

Beweging en stabiliteit van het polsgewricht

Citation for published version (APA):

Lange, de, A., Kauer, J. M. G., & Huiskes, H. W. J. (1987). Beweging en stabiliteit van het polsgewricht. In *Biomechanica : aspecten van het bewegingsapparaat / Ed. R. Huiskes, ... [et al.]* (pp. 65-84). (Fysiotherapie in ontwikkeling; Vol. 9). Samsom Stafleu.

Document status and date:

Published: 01/01/1987

Document Version:

Publisher's PDF, also known as Version of Record (includes final page, issue and volume numbers)

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.tue.nl/taverne

Take down policy

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

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

4 Beweging en stabiliteit van het polsgewricht

A. de Lange, J.M.G. Kauer, R. Huiskes

4.1	Inleiding	65
4.1.1	Anatomie en bewegingsmogelijkheden	65
4.1.2	Onderzoek	67
4.2	Methode en materiaal 'polsproject'	69
4.3	Resultaten	74
4.3.1	Dorso-palmaire flexie	74
4.3.2	Radio-ulnaire deviatie	76
4.4	Discussie	79
	Referenties	83

4.1 Inleiding

Het polsmechanisme stelt ons in staat de hand in twee hoofdrichtingen (dorso-palmaire flexie en radio-ulnaire deviatie) en een combinatie daarvan, circumductie, te bewegen, terwijl een rotatie in het transversale vlak is uitgesloten.

De spieren die de polsbeweging sturen hebben twee belangrijke functies: zij maken de fijne positionering van de hand mogelijk en fixeren de hand als de gewenste positie is ingenomen, om zo een stabiel werkplatform te creëren. Het polsgewricht is een uiterst ingewikkeld mechanisme en reeds jaren onderwerp van belangstelling en onderzoek.

In dit hoofdstuk wordt verslag gedaan van een onderzoek dat in 1982 in Nijmegen van start ging, het 'polsproject'. Daaraan voorafgaand zal in deze paragraaf eerst aandacht worden besteed aan de anatomie van de hand en zal een overzicht gegeven worden van de belangrijkste onderzoeken die tot nu toe hebben plaatsgevonden.

4.1.1 Anatomie en bewegingsmogelijkheden

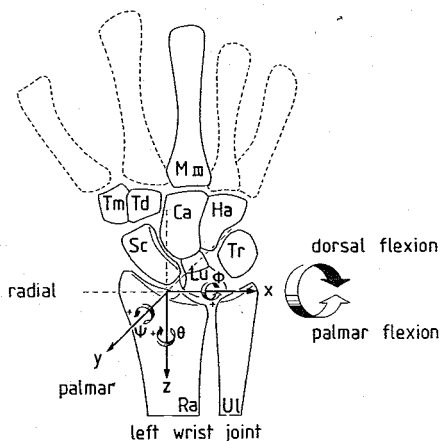
Het polsgewricht bestaat uit zeven carpalia, rust proximaal op de radius en de discus articularis en maakt distaal contact met de metacarpalia.

- Hamer A. A static knee-loading apparatus. Nijmegen: Third Meeting of the European Society of Biomechanics, 1982.
- Hughston JC, Andrews JR, Cross MJ, Moschi A. Classification of knee ligament instabilities, parts I and II. *J Bone Jt Surg* 1976; 58-A: 159-179.
- Huiskes R, Blankevoort L, Dijk R van, Lange A de, Rens ThJG van. Ligament deformation patterns in passive knee-joint motions. In: Spilker RL (ed), 1984 *Advances in Bioengineering*. New York: Am Soc Mech Engrs 1984; 53-54.
- Huiskes R, Kremers J, Lange A de, Woltring HJ, Selvik G, Rens ThJG van. Analytical stereophotogrammetric determination of three-dimensional knee joint geometry. *J Biomechanics* 1985; 18: 559-570.
- Huiskes R, Dijk R van, Lange A de, Woltring HJ, Rens ThJG van. Kinematics of the human knee joint. In: Berme N, Engin AE, Correia da Silva KM (eds), *Biomechanics of normal and pathological human articulating joints*. Dordrecht/Boston/Lancaster: Martinus Nijhoff publ, 1985; NATO-ASI-series E93: 165-187.
- Huson A. Biomechanische Probleme des Kniegelenks. *Orthopaedie* 1974; 3: 119-126.
- Jaspers PJTM. De mechanische functie van de menisci in het kniegewricht. Dissertatie. Nijmegen: Katholieke Universiteit Nijmegen, 1982.
- Kapandji IA. *The physiology of the joints*. Vol. II. Edinburgh, London, New York: Churchill Livingstone, 1970.
- Lanz J, Wachsmuth W. *Praktische Anatomie, Bein und Statik*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1972.
- Selvik G. A Roentgenstereophotogrammetric method for the study of the kinematics of the skeletal system. Dissertatie. Sweden: University of Lund, 1974.
- Walker PS. *Human joints and their artificial replacement*. Illinois: Charles C. Thomas, 1977.

**Bibliotheek Lab. voor Anatomie
en Embryologie
Oostersingel 69
9713 EZ GRONINGEN**

Meestal wordt de rangschikking van de carpalia beschreven als in twee rijen: een proximale en een distale rij. De proximale rij bestaat uit het os scaphoïdeum, het os lunatum en het os triquetrum. De distale rij wordt opgebouwd door het os trapezium, het os trapezoïdeum, het os capitatum en het os hamatum (fig. 4-1). Het os pisiforme wordt in dit geheel als een sesamoïd botstuk beschouwd. Op basis hiervan worden de articulaties in het polsgewricht beschreven als:

- het radio-carpale gewricht tussen de proximale carpalia en het distale gedeelte van de radius en de discus articularis,
- het midcarpale gewricht dat gevormd wordt door de proximale en de distale carpale rij,
- de intercarpale gewrichten, de gewrichten tussen de beenstukken in één rij onderling.



Figuur 4-1. Carpale botstukken van het polsgewricht: Ra, radius; Ul, ulna; Sc, scafoïd; Lu, lunatum; Tr, triquetrum; Tm, trapezium; Td, trapezoïd; Ca, capitatum; Ha, hamatum en MIII, metacarpale III. Een referentie-coördinatiestelsel is geïntroduceerd in de radius.

De (carpale) botstukken hebben ieder zeer specifiek gevormde gewrichtsvlakken, zodanig dat bij anatomische rangschikking deze contactvlakken onderling een treffende passing vertonen. Deze passing wordt gehandhaafd door kapsel en ligamenten, die de botstukken onderling verbinden, en pezen.

Tijdens door spieractiviteit extern opgelegde belastingen worden via het carpale mechanisme krachten overgedragen van de hand op de onderarm. Het carpale mechanisme moet dus in feite tegelijkertijd aan twee eisen voldoen:

1. het toelaten van grote bewegingen,
2. het garanderen van stabiliteit in elke positie van de hand.

Deze twee eisen worden in het carpale mechanisme gewaarborgd door een voor iedere positie van de hand specifieke rangschikking van de botstukken, waarbij de vormgeving van de botstukken, de ligamenten, het kapsel en de spieren een essentiële rol spelen. Omdat de spieren distaal van de pols insereren nemen de proximale carpalia een bijzondere positie in, omdat de positieveranderingen niet door directe spieractiviteiten worden veroorzaakt. De proximale carpale rij functioneert als een geïntercaleerd segment dat door het mechanisme zelf gestabiliseerd wordt en tegelijkertijd bewegingen toelaat.

4.1.2 Onderzoek

Kennis met betrekking tot enerzijds de interacties van het scafoïd, het lunatum en het triquetrum onderling en met de hun aangrenzende botstukken, anderzijds over de invloed van ligamenten en de vormgeving van de botstukken hierop is van wezenlijke betekenis voor het inzicht in de werking van het carpale mechanisme.

In de laatste eeuw heeft een aantal onderzoekers functioneel anatomisch en biomechanisch onderzoek verricht aan het polsgewricht.

Met kwalitatieve analyses van de bewegingen van het polsgewricht is een aanvang gemaakt aan het eind van de vorige eeuw. Deze analyses, waarbij eerst gebruik werd gemaakt van dissectiemethoden en later van conventionele röntgentechnieken, werden onder meer uitgevoerd om zogenaamde rotatie-assen vast te leggen voor de hand, bewegend ten opzichte van de onderarm. Zo postuleerde Fick (1911) aan het begin van deze eeuw het concept van de 'horizontale rijen', om daarmee inzicht te scheppen in het kinematische gedrag van het polsgewricht. Dit concept berust op de aanname dat beide carpale rijen als vaste eenheden zijn te beschouwen en dat tijdens flexie en deviatie van de hand deze rijen om vaste rotatie-assen bewegen.

In 1921 werd voor het eerst het concept van de 'verticale kolommen' geïntroduceerd door Navarro, in een poging de carpale instabiliteiten beter te kunnen verklaren. Volgens dit concept worden de carpalia functioneel ingedeeld in drie longitudinale ketens, waarvan de keten capitatum-lunatum-radius het centrale gedeelte vormt. Met dit concept worden de, eerder waargenomen, synchrone bewegingen van de proximale en distale carpalia tijdens flexie van de hand verklaard door de werking van het scafoïd, die de proximale en distale botstukken van de centrale keten overbrugt. Dit concept voorziet echter niet in beschrijvingen van de carpale bewegingen tijdens deviatie van de hand.

Enkele decennia later beschreef Kauer (1974, 1980) de carpale interacties tijdens flexie voor het scafoïd-lunatum gewricht, het scafoïd-capitatum gewricht en het capitatum-lunatum gewricht. Hij baseerde zijn studie op morfologische onderzoeken, met name met betrekking tot de geometrie van de botstukken. Bij deze beschrijvingen ging hij uit van het 'verticale kolommen'-concept; hij wees er echter op dat in dit concept het polsgewricht gezien moet worden als een geïntercaleerd systeem waarvan de ketens elkaar kinematisch zullen beïnvloeden tijdens flexie. Op dezelfde wijze werd getracht de verschillen in de wijze van standsverandering van de carpalia bij flexie en deviatie van de hand te verklaren (Kauer, 1986). In het laatste decennium pasten onderzoekers experimentele technieken toe, zoals 'sonic digitizers' en stereoscopische methoden, ten einde de bewegingen van de pols aan een kwantitatief onderzoek te onderwerpen. In de meeste van deze studies werd de hand beschouwd als een star lichaam dat een beweging uitvoert ten opzichte van de onderarm (Brumbaugh e.a., 1982; Andrews e.a., 1979; Sommer III en Miller, 1980; Youm e.a., 1978). Deze studies resulteerden in ofwel één schroevings- c.q. rotatie-as voor het hele bewegingsgebied, of twee assen voor de beweging die opgesplitst is in twee intervallen.

Bewegingen van individuele carpale botstukken werden kwantitatief onderzocht door Berger e.a. (1982), die de resultaten beschreven in termen van schroevingsassen.

Simultaan aan de bovengenoemde bewegingsanalyses vonden onderzoeken plaats aan de ligamenten in het polsgewricht, alle kwalitatief van aard. Veelal concentreerde men zich op het beschrijven van een vereenvoudigd gsystematiseerd ligamentensysteem (Mayfield, 1984; Bonjean, 1981; Taleisnik, 1976). Uitgaande van klassieke beschrijvingen van intercarpale verbindingen werden concepten voor het ontstaan van ligamenttraumata opgesteld.

Met het doel de functie van verschillende ligamenten te achterhalen, hebben Mayfield (1984) en Bonjean (1981) als enigen getracht een relatie te leggen tussen de bewegingen van de carpalia en het lengtegedrag van de ligamenten. Hierbij namen zij vaste rotatie-assen aan voor de verschillende bewegingen van de hand.

Uit het bovenstaande mag duidelijk zijn dat meer precieze, kwantitatieve beschrijvingen met betrekking tot de individuele carpale bewegingen en de bijbehorende lengteveranderingen van ligamenten nodig zijn die het inzicht in de werking van het polsmechanisme zullen vergroten. Gebaseerd op kwantitatieve gegevens kunnen bestaande concepten, c.q. modellen, verfijnd worden en meer complete en gegeneraliseerde (kwantitatieve) modellen ontwikkeld worden.

Met dit doel is in 1982 op de Katholieke Universiteit Nijmegen, op basis

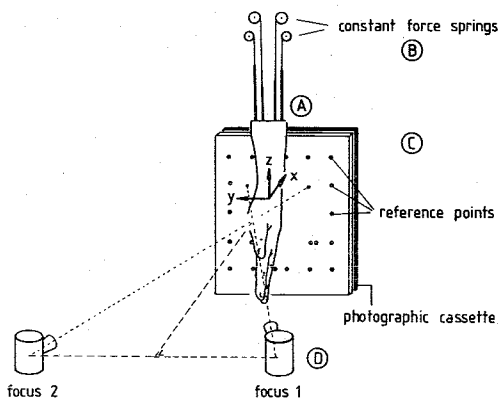
van een samenwerkingsverband tussen de afdeling Anatomie en Embryologie en de afdeling Orthopedie, sectie Biomechanica, het 'polsproject' gestart.

Met behulp van een röntgen-stereofotogrammetrisch meetsysteem zijn inmiddels kwantitatieve gegevens verkregen over de individuele carpal bewegingen en lengte en lengteveranderingen van verschillende ligamenten tijdens flexie en deviatie van de hand. In het volgende worden de aanpak en de verkregen resultaten in het kort besproken.

4.2 Methode en materiaal

Het stereoröntgenfotogrammetrisch systeem, zoals dat in Nijmegen wordt toegepast, is afkomstig uit Zweden en werd ontwikkeld door Selvik (1974). Met dit systeem worden (meet)punten van het spierskeletstelsel driedimensionaal gereconstrueerd. Omdat er geen duidelijk aanwijsbare meetpunten in of op anatomische structuren aanwezig zijn worden deze artificieel ingebracht. Als meetpunten worden ronde, van tantalium vervaardigde merkers gebruikt met diameters van 0,5, 0,8 of 1,0 mm die worden ingebracht met een daartoe speciaal ontworpen insertie-apparaat.

Het te onderzoeken object met de tantalium merkers wordt door twee röntgenbuizen afgebeeld op röntgenfilm (fig. 4-2). De afbeeldingen van de (tantalium) merkers worden opgemeten met behulp van een nauwkeurige XY-coördinatenmeettafel.



Figuur 4-2. Schematische weergave van de experimentele opstelling. Het polspreparaat (A) is geplaatst voor de filmcassette en de referentieplaat (C). Na elke bewegingsstap van de hand werd het preparaat gefotografeerd door twee röntgenbuizen (D). Gedurende het experiment waren de spieren belast door 20 Newton constante krachtveren.

Gebruikmakend van stereofotogrammetrische principes worden uit de bekende posities van de twee röntgenbuizen en de gemeten coördinaten van de afbeeldingen van de merkers op de fotografische plaats, de (object)merkers driedimensionaal gereconstrueerd ten opzichte van een laboratorium coördinatenstelsel. Deze mathematische reconstructie vindt natuurlijk in de computer plaats.

Om een beweging van een star lichaam (bijv. een carpaal botstuk) te kunnen beschrijven is informatie nodig over de ruimtelijke positie van minimaal drie, niet op één lijn liggende punten van dat lichaam. Zijn de posities van deze meetpunten op verschillende (meet)tijdstippen van de beweging van het vaste lichaam bekend dan kan de beweging van het vaste lichaam tussen de meettijdstippen berekend worden. Dit impliceert dat een continue beweging van een vast lichaam opgebouwd gedacht wordt uit opeenvolgende kleine bewegingsstappen. Uiteraard wordt een continue beweging beter benaderd naarmate de bewegingsstappen kleiner zijn.

Om de beweging van een star lichaam ten opzichte van een ander star lichaam of externe referentie te beschrijven staan in principe twee methoden ter beschikking: in termen van schroevingsassen (ook wel helische assen of rotatie-assen genoemd) of in termen van rotatiematrices en translatievectoren. In termen van schroevingsassen wordt de beweging van een star lichaam gedurende een bewegingsstap beschouwd als een rotatie van dat lichaam om een as en een translatie langs dezelfde as. Deze as kan beschreven worden als een lijn ten opzichte van een coördinatenstelsel.

Bij de tweede beschrijvingsmethode, geïntroduceerd door Euler (1776), wordt ervan uitgegaan dat de positieverandering van het lichaam bewerkstelligd wordt door rotaties om de drie assen van een rechthoekig (Cartesiaans) coördinatenstelsel in een bepaalde, van tevoren afgesproken volgorde (bijv. eerst om de x-as, dan om de y-as en ten slotte om de z-as) en translaties langs deze assen (in een willekeurige volgorde).

Beide beschrijvingsmethoden zijn in dit onderzoek toegepast. Echter, gezien de toegestane lengte van dit artikel, zullen alleen de 'Eulerse' rotaties besproken worden.

Met behulp van dit meetsysteem en de tantalium merkers is het tevens mogelijk de lengte van ligamenten (in elke positie van de hand) accuraat te bepalen. Daartoe worden in de ligamenten tantalium merkers (0,5 mm diameter) op ongeveer gelijke afstanden van elkaar (ca. 3 mm) met speciale weefsellijm (histo-acryl®) vastgelijmd. Dit wordt zodanig uitgevoerd dat de vezelrichting tussen insertie en origo van een ligamentdeel zo goed mogelijk gevolgd wordt. In de aanhechtingsplaatsen (op het

bot) worden ook nog merkers geplaatst. In geometrisch opzicht duidelijk identificeerbare ligamenten (bijv. lig. radio-lunatum palmare) kunnen zelfs door twee series merkers gerepresenteerd worden, hetgeen in dit onderzoek voor een aantal werd gedaan.

De ruimtelijke reconstructie van de ligamentmerkers wordt gevolgd door de bepaling van de afstanden tussen de achtereenvolgende merkers en berekening van de totale lengte door de afstanden op te tellen.

In het kader van het kinematisch onderzoek werden vijf niet-gefixeerde en in diep bevroren toestand bewaarde menselijke bovenste extremiteiten (♀ 57 jr, ♀ 35 jr en ♂ 42 jr), waarvan twee paren (♀ 42 jr, ♂ 35 jr), geselecteerd en op abnormaliteiten onderzocht. Elk preparaat werd 12 uur voor aanvang van het experiment ontdooid. Proximaal van het polsgewricht werden incisies gemaakt om de pezen van het spierapparaat te isoleren. De spieren werden op de overgang spier-pees doorgesneden. Proximaal hiervan werden de weke delen rond de humerus, ulna en radius verwijderd. Het kapsel van het elleboogsgewricht bleef intact. Vier tot zes tantaliummerkers werden vervolgens geplaatst in de zeven carpalia, in de radius en in de ulna. Het os pisiforme werd niet opgenomen in het onderzoek. De radius werd in de testopstelling gefixeerd en voor de filmhouder geplaatst (fig. 4-2). Daarna werden de vrijgemaakte pezen verbonden met roestvrijstalen veren die elk met een constante kracht van 20 N belast waren. Deze belastingen waren bedoeld om de veronderstelde stabiliserende activiteit van de pezen op het polsgewricht te simuleren en niet om bewegingen te sturen.

De hand werd door het bewegingsgebied geleid in rotatiestappen van 4° door een mechanisch sturingsmechanisme dat zich bewoog over een cirkelvormige geleiding. Een Steinmann-pin, aangebracht in het metacarpale III-botstuk vormde de verbinding tussen de hand en dit mechanisme. Op deze manier werd de hand, zowel in de maximaal gepronede als in de maximaal gesupineerde stand van de onderarm, bewogen van maximale palmaire flexie naar maximale dorsale flexie en omgekeerd. Vervolgens werd het totale preparaat 90° gedraaid om de longitudinale as en werd de hand van maximale radiale deviatie naar maximale ulnaire deviatie bewogen, wederom voor de onderarm in pronatie en supinatie.

Na de experimenten werd het gewricht geopend ter hoogte van het radio-carpale gewricht en werd een extra tantaliummerker geplaatst in het centrum van het distale gewrichtsoppervlak van de radius. Een extra dubbelopname werd gemaakt om met behulp hiervan de relatie vast te leggen tussen de positie van de extra merker en die van de positiemerken in de radius. Deze extra merker in de radius werd gebruikt om de oorsprong van het coördinatenstelsel in de radius te definiëren, en wel zoda-

nig dat de x-as medio-lateraal georiënteerd was, de y-as antero-posterior en de z-as longitudinaal (fig. 4-1).

Hoewel de hand stapsgewijs bewogen werd van de ene uiterste positie naar de andere, worden de resultaten hier weergegeven alsof de bewegingen vanuit de neutrale stand hebben plaatsgevonden, namelijk vanuit de neutrale stand naar dorsale flexie, vanuit de neutrale stand naar palmaire flexie, vanuit de neutrale stand naar radiale deviatie en vanuit de neutrale stand naar ulnair deviatie.

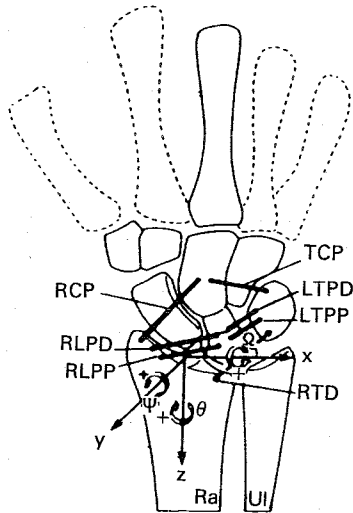
Gebruikmakend van de röntgenfoto's werd de neutrale stand gedefinieerd als zijnde de stand waarin de longitudinale as van de derde metacarpale parallel staat aan de longitudinale as van de radius.

In de neutrale stand van de hand werden 'body-fixed' coördinatenstelsels mathematisch geïntroduceerd in alle carpalia, dusdanig dat de as-richtingen in de neutrale stand overeenkwamen met die van het coördinatensysteem in de radius.

De bewegingen van de carpalia werden beschreven zowel in relatie tot elkaar als in relatie tot de radius, daarbij gebruik makend van translatievector en ('Eulerse') rotatiehoeken. De rotatiehoeken werden uitgedrukt in het body-fixed coördinatenstelsel in de volgorde ϕ om de x-as (flexie), ψ om de y-as (deviatie) en θ om de z-as (supinatie c.q. pronatie). Elke rotatoire beweging werd geëvalueerd als functie van de voorgeschreven flexie- of deviatiepositie van de hand, waarvoor de positie van het capitatum als referentie werd gebruikt.

Voor de ligamentexperimenten werden twee polspreparaten (42 jr.) gebruikt die reeds eerder, op de bovenbeschreven wijze, kinematisch geanalyseerd waren. Bij de dissectie van het polspreparaat werden palmaire en dorsaal incisies gemaakt en werden de retinacula flexorum en extensorum mediaan gekliefd. Onder een operatiemicroscop werden in vier palmaire ligamenten en in een dorsaal ligament tantalium merkers (0,5 mm diameter) aangebracht, waarna de gekliefte retinacula en de huid weer werden gehecht. Het betroffen de ligamenten: radio-lunatum palmare (RLP), radio-capitatum palmare (RCP), lunato-triquetrum palmare (LTP), triquetro-capitatum palmare (TCP) en radio-triquetrum dorsale (RTD) (fig. 4-3). In ligg. radio-lunatum palmare en lunato-triquetrum palmare werden twee delen onderscheiden (RLPP, RLPD en LTPP, LTPD).

Beide polspreparaten werden onderworpen aan hetzelfde meetprotocol zoals eerder beschreven, gevolgd door de stereofotogrammetrische reconstructieprocedure. Dit leverde de ruimtelijke posities op van de ligamentmerkers en de positiemerkers van alle carpalia, de radius en de ulna. Voor elk ligament werd de relatieve lengteverandering (rl) uitgezet



Figuur 4-3. Schematische weergave van de ligging der onderzochte ligamenten in een linker polspreparaat: RLPD, lig. radio-lunatum palmare distale, RLPP, lig. radio-lunatum palmare proximale, RCP, lig. radio-capitatum palmare. LTPD, lig. lunato-triquetrum palmare distale, LTPP, lig. lunato-triquetrum palmare proximale, TCP, lig. triquetro-capitatum palmare, RTD, lig. radio-triquetrum dorsale.

als functie van de stand van de hand, waarvoor weer het capitatum als representant werd genomen. Als beginlengte werd de lengte van het ligament in de neutrale stand van de hand genomen. Tevens werd voor ieder ligament en iedere voorgeschreven handbeweging (flexie c.q. deviatie) de maximaal optredende lengteverandering berekend, gedefinieerd als de percentuele verhouding tussen de maximale en de minimale lengte. De nauwkeurigheid van de kinematische parameters en de lengtebepalingen is afhankelijk van de nauwkeurigheid waarmee de posities van de merkers kunnen worden gereconstrueerd. In dit opzicht heeft Selvik (1974) eerder aangetoond dat de maximale fouten tot 30-60 μm kunnen worden gereduceerd. Deze fouten zijn hoofdzakelijk afhankelijk van de onnauwkeurigheid van de meettafel. Een schatting van de precisie, welke een maat is voor de nauwkeurigheid, werd verricht door twee opeenvolgende dubbelopnameparen opnieuw op te meten en de kinematische parameters en de (ligament)lengten wederom te bepalen. De verkregen standaarddeviaties zijn weergegeven in tabel 4-1.

Tabel 4-1. Standaarddeviaties voor een aantal kinematische parameters, gemeten van preparaat 1 en 2 en de standaarddeviatie voor de relatieve ligamentlengtetoeename.

Tabel 4-1.

n=7	symbol	specimen/1	specimen/2	unit
Euler rotation around				
z-axis	ϕ	0.36	0.20	degr.
y-axis	ψ	0.76	0.30	degr.
z-axis	θ	0.31	0.41	degr.
Translation along				
x-axis	dx	0.062	0.050	mm
y-axis	dy	0.027	0.059	mm
z-axis	dz	0.024	0.026	mm
Ligament strain	rl		0.3	%

4.3 Resultaten

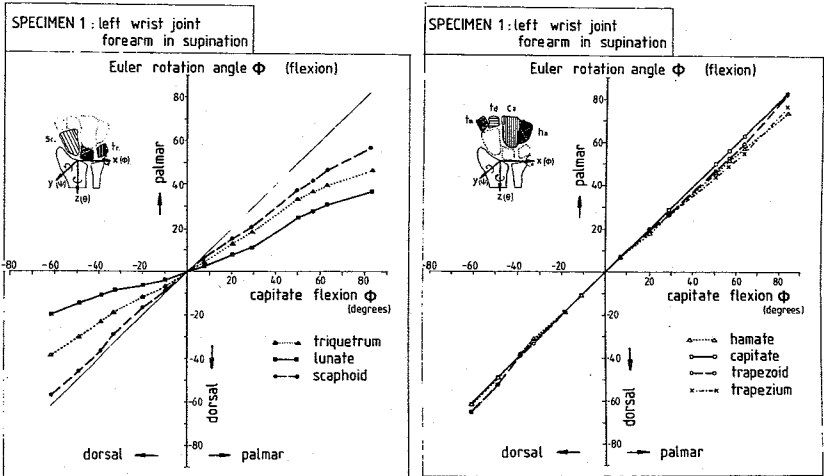
Globaal gesproken werden in alle preparaten dezelfde tendensen gevonden zowel voor de individuele carpale bewegingen in flexie en deviatie, als voor de lengteveranderingen van de onderzochte ligamenten. Omdat de genoemde resultaten in hoge mate reproduceerbaar zijn, zal in dit artikel volstaan worden met enkele typische resultaten van één preparaat (42 jr).

4.3.1 Dorso-palmaire flexie

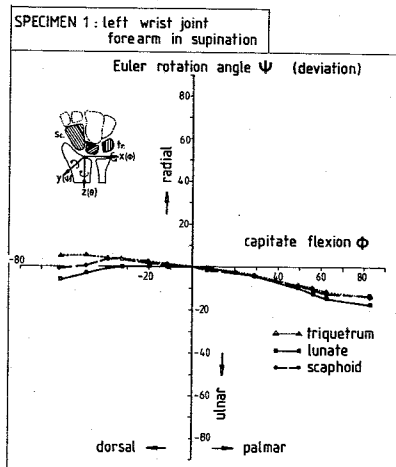
De bewegingen van de carpalia in het vlak van beweging (het flexievlak) vinden simultaan met de flexie van de hand plaats en tevens in dezelfde richting (fig. 4-4). In de proximale rij zijn de flexie-excursies ongelijk aan elkaar, maar in de distale rij zijn deze nagenoeg gelijk. Bewegingen uit het (flexie)vlak van beweging, dus bewegingen om de y- en z-as, treden tijdens flexie van de hand op, doch zijn een orde grootte kleiner dan de rotatoire excursies in het hoofdvlak (om de x-as). Voorbeelden van deze 'secundaire' bewegingen – deviatie en pronatie/supinatie tijdens flexie van de hand – zijn weergegeven in respectievelijk figuur 4-5 en figuur 4-6.

Een interessant resultaat is dat zowel in de maximale pronatiestand als in de maximale supinatiestand van de hand vrijwel dezelfde bewegingskarakteristieken optreden: qua grootte en bewegingszin zijn er slechts minimale verschillen.

Een belangrijk onderwerp in de literatuur op dit gebied zijn de aandelen

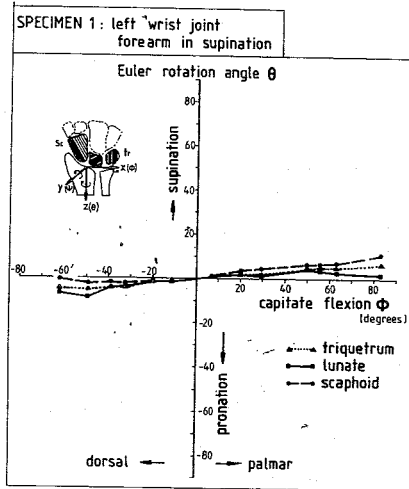


Figuur 4-4. Flexiehoeken van de proximale (a) en de distale (b) carpale botstukken als functie van de flexiehoek ϕ van het capitatum voor preparaat 1. (De Lange e.a., 1985.)



Figuur 4-5. Deviatiehoeken van de proximale carpalia tijdens de voorgeschreven flexie van de hand, preparaat 1. (De Lange e.a., 1985.)

van het radio-carpale en het mid-carpale gewricht in de totale flexie beweging. Uit de huidige onderzoeksresultaten blijkt dat het, in dit opzicht, van voordeel is het polsmechanisme opgebouwd te denken uit longitudinale ketens. Dan komt naar voren dat in de ulnaire keten (ulna-triquetrum-hamatum) en in de radiale keten (radius-scaphoideum-trapezium/trapezoideum) het radio-carpale gewricht het grootste aandeel in



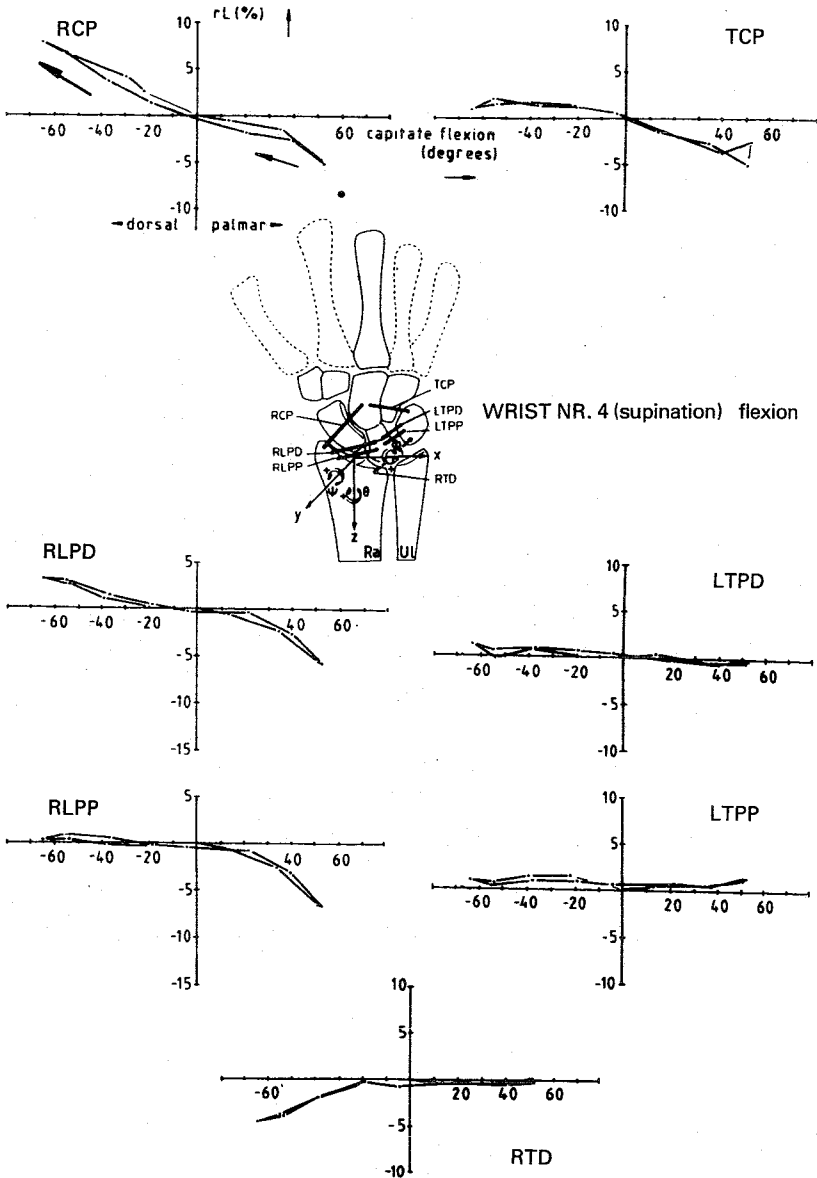
Figuur 4-6. Rotatiehoeken om de z-as van de proximale carpalia tijdens de voorgeschreven flexie van de hand, preparaat 1. (De Lange e.a., 1985.)

de flexie heeft, terwijl in de centrale keten het mid-carpale gewricht een gelijk of zelfs een groter aandeel heeft.

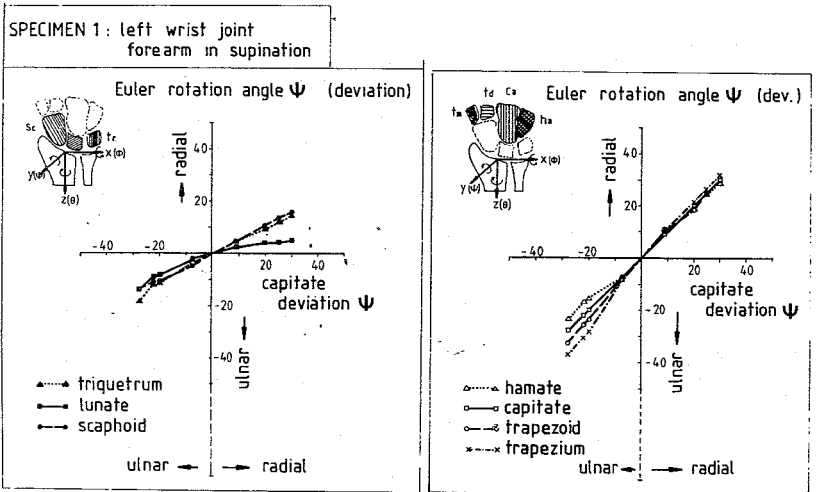
Gedurende de flexiebeweging van de hand vertonen de ligamenten relatieve lengteveranderingen die een maximum waarde van 20% niet overschrijden en ieder ligament heeft een specifiek verlengingspatroon (fig. 4-7). In de maximale dorsale flexiestand van de hand vertonen de ligg. radio-capitatum palmare (RCP), triquetro-capitatum palmare (TCP) en radio-lunatum palmare (RLP) de grootste verlenging. Bij toenemende flexie van de hand in palmaire richting nemen deze ligamenten in lengte af. Het lig. lunato-triquetrum palmare verandert tijdens flexie niet of nauwelijks van lengte, terwijl het lig. radio-triquetrum dorsale verlengt. Evenals bij de kinematische experimenten blijkt ook hier dat de stand van de hand in de onderarm klaarblijkelijk geen invloed uitoefent op de lengtekenmerken van de (onderzochte) ligamenten.

4.3.2 Radio-ulnaire deviatie

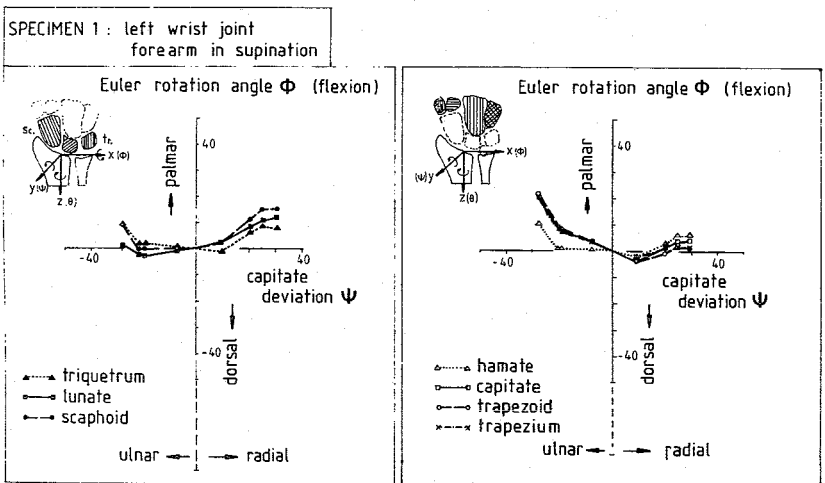
Ook tijdens de radio-ulnaire deviatie van de hand bewegen alle carpalia radio-carpaal en mid-carpaal simultaan en in dezelfde richting als de hand (fig. 4-8). De distale carpalia laten hierbij in het hoofdvlak van beweging (het deviale vlak) grotere excursies zien dan de proximale. Echter, in tegenstelling tot de bevindingen bij handflexie, zijn de 'secondaire' bewegingen tijdens deviatie van de hand van dezelfde orde grootte als



Figuur 4-7. Relatieve lengteveranderingen (rl) in % van de onderzochte ligamenten van preparaat 4 als functie van de flexiehoek van het capitatum van een volledige flexiecyclus van de hand. In de neutrale stand van de hand is de lengte van ieder ligament op 100% gesteld.



Figuur 4-8. Deviatiehoeken van de proximale (a) en distale (b) carpalia als functie van de deviatiehoek van het capitatum, preparaat 1. (De Lange e.a., 1985.)



Figuur 4-9. Flexiehoeken van de proximale (a) en distale (b) carpalia tijdens de voorgescreven deviatie van de hand, preparaat 1. (De Lange e.a., 1985.)

die in het hoofdvlak. Een deviatiebeweging van de hand van ulnair naar radiaal heeft voor het scafoïd de consequentie dat het voorover kantelt (palmaire flexie) (fig. 4-9) en tevens een pronatoire beweging ondergaat. Deze bewegingspatronen worden ook herkend bij het lunatum en het triquetrum en, in geringere mate, bij de distale carpalia.

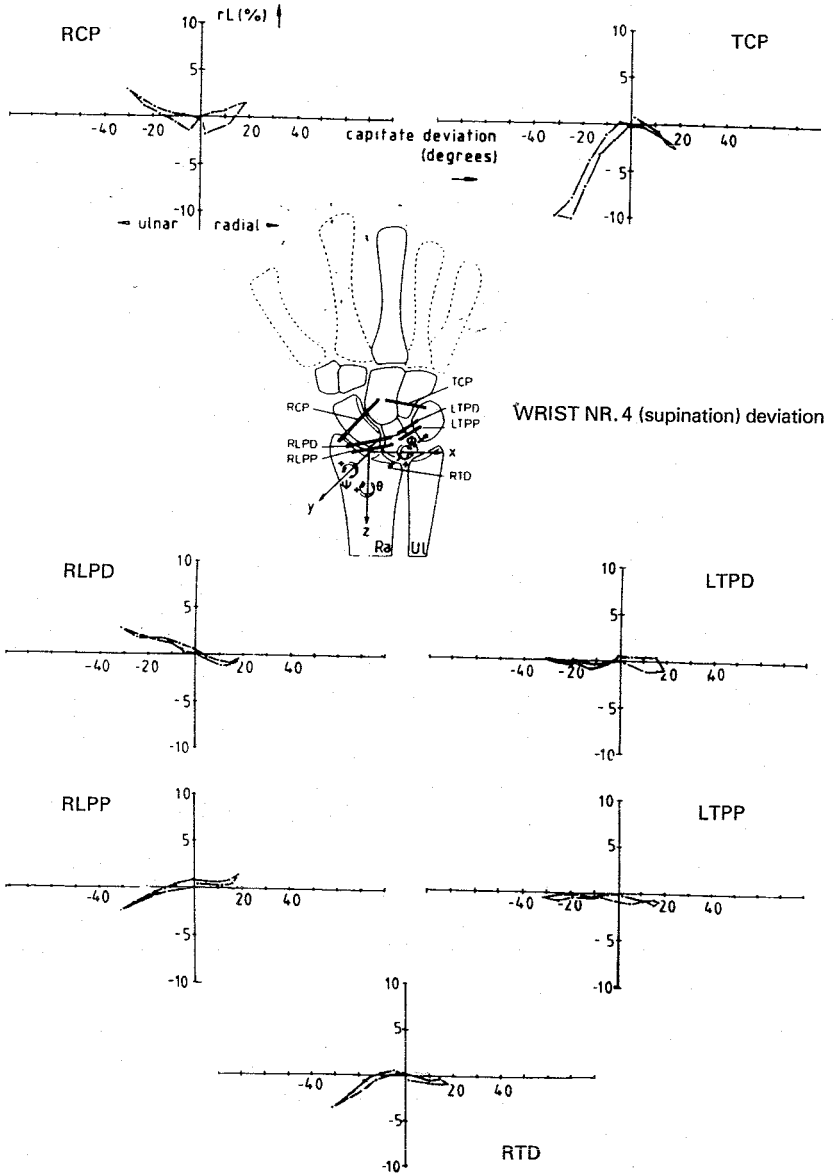
Worden, in de verschillende (bewegings)vlakken, de bewegingen van de distale en de proximale carpale rij onderling beschouwd, dan geldt in het algemeen dat tijdens deviatie van de hand van de ulnaire naar de radiale positie de distale rij ten opzichte van de proximale rij radiaal devieert, supineert en dorsaal flecteert. Wordt de bewegingsrichting van de hand omgekeerd dan wordt een tegenovergesteld bewegingspatroon voor de distale rij waargenomen.

Tijdens deviatie van de hand zijn de maximale relatieve lengteveranderingen van de ligamenten kleiner dan 20%. Twee ligamenten, te weten het TCP en het RTD, hebben in de neutrale positie van de hand hun maximale lengte en verkorten indien de hand naar één van de uiterste deviatiestanden wordt bewogen. Het RCP laat juist het tegenovergestelde beeld zien: in de neutrale stand neemt dit ligament de kleinste lengte in om te verlengen bij een handbeweging naar radiaal of ulnair (fig. 4-10). Het LTP blijft echter, evenals bij handflexie, op dezelfde lengte. De twee delen van het RLP verlengen zich wel en in een tegengesteld patroon. De bovenbeschreven lengtepatronen en bewegingskarakteristieken worden weer niet of nauwelijks beïnvloed door pronatie en supinatie van de hand.

4.4 Discussie

In de huidige studie van het polsmechanisme zijn van vijf polspreparaten gegevens verkregen over de individuele carpale bewegingen als functie van de handbeweging. Tevens zijn van drie polspreparaten de lengteveranderingen van vijf, voor dit onderzoek geselecteerde ligamenten gekwantificeerd. Precisietesten hebben uitgewezen dat de toepassing van het röntgenstereofotogrammetrische meetstelsel tot nauwkeurige resultaten leidt.

Het blijkt dat gedurende de twee hoofdbewegingen van de hand de individuele carpalia ruimtelijke bewegingen uitvoeren. Verandering van de handpositie heeft veranderingen van de posities van alle carpalia tot gevolg, die specifiek zijn voor de uitgevoerde beweging. De bewegingsmogelijkheden zijn dus onderling gekoppeld. Elk carpaal botstuk neemt in elke stand van de hand slechts één, voor dat botstuk specifieke stand in ten opzichte van zijn omgeving.



Figuur 4-10. Relatieve lengteveranderingen (rL) in % van de onderzochte ligamenten van preparaat 4 als functie van één volledige deviatiecyclus van de hand.

Tijdens de flexie van de hand vinden de positieveranderingen van de carpalia voornamelijk plaats in het hoofdvlak van beweging. Bij benadering kan men stellen dat tijdens een dergelijke beweging de distale carpalia zich als een vaste groep door het bewegingsgebied verplaatsen. De proximale carpalia laten daarentegen duidelijk onderling verschillende bewegingspatronen zien, met het lunatum als het minst bewegende botstuk. Een mogelijke verklaring hiervoor is het verschil in kromming van de proximale contactvlakken van de proximale carpalia. Het lunatum is het minst gekromd (Kauer, 1974). Vanwege het regelmatig optreden van hyperdorsale flexietrauma's en hun residuele effecten op de functie van het polsgewricht, krijgen de articulaties van het scafoïd en het lunatum aanzienlijke aandacht in de literatuur. Naast de grotere flexie-excursie van het scafoïd ten opzichte van het lunatum blijkt uit de huidige onderzoeksresultaten dat tijdens palmaire flexie van de hand het scafoïd en het lunatum elkaar aan de palmaire zijde naderen. Dit 'closure of the cleft'-fenomeen is eerder beschreven door Kauer (1974, 1980) als een belangrijk fenomeen voor de koppeling van bewegingen van scafoïd en lunatum aan elkaar. Hierin is de specifieke functie van het lig. scafo-lunatum interosseum belangrijk.

Uit de huidige onderzoeksresultaten komt naar voren dat in de radiale en in de ulnaire keten het radio-carpale gewricht het meest bijdraagt in de totale flexie-excursie, terwijl in de centrale keten het intercarpale gewricht het grootste aandeel heeft. Volz e.a. (1980) en Bonjean e.a. (1981) onderzochten deze relatieve bijdragen in de centrale keten door gebruik te maken van conventionele röntgentechnieken. Onze onderzoeksresultaten komen gedeeltelijk overeen met resultaten van Volz e.a. (1980), waar het gaat om de palmaire flexie, en van Bonjean e.a. (1981) als het gaat om de dorsale flexie. Bovendien generaliseren beide auteurs hun conclusies voor de proximale en de distale rij als één geheel, hetgeen niet verantwoord blijkt.

Ulnaire abductie van de hand heeft voor alle carpalia een rotatie in ulnaire richting tot gevolg. Ook vinden echter rotatoire bewegingen plaats uit het vlak van de primaire beweging, die ongeveer van dezelfde orde van grootte zijn als die in het hoofdvlak. Meer nog dan bij handflexie voltrekken zich gedurende deze beweging ingewikkelde ruimtelijke bewegingspatronen van de individuele carpalia, die zich als volgt laten omschrijven.

Een beweging van de hand vanuit de neutrale stand naar de radiale positie heeft tot effect dat niet alleen het scafoïd deze beweging volgt, maar tevens tot palmaire flexie wordt gedwongen. Hierbij treedt ook een rotatie om de lengteas in pronatoire zin op. Doordat het scafoïd door een in-

terossaal ligament met het lunatum is verbonden, volgt het laatstgenoemde botstuk deze bewegingen, zij het in mindere mate door het eerder gesignaleerde verschil in radio-carpale geometrie. Distaalwaarts van het scafoïd rusten het trapezium en het trapezoid op de 'rug' van het scafoïd en glijden als het ware over deze rug radiaal- en dorsaalwaarts af, tegelijkertijd supinerend om hun longitudinale assen. Op distaal niveau worden deze bewegingen gevolgd door het capitatum en het hamatum. Ruimtelijk gezien vindt er tussen beide niveaus een min of meer schurende beweging plaats, waarvan het 'draaipunt' gelegen is aan de ulnaire zijde. In dit verband is het dan ook opvallend dat aan de ulnaire zijde van de pols een zeer subtiel en ingewikkeld gebouwd ligamentensysteem aanwezig is, waarvan de bouw en functie nog steeds onderzocht worden (Kauer, 1975, 1985). Wordt de hand naar ulnair bewogen, dan vinden carpale bewegingen plaats in tegenovergestelde zin als hierboven beschreven.

Het bewegingspatroon van elk carpaal botstuk tijdens de verplaatsing van de hand wordt in hoge mate bepaald door de vormgeving van de contactvlakken en de functie van ligamenten.

Zoals in de inleiding is vermeld, zijn er kwalitatieve concepten ontwikkeld op basis van de vastgestelde bewegingsmogelijkheden van de hand tot de onderarm. Fick (1911) laat zo de proximale rij als een geheel in een eivormig gewricht bewegen tot de radius en de discus articularis. Dit concept kan eventueel geen verklaring geven voor het ontstaan van de vele vormen van intercarpale instabiliteit, waar in deze tijd de belangstelling zo naar uitgaat. Ook uit de hier beschreven kinematische resultaten, met name wat betreft de proximale carpalia, mag blijken dat dit concept niet juist is. Uitgaande van een longitudinale groepering van de carpalia, beschreef Kauer uitvoerig de relatie tussen de vormgeving der botstukken en de daaruit noodzakelijk voortspruitende bewegingen. De huidige experimentele resultaten zijn grotendeels consistent met deze beschrijvingen. Volstaan wordt met een verwijzing naar deze gegevens (Kauer, 1974, 1980, 1986).

Met betrekking tot de functie van ligamenten in het polsgewricht is relatief weinig bekend. De functie van een ligament is gerelateerd aan het vermogen om krachten te leveren, waarvoor het van vorm moet veranderen. De mate van vervorming (verlenging) is gekoppeld aan de kracht in het ligament.

Daar het niet mogelijk is krachten direct te bepalen, is in dit onderzoek getracht de lengteveranderingen van ligamenten tijdens de handbeweging te kwantificeren. Het betrof in eerste instantie vijf ligamenten, vier palmaire en één dorsaal gelegen, een kleine, maar niet onbelangrijke selectie.

Flexie van de hand van de uiterst palmaire naar de uiterst dorsale stand doet de ligamenten aan de palmaire zijde in lengte toenemen, terwijl de ligamenten aan de dorsale zijde (in geringe mate) in lengte afnemen. Men kan zeggen dat tijdens dorsale flexie van de hand de weerstand tegen verplaatsing in de palmaire ligamenten moet toenemen, terwijl dorsaal deze juist moet afnemen.

De in dit onderzoek verkregen ligamentlengtegegevens komen slechts voor een beperkt deel overeen met de theoretische voorspellingen van Mayfield e.a. (1976). Dit komt doordat zij vaste rotatiecentra aannamen, gelegen in de kop van het capitatum, één voor flexie en één voor deviatie van de hand. Een dergelijke veronderstelling blijkt niet gerechtvaardigd te zijn.

In de analyse van het carpale mechanisme heeft modelvorming steeds een belangrijke rol gespeeld. Mede op basis van modelstudies zijn in het verleden voor het polsgewricht verschillende en tegenstrijdige functioneel-anatomische concepten geformuleerd. Het is thans duidelijk geworden, dat het ontbreken van kwantitatieve gegevens heeft bijgedragen aan de verwarring rond het mechanisme. Een voortgaande verwerving van kwantitatieve gegevens op het punt van carpale geometrie, ligamentverhoudingen en spierfuncties is voor een realistische modelvorming onontbeerlijk. Een zodanig model is bij het bepalen van belastingen in het polsgewricht en voor de bepaling van ten gevolge daarvan optredende afwijkingen van het grootste belang.

Referenties

- Andrews JG, Youm Y. A biomechanical investigation of wrist kinematics. *J Biomechanics* 1979; 12: 83-93.
- Berger RA, Crowninshield RD, Flatt AE. The three-dimensional rotational behavior of the carpal bones. *Clin Orthop* 1982; 167: 303-10.
- Bonjean P, Honton JL, Linarte R, Vignes J. Anatomical bases for the dynamic exploration of the wrist joint. *Anatomica Clinica* 1981; 3: 73-85.
- Brumbaugh RB, Crowninshield RD, Blair WF, Andrews JG. An in-vivo study of normal wrist kinematics. *J Biomech Eng* 1982; 104: 176-81.
- Euler L. *Formulae generales pro translatione quacumque corporum rigidorum*. *Novi Comment Petrop* 1776; 20: 189.
Herdruckt in *Euleri Opera Omnia* (2), Vol. 9, Basel, 1968.
- Fick R. *Handbuch der Anatomie und Mechanik der Gelenke*. Teil III. Jena, Verlag von Gustav Fischer, 1911: 358-95.
- Kauer JMG. The interdependence of carpal articulation chains. *Acta Anat* 1974; 88: 481-501.
- Kauer JMG. The articular disc of the hand. *Acta Anat* 1975; 93: 590-605.
- Kauer JMG. Functional anatomy of the wrist. *Clin Orthop* 1980; 149: 9-20.

- Kauer JMG. Comparative aspects of the ulnar articular disc. *Fortschritte der Zoologie* 1985; 30: 77-9.
- Kauer JMG. The mechanism of the carpal joint. *Clin Orthop* 1986; 202: 16-26.
- Lange A de, Kauer JMG, Huiskes R. Kinematic behavior of the human wrist joint: A röntgenstereophotogrammetric analysis. *J Orthop Res* 1985; 3: 56-64.
- Mayfield JK, Johnson RP, Kilcoyne RG. The ligaments of the human wrist and their functional significance. *Anat Rec* 1976; 186: 417-28.
- Mayfield JK. Wrist ligamentous anatomy and pathogenesis of carpal instability. *Orthop Clin NA* 1984; 15, 2: 209-16.
- Navarro A, cited by Scaramuzza RF. El movimiento de rotacionen el carpo y sie relacion con la fisio pathologica de sus lesiones traumaticas. *Bull Trab Soc Argent Ortop Traumatol* 1967; 34: 337-86.
- Selvik G. A roentgenstereophotogrammetric method for the study of the kinematics of the skeletal system. Dissertation. Sweden: Univ of Lund, 1974.
- Sommer HG III, Muller NR. A technique for kinematic modeling of anatomical joints. *J Biomech Eng* 1980; 102: 311-17.
- Taleisnik J. The ligaments of the wrist. *J Hand Surg* 1976; 1: 110.
- Volz RG, Lieb M, Benjamin J. Biomechanics of the wrist. *Clin Orthop* 1980; 149: 112-7.
- Youm Y, McMurty RY, Flatt AE, Gillespie TE. Kinematics of the wrist. I: An experimental study of radial-ulnar deviation and flexion-extension. *J Bone Jt Surg* 1978; 60A: 423-31.