

# Footnotes : anatomical and functional studies on the sole of the foot

## Citation for published version (APA):

Weijers, R. E. (2005). *Footnotes : anatomical and functional studies on the sole of the foot*. Datawyse / Universitaire Pers Maastricht.

## Document status and date:

Published: 01/01/2005

## Document Version:

Publisher's PDF, also known as Version of record

## Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

## General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

[www.umlib.nl/taverne-license](http://www.umlib.nl/taverne-license)

## Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

[repository@maastrichtuniversity.nl](mailto:repository@maastrichtuniversity.nl)

providing details and we will investigate your claim.

## General discussion

Despite a multitude of publications on the morphology and function of the sole of the foot, the resulting contemporary image is incomplete and sometimes confusing. Besides, some fundamental concepts that are used in interpreting (diagnostic) tests and in planning therapeutic interventions, were never systematically tested. The possible value of this thesis lies not so much in the fundamental issues it addresses or in information it adds to the contemporary knowledge of the sole, but more in the change of the general concept on the function of the sole it offers. Putting the various elements of the previous chapters together, the sole of the foot emerges as a highly organized and differentiated structure that helps to protect the rest of the body against injury. It proved to be an integral part of the foot, where regional differences in functional requirements are expressed in morphological and mechanical differences.

During locomotion, the bones of the fore foot 'freely' move around in the soft tissue of the sole in both vertical and horizontal directions. In the horizontal directions (including the deformation by torque), the extent of this movement is limited by various connective tissue structures that tether the skin and subcutaneous soft tissue of the sole to the deeper layers of the foot (chapter 2). MRI displayed this limitation in the antero-posterior direction. Thus, the internal connective tissue structures provide stability to the sole of the foot with the preservation of the necessary mobility to adapt to irregularities of the ground. Moreover, mobility helps to disperse the repetitive loadings of locomotion over a larger area. In this sense, mobility of the skin relative to the bones helps to protect the skin from injury. In addition to the already mentioned properties, the internal connective tissue structures seem to be able to (passively) deflect the loadings away from the most vulnerable parts of the bones of the foot (chapter 4).

The vertical down shift of the bones into the soft tissue of the sole is important in damping the impact forces of locomotion. In the unloaded situation, the thickness of the soft tissue under the metatarsal heads increases from lateral to medial. At progressive loadings of the forefoot, the sole of the foot progressively gets thinner, but the mutual position of the metatarsal heads persists. The loadings on the forefoot are centrally and medially higher than laterally. The soft tissue keeps the metatarsal heads in place; its thickness illustrates the principle of adequate cushioning, not the existence of a functional distal transverse arch (chapter 5). To facilitate the vertical down shift of the metatarsals, the pliable subcutaneous tissue is displaced to the borders of the foot, similar to the widening of the heel pad during loading as was reported by others. Moreover, some tissue is shifted dorsally in the intermetatarsal spaces, as the loading causes the metatarsal bones to sink into the sole. This mechanism may add to the damping power of the forefoot (chapter 3).

Also compression of the venous plexus of the forefoot added to the vertical down shift of the metatarsal heads as made plausible by the decrease in volume of the plantar side of the forefoot after loading. Because of the large magnitude of the decrease, we hypothesized that the venous plexus functions as a hydro-mechanical damper. Although we confirmed this hypothesis at the heel region with pendulum impact tests, the venous plexus only marginally contributed to the damping power of the sole (chapter 9). In the forefoot, also deep venous structures are present. However, a similar test on the forefoot did not demonstrate a contribution of the venous plexus to the damping power. Probably, this was due to the difficulties in stabilizing the forefoot during impact, which limited the accuracy (chapter 10). The fundamental visco-elastic properties of biomaterial predict a change in the mechanical behaviour on repeated impacts. Because we used repeated impacts to evaluate the effects of venous congestion, we also had to analyse the effect of repeated impacts as such. Earlier studies, using a similar type of *in vivo* experiments, reported no effect of repeated impacts. At lower impact velocities, we confirmed the visco-elastic properties in the increase of the elasticity of the padding on consecutive impacts (chapter 8). Moreover, we found a velocity

dependency that could not exclusively be explained by the fundamental properties. This velocity dependency seemed to support the recent suggestion that the muscles of the lower leg can actively anticipate and adapt to the next impact in a series of impacts as in locomotion. This 'tuning' of the muscles is directed to increase the damping power of the lower leg system.

We also compared the mechanical properties of the forefoot and the heel (chapter 10). The impacts on the heel were significantly more elastic. Because the structure of the sole at the forefoot and the heel differ only in detail, the presence of the deeper layers should explain the difference. Together with the observations that the presence of the lower leg increases the damping of an impact, we have come to the insight that attenuation of an impact not only involves the padding of the foot, but also involves a much larger area. This observation explains the sometimes contradictory reports on the mechanics of the heel, but also illustrates the complexity of the field of the mechanics of locomotion.

Although we painted a dynamic picture of a continuously adapting sole of the foot on loading, we realise that some caution in this interpretation is in place. In fact, the foregoing description originates from sequential static positions, not from truly dynamic events of normal locomotion. Moreover, the presented results originate from normal subjects. Therefore, one should be cautious to extrapolate our observations to pathological conditions such as diabetes mellitus or to the field of designing shoes or inlays. Nevertheless, the results can be used as a starting point of future investigations.

## Summary

To meet the requirements of locomotion, the sole of the foot is pliable, resilient, and tough. In *chapter 2*, the underlying internal structures were described as visualized by MRI and they were compared with contemporary anatomic insights. In general, the anatomy that MRI displayed largely was in line with the descriptions of traditional anatomy. However, MRI not only showed some additional structures, but also gave more insight in the relation between the internal structures, and stability and integrity of the sole of the foot.

The third to the seventh chapter deal with one experiment that was carried out on ten healthy volunteers, from different perspectives. The experiment combined morphology as depicted by computed tomography with plantar pressure distributions as registered by a pressure measuring inlay.

In *chapter 3* we described the changes in the distribution of soft tissue in the forefoot on loading. The most prominent result was a decrease of the volume on the plantar side (4.8 %) that was most likely due to the compression of plantar venous structures. Besides, a small increase in volume (1.6 %) on the dorsal side likely reflected a dorsal shift of soft tissue in the intermetatarsal spaces. Both observations are potentially important in relation to shock absorption and they initiated the complementary study on which chapter eight to ten reported.

In clinical and experimental studies, the unspoken premise that peak plantar pressure is located directly under the bony prominences in the forefoot is used. Even therapeutic interventions are based on this premise. In *chapter 4* the hypothesis was put to the test. It showed that the position of the metatarsal heads 1, 4, and 5 and the position of local peak plantar pressure differed significantly. The findings suggest that normal plantar soft tissue is able to deflect a load away from the most vulnerable structures. The observations improve

insight in the function of the normal forefoot and might direct further research on pathogenesis and therapeutic intervention of complaints of the forefoot.

Although the existence of a transverse arch at the level of the heads of the metatarsals is generally denied, it is still a matter of debate. In *chapter 5*, we investigated the matter by describing the relation between the position of the metatarsal heads as indicated by the thickness of the sole underneath, and the corresponding plantar pressures during different degrees of loading. Excluding the sesamoids, the thickness of the sole under the bones of the forefoot increased from lateral to medial. This relation persisted at all degrees of loading. Including the sesamoids in the load bearing bony structures, the bones were placed in geometrical arch; just the same they did not form a functional arch. The soft tissue underneath the heads kept them in place; its thickness reflected the principle of adequate cushioning.

In preparation to study the effect of loading of the forefoot on the position of the metatarsals with the data of our CT experiment, it was noticed that most reports on metatarsal splaying used angular measurements on radiographs. However, the distortion that comes with radiographic projection of bones was never systematically investigated. In *chapters 6 and 7* radiography was simulated to quantify radiographic distortion in angular measurements in the forefoot. We used a mathematical model for a theoretical analysis and our CT-data to study distortion in daily practice.

The distortion of the declination angles of the metatarsals on the lateral radiograph was practically negligible. The variability of distortion of the intermetatarsal angles on the antero-posterior radiograph was only about one third of the interobserver variability. However, they may have cumulative effects on the error of measured intermetatarsal angles and should be considered (*chapter 6*).

The distortion due to angulation of the roentgen tube was so small, that for practical reasons, a 15° cranio-caudal tube angulation was recommended as the standard technique to obtain an antero-posterior radiograph of the forefoot (*chapter 7*).

From the eighth to the tenth chapter, the results of impact experiments were presented. In the experiments a pendulum collided with the sole of the foot of healthy volunteers. During the impact, the deceleration of the pendulum was recorded with an accelerometer that was firmly attached to the back of the bar of the pendulum. From these recordings, load-deformation curves were derived. Four parameters characterized the individual curves. Changes in the magnitude of the parameters before and after an intervention described the effect.

Primarily, we were interested in the contribution of the plantar venous structures to the damping power of the sole of the foot. Because this only could be determined by sequential measurements, we also had to take the (possible) effect of repeated impacts into account.

*Chapter 8* reports on this effect of repeated impacts on the heel region. Overall, repeated collisions resulted in more elastic impacts, characterized as a rise of maximum force and maximum indentation and a decline of dissipated energy and stiffness (all in the order of 3%). If a parameter showed changes in magnitude, most of the change was already reached after the very first impacts. The fundamental visco-elastic properties of the heel pad explain most of these observations. However, the significant decrease of the maximum force and stiffness on consecutive impacts at higher impact velocities do not match to the visco-elastic properties. We suggested that these observations expressed the adaptation of the muscles of the calf to the impact force, also referred to as 'tuning'. We concluded that the damping effect of the lower leg more than compensated the loss of damping power of the heel pad on repeated impacts.

In *chapter 9* we tested the hypothesis that the venous plexus might contribute as a hydraulic shock absorber to the damping properties of the heel pad. At congestion of the plantar veins, the maximum impact force decreased slightly but significantly by 2.6 % at 0.2 m/s and 1.8 % at 0.4 m/s. This effect was no longer found at 0.6 m/s. Although these effects are rather small, they confirm the fundamental hypothesis that the venous plexus contributes to the damping properties of the heel pad during walking.

To our knowledge, presently no data are available on the damping properties of the forefoot. In *chapter 10*, we reported on pendulum impact tests on the forefoot similar to previous experiments on the heel with one and the same group of volunteers. The goal of this study was to explore whether the forefoot also showed effects of venous congestion and repeated impacts as observed in the heel region. Moreover, we wanted to compare the magnitude of the parameters that described the impacts on the heel region with those on the forefoot. The results did not show a significant contribution of venous congestion to the damping abilities of the sole. The effect of repetitive impacts was confirmed and results paralleled those of the heel. The mechanical characteristics were significantly different at the forefoot compared to those of the heel region. Most likely, the differences in anatomy of the forefoot and the heel explain this result rather than an intrinsic difference in the mechanical properties of the soft tissue of the sole of the foot. The results illustrate that the damping of an impact is not a local phenomenon, but involves the underlying structures as well.

## Algemene beschouwing en samenvatting

### Algemene beschouwing

Ondanks vele publicaties, is het huidige beeld van de vorm en functie van de voetzool incompleet en soms zelfs verwarrend. Bovendien zijn fundamentele concepten die gebruikt worden bij het interpreteren van (diagnostische) onderzoeken en het plannen van behandelingen nooit systematisch onderzocht. In dit proefschrift zijn een aantal onderzoeken beschreven die betrekking hebben op deze fundamentele zaken. De betekenis van dit proefschrift moet echter eerder gezocht worden in de gehanteerde benadering van de functie van de voetzool dan in de verdiepende fundamentele kennis. De in dit proefschrift beschreven studies creëren een beeld van de voetzool als een sterk georganiseerde en gedifferentieerde structuur, die helpt de rest van het lichaam te beschermen. De zool blijkt een integraal deel van de voet te zijn, waarvan regionale verschillen in functie tot uiting komen in verschillen in vorm en mechanische eigenschappen.

Tijdens het lopen, bewegen de botten van de voorvoet voortdurend ten opzichte van de weke delen van de zool, zowel in horizontale als in verticale richting. In horizontale richting (inclusief de vervorming door draaiing) wordt de verschuiving beperkt door verschillende bindweefselstructuren die de huid en de onderhuidse weke delen verbinden met de diepere lagen van de voet (*hoofdstuk 2*). MRI illustreerde dit voor de voorachterwaartse verschuiving. Daarnaast geven de onderhuidse bindweefselstructuren stevigheid aan de zool met behoud van de nodige beweeglijkheid om zich aan te passen aan onregelmatigheden op de grond. Bovendien helpt de beweeglijkheid om de zich herhalende belasting tijdens het lopen te verspreiden over een groter oppervlak van de zool. Hierdoor wordt de huid beschermd tegen beschadiging. Naast de reeds genoemde eigenschappen, lijken de inwendige bindweefselstructuren de krachten die tijdens lopen optreden af te kunnen buigen van de meest kwetsbare delen van het voetskelet (*hoofdstuk 4*).

De neerwaartse verplaatsing van de botten in de weke delen van de zool is belangrijk bij het dempen van krachten die optreden tijdens het landen bij lopen en rennen. In een onbelaste toestand, neemt de dikte van de zool onder de kopjes van de middenvoetsbeentjes van buiten naar binnen toe. Centraal en aan de binnenkant van de voorvoet is de belasting groter dan aan de buitenkant. Bij toenemende belasting, wordt de zool dunner, maar de onderlinge positie van de kopjes van de middenvoetsbeentjes verandert niet. De weke delen van de zool blijken de kopjes op hun plaats te houden. De dikte van de weke delen van de zool onderstreept de noodzaak tot demping op plaatsen van de grootste belasting, maar is geen argument voor het bestaan van een functioneel voorste dwarse voetgewelf (*hoofdstuk 5*). Om de neerwaartse verplaatsing van het voetskelet mogelijk te maken, wordt het soepele onderhuidse weefsel naar de voetranden verplaatst. Bovendien verschuift er weefsel tussen de middenvoetsbeentjes naar de rug van de voet, terwijl de middenvoetsbeentjes zelf in de voetzool zinken. Dit mechanisme kan een aanvullende rol spelen in het dempende vermogen van de voorvoet (*hoofdstuk 3*).

Ook het leegdrukken van aderen in de voorvoet helpt bij de neerwaartse verplaatsing van de kopjes van de middenvoetsbeentjes, zoals waarschijnlijk gemaakt werd door het volumeverlies van de weke delen aan de plantaire zijde van de voet na het belasten. Vanwege de grootte van dat volumeverlies, hypothetiseerden we dat de ader werkte als een hydromechanische demper. Hoewel we de hypothese konden bevestigen met botsingsproeven van een slinger in de hielregio, was het dempende effect slechts marginaal. Een soortgelijke test op de voorvoet toonde in het geheel geen effect op de demping van de botsing. Dit werd waarschijnlijk verklaard door een mindere nauwkeurigheid van de metingen omdat de voorvoet tijdens de botsingsexperimenten moeilijker te stabiliseren was (*hoofdstuk 10*).

De fundamentele visco-elastische eigenschappen van natuurlijke materialen voorspellen een verandering in mechanisch gedrag na herhaalde botsingen. Omdat we een reeks van opvolgende botsingen gebruikten om het effect van stuwung van de aderen te onderzoeken, moesten we ook het effect van herhaalde botsingen als zodanig onderzoeken. Eerdere studies van andere auteurs, die van eenzelfde type onderzoek gebruik maakten, rapporteerden dat er geen effect was van herhaalde botsingen op demping. Bij lagere botsingssnelheden konden wij de visco-elastische eigenschappen bevestigen, omdat er een toename van de elasticiteit van het weefsel van de zool werd vastgesteld (*hoofdstuk 8*). Echter, de fundamentele weefseleigenschappen konden niet verklaren dat herhaalde botsingen een toename lieten zien van het dempende vermogen van de zool bij toenemende botsingssnelheid. Deze relatie lijkt de recente suggestie te ondersteunen, dat de spieren van het (onder)been zich actief kunnen voorbereiden op de komende 'klap' in een serie van botsingen zoals tijdens lopen. Deze 'fijnafstelling' van spieren zou het dempende vermogen van het onderbeen-systeem vergroten.

Tevens vergeleken we de mechanische eigenschappen van de voorvoet en de hiel (*hoofdstuk 10*). De botsingen op de hiel waren significant elastischer. Omdat de structuur van de voetzool van de hiel en de voorvoet slechts in detail van elkaar verschillen, moet de aanwezigheid van diepere structuren de gevonden verschillen verklaren. Samen met de waarneming dat de aanwezigheid van het onderbeen de demping van een botsing versterkt, zijn wij tot het inzicht gekomen dat een botsing niet alleen de lokale weke delen treft, maar een veel groter gebied. Deze vaststelling verklaart de soms tegenstrijdige berichten over de mechanica van de hiel, maar het illustreert tegelijkertijd de complexiteit van de mechanica van het lopen.

Hoewel we een dynamisch beeld hebben geschetst van een zich continu aanpassende voetzool tijdens belasting, realiseren we ons dat enige reserve bij deze interpretatie op zijn plaats is. Eigenlijk vindt de bovenstaande beschrijving niet zijn oorsprong in echte dynamische bewegingen, maar in opeenvolgende statische posities. Bovendien zijn de verkregen resultaten afkomstig van onderzoek aan gezonde proefpersonen. Daarom dient men zorgvuldig en terughoudend te zijn bij het extrapoleren van onze resultaten naar pathologie zoals diabetes mellitus, of naar het veld van het ontwerpen van schoenen of steunzolen. Desalniettemin kunnen de resultaten een uitgangspunt vormen voor toekomstig onderzoek.

## Samenvatting

Om te kunnen lopen of rennen, moet de voetzool soepel, veerkrachtig en tegelijkertijd taai zijn. In *hoofdstuk 2* worden de inwendige bindweefselstructuren beschreven zoals MRI die zichtbaar maakt. Deze beelden worden vergeleken met de huidige anatomische inzichten. In het algemeen komt de anatomie, zoals die zichtbaar wordt met MRI overeen met de beschrijvingen van de traditionele anatomie. Echter, MRI toonde niet alleen enkele nieuwe structuren, maar gaf ook meer inzicht in de onderlinge samenhang van diverse inwendige structuren en in de stabiliteit en integriteit van de voet.

In *hoofdstuk 3* tot en met *7* wordt een experiment op tien gezonde proefpersonen vanuit verschillende invalshoeken behandeld. Het experiment combineerde computertomografie en drukmeting met behulp van een drukgevoelige inlegzool. Zo kon de relatie tussen de vorm van de voet en de drukverdeling onder de voetzool worden vastgesteld.

In *hoofdstuk 3* beschrijven wij de veranderingen in de verdeling van de weke delen van de voorvoet door belasting. Het meest opvallende resultaat was een afname van het volume

van de voetzool (4,8%), die hoogst waarschijnlijk grotendeels het gevolg was van het leegdrukken van aderen. Bovendien, werd er een kleine volumetoename (1,6%) van de voetrug vastgesteld, die verklaard kan worden door een verplaatsing van weefsel in de ruimte tussen de middenvoetsbeentjes. Beide waarnemingen kunnen in principe van belang zijn bij schokabsorptie en zij vormden de aanleiding voor aanvullend onderzoek dat in het achtste tot het tiende hoofdstuk wordt beschreven.

In klinische en experimentele studies wordt impliciet de veronderstelling gebruikt dat precies onder het botstuk dat het diepst in de voetzool staat, de hoogste plantaire druk is gelegen. Zelfs therapieën maken van deze veronderstelling gebruik. In *hoofdstuk 4* werd de hypothese getest. De positie van de kopjes van de middenvoetsbeentjes 1, 4, en 5 en de positie van de hoogste locale plantaire druk bleken significant van elkaar te verschillen. Deze bevinding suggereert dat het weefsel van de voetzool in staat is belasting van de meest kwetsbare structuren af te leiden. Deze waarneming vergroot het inzicht in de functie van de normale voorvoet en kan een uitgangspunt zijn voor toekomstig onderzoek naar het ontstaan van ziekte en het ontwikkelen van behandelingen bij klachten van de voorvoet.

In voorbereiding op een analyse van het spreiden van de voorvoet bij belasting met onze gegevens van het CT-experiment, viel ons het veelvuldige gebruik van hoekmetingen op röntgenfoto's in de bestaande literatuur op. Echter, de vertekening die ontstaat door radiologische projectie van botten is nooit systematisch onderzocht. In de *hoofdstukken 6 en 7* werd de invloed van de radiologische vertekening op hoekmeting van de middenvoetsbeentjes gekwantificeerd door de radiologische opnametechniek te simuleren. Hiervoor gebruikten we een wiskundig model voor theoretische analyse en onze gegevens van het CT-experiment voor representatieve analyse van de dagelijkse praktijk. Voor de zijdelingse röntgenfoto bleek de vertekening van de declinatiehoeken van de middenvoetsbeentjes praktisch verwaarloosbaar. Voor de voorachterwaartse röntgenfoto, bedroeg de variantie van de vertekening van de hoeken tussen de middenvoetsbeentjes slechts een derde van de variantie van de waarnemers onderling, zoals die door andere auteurs was vastgesteld. Desondanks, dient rekening gehouden te worden met vertekening, omdat vertekening en de waarnemerfout een cumulatief effect kunnen hebben op de fout in de hoekmeting (*hoofdstuk 6*).

De vertekening als gevolg van angulatie van de röntgenbuis bleek zo klein te zijn, dat we, om praktische redenen, toch een standaard techniek voor de voorachterwaartse röntgenfoto aanbevelen met een cranio-caudale buisangulatie van  $15^\circ$  (*hoofdstuk 7*).

De resultaten van de botsingsproeven worden in *hoofdstuk 8* tot en met *10* gepresenteerd. Bij deze experimenten botst het gewicht van een slinger tegen een deel van de voetzool van gezonde vrijwilligers. Een accelerometer die stevig op de achterzijde van het gewicht was gemonteerd, registreerde de versnelling van het gewicht tijdens de botsing. Van deze registratie werden krommes afgeleid die de belasting als functie van de indeuking weergaven. We kozen vier variabelen om een kromme te karakteriseren. De veranderingen in de grootte van een dergelijke variabele na een interventie werden als maat voor het effect genomen. In eerste instantie waren we geïnteresseerd in de bijdrage van aderen aan het dempende vermogen van de voetzool. Omdat dit alleen kon worden vastgesteld door gedurende langere tijd herhaaldelijk botsingen te meten, moesten we ook rekening houden met de mogelijkheid dat herhaling van botsing op zich ook al een effect kon hebben. *Hoofdstuk 8* rapporteert over het effect van herhaalde botsingen tegen de hiel. In het algemeen leidt herhaling tot meer elastische botsingen, die gekarakteriseerd worden door een toename van de maximale kracht en maximale indeuking en een afname van de gedissipeerde energie en stijfheid (alle effecten ongeveer 3%). Als een variabele een verandering toonde, was het grootste deel van het effect al na de eerste botsingen bereikt.



De fundamentele visco-elastische eigenschappen van de voetzool van de hiel kunnen een deel deze waarnemingen verklaren. Een significante afname van de maximale kracht en stijfheid bij opvolgende botsingen bij hogere botsingssnelheden klopten echter niet met de veronderstelde visco-elastische eigenschappen. Wij suggereerden dat deze waarnemingen een uiting zijn van de aanpassing van de spieren in de kuit aan de kracht van een botsing, in de literatuur ook wel 'fijnafstemming' genoemd. Wij concluderen dat het dempende effect van het onderbeen meer dan compenseerde voor het verlies van het dempende vermogen van de zool van de hiel bij herhaalde botsingen.

In *hoofdstuk 9* hebben we de hypothese getest dat de aderen van de voetzool als een hydromechanische demper kunnen bijdragen aan het dempende eigenschappen van de zool van de hiel. Door de aderen te stuwen, nam de maximale kracht die tijdens de opvolgende botsing werd gemeten slecht 2,6% bij 0,2 m/s en 1,8% bij 0,4 m/s af. Deze resultaten waren significant. Bij 0,6 m/s werd geen effect meer vastgesteld. De fundamentele hypothese dat de aderen van de voetzool bijdragen aan dempende eigenschappen van de zool van de hiel tijdens wandelen worden hierbij bevestigd, ondanks de kleine omvang van de effecten.

Voor zover wij weten, zijn er momenteel geen gegevens beschikbaar over de dempende eigenschappen van de voorvoet. In *hoofdstuk 10* rapporteren wij over botsingstesten tegen de zool van de voorvoet, die lijken op de experimenten die bij de hiel werden uitgevoerd op dezelfde groep vrijwilligers. Het doel van de studie was te onderzoeken of de voorvoet ook effecten van stuwung van aderen en van herhaalde botsingen vertoont, zoals reeds was vastgesteld in de hiel. Bovendien wilden we de grootte van de variabelen die een botsing karakteriseren in de hiel vergelijken met die in de voorvoet. De resultaten toonden geen significante bijdrage van de stuwung van de aderen aan de dempende eigenschappen van de voorvoet. De effecten van herhaalde botsingen werden bevestigd en kwamen met de resultaten van de hiel overeen. De mechanische karakteristieken waren in de voorvoet en in de hiel significant verschillend. Waarschijnlijk worden de verschillen beter verklaard door anatomische verschillen tussen de voorvoet en de hiel dan door intrinsieke verschillen in de weke delen van de voet. De resultaten illustreren dat de demping van een impact niet een lokaal fenomeen is, maar dat ook de onderliggende structuren van belang zijn.