |
|-------------------------------------|---|---|
| Bounding Box Width Differenz | 16/13 -.177 (p=.512) -.119 (p=.552) | 16/13 .467 (p=.068) .303 (p=.112) |
|-------------------------------------|---|---|

Abb.27 Die Parameter „Bounding Box Length“ und „Bounding Box Width“

Dies zeigt sich bei dem Parameter „Bounding Box Length“ (p-Wert: 0,803, p-Wert: 0,454) sowie dem Parameter „Bounding Box Width“ (p-Wert: 0,512, p-Wert: 0,068) (Abb.27).

| Anzahl/ Fehlende Spearman's rho Kendall's tau | VAS-Skala | Calcaneodynie-Score |
|--|--|--|
| Cadence | 20/9 -.085 (p=.723) -.102 (p=.553) | 20/9 .023 (p=.922) .005 (p>.999) |

Abb.28 Der Parameter „Cadence“

Des Weiteren zeigt sich keine statistisch signifikante Korrelation zwischen dem Parameter „Cadence“ (p-Wert: 0,723, p-Wert: 0,922) und der VAS-Skala beziehungsweise dem Calcaneodynie-Score (Abb.28).

| Anzahl/ Fehlende Spearman's rho Kendall's tau | VAS-Skala | Calcaneodynie-Score |
|--|---|---|
| Stance Time Differenz | 19/10 .375 (p=.114) .299 (p=.080) | 19/10 -.039 (p=.873) -.048 (p=.800) |
| Stance Time Quotient | 19/10 .409 (p=.082) .322 (p=.059) | 19/10 -.065 (p=.792) -.072 (p=.693) |

Abb.29 Der Parameter „Stance Time“

Der Parameter „Stance Time“ weist keine Korrelation zu VAS-Skala oder dem „Calcaneodynie-Score“ (p-Wert: 0,114, p-Wert: 0,873) auf (Abb.29).

| Anzahl/ Fehlende Spearman´s rho Kendall´s tau | VAS-Skala | Calcaneodynie-Score |
|--|---|---|
| Center of Pressure Sway Area medial-lateral Differenz | 16/13 .027 (p=.922) .017 (p=.963) | 16/13 .312 (p=.239) .202 (p=.296) |

Abb.30 Der Parameter „Center of Pressure Sway Area medial-lateral“

Ebenfalls keine statistisch signifikante Korrelation zwischen dem Parameter der statischen Pedobarographie „Center of Pressure Sway Area medio-lateral“ (p-Wert: 0.922, p-Wert: 0,239) und der VAS-Skala sowie dem Calcaneodynie-Score (Abb. 30).

| Anzahl/ Fehlende Spearman´s rho Kendall´s tau | VAS-Skala | Calcaneodynie-Score |
|---|---|---|
| Center of Pressure Sway Area anterior-posterior Difference | 16/13 -.114 (p=.675) -.017 (p=.963) | 16/13 .060 (p=.824) .050 (p=.820) |

Abb.31 Der Parameter „Center of Pressure Sway Area anterior-posterior“

Bezüglich des Parameters “Center of Pressure Sway Area anterior-posterior“ (p-Wert: 0.675, p-Wert: 0,824) zeigt sich ebenfalls keine Korrelation zur Visuellen Analog-Skala oder dem Calcaneodynie-Score (Abb. 31).

| Anzahl/ Fehlende Spearman´s rho Kendall´s tau | VAS-Skala | Calcaneodynie-Score |
|--|---|---|
| Center of Pressure Velocity Differenz | 16/13 -.176 (p=.516) -.136 (p=.492) | 16/13 .336 (p=.203) .202 (p=.296) |

Abb. 32 Der Parameter „Center of Pressure Velocity“

Zudem zeigt sich keine Korrelation zwischen dem Parameter „Center of Pressure Velocity“ (p-Wert: 0.516, p-Wert: 0,203) und der VAS-Skala beziehungsweise dem Calcaneodynie-Score (Abb.32).

5. Diskussion

Die Wirkung der Strahlentherapie bei der schmerzhaften plantaren Fasziitis lässt sich in dieser Studie durch statische und dynamische Pedobarographie nicht objektivieren. Es zeigten sich keine statistisch signifikanten Korrelationen zwischen den vor und nach Bestrahlung gemessenen Parametern und der bislang als Standard zur Evaluation der Wirkung der Strahlentherapie der schmerzhaften plantaren Faszioopathie verwendeten Visuellen-Analogskala und dem Calcaneodynie-Score nach Rowe.

Betrachtet man die Daten der Visuellen-Analog-Skala, so spiegelt sich die Wirksamkeit der Radiatio der schmerzhaften plantaren Faszioopathie wider. Hier werden drei Monate nach Bestrahlung durchschnittlich geringere Punktzahlen erreicht als zuvor.

Ähnliches findet man bei der Betrachtung der Daten des Calcaneodynie-Scores nach Rowe. Auch hier zeigt sich die Wirksamkeit der Radiatio der plantaren Fasziitis. So werden nach Bestrahlung höhere Punktzahlen im Score erreicht, als zuvor. Es kommt also zu einer geringeren Einschränkung der betroffenen Extremität als vor der Bestrahlung.

Die beiden sich ergebenden Korrelationen der Daten vor Bestrahlung rühren daher, dass die verschiedenen Parameter der statischen und dynamischen Pedobarographie jeweils einzelne Aspekte der Fußfunktionalität widerspiegeln. Daher ergibt sich der Zusammenhang zu VAS-Skala und Calcaneodynie-Score. Bei geringen Schmerzen und hoher Funktionalität der betroffenen Extremität kommt es zu geringer Einschränkung der Bewegungsabläufe, sodass mehr Bewegung und höhere Belastung möglich werden.

Der Parameter „Cadence“ korreliert in den Daten vor Bestrahlung mit der Visuellen-Analog-Skala. Ein Erklärungsansatz hierfür könnte sein, dass bei starken Schmerzen die Schrittfrequenz entsprechend höher ist, um die betroffene Extremität nur kurz zu belasten.

Die positive Korrelation der Variable „Average Total Force“ und dem Calcaneodynie-Score vor Bestrahlung ergibt sich daher, dass eine hohe durchschnittlich gemessene Kraft, welche durch die Extremität auf den Untergrund übertragen wird, entsprechend eine hohe Funktionalität dieser Extremität erwarten lässt. Daher ist die

Einschränkung der betroffenen Extremität gering und es werden im Calcaneodynie-Score hohe Punktzahlen erreicht.

Die erfassten Parameter der Pedobarographie stellen eine Momentaufnahme dar und sind abhängig von dem aktuellen Allgemeinzustand des Patienten, dessen „Fitness“ und der Tagesform. War der Patient vorher schon aktiv, ist möglicherweise zur Klinik gelaufen und hat damit den betroffenen Fuß schon (übermäßig) belastet oder ist er generell sehr aktiv und belastet viel und regelmäßig?[19] Daher könnte es sein, dass ein Patient, der die betroffene Extremität schon vor der Untersuchung belastet hat, diese während der Untersuchung unbewusst schont. Ein anderer Patient, welcher sich möglicherweise extra für diese Untersuchung geschont hat, könnte dann Ergebnisse erzielen, welche auf eine höhere Fußfunktionalität schließen lassen, als tatsächlich vorhanden ist.

Zudem können die Patienten verschiedene Utensilien zur Linderung der Symptomatik verwenden, so kann zum Beispiel durch das Einnehmen von Analgetika bzw. Antiphlogistika eine Reduktion der Schmerzen erreicht werden. In der Folge kommt es dann zu einer verbesserten Belastbarkeit der Extremität über die Dauer der Wirkung des Analgetikums. Eine weitere Möglichkeit ist das Tragen von Einlagen, welche ebenfalls zu einer Analgesie und damit kurzfristig höheren Belastbarkeit der betroffenen Extremität führen können. Diese zusätzlichen Faktoren werden nicht explizit erfragt, jedoch unspezifisch unter dem Punkt „Hilfsmittel“ im Calcaneodynie-Score nach Rowe abgebildet.

Des Weiteren können auch die Vorerkrankungen der Probanden eine Rolle spielen, insofern sie den Allgemeinzustand des Patienten verschlechtern. Ebenso zum Beispiel das Gewicht des Patienten, welches eine Auswirkung darauf haben kann, welche Regionen des Fußes besonders belastet werden.[21] Dem soll durch die Ein- und Ausschlusskriterien (s.o.) weitestgehend entgegen gewirkt werden.

Auch muss bedacht werden, dass die Wirkung der Radiatio im Niedrigdosisbereich nicht sofort einsetzt, sondern zumeist mit einer Verzögerung von 3-6 Monaten. Daher könnte es zu Fehleinschätzungen der Wirksamkeit der Bestrahlung kommen, wenn man den Zeitpunkt 3 Monate nach der Bestrahlung in Augenschein nimmt. Nicht selten wird zunächst eine Schmerzzunahme beobachtet, die sich durch den durch die Radiatio entstandenen Entzündungsprozess erklären lässt. Dies spiegelt sich in der Belastbarkeit der Extremität wider.

Zudem kommt das subjektive Schmerzempfinden eines jeden Patienten in der Belastungsfähigkeit dessen zum Tragen. Einige Personen zeigen bereits bei niedriger Belastung eine ausgeprägte Schonhaltung und belasten die betroffene Extremität weniger, andere Personen hingegen belasten den Beschwerden zum Trotz. Dies kommt dann in den gemessenen Werten zum Ausdruck und sorgt für eine Veränderung der Werte, ohne dass dies objektivierbar wäre.

Anders hingegen konnte das Ausfüllen der VAS-Skala und des Calcaneodynie-Scores für eine kontinuierliche Betreuung des Patienten durch eine Person Sorge getragen werden. Hier ist somit nicht von einer Verfälschung der Angaben auszugehen.

Die Sensibilität der Messinstrumente inklusive deren Lebensalter und Abnutzung kann eine Rolle gespielt haben. Unterschiedliche Untersucher, welche den Parcours mit den Patienten abgegangen sind, können durch unterschiedliche Geschwindigkeit die Leistungsbereitschaft des Probanden in die eine oder andere Richtung verändert haben.

Da die Messungsergebnisse wie oben erwähnt überwiegend die Fußfunktionalität abbilden, und diese durch das Vorhandensein oder die Abwesenheit von Schmerz zu Stande kommt, ist ein weiterer großer Punkt, den es zu betrachten gilt, der Schmerz selbst.

Schmerz ist subjektiv. Die Definition von Schmerz wurde von der International Association for the Study of Pain verfasst und als unangenehmes Sinnes- und Gefühlserlebnis, welches mit einer tatsächlichen oder drohenden Gewebeschädigung verknüpft ist oder mit Begriffen einer solchen Schädigung beschrieben wird, definiert.[36] Diese wurde um sechs Schlüsselemente erweitert, um das Ereignis „Schmerz“ noch adäquater zu umschreiben. Einige hiervon möchte ich nun näher beschreiben. Schmerz sei immer ein persönliches Erlebnis, welches von verschiedenen Faktoren (biologischen, psychologischen und sozialen) beeinflusst wird. Schmerz und die Nozizeption (Schmerzwahrnehmung) könne man nicht gleichsetzen. Schmerz könne nicht nur durch die Aktivität sensorischer Neurone und deren Interaktion abgebildet werden. Das Konzept des Schmerzes sei durch persönliche Erfahrung erlernt.[36] Trotz der Adaption an einen Schmerzreiz könne dieser doch eine weitere Wirkung auf die Funktion des Körpers und auch das Wohlbefinden einer Person haben. Die Möglichkeit Schmerz verbal oder non-verbal zu äußern oder aber auch nicht äußern zu können sei nicht mit in die Beurteilung über An- oder Abwesenheit von Schmerzen miteinzubeziehen. [36]

Was bedeutet oben Genanntes nun für die Objektivierbarkeit der Wirkung der Strahlentherapie des symptomatischen Fersensporn, deren Wirkung bisher einzig und allein durch die Veränderung des durch den Patienten verspürten Schmerzes erfasst werden konnte?

Durch die subjektive Komponente des Schmerzes ist die Objektivierbarkeit eingeschränkt. Allerdings kann man die dynamische und statische Pedobarographie als nicht zu missachtendes Mittel auf dem Weg zur Objektivierbarkeit der Wirkung der Strahlentherapie heranziehen, da diese die Verbindung zwischen Schmerz und Fußfunktionalität herstellt. Je größer der Schmerz, desto geringer die Funktionalität der Extremität. Dies zeigt sich dann in den Messergebnissen. Hieraus lassen sich dann Schlüsse über die Wirksamkeit einer Behandlungsmethode, in diesem Fall der Radiatio, ziehen, sodass das tatsächliche Ziel dieser zumindest in einigen Aspekten dargestellt werden kann. Die Parameter, welche in das Detail der Dynamik des Bewegungsablaufes gehen,

zeigen keinen Zusammenhang zu den erhobenen Angaben der Patienten in den Fragebögen. Das kann auch an der relativ geringen Größe der zu untersuchenden Gruppe liegen. Möglicherweise würde sich in einer Studie mit einer deutlich größeren Anzahl an Probanden ein klareres Bild in den Messungen widerspiegeln.

Weiterhin bleibt die Frage, inwiefern eine Re-Radiatio, die bei einigen Patienten nach 3 Monaten zum Einsatz kam, in die Bewertung mit einbezogen werden kann. Nach welchen Ergebnissen der Messungen, bei welchem Schmerzniveau oder Angaben im Calcaneodynie-Score kann sie erwogen werden, da auch die Heilungszeit des Gewebes/Zeit bis zum Auftreten der Wirkung in gewissem Maß individuell sein wird. Wie differenziert man „Non-Responder“ von denjenigen Probanden, bei denen die Wirkung der Bestrahlung zu einem späteren Zeitpunkt zum Tragen kommt? Hier wäre es schön, Messergebnisse beziehungsweise gewisse Parameter zu bekommen, welche dies ermöglichen könnten. Vielleicht könnte dies durch andere Messmethoden mit gegebenenfalls sensibleren Rezeptoren, welche andere Parameter hervorbringen, erreicht werden.

Einen wichtigen zu beachtenden Faktor stellt die Pedobarographie selbst dar. Hier spielt die Genauigkeit der Messmethode und deren Reproduzierbarkeit eine große Rolle. Die Anzahl der Sensoren und deren Lokalisation an den verschiedenen Regionen des Fußes, aber auch die Anpassung der Messobjekte an den zu untersuchenden Patienten selbst, zum Beispiel im Hinblick darauf, ob der ganze Fuß von Sensoren erfasst wird.[23,37] Der Aspekt des Komforts während der Untersuchung, sowohl die Sohlen als auch die statische Messung betreffend, scheint ebenfalls eine Auswirkung auf die Messergebnisse zu haben. Ob die Messungen mit festem Schuhwerk oder barfuß durchgeführt werden und der Patient hierbei eine gute Stand- und Gangsicherheit zeigt.[4,37]

Ebenso konnte in unserer Publikation gezeigt werden, dass es durchaus auch Unterschiede in Bezug auf die verschiedenen Messmethoden und -systeme gibt. Die dynamische Fußdruckmessung konnte hier Zusammenhänge abbilden, welche die statische nicht darstellen konnte. [3]

Zusammenfassend gibt es verschiedene Systeme der Pedobarographie und insbesondere der dynamischen Fußdruckmessung und viele Möglichkeiten der Weiterentwicklung. So zum Beispiel der äußeren Form der Sohle, um diese dem Fuß des Patienten besser anzupassen. Aber auch im Hinblick auf die Größen der Sohlen. Das Erstellen von Zwischengrößen kann sinnvoll sein. In Bezug auf die technische Komponente gibt es ebenfalls Optionen der Weiterentwicklung. Ein Beispiel ist hier die Sensorenanzahl, -qualität und damit -sensibilität, im Hinblick darauf, dass es Studien gibt, welche sich mit der diagnostischen Validität der Pedobarographie befassen.[4,6,17]

6 Literaturverzeichnis

1. Acevedo JI, Beskin JL (1998) Complications of Plantar Fascia Rupture Associated with Corticosteroid Injection. *Foot Ankle Int* 19:91–97
2. Arenas M, Sabater S, Hernández V, Rovirosa A, Lara PC, Biete A, Panés J (2012) Anti-inflammatory effects of low-dose radiotherapy. Indications, dose, and radiobiological mechanisms involved. *Strahlenther Onkol* 188:975–981
3. Braun BJ, Huss C, Heim Mueller S, Klein M, Herath SC, Ruebe C, Pohlemann T, Niewald M (2018) Should I Stay or Should I Go? A Prospective, Blinded Study Comparing the Diagnostic Capability of Dynamic and Stationary Pedobarography in Plantar Fasciitis. *J Foot Ankle Surg* 57:1181–1185
4. Charles YP, Axt M, Döderlein L (2001) [Dynamic pedobarography in postoperative evaluation of pes cavovarus]. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot* 87:696–705
5. Chimutengwende-Gordon M, O'Donnell P, Singh D (2010) Magnetic Resonance Imaging in Plantar Heel Pain. *Foot Ankle Int* 31:865–870
6. Choi YR, Lee HS, Kim DE, Lee DH, Kim JM, Ahn JY (2014) The diagnostic value of pedobarography. *Orthopedics* 37:e1063-1067
7. Cornwall MW, McPoil TG (1999) Plantar Fasciitis: Etiology and Treatment. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy* 29:756–760
8. Crawford F, Atkins D, Young P, Edwards J (1999) Steroid injection for heel pain: evidence of short-term effectiveness. A randomized controlled trial. *Rheumatology (Oxford)* 38:974–977
9. Cutts S, Obi N, Pasapula C, Chan W (2012) Plantar fasciitis. *Ann R Coll Surg Engl* 94:539–542
10. Digiovanni B, Nawoczenski D, Lintal M, Moore E, Murray J, Wilding G, Baumhauer J (2003) Tissue-Specific Plantar Fascia-Stretching Exercise Enhances Outcomes in Patients with Chronic Heel Pain. *The Journal of Bone and Joint Surgery-american* Volume 85:1270–1277
11. Digiovanni B, Nawoczenski D, Malay D, Graci P, Williams T, Wilding G, Baumhauer J (2006) Plantar Fascia-Specific Stretching Exercise Improves Outcomes in Patients with Chronic Plantar Fasciitis. *The Journal of Bone & Joint Surgery* 88:1775–1781
12. Djiepmo F, Tamaskovics B, Bölke E, Peiper M, Haussmann J, Neuwahl J, Jazmati D, Maas K, Schmidt L, Gelzhäuser R, Schleich C, Corradini S, Orth K, van Griensven M, Rezazadeh A, Karimi K, Budach W, Matuschek C (2022) Low-dose radiation treatment for painful plantar enthesophyte: a highly effective therapy with little side effects. *Eur J Med Res* 27:28
13. Donley BG, Moore T, Sferra J, Gozdanovic J, Smith R (2007) The efficacy of oral nonsteroidal anti-inflammatory medication (NSAID) in the treatment of plantar fasciitis: a randomized, prospective, placebo-controlled study. *Foot Ankle Int* 28:20–23
14. Gabel J (2015) Funktionsanalyse des Fußes. *Trauma Berufskrankh* 17:4–9

15. Gaipf US, Meister S, Lödermann B, Rödel F, Fietkau R, Herrmann M, Kern PM, Frey B (2009) Activation-induced cell death and total Akt content of granulocytes show a biphasic course after low-dose radiation. *Autoimmunity* 42:340–342
16. Gift AG (1989) Visual analogue scales: measurement of subjective phenomena. *Nurs Res* 38:286–288
17. Jasiewicz B, Klimiec E, Młotek M, Guzdek P, Duda S, Adamczyk J, Potaczek T, Piekarski J, Kołaczynski G (2019) Quantitative Analysis of Foot Plantar Pressure During Walking. *Med Sci Monit* 25:4916–4922
18. Kopf A, Nicolakis P (2001) *Klinische Ganganalyse*. Springer, Vienna. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-7091-3780-2_13
19. Lee JH, Jung HW, Jang WY (2020) A prospective study of the muscle strength and reaction time of the quadriceps, hamstring, and gastrocnemius muscles in patients with plantar fasciitis. *BMC Musculoskelet Disord* 21:722
20. Lengerke J (2009) Deutsch: plantarer und kleiner dorsaler Fersensporn. URL: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fsporn-plantar.jpg>
21. Lorkowski J, Hładki W, Galicka-Latała D, Trybus M, Brongel L (2009) [Underfoot pressure distribution of female patients with obesity and plantar fasciitis]. *Przegl Lek* 66:513–518
22. Luffy L, Grosel J, Thomas R, So E (2018) Plantar fasciitis: A review of treatments. *Journal of the American Academy of PAs* 31:20
23. Merry KJ, Macdonald E, MacPherson M, Aziz O, Park E, Ryan M, Sparrey CJ (2021) Classifying sitting, standing, and walking using plantar force data. *Med Biol Eng Comput* 59:257–270
24. Mücke R, Schönekaes K, Micke O, Seegenschmiedt MH, Berning D, Heyder R (2003) Low-dose radiotherapy for painful heel spur. Retrospective study of 117 patients. *Strahlenther Onkol* 179:774–778
25. Mücke R, Micke O, Seegenschmiedt MH, Schäfer U DEGRO-AG „Radiotherapie gutartiger Erkrankungen“.
26. Niewald M, Seegenschmiedt MH, Micke O, Graeber S, Muecke R, Schaefer V, Scheid C, Fleckenstein J, Licht N, Ruebe C, German Cooperative Group on Radiotherapy for Benign Diseases (GCGBD) of the German Society for Radiation Oncology (DEGRO) (2012) Randomized, multicenter trial on the effect of radiation therapy on plantar fasciitis (painful heel spur) comparing a standard dose with a very low dose: mature results after 12 months’ follow-up. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 84:e455-462
27. Ott OJ, Jeremias C, Gaipf US, Frey B, Schmidt M, Fietkau R (2013) Radiotherapy for calcaneodynia. Results of a single center prospective randomized dose optimization trial. *Strahlenther Onkol* 189:329–334
28. Ott OJ, Jeremias C, Gaipf US, Frey B, Schmidt M, Fietkau R (2014) Radiotherapy for benign calcaneodynia: long-term results of the Erlangen Dose Optimization (EDO) trial. *Strahlenther Onkol* 190:671–675
29. Ott OJ, Niewald M, Weitmann H-D, Jacob I, Adamietz IA, Schaefer U, Keilholz L, Heyd R, Muecke R, German Cooperative Group on Radiotherapy for Benign Diseases (GCG-BD) (2015) DEGRO guidelines for the radiotherapy of non-malignant disorders. Part II: Painful degenerative skeletal disorders. *Strahlenther Onkol* 191:1–6

30. Rödel F, Frey B, Gaipl U, Keilholz L, Fournier C, Manda K, Schöllnberger H, Hildebrandt G, Rödel C (2012) Modulation of inflammatory immune reactions by low-dose ionizing radiation: molecular mechanisms and clinical application. *Curr Med Chem* 19:1741–1750
31. Rowe CR, Sakellarides HT, Freeman PA, Sorbie C (1963) Fractures of the Os Calcis: A Long-Term Follow-up Study of 146 Patients. *JAMA* 184:920–923
32. Rudat V, Tontcheva N, Kutz G, Orovwighose TO, Gebhardt E (2021) Long-term effect and prognostic factors of a low-dose radiotherapy of painful plantar calcaneal spurs : A retrospective unicenter study. *Strahlenther Onkol* 197:876–884
33. Schäfer U, Micke O, Glashörster M, Rube C, Prott FJ, Willich N (1995) [The radiotherapy treatment of painful calcaneal spurs]. *Strahlenther Onkol* 171:202–206
34. Schomacher J (2008) Gütekriterien der visuellen Analogskala zur Schmerzbewertung. *Physioscience* 4:125–133
35. Seegenschmiedt MH, Keilholz L, Stecken A, Katalinic A, Sauer R (1996) [Radiotherapy of plantar heel spurs: indications, technique, clinical results at different dose concepts]. *Strahlenther Onkol* 172:376–383
36. Wörz R, Horlemann J, Müller-Schwefe GHH (2022) Schmerz in der Sprache, Konzeptionen und Definitionen. *Schmerzmedizin* 38:48–51
37. Zulkifli SS, Loh WP (2020) A state-of-the-art review of foot pressure. *Foot and Ankle Surgery* 26:25–32
38. Keloid Scar Treatment and Other Benign Conditions. URL: <https://xstrahl.com/benign-conditions/>
39. TrueBeam | Varian. URL: <https://www.varian.com/de/products/radiotherapy/treatment-delivery/true-beam>
40. Science Apps Overview - Moticon. URL: <https://www.moticon.de/apps-overview/>

7. Publikation

Should I stay or should I go? - A Prospective, Blinded Study comparing the Diagnostic Capability of Dynamic and Stationary Pedobarography in Plantar Fasciitis

National Journal of Foot and Ankle Surgery 12/2018 - Benedikt J Braun M.D, Christine Huss, Sina Heimüller, Moritz Klein M.D., Steven C Herath M.D., Christian Ruebe M.D., Tim Pohlemann M.D., Marcus Niewald M.D.

8. Dank

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die mich bei der Anfertigung meiner Dissertation unterstützt haben und mir mit Rat und Tat zur Seite standen.

Mein besonderer Dank gilt Herr Prof. M. Niewald für die hervorragende Betreuung sowie die enorme Unterstützung bei der Durchführung der klinischen Studie, sowie der Ausarbeitung und Verschriftlichung dieser.

Außerdem möchte ich mich bei PD Dr. B. Braun bedanken, der mich im Rahmen des Projektes vor allem aus unfallchirurgischer/orthopädischer Sicht aber auch in Bezug auf die Erhebung und Auswertung der gewonnenen Daten begleitet hat.

Meiner Familie und meinen Freunden, allen voran meinem Partner, danke ich für ihre endlose Geduld, den starken Zuspruch und die vielen Ermutigungen während der Arbeit an dieser Dissertation.

9. Lebenslauf

Aus datenschutzrechtlichen Gründen wird der Lebenslauf in der elektronischen Fassung der Dissertation nicht veröffentlicht.

10. Anhang

10.1 Relevante Studienbögen für die Dissertation

10.1.1 Aufklärungsbogen

Strahlentherapie beim schmerzhaften Fersensporn

Patientenetikett

Patientenaufklärung

Sehr geehrte Patientin, sehr geehrter Patient,

Die bei Ihnen durchgeführte klinische Untersuchung zeigt, dass Sie an einem schmerzhaften plantaren „Fersensporn“ leiden. Wie Sie vielleicht wissen, kann diese Erkrankung starke Schmerzen und vielfältige Einschränkungen im Beruf und Alltag verursachen. Oft werden mehrere Behandlungsverfahren, wie z.B. orthopädische Schuheinlagen, örtliche Cortisoneinspritzungen, oder entzündliche Medikamente eingesetzt, die in den meisten Fällen zur Besserung führen. Nicht selten können diese Beschwerden hierdurch nur unzureichend gelindert werden.

In Deutschland und Europa gibt es eine langjährige Erfahrung mit der Bestrahlung von gutartigen, meist entzündlichen Erkrankungen des Skelettsystems. Bei vielen dieser Erkrankungen hat sich die Strahlentherapie seit Jahrzehnten als sicher und wirksam bewährt. Selbst wenn der genaue Wirkmechanismus noch nicht abschließend geklärt ist, weiß man um die schmerzlindernde und entzündungshemmende Wirkung der Strahlentherapie bei dieser Erkrankung. Die Behandlung wird mit hochenergetischen Röntgenstrahlen durchgeführt, wobei eine sehr viel geringere Strahlendosis als bei Tumorerkrankungen benötigt wird. Von der Behandlung werden Sie kaum etwas merken, da der Ablauf ähnlich ist wie bei einer normalen Röntgenuntersuchung. Jede Therapiesitzung dauert pro Tag nur wenige Minuten und kann ambulant durchgeführt werden.

Sinn dieser Untersuchung

Die schmerzlindernde Wirkung der Strahlentherapie beim Fersensporn ist hinlänglich bekannt und bereits vielfach untersucht worden. Dabei war es bisher nur möglich, die Schmerzintensität subjektiv zu erfassen. Wir

möchten jetzt versuchen, durch eine Ganganalyse objektivere Parameter zu finden, um die Schmerzlinderung zu beurteilen.

Studienablauf

Nach Aufklärung und Einverständnis zur Strahlentherapie werden Sie in der Klinik für Unfall-, Hand- und Wiederherstellungschirurgie des UKS vorgestellt. Im dortigen Ganglabor wird eine Fußdruckanalyse durchgeführt. In diesem Rahmen wird ihr Gangbild mit einer speziellen Schuheinlage-Messsohle während eines kurzen Gangparcours in einer Ebene, auf der Treppe, und einer flachen Schräge gemessen. Im Anschluss werden auf einer stationären Kraftmessplatte 5 Musterschritte und Ihr Stand gemessen. Die gesamte Untersuchung ist schmerz- und nebenwirkungsfrei und wird pro Termin circa 15 Minuten in Anspruch nehmen.

Drei Monate nach Ende der Strahlentherapie werden Sie in der Klinik für Strahlentherapie und Radioonkologie wieder gesehen- dann erfolgt auch die erste Fußdruckmessung nach Behandlung. Eine letzte Nachsorge mit gleichem Untersuchungsprogramm erfolgt 12 Monate nach Strahlentherapie.

Nebenwirkungen der Strahlentherapie

Bei der niedrigen Strahlendosis sind akute Nebenwirkungen nicht zu erwarten, andernfalls kann eine leichte Hautrötung und-trockenheit im bestrahlten Bereich auftreten. Dauerhafte Strahlenfolgen sind bei der eingesetzten Dosis extrem selten.

Gelegentlich ist unter der Therapie eine Schmerzverstärkung zu beobachten, die gewöhnlich vorübergehend ist und eher auf eine gute Wirksamkeit der Strahlentherapie hinweist.

Wie bei jedem Einsatz von Röntgenstrahlen besteht ein sehr geringes, theoretisches Risiko von ca. 0,1% (1:1000) für die Entstehung von bösartigen Tumorerkrankungen im bestrahlten Gebiet nach 20-30 Jahren. Entsprechende Fälle wurden bei den bislang eingesetzten, sehr niedrigen Bestrahlungsdosen allerdings noch nie beobachtet oder berichtet. Eine Schädigung der Gonaden (Eierstöcke, Hoden) ist durch die Bestrahlung nicht zu erwarten. Die ankommende Streustrahlung liegt in der Größenordnung einer gewöhnlichen Röntgenuntersuchung.

Die Ganganalyse ist nebenwirkungsfrei.

Schwangere dürfen an dieser Studie auf keinen Fall teilnehmen. Sollten Zweifel über eine Schwangerschaft bestehen, wird Ihr verantwortlicher Arzt einen Schwangerschaftstest im Urin oder Blut veranlassen.

Wenn Sie die Patientenaufklärung in Ruhe gelesen haben und nach einem Aufklärungsgespräch mit der behandelnden Ärztin/dem behandelnden Arzt Ihre noch vorhandenen Fragen geklärt und mit dem Eintritt in die Studie einverstanden sind, bestätigen Sie dies bitte durch Ihre Unterschrift. Ihr Einverständnis beinhaltet auch Ihre Zustimmung zur aktiven Mitarbeit im Rahmen der Kontrolluntersuchungen sowie zur Weitergabe Ihrer Daten an ein zentrales Studienbüro für die nachfolgende (anonymisierte) wissenschaftliche Auswertung. Die erhobenen personenbezogenen Daten werden entsprechend allen Bestimmungen des Datenschutzes behandelt.

Sie können das Einverständnis zur Behandlung in diesem Behandlungsprotokoll jederzeit nach eigenem Gutdünken und ohne Angaben von Gründen widerrufen. In diesem Fall werden Sie natürlich die nach den bisherigen medizinischen Erkenntnissen für Sie beste Behandlung erhalten, d.h. eine der medizinisch etablierten Standardbehandlungen.

Vertraulichkeit der Daten

Die im Rahmen der Studie erhobenen Daten werden in anonymisierter Form, also ohne Namensnennung, gesammelt und ausgewertet. Ihr Name und Ihre über diese Studie hinausgehenden medizinischen Daten sind nur Ihrem behandelnden Arzt bekannt und werden nicht an die Studienleitung weitergegeben. Die Bestimmungen der ärztlichen Schweigepflicht und des Datenschutzes sind gewährleistet. Wir weisen jedoch darauf hin, dass zu Kontrollzwecken den Überwachungsbehörden bzw. speziell autorisierten Personen eine Einsichtnahme in Ihre Krankenakte gestattet wird. Mit Ihrem Einverständnis zur Teilnahme an dieser Studie stimmen Sie auch dieser Offenlegung zu. Wir versichern Ihnen jedoch, dass Ihre personenbezogenen Daten absolut vertraulich behandelt werden und nicht an die Öffentlichkeit gelangen.

Strahlentherapie beim schmerzhaften Fersensporn:

Patienteneinverständnis

Etikett

Patienteneinverständniserklärung:

Name, Vorname:

Geb.:

Aufklärender Arzt/ Ärztin:

Hiermit erkläre ich mich mit der Teilnahme an der vorliegenden Studie zur Behandlung des schmerzhaften Fersensporns einverstanden.

Mit meiner Unterschrift bestätige ich, dass ich die Aufklärungsinformation verstanden habe und dass alle mir noch entstandenen Fragen zu diesem Thema ausreichend beantwortet wurden. An dieser Untersuchung nehme ich freiwillig teil. Eine einmal gemachte Zusage kann ich jederzeit, auch ohne Angabe von Gründen widerrufen, ohne dadurch irgendeinen Nachteil befürchten zu müssen.

Ort,

Datum,

10.1.2 VAS-Skala

Subjektive Einschätzung des Gesamtbefindens durch den Patienten (X)



10.1.3 CS-Score

Calcaneodynie - Score

anwendbar auf die Krankheitsbilder: **Fersensporen** und **Achillodynie**

Zeit: vor RT ; während der RT bzw. Wochen / Monate / Jahre nach RT

| Einzelkriterien | Ausmaß der Veränderung | Punkte |
|--|--|---------------|
| A. Schmerzen (gesamt: 30%) pro Einzelkriterium: | B = Belastungsschmerzen | 0 / 2 / 4 / 6 |
| | N = Nachtschmerzen | 0 / 2 / 4 / 6 |
| | D = Dauerschmerzen (tagsüber) | 0 / 2 / 4 / 6 |
| | R = Ruheschmerzen (nach Belastung) | 0 / 2 / 4 / 6 |
| | S = Steifigkeit (am Morgen) / Anlaufschmerzen | 0 / 2 / 4 / 6 |
| | keine = 6; leichte = 4; mittlere = 2; schwere = 0 Punkte | |
| | ⇒ | |
| B. Benutzung von Hilfsmitteln (gesamt: 15%) | Keine Hilfsmittel | 15 |
| | Orthopädischer Schuh, Einlegesohlen, Knöchelpolster | 10 |
| | Einen Stock oder Gehhilfe | 5 |
| | Zwei Stöcke oder Gehhilfe | 0 |
| | ⇒ | |
| C. Einschränkung im Beruf (gesamt: 20%) | Keine Einschränkung, maximale berufliche Belastbarkeit | 20 |
| | Leichte Einschränkung, normale berufliche Belastbarkeit | 10 |
| | Mäßige Einschränkung, eingeschränkte Berufstätigkeit | 5 |
| | Schwere Einschränkung, keine Berufstätigkeit möglich | 0 |
| | ⇒ | |
| D. Einschränkung im Alltag / Sport (gesamt: 15%) | Keine Einschränkung von Alltag und / oder Sport | 15 |
| | Leichte Einschränkung im Alltag, reduzierte Belastbarkeit im Sport | 10 |
| | Mäßige Einschränkung im Alltag, keine sportliche Aktivität möglich | 5 |
| | Völlige Einschränkung im Alltag und beim Sport | 0 |
| | ⇒ | |
| E. Gangbild (gesamt: 20%) | Kein Hinken, normales Gehen ohne Einschränkung | 20 |
| | Geringe Störung des Gangbildes, Schmerzen / Hinken nach mehr als 1 km Gehstrecke | 10 |
| | Deutliche Störung des Gangbildes, Schmerzen / Hinken nach weniger als 1 km Gehstrecke | 5 |
| | Schwere Störung des Gangbildes, normales Gehen nicht mehr möglich | 0 |
| | ⇒ | |
| Summenscore | Summe der Einzelscores A + B + C + D + E | ⇒ |

modifiziert nach Heyd et al.: Radiology (2001) und Seegenschmiedt et al.: Radiology (1996)

10.2 Abkürzungsverzeichnis

BOBOXLI – Bounding Box Length Involved Side
BOBOXLNI – Bounding Box Length Not Involved Side
BOBOXWI – Bounding Box Width Involved Side
BOBOXWNI – Bounding Box Width Not Involved Side
CADENCE – Cadence
CONTII – Contact Time Involved Side
CONTINI – Contact Time Not Involved Side
COPSWAY – Center of Pressure Sway Area
COPVELO – Center of Pressure Velocity
CS – Calcaneodynie Score nach Rowe
ERD – Einzeldosis in Gy
GAITLLL – Gait Line Length Left
GAITLLR – Gait Line Length Right
GRD – Gesamtdosis in Gy
LOADDIHI – Load Distribution Heel Involved Side
LOADIHNI – Load Distribution Heel Not Involved Side
MAXFOHI – Maximum Force Heel Strike Involved Side
MAXFOHNI – Maximum Force Heel Strike Not Involved Side
MAXFOTI – Maximum Force Toe Off Involved Side
MAXFOTNI – Maximum Force Toe Off Involved Side
PRESSHI – Pressure Heel Involved Side
PRESSHNI – Pressure Heel Not Involved Side
PRESSTI – Pressure Toe Involved Side
PRESSTNI – Pressure Toe Not Involved Side
SWAYAREA – Sway Area
TOTLOADI – Total Load Distribution Involved Side
TOTLOADNI – Total Load Distribution Not Involved Side
VAS – Visuelle Analogskala