

## **Mechanismen und die Funktion des menschlichen Fußes**

Mr. David Stainsby, MD  
New Castle upon Tyne  
Vortrag auf dem 20. Internationalen Symposium für Fußchirurgie  
München, 06.12.2012

Übersetzung: M. Lang, Erlangen  
R. Springfeld, Hamburg

### **Einführung**

Bis heute haben Chirurgen und Anatomen die Funktionsmechanismen des menschlichen Fußes noch nicht in vollem Umfang verstanden. Häufig wurden die koordinierten Bewegungsabläufe zwischen den Tarsalgelenken als „zu schwierig zu verstehen“ erachtet und beschrieben. Verschiedene Konzepte wurden entwickelt.

In den vergangenen 20 Jahren haben wir verschiedene Studien in Newcastle entworfen und realisiert, um die Fußfunktion zu verstehen. 1993 wurde der Zuggurtung- Verspannungsmechanismus (transverse tie- bar mechanism) in der queren Vorfußstabilisierung in einer "Hunterian" Vorlesung (Stainsby 1997) beschrieben, sowie weitere Ergebnisse über die koordinierte Bewegungen der Gelenke des unteren Sprunggelenks (T- N, C- C, subtalar) wurden in einer Royal College of Surgeons "Arnott Lecture" im Jahre 2004 vorgestellt.

B. Romanus (Göteborg), H. Zwipp (Dresden) und R. Atkins (Bristol) haben seitdem ein wirklich hilfreiches Interesse gezeigt, halfen mit konstruktive Kommentaren und Zuspruch. Präsentationen der "Newcastle-Hypothese" und fundierte Beweise wurden in Schweden, Deutschland und Bristol vorgestellt. In einer kurzen Präsentation sind die neuen Konzepte anfänglich nicht leicht zu verstehen. Die Beschreibung von dreidimensionalen Bewegungen ist schwierig. Nachfolgend wird eine in diese Problematik „einführende Richtlinie“ vorgestellt, die die wichtigsten zugrunde liegenden Ideen präsentiert. Ich hoffe sehr, dass sie zum Verständnis beiträgt.

Einige frühere Konzepte und Theorien, ferner die bisherigen Arbeiten von Hicks, de Doncker und Kowalski, Ambagtsheer und Huson, und diese zusammen mit den stereophotogrammetrische Studien des Fußes (Van Langelaan, Lundberg et al, Winson et al) wurden erneut durchgesehen. Ich versuche nun zu zeigen, wie all diese Ergebnisse in einen anderen unterschiedlichen Zugang zum Verständnis der Fußmechanik und dessen Steuerung eingebracht werden können. Grundsätzlich gilt, folgt man den

Empfehlungen von Huson, dass sich die Beweglichkeit der eigentlichen Fußgelenke aus Formgebung und Kontur der Gelenkflächen, sowie durch die eingeschränkte, kontrollierte Steuerung der zugehörigen Bänder ergibt, anstatt über Bewegungen in mehreren, aber definierten Achsen. Definierte Drehachsen können relative Bewegungsmuster zwischen Teilen des Fußes, ja sogar zwischen einzelnen Knochen aufzeigen, aber sie bieten keine Erklärung für die nachgewiesenen dreidimensionalen Bewegungen, sie stellen auch nicht die eigentlichen Drehachsen des Skeletts dar.

Die beigegefügte "Powerpoint-Präsentation" zeigt die wichtigsten Grundsätze. Die beigegefügte Literaturliste soll zum Einlesen in Thematik hilfreich sein und für Hintergrundinformationen sorgen.

Das soll dafür sorgen, eine gemeinsame Diskussionsgrundlage zu erreichen.

Es wird angeregt, die möglicherweise leicht verfügbare Arbeit von Ambagtsheer als wahrscheinlich die wichtigste zu lesen, vor allem den Abschnitt, wo die Untersuchungsergebnisse über die koordinierten Bewegungen der drei großen korrespondierenden Tarsalgelenke (gemeint: T- N, C- C und subtalar, Anm. der Übersetzer) vorgestellt werden. Es ist die einzige Quelle über gemessene und aufgezeichnete Bewegungen am calcaneo - cuboidal - Gelenk, die ich gefunden habe.

### **Nomenklatur**

Die Begriffe Supination und Pronation werden anstelle von Inversion und Eversion bei der Beschreibung der Bewegung um die Längsachse des Fußes (Folie 2) bevorzugt.

**"New Approach" ist als neuer Denkansatz zur Fußmechanik zu verstehen**(Folien 3 - 4)

### **Das "neue Konzept" basiert auf:**

(i) Das Konzept beruht darauf, dass ein multi-segmentales Verstreben- und Verankerungssystem(multi-segmental tie-bar support system) der wichtigste Kontrollmechanismus für die Unterstützung und Stabilität der Fußstruktur, die Funktion der Zehen und der plantaren Vorfußballens ist, und

(ii) auf der Hypothese, dass die Gestaltungsform des menschlichen Fußes, mit seinen seitlichen Schwingbewegung um die transversen Tarsalgelenke es ihm ermöglicht, als "balancierter Ausleger" zu agieren und über einen seitlichen Ausgleichsmechanismus zu verfügen.

## Die longitudinale Struktur des Fußes

### **A. Die Fuß - Längs- Struktur und das „3 Bogen“-Konzept (Folie 5)**

Bislang wurde der Fuß oft als 3 Bögen –Modell gedanklich dargestellt:

ein mediales Längsgewölbe (oder Säule)  
ein (flacheres) laterales Längsgewölbe  
ein quererer Bogen auf der Ebene der MT Köpfe (oder ein halbes Quergewölbe in Höhe des Mittelfußes)

**aber:** eine Gewölbekonstruktion erfordert ein Fundament, so dass sich in dieser Bogenstruktur die keilförmige Knochen [Steine] einander durch gegenseitigen Druck abstützen und sich die Basis der Struktur unter Last nicht auseinander bewegt.

Der Begriff "Gewölbe" ist für die Fuß Längs--Struktur als technisch ungeeignet anzusehen.

### **B. Das Konzept beruht darauf, dass die longitudinale Struktur des menschlichen Fußes einen "bow-string beam": ein „Verstrebungs-Verankerungssystem" hat und auf der Bedeutung des Ankerwinden - Mechanismus (Hick's Windlass Mechanismus) der Plantaraponeurose. (Folien 6-9)**

Hicks (1954 und 1955) zeigte die Bedeutung der Plantaraponeurose, befestigt proximal an der plantaren Tuberositas des Calcaneus und mit fünf starken Zügeln nach vorne verlaufend, um in und an den Platten der plantaren MTP -Gelenke zu inserieren und dadurch mit den Basen der proximalen Phalangen der 5 Zehen in Verbindung zu stehen. Die daraus resultierenden 'tie-bars' die gekrümmte ("bogenartigen") Struktur bewahrt den tragenden Fuß vor dem Kollaps. Ingenieure verwenden häufig diese Art von "bow-string" Trägerstruktur beim Bau von Brücken.

1954 beschrieb Hicks den "Ankerwinde Mechanismus". Wenn die Zehen in den MTP Gelenke dorsal extendiert sind, werden die damit verbundenen Strukturen der Plantaraponeurose um den „MT - Kopf gewickelt“ (windlass-mechanism) und die "bow-strings" das Verstrebungs -Verankerungssystem effektiv verkürzt. Dadurch verkrümmen sich die längsverlaufenden

Knochenstrukturen in den Tarsalgelenken und die daraus resultierende Summenbewegung ist in der Regel als "Aufrichten des Fußgewölbes" beschrieben worden.

Der longitudinale "Strahl" muss seine Form, verändern, wenn der "bow-string" effektiv verkürzt, aber die daraus resultierenden eigenen intrinsischen Gelenkbewegungen laufen in allen drei Raumebenen ab.

Der Mittelfuß ist erhöht, aber es gibt auch laterale und mediale schwingende Bewegungen, sowie Drehungen in Supination und Pronation (im Gegensatz zu allen von Ingenieuren gebauten Brücken).

### **C. Plantar-Flexion Kontrolle der Zehen**

Einige Autoren haben behauptet, dass die kleinen intrinsischen Muskeln des Fußes die Plantarflexion der Zehen gegen den Boden kontrollieren können, analog der Steuerung der isolierten Beugebewegung der Finger an den MCP Gelenken in der Hand.

Sie sind auch durchaus in der Lage, einen Beitrag zur Kontrolle Fuß zu leisten. Patienten mit einem Verlust von Arm und Hand-Funktion können feine Bewegung und "handartige" Zehenfunktion entwickeln. Die kleinen Muskeln der Zehen tragen zu der Bewegung und Aktivität sicherlich bei, wenn der Fuß ausbalanciert. Aber es ist unwahrscheinlich, dass sie einen erheblichen mechanischen Beitrag während des normalen Gehen und Laufen leisten.

### **Der "umgekehrte Ankerwinde Mechanismus" der Plantaraponeurose**

(Folien 10-13)

1955 beschrieb Hicks den umgekehrten Ankerwinde Mechanismus (reversed windlass mechnism) der Plantaraponeurose.

Wenn der plantigrade Fuß belastet wird, Last tragend wird, flacht die Längsstruktur ab und der Abstand zwischen der Ferse und den Metatarsaleköpfen nimmt zu. Die Plantaraponeurose verspannt sich und diese erhöhte Spannung bewirkt, dass die entsprechenden Zehen in den MTP Gelenken in Plantarflexion gezogen werden. Die Interphalangealgelenke der Zehen sind in Extension stabil. Die so geraden Zehen (flach gegen den Boden gehalten) können so als starke Hilfshebel wirken, wenn die Fersenhebung erfolgt. Mit der Fersenhebung erfolgt gleichzeitig die begleitende Aktivität des "Ankerwinden Mechanismus", der die proximalen Phalangen in Dorsalflexion in den MTP Gelenken einstellt. Dadurch halten (erhöhen) sich die plantar-flektierenden Kräfte auf die Zehen und die Fußlängsstruktur verkürzt sich auch - aber mit begleitenden Bewegungen an den intrinsischen Tarsalgelenke in alle drei

Bewegungsebenen.

Hicks zeigte auf, dass die Fuß- Längsstruktur auf 5 unabhängigen "bow-string beams", Zuggurtungs –Verstrebungen der einzelnen Mittelfußknochen basiert, wobei die Plantaraponeurose als verstellbare Zuggurtung arbeitet. Die Plantarflexionskraft jedes Zehs gegen den Boden ist proportional zu der Spannung in seiner aponeurotischen Lage und Stellung und das wiederum ist direkt mit der Last auf die einzelnen Mittelfußknochen- Zuggurtungsstrukturen verbunden.

Die Arbeit von John Hicks zeigte sehr deutlich, dass **der umgekehrte Ankerwinden Mechanismus der wichtigste Plantarflexions - Mechanismus für die Zehen an den MTP-Gelenken ist, wenn der Vorfuß belastet wird.** Das wurde allgemein nicht anerkannt.

Dies ist möglicherweise auf die Veröffentlichung von Hicks 1955 in der Acta Anatomica (nicht so weit verbreitet wie das Journal of Anatomy) zurückzuführen.

#### **D. Kontrolle der Aufspreizung der Mittelfußknochen über die Breite des Vorfußes** (Folien 14-16)

Bisher ist allgemein akzeptiert, dass die seitliche Abspreizung der lasttragenden Mittelfußknochen in Vorfuß Ebene durch den M. adductor hallucis gesteuert wird.

**Die alternative Erklärung – die Bedeutung der Ligg. metatarsalia transversa profunda und der plantaren Platten der MTP-Gelenke, da sie eine transversale Vorfußverspannung (transvers forefoot tie bar) bilden.**

#### **Die Vorfuß- Querverstrebungs-Verspannung**

1991 als Ergebnis von der Sektion eines Vorfußes durch Frau Ch. Harkness in Newcastle. Durch die nachfolgenden Untersuchungen haben wir gezeigt, dass die plantaren Platten der MTP - Gelenke und den dazwischen liegenden Ligg. metatarsalia transversalia profunda eine sehr starke gleichmäßige Struktur quer über den plantaren Aspekt des Vorfußes bilden. Weil jede plantare Platte fest mit seinem Mittelfußköpfchen durch die Seitenbänder verbunden ist, kann diese starke Querverstrebungs-Verspannung die Vorfußspreizung über den gesamten Vorfuß kontrollieren und das auch zwischen den einzelnen Mittelfußstrahlen, wenn nur ein Teil des Vorfußes belastet wird.

#### **E. Die Querverstrebungs-Verspannung und die Plantaraponeurose bilden**

## **ein 'multi-segmentales' Verstrebung-Verspannungssystem (tie- bar) (Folien 17-20)**

Weitere Dissektionen haben gezeigt, dass die Längs - Verspannung der Plantaraponeurose über die volle Breite der Vorfuß – Querverstrebungs-Verspannung ansetzt: d.h. beidseits an den plantaren Platten und den Ligg. metatarsalia transversalia profunda. Es ist also ein komplettes plantares Verstrebungs -Verspannungssystem, das geeignet ist die fünf longitudinale einstellbaren Verstrebungs -Verspannungssysteme zu unterstützen und die Spreizung zwischen den MT Köpfen des gesamten Vorfußbereich zu kontrollieren, oder nur der medialen oder der lateralen Strahlen, wenn nur ein Teil des Vorderfußes belastet wird.

Die funktionelle Kontrolle dieser Verspannung erfolgt automatisch, als Reaktion auf die lasttragende Dehnbeanspruchung mit einer individuellen Belastung der einzelnen Verstrebungs- Verspannungs - Systeme durch die Metatarsaleköpfe, und stellt so einen starken, energiesparenden Wirkmechanismus dar.

Dieses multifsegmentale Verstrebung -Verspannungssystem ist eines der wichtigsten Hilfssysteme für das Aufrechterhalten der Stabilität der Fußstruktur, und kontrolliert die Einstellung der plantar-flektierten Zehen und die Kräfte entgegen dem Boden, wenn der Vorfuß lasttragend ist.

## **F. Aufbau der plantaren Fußfettpolster (Folien 21-31)**

Die Struktur des plantaren Fußpolsters wurde zuvor durch Bojsen-Møller und Flagstad (1976) beschrieben. Es handelt sich um ein lobuliertes Fettpolster quer über die volle Breite des Vorfußes an vielen Stellen ausbreitet, so auch zwischen den Metatarsaleköpfen und den proximalen Phalangen.

Weitere Dissectionen und MRT Untersuchungen waren hilfreich mehr Anatomie und funktionelle Bedeutung demonstrieren zu können.

### **Die Bedeutung der Struktur der Plantaraponeurose, ihr Verhältnis zur plantaren Fettpolsteranatomie, und ihre Funktion bei der Lastaufnahme**

Unsere jüngsten Studien haben gezeigt, dass die Plantaraponeurose aus zwei Schichten besteht- einer oberflächlichen Schicht und der starken, tieferen, aponeurotischen "sehnenhaften" Schicht. Im proximalen Teil des Fußes sind die beiden Schichten miteinander verbunden, aber unter den Mittelfußschäften trennen sie sich in die endgültigen 5 einzelnen tiefen

Ausläufer auf, um die vier Fettkörper zu bilden. Auf Höhe der Mittelfußknochens retrokapital trennen sich die tiefen Schichten von der Oberflächenschicht, und jeder Anteil teilt sich dann in zwei weitere Anteile, die um die Beugesehnen herumzuziehen und in den plantaren Platten der Grundgelenke und den Ligg. met. transv. prof. zu inserieren. Mit der Separation von "streifenartigen Zügeln" der oberflächlichen Schicht von der "aponeurotischen" Schicht werden die Fettkörper an beiden Seiten kontinuierlich einander angepasst und die plantaren Fettpolster gebildet. Das Pad erstreckt sich somit über die gesamte Breite des Vorderfußes in Höhe der Metatarsaleköpfe und erstreckt sich ebenfalls nach vorne unter die Grundphalangen der Zehen bis retrokapital.

NB: Das Polster wird zwischen den beiden Schichten der Plantaraponeurose gebildet und wird in den Fettkörpern fortgesetzt.

Proximal der plantaren Pads liegen unterhalb der MTP- Gelenke die plantaren Platten (mit den jeweiligen Beugesehnnenscheiden) und den dazwischen liegenden Ligg. met. transv. prof. Weiter distal wird der dorsale Rand der plantaren Pads durch den Schaft der Grundphalangen und den verbindenden transversalen Bänder, die sich zwischen Beugesehnnenscheiden der seitlichen vier Zehen erstrecken begrenzt.

Aufgrund der Wirkung des umgekehrten Ankerwindenmechanismus haben die proximalen Phalangen und dazwischen liegenden transversalen Bänder die Fähigkeit den distalen Teil der plantaren Pad zu komprimieren und so eine geeignete Lastverteilung in dem Bereich unter den MT Köpfe für jedes der lasttragenden Mittelfußknochen zu erreichen.

Das plantare Polster und der „Reverse Ankerwinden Mechanismus“ erlauben außerdem die Haut unter dem Fußsohlenfettpolster zum Zeitpunkt des Vorfußkontakts beim Gehen und Laufen so auf den Boden zu bringen, dass die Hautreibung minimal ist und die Fußsohlenhaut und das Fettpad an der belasteten Stelle "stationär" auf dem Boden bleiben, wenn die darüber liegenden Bewegungen des Fußes stattfinden und der Fersenhub erfolgt (Folie 31).

### **G. Die Plantaraponeurose und der M. gastrocnemius bilden einen "zweiteiligen" Propulsionsmechanismus (Folie 32)**

In vergleichenden Studien der Beinmuskulatur von Mensch und den unteren Gliedmaßen von Primaten hat Lewis beobachtet, dass sich bei den Menschen aus der Sehne des oberflächlichen Beugemuskels (plantaris) eine Plantaraponeurose entwickelt hat. Bei den meisten anderen terrestrischen Vierfüßlern ist dies eine durchgehende Struktur aus dem unteren Femur bis zu den Zehen. Es ist daher offensichtlich, dass beim

Menschen der wichtigste Propulsions- Mechanismus unterhalb des Knies in "zwei Teilen" geleistet wird, die vom M. gastrocnemius und der Plantaraponeurose gebildet werden.

Dies kann als eine der wichtigsten evolutionären Anpassungen betrachtet werden, die es dem menschlichen Fuß ermöglicht hat, plantigrad zu werden und dem Menschen damit zu einem Zweibeiner.

## **H. Die koordinierten Bewegungen an den intrinsischen Gelenken des Fußes** (Folien 33-38)

Bisherige Konzepte beinhalten folgendes:

(I) Das Skelett des Fußes unter dem Talus wird als durchgehende "Fußplatte" oder "Lamina pedis" angesehen, und die Vorstellung vertreten, dass diese Struktur in der Lage ist eine longitudinale Pronation oder Supination, eine Eindreh- und Ausdrehbewegungen ist, und eine "closed- packed" und "loose- packed" Stellung bewirkt (MacConaill 1945 und MacConaill, Basmajian 1969).

(II) Oft wurde die Auffassung geäußert, dass die Bewegungen in den intrinsischen Intertarsalgelenke seien Drehungen um definitive Achsen (Hicks 1953, Van Langelaan 1983, Benink 1985, Lundberg et al 1989).

(III) Die Bedeutung der Achsen der calcaneo-cuboid und der talonavikular Gelenke, wobei diese "in und aus der Achse" sein können, die die Mobilität und Stabilität in der USG- Gelenklinie (Elftman 1960, Mann 1993) definieren.

Es wird vermutet, dass die bisherige Akzeptanz und Darstellung der oben genannten Konzepte in vielen Arbeiten, ohne Untersuchung der anatomischen und funktionellen Gründe, für die beobachteten Bewegungsmuster der koordinierten Bewegung an den Gelenken es unteren Sprunggelenks und deren Kontrolle, den Anfang eines Verständnisses um viele Jahre verzögert hat. Erkenntnisse warum und wie sich die koordinierten Bewegungen an den USG- Gelenken entwickelt haben, diese Mechanik der miteinander verbundenen Bewegungen und ihr Zweck, haben sich ebenfalls verzögert.

Zum Verständnis des "neuen Konzepts" werden die folgenden



Ausführungen als wichtige Beobachtungen betrachtet.

(IV) Hicks (1953) machte die wichtige Beobachtung, dass im Vorfußbereich die Mittelfußknochen zu unabhängigen Bewegungen fähig sind, und eine "Pronation/ Supinationsdrehung" für den Vorfuß ermöglichen. Die Mittelfußknochen sind in der Lage, ein Verdrehen relativ zu den Mittelfußgelenken auszuführen und sich den Querneigungen der Bodenoberfläche anzupassen.

Es wird festgestellt, dass umgekehrt der Mittelfuß die Fähigkeit hat, sich "durch Drehung" einer stabilen, plantigraden Vorfußstellung anzupassen.

(V) Huson hat herausgefunden, dass seit dem Ende des 19. Jahrhunderts bekannt war, dass die Bewegungen an den talo-calcaneal, calcaneo-cuboid und talo-calcaneo-navikular Gelenke immer verknüpft und untereinander koordiniert sind.

Einzelne Bewegungen können nicht unabhängig von anderen Gelenken stattfinden. Er hat die Begriffe "offene Kette" und "geschlossene Kette" geprägt und diese Bewegungen in Bezug auf den menschlichen Fuß erläutert (siehe Folien 36-37).

(VI) De Doncker und Kowalski (1970) haben erkannt, dass die zweiten und dritten Mittelfußknochen kleine unabhängige seitliche Bewegung haben und so ein stabiles zentrale Segment im Vorfußbereich bilden (Folie 38).

### **I. Beweisführung für ein stabiles zentrales Vorfußsegment und Entwicklung des Konzepts der Fußfunktion als "4-Teiliger-Mechanismus"** (Folien 39-42)

Unsere Untersuchungen in Newcastle haben die laterale Stabilität der 2. und 3. Mittelfußknochen im Verhältnis zu den Cuneiforme mediale und laterale (wie von Kowalski und De Doncker beschrieben) nicht nur bestätigt, sondern darüber hinaus deuten unsere Studien darauf hin, dass das Navikulare und das Cuboid in ein erweitertes, zentrales Vorfuß-Segment einbezogen werden müssen.

Die erste Strahl und der vierte und fünfte sorgen so für eine geeignete Unterstützung und Mobilität für Hick's Vorfußdreh- Mechanismus und bieten so einen abpassungsfähigen Mechanismus beim Stehen auf abschüssigem Gelände. Aber der Vorfuß "twist" funktioniert auch, wenn im Mittelfuß Pro- und Supination Bewegungen stattfinden, sozusagen hinter einem plantigrad ausgerichteten Vorfuß.

Als Ergebnis unserer Studien haben wir ein Konzept entwickelt, dass die Struktur des Fußes als vier, voneinander abhängige "Teile" betrachtet.

1. Die Zehen und die Plantaraponeurose (mit plantaren Polster und Ankerwinde Mechanismus) und zusammen mit der Queren Verstreibungs-Zuggurtung als ein multi-segmentales Zuggurtung und Verstreibungssystem.

2. Das "stabile zentrale Vorfußsegment" mit medialen und lateralen unterstützenden Mittelfußstrahlen.

3. Kalkaneus

4. Talus

Als **erweiterte zentrale longitudinale Struktur** kann das zentrale Vorfuß-Segment, Kalkaneus und Talus – unterstützt durch drei Schichten von plantaren Bändern (Lig. calcaneo- naviculare plantare, Lig. plantare longum , Aponeurosis plantaris) definiert werden. Dadurch wird eine starker Zuggurtungsmechanismus (bow- string beam mechnism) wirksam. (slide 42).

## **J. Rückfußanatomie und Struktur, die Bedeutung der seitlichen Schwenkbewegungen der Chopart- Gelenksebene** (Folien 43-69)

Die Entstehung der Hypothese, dass das Fußskelett in der Lage ist, als "balanzierter Hebel" zu agieren.

## **Ausgangspunkte für Änderungen zum Verständnis der Fußmechanik** (Folien 43-45)

Huson darauf hingewiesen, dass Versuche, die koordinierte Bewegungen der Tarsal- Gelenksreihe zu erklären - auf der Annahme basieren, dass Gelenkbewegungen um eigenständige Achsen stattfinden. Das sollte aufgegeben werden. Er dachte, dass Bewegungen in den drei wichtigsten Gelenken in Bezug auf ihre Struktur, die Gelenkflächenkonturen und dem steuerndem Einfluss der Bänder beurteilt werden sollten. Er wies auch darauf hin, dass bei Belastung und Stehen (Gehen, Laufen) die Gelenke Teil einer "geschlossenen Kette" sind - mit Einschränkungen (constraint) distal (Vorfuß verbleibt horizontal) und proximal (Talus bleibt weitgehend horizontal), damit wird dem plantigrade Fuß Kontakt mit dem Boden auch auf unebenen Oberflächen sowie eine aufrechte Körperhaltung während der Bewegung ermöglicht. Dies ist Grundvoraussetzung für die Anpassung an unebenen Boden.

Lewis (1989) hat die Beobachtung gemacht, dass der menschliche Fuß als einziger eine seitliche Schwenkbewegung in Chopart-Linie hat. Anbetracht dieser einleuchtenden Tatsache hat sich mein Verständnis im Hinblick darauf, wie sich die koordinierten Bewegungen in den Chopart Gelenken entwickelt haben und welchen wichtigen Zweck sie dienen, verändert.

Eine sorgfältige Beobachtung des Fußes beim Balancieren auf einem Fuß (mit angebrachter Anzeige- Markierungen am Mittelfuß und am unteren Unterschenkel) haben während des Großzehenextensionstests (GTET) gezeigt, dass die begleitenden lateralen und medialen Schwenkbewegungen der Chopart Gelenke den Mittelfuß beständig zu Supinations- und Pronationsbewegung zwingen. Um den Vorfuß plantigrad auf dem Boden zu halten - und das Bein einigermaßen senkrecht zu stellen, somit eine aufrechte Haltung zu bewahren, gibt es eine offensichtliche Notwendigkeit zu gleichzeitigen kompensatorischen (und gegenläufig ) Pronations oder Supinationsbewegungen in beiden im Vorfuß und im Rückfuß.

Diese koordinierten Bewegungen sind die klare Demonstration von Huson's "geschlossener Ketten" Kopplung.

Der Hicks "forefoot twist" Mechanismus (Folien 34-35) erläutert die notwendigen kompensatorischen Vorfußbewegungen. Aber das Verständnis der koordinierten Bewegungen im Rückfuß blieb eine Herausforderung. Trotzdem zeigt der einfache GZET, dass die Pronation-Supinationsbewegungen des Kalkaneus immer geringer sind als die des Mittelfußes (Kahnbein und Cuboid).

### **K. Koordinierte Bewegungen an den Inter- Tarsalgelenken des Mittel- und Rückfußes** (Folien 46-65)

Die koordinierten Bewegungen an den "vier Gelenke der Mittel- und Rückfußes wurden von Ambagtsheer (1978) untersucht. Dargestellt auf den Folien 46-49.

Er untersuchte die triplanaren Rotationsbewegungen der einzelnen Knochen indem er Marker in jeden Knochen steckte. Dann platzierte er den Fuß in einer Vorrichtung, die Fotos in allen drei Ebenen erlaubte. Die Tibia wurde über dem stehenbleibenden Fuß gedreht und fotografiert, um das Ergebnis der triplanaren Bewegung von jedem Marker aufzeichnen.

Er konnte zeigen, dass mit der Außenrotation der Tibia eine transversale Außenrotation im Chopartgelenk stattfindet und dass das Navikulare und

das Cuboid supiniert wurden, und das sie und die Mittelfußknochen sich in eine relative Innenrotation und Plantarflexion (d.h. gegenüber dem Talus und Calcaneus) bewegten.

Dies geschieht mit nach außen schwingender Abduktion auf Höhe der Tarsalgelenke in der transversalen Ebene (von einer nach innen abgewinkelten Position) sind die koordinierten Bewegungen des Vorfußesegments (navikular und cuboid, laterales und zentrales Cuneiforme und 2. und 3. Mittelfußknochen):

**S**upination

**I**nnenrotation

**P**lantar- flexion

Die Bewegungen des Calcaneus relativ gegenüber dem supinierten Cuboid (und Naviculare) sind deshalb das Gegenteil:

**P**ronation (aber relativ zum Boden ist das Ausmaß der Supination hälftig zum Cuboid)

**E**xterne Rotation

**D**orsalflexion

Die Bewegungen des Talus gegenüber dem supinierten Naviculare (und Cuboid) und dem Fersenbein sind:

**P**ronation (aber keine tatsächliche Drehung in Bezug auf den Boden in der Frontalebene und so wird die horizontale Position des Talus beibehalten, während Fersenbein und Kahnbein einer Supination unterhalb des Talus unterliegen)

**A**ußenrotation (Außendrehung relativ zu Naviculare doppelt so weit wie zum Calcaneus)

**D**orsalflexion (bezogen auf den Boden, Talus Dorsalextension doppelt so viel wie der Calcaneus)

Diese koordinierten Bewegungsmuster sind unvermeidlich, wenn der Vorfuß plantigrad fixiert ist und die Tibia vertikal verbleibt und der Mittelfuß winkelt sich nach außen (ein Beispiel für eine geschlossenen Kettenbewegung).

Wenn somit der Mittelfuß (Kahnbein und Cuboid) **supiniert**, durchlaufen die distalen Knochen an jeder der drei Mittelfuß/Rückfuß- Gelenke (calcaneo-cuboid, talo- calcaneal und talo- calcaneo- navicular) die folgende

## **triplanaren Bewegungen gegenüber den proximalen Knochen:**

**S**upination  
**I**terne Rotation                                 **S I P-f**  
**P**lantarflexion

Daraus folgt, dass die jeweiligen triplanaren Bewegungen der proximalen Knochen gegenüber der distalen Gelenkfläche dann sind:

**P**ronation  
**E**xterne Rotation                                 **P E D**  
**D**orsalflexion

Wenn eine Einwärtsdrehung an den Chopartgelenken auftritt und der Mittelfuß unterzieht sich einer Pronation werden die jeweiligen triplanaren Bewegungen umgekehrt:

Die distalen Knochen unterziehen einer relativen

**P**ronation  
**E**xterne Rotation                                 **P E D**  
**D**orsalflexion

Und die proximalen Knochen unterziehen relativ gesehen einer

**S**upination  
**I**terne Rotation                                 **S I P-f**  
**P**lantarflexion

Ich finde es hilfreich, sich an **PED** und **SIP-f** zu erinnern und diese Dreiebenen- Bewegungs- Kombinationen beim Versuch die koordinierten Bewegungen, von Mittelfuß und Rückfuß zu verstehen, anzuwenden.

## **L. Diagramme, die die dreidimensionalen Bewegungen an den Inter-Tarsalgelenken: Vorfuß und Rückfuß darstellen**(Folien 50-63)

Diese sind nach bewegungsradiologischen, klinischen und osteologischen Studien, die die koordinierten, in 3 Ebenen ablaufenden Fußbewegungen untersuchten, produziert worden. Sie versuchen, den Bewegungsablauf des Groß-Zehen-Extensions-Test dazustellen und zeigen die Abduktion in der Transversalebene der Intertarsalgelenke.

Ich bin überzeugt, dass die Form der Gelenkflächen und der Position und

"Straffheit" der gelenkführenden Bänder des C- C, T- C und T- C- N Gelenke die resultierenden koordinierten Bewegungen unvermeidlich machen.

#### **M. Exaktheit der Ambagtsheer Ergebnisse** (Folien 64-65)

Diese bieten ähnliche Bewegungsmuster wie in den Folien für **K** und bei den aufgezeichneten Drehbewegungen. Abduktion am Chopartgelenk und Supination des Mittelfußes führt zu doppelt so großer Supination des Cuboids in Relation zum Fersenbein und der Talus außenrotiert doppelt so weit wie der Calcaneus.

#### **N. Diagramme, die die Mittelfuß Außenrotation und Winkelung und die Ausgleichsrotationen im Rückfuß und Vorfuß demonstrieren** (Folien 66-69)

Diese zeigen die seitlichen Schwenkbewegungen der Chopartgelenke. Die verringerte Farbgebung der grün/ blau (Supination / Pronation) des Calcaneus in Folien von 56 bis 58 zeigt, dass der Calcaneus halb so viel supiniert/ proniert wie das stabile zentrale Vorfußsegment. Es sollte auch klar sein, dass diese Schwenkbewegungen im Talus stattfinden der extern/ intern doppelt so viel dreht wie das Fersenbein.

#### **O. Das Fußskelett in den Positionen "Neutralität", lateralen und medialen Schwenkbewegungen der Chopartgelenke mit dem entsprechenden ("closed-chain") Vorfuß und Rückfuß Ausgleich -Drehungen werden gezeigt** (Folien 70-74)

#### **P. Die Hypothese: eine mögliche Erklärung für die lateralen und medialen Schwenkbewegungen am Mittelfuß, für die Mittelfuß Supinations- und Pronations Bewegungen und die kompensatorischen Regulierungen von Vorfuß und Rückfuß** (Folien 75-76)

In den verschiedenen Stellungen zwischen der vollen Innenrotation und der Mittelfußpronation und voller Außenrotation und Mittelfuß Supination, wirken drei Hauptkräfte, auf den Fuß in der Sagittalebene, d.h. eine Unterstützung auf Rückfuß (Achillessehne und / oder plantarem Druck unter der Ferse), läuft das gesamte Körpergewicht durch den Talus, und das Zentrum von Vorfuß / Mittelfuß mit der Druckbelastung kann in einer Reihe bilanziert

werden . Der Fuß ist in der Lage als ein Ausgleichshebel zu wirken. Dieser "ausgewogene" Fuß, mit drei Schichten von plantaren Bänder unterstützt (Lig. calcaneo- naviculare plantare, Lig. plantare longum und die plantare Aponeurose) können, unter statischer oder dynamischer Spannungs- und Dehnungsbelastung, stabil sein.

**Q: Die seitlichen 'swing' Bewegungen in der Mittelfuß-Ebene sorgen für eine seitliche Balance** (Folien 77-79)

Wenn die medialen/ lateralen Schwingbewegungen in der Chopart- Ebene auftreten, so bewegt sich auch das Sprunggelenk von Seite zu Seite. Kontrolliert wird das durch einen Mechanismus wie für einen seitlichen Ausgleich (wie ein Jongleur eine senkrechte Stange ausbalanciert).

**Es wird davon ausgegangen, dass die seitlichen Schwingbewegungen an den transversalen Tarsalgelenke und damit auch die lateralen Ausgleichsmechanismen durch den Tibialis posterior und die Peronei und die dazugehörigen 'Dehnungsreflexe' gesteuert werden.**

David Stainsby, September 2012

### References

1. Ambagtsheer JBT. The function of the muscles of the lower leg in relation to movements of the tarsus. An experimental study in human subjects. *Acta Orthop Scand* 1978; Suppl 172. Copenhagen, Munksgaard.
2. Bojsen-Møller F, Flagstad KE. Plantar aponeurosis and internal architecture of the ball of the foot. *J Anat* 1976; 121(3): 599.
3. De Doncker E, Kowalski C. Le pied normal et pathologique. *Acta Orthopaedica Belgica* 1970. Tome 36; Fasc 4-5: 386-559.
4. Elftman H. The transverse tarsal joint and its control. *Clin Orthop* 1960; **16**: 41.
5. Hicks JH. The mechanics of the foot. I: The joints. *J Anat* 1953; **87**: 345 – 357.
6. Hicks JH. The mechanics of the foot. II: The plantar aponeurosis and the arch. *J Anat* 1954; **88**: 25 – 30.

7. Hicks JH. The foot as a support. *Acta Anat* 1955; **25**: 34 – 45.
8. Hicks JH. The mechanics of the foot IV. The action of muscles on the foot in standing 1956. *Acta anat*; 27: 180-192.
9. Hicks JH. The three weight-bearing mechanisms of the foot. 1961; In *Biomechanical Studies of the Musculo-skeletal System* (Ed FG Evans). Springfield, IL., Charles C Thomas.
10. Huson A. “Een Ontleed kundig Functioneel Onderzoek van de Voetwortel” (A functional and anatomical study of the tarsus). Ph D Dissertation, Leiden. Leiden University, 1961.
11. Huson A. Joints and Movements of the Foot: Terminology and Concepts. *Acta Morphol Neerl-Scand* 1987; **25**: 117-130.
12. Huson A. Functional Anatomy of the Foot. In *Disorders of the Foot and Ankle* (Ed M H Jahss) 1991, 409-431. Philadelphia, W B Saunders Company.
13. Lewis OJ. The joints of the evolving foot. Part II. The intrinsic joints. *J Anat* 1980; **131**: 275-57.
14. Lewis OJ. *Functional Morphology of the Hand and Foot* 1989; 253. Oxford, Clarendon Press.
15. Lundberg A, Svensson, OK, Bylund C, Goldie I., Selvik G. Kinematics of the ankle/foot complex. Part 2: Pronation and supination. *Foot Ankle* 1989; **9** (5): 248-253.
16. Lundberg A, Svensson, OK, Bylund C, Selvik G. Kinematics of the ankle/foot complex. Part 3: Influence of leg rotation. *Foot Ankle* 1989; **9** (6): 304-309.
17. MacConaill MA. The postural mechanism of the human foot. *Proc R Ir Acad* 1945; **50**(14): 265.
18. MacConaill MA, Basmajian, JV. *Muscles and Movements: A Basis for Human Kinesiology* 1969; 74–84. Baltimore, Williams and Wilkins.
19. Manter JT. Movements of the subtalar and transverse tarsal joints. *Anat Rec* 1941; **80**: 402.
20. Stainsby GD. Pathological anatomy and dynamic effect of the displaced plantar plate and the importance of the integrity of the plantar plate–deep transverse metatarsal ligament tie-bar. *Ann R Coll Surg Engl* 1997; **79**: 58-68.
21. Van Langelaan EJ. A kinematical analysis of the tarsal joints. An X-ray photogrammetric study, 1983. *Acta Orthop Scand*; 54 (Suppl 204). Copenhagen, Munksgaard.
22. Winson IG, Lundberg A, Bylund C. The pattern of motion of the longitudinal arch of the foot. *The Foot* 1994; **4**: 151 – 154.



