

Inhoud

1 De opbouw van het bewegingsapparaat

Inleiding	1
Bindweefsel	1
Kraakbeen	4
Been en algemene osteologie	5
<i>De verbening</i>	9
Algemene gewrichtsleer	12
Algemene spierleer	19
<i>Bouw van de dwarsgestreepte spieren</i>	20
<i>Nomenclatuur en structuur van de dwarsgestreepte spieren</i>	24
<i>Kracht, werking en functie van de dwarsgestreepte spieren</i>	25
Reliëf van het lichaam	33
Anatomische terminologie	34
<i>Nomenclatuur van de beenderen</i>	35

2 De huid, de ingewanden en het perifere zenuwstelsel

De huid	37
De ingewanden	38
<i>De tractus digestivus</i>	39
<i>De tractus respiratorius</i>	45
<i>De tractus circulatorius</i>	50
<i>Het lymfatische systeem</i>	56
<i>De tractus urogenitalis</i>	58
<i>Het endocriene systeem</i>	65
Het perifere zenuwstelsel	69
<i>De opbouw van het zenuwstelsel</i>	69
<i>De spinale zenuwen</i>	71
<i>Indeling van het perifere zenuwstelsel</i>	74
<i>Het perifere somatische zenuwstelsel</i>	75
<i>Het perifere autonome zenuwstelsel</i>	80

3 De romp

Inleiding	85
<i>Aanleg van de extremiteiten</i>	88
<i>Zenuw- en bloedvoorziening van de spieren</i>	88
Bouw van de wervelkolom	88
Vorm van de wervelkolom	94
Variaties van de wervelkolom	95
Beweeglijkheid van de wervelkolom	96
<i>De voorste intervertebrale gewrichten</i>	97
<i>De achterste intervertebrale gewrichten</i>	98
<i>De bewegingen van de wervelkolom</i>	99
<i>De craniovertebrale gewrichten</i>	100
<i>De articulatio sacrococcygea</i>	102
Ouderdomsveranderingen van de wervelkolom	102
Spieren van de wervelkolom	103
<i>Dorsale wervelkolomspieren</i>	103

<i>Overzicht</i>	104
<i>Ventrale wervelkolomspieren</i>	110
Functie van de wervelkolomspieren	110
Bouw en vorm van de thorax	111
Beweeglijkheid van de thorax	115
Spieren van de thorax	117
<i>Overzicht</i>	117
<i>Intercostale spieren</i>	118
<i>Sternocostale spier</i>	118
<i>Truncocostale spieren</i>	118
<i>Het diaphragma</i>	119
De ademhaling	120
De buikspieren	123
<i>Rechte buikspieren</i>	123
<i>Schuine buikspieren</i>	124
<i>Overzicht</i>	126
<i>Dwarse buikspier</i>	126
<i>De rectusschede</i>	127
<i>Het lieskanaal</i>	127
Functie van de buikspieren	129
Bloed- en zenuwvoorziening van de rompwand	131
Oppervlakteanatomie van de borst	133
Oppervlakteanatomie van de buik en het bekken	140
Tabel van de rompspieren	144
Tabel van de bewegingen van de wervelkolom, het hoofd en de ribben	148

4 Schoudergordel en arm

Inleiding	149
Het skelet van de schoudergordel en de bovenarm	149
De gewrichten van de schoudergordel en de bovenarm	152
<i>De verbindingen van de clavicula</i>	153
<i>Het schoudergewricht</i>	155
Spieren die de romp met de schoudergordel en de humerus verbinden	159
<i>Ventrale spieren</i>	159
<i>Dorsale spieren</i>	160
<i>Mediale spier</i>	162
Bewegingen van de schoudergordel	162
Schouder spieren	164
Spieren van de bovenarm	167
<i>Ventrale spieren</i>	168
<i>Dorsale spieren</i>	169
Bewegingen in het schoudergewricht	169
Heffing van de arm in het frontale en sagittale vlak	171
Het skelet van de onderarm en de hand	172
<i>Het skelet van de onderarm</i>	172
<i>Het skelet van de handwortel</i>	174
<i>Het skelet van de middenhand en de vingers</i>	174
De gewrichten van de onderarm en de hand	177
<i>Het ellebooggewricht</i>	177
<i>De verbindingen tussen de radius en de ulna</i>	179
<i>Het polsgewricht</i>	180
<i>De gewrichten van de middenhand</i>	183
<i>De gewrichten van de vingers</i>	184
<i>De gewrichten van de duim</i>	186
Spieren van de onderarm	187

<i>Overzicht</i>	188
<i>Oppervlakkige ventrale spieren</i>	188
<i>Diepe ventrale spieren</i>	190
<i>Oppervlakkige dorsale spieren</i>	190
<i>Diepe dorsale spieren</i>	192
Bewegingen van de onderarm	193
Bewegingen van de hand	195
Spieren van de hand	197
<i>Overzicht</i>	197
<i>Korte duimspieren</i>	197
<i>Korte pinkspieren</i>	197
<i>Mm. lumbricales</i>	198
<i>Mm. interossei</i>	198
De handpalm	199
Het dorsale polsgebied en de handrug	200
De bouw van de dorsale aponeurose en de bewegingen van de vingers	202
Bewegingen van de duim	205
Bloed- en zenuwvoorziening van de schoudergordel en de arm	205
Oppervlakteanatomie van de schoudergordel en de arm	214
Tabel van de spieren van schoudergordel en arm	222
Tabel van de bewegingen van schoudergordel en arm	228

5 Bekkengordel en been

Inleiding	231
Het skelet van de bekkengordel	232
Het bekken	234
De verbindingen van het bekken	236
De bekkenbodem	239
Het skelet van het bovenbeen	242
Het heupgewricht	245
De heupspieren	252
<i>Ventrale spieren</i>	252
<i>Oppervlakkige dorsale spieren</i>	253
<i>Diepe dorsale spieren</i>	255
Spieren van het bovenbeen	255
<i>Overzicht</i>	256
<i>Ventrale spieren</i>	256
<i>Mediale spieren</i>	258
<i>Dorsale spieren</i>	260
Bewegingen van het bovenbeen	261
Het skelet van het onderbeen en de voet	263
<i>Het skelet van het onderbeen</i>	263
<i>Het skelet van de voetwortel</i>	266
<i>Het skelet van de middenvoet en de tenen</i>	270
De gewrichten van het onderbeen en de voet	270
<i>De bouw van het kniegewricht</i>	270
<i>De bewegingen in het kniegewricht</i>	279
<i>De verbindingen tussen de tibia en de fibula</i>	283
<i>Het enkelgewricht</i>	284
<i>Gewrichten van de voetwortel en de middenvoet</i>	287
<i>Gewrichten van de tenen</i>	291
Spieren van het onderbeen	291
<i>Overzicht</i>	292
<i>Ventrale spieren</i>	292
<i>Laterale spieren</i>	295

INHOUD X

<i>Oppervlakkige dorsale spieren</i>	295
<i>Diepe dorsale spieren</i>	296
Bewegingen in de knie	299
Bewegingen van de voet en in de voet	300
Spieren van de voet	301
<i>Overzicht</i>	301
<i>Dorsale voetspieren</i>	302
<i>Spieren van de grote teen</i>	302
<i>Spieren van de kleine teen</i>	302
<i>Middelste plantaire voetspieren</i>	302
Bewegingen van de tenen	303
Het voetgewelf	304
Bloed- en zenuwvoorziening van de bekkengordel en het been	305
Oppervlakteanatomie van de bekkengordel en het been	320
Tabel van de spieren van bekkengordel en been	325
Tabel van de bewegingen van het been	332

6 Hoofd en hals

Inleiding	335
De schedel en het os hyoideum	335
<i>Overzicht</i>	336
<i>De hersenschedel</i>	336
<i>De aangezichtsschedel</i>	339
<i>Os hyoideum</i>	341
<i>Groei van de schedel</i>	342
Spieren van het aangezicht	342
<i>Overzicht</i>	342
<i>De vier belangrijkste aangezichtsspieren</i>	343
Kauwspieren	345
Halsspieren	347
<i>Overzicht</i>	347
<i>Oppervlakkige spieren</i>	347
<i>Suprahyoïdale spieren</i>	348
<i>Infrahyoïdale spieren</i>	350
Het kaakgewricht	350
Bewegingen van hoofd en hals	353
Bloed- en zenuwvoorziening van het hoofd-halsgebied	353
Oppervlakteanatomie van de hals en de nek	358
Tabel van de spieren van hoofd en hals	359
Tabel van de bewegingen van het os hyoideum en de mandibula	362

7 Het centrale zenuwstelsel

Inleiding	363
Het ruggenmerg	363
De hersenen	365
<i>De hersenvliezen en de liquor cerebrospinalis</i>	371
<i>De vascularisatie van de hersenen</i>	373
Sensibele vezelsystemen	374
<i>Pijntransmissie en pijnmodulatie</i>	378
Motorische vezelsystemen	378
<i>Extrapiramidiaal systeem en cerebellum</i>	381

8 Stand en beweging

Inleiding	387
Zwaartekracht, zwaartepunt en steunvlak van het lichaam	387
Analyse van het staan	390
<i>Symmetrische standen</i>	391
<i>Asymmetrische standen</i>	395
Analyse van enkele bewegingen van romp en benen	396
<i>Bewegingen vanuit staande stand</i>	397
<i>Bewegingen vanuit liggende stand</i>	400
Hangen en steunen	403
Analyse van het gaan	405
<i>De gangcyclus</i>	405
<i>Lichaamszwaartepunt</i>	408
<i>Bewegingsuitslagen</i>	410
<i>Voetreactiekrachten</i>	413
<i>Gewrichtsmomenten</i>	414
<i>Gewrichtsmomenten en spieractiviteiten</i>	415
Literatuur	419
Register	433

Overzicht Klinische notities

Hoofdstuk 1 De opbouw van het bewegingsapparaat

Osteoporose	7
Fracturen en fractuurgenezing	10
Arthrosis deformans	14
Tendinitis	23
Myofasciale krachtoverdracht	28
Klinische spierkrachtmeting	32

Hoofdstuk 2 De huid, de ingewanden en het perifere zenuwstelsel

Pneumothorax	49
Atherosclerose	54
Aneurysmata van de aorta abdominalis	55
Regeneratie na perifeer zenuwletsel	75
Posttraumatische dystrofie	83

Hoofdstuk 3 De romp

Wervelfracturen	93
Spina bifida	96
Afwijkingen van de wervelkolom I	102
Afwijkingen van de wervelkolom II	102
Lage rugpijn	110
Hernia nucleï pulposi	112
Verminderde beweeglijkheid van de thorax	122
Rectusdiastase	127
Herniae van de buikwand	132

Hoofdstuk 4 Schoudergordel en arm

Claviculafracturen	154
Arthroscopie van het schoudergewricht	159
Luxatie van de schouder	160
Subacromiaal impingement	161

Bewegingsbeperkingen van de schouder	164
Het 'thoracic outlet syndrome'	168
Elleboogletsels	179
Fracturen van de onderarm	181
Polsfracturen	183
Contractuur van Volkmann	191
Tennisarm en golferselleboog	193
Contractuur van Dupuytren	201
Mallet-vinger	202
Afwijkingen van de plexus brachialis	214
Letsels van de n. thoracicus longus	214
Letsels van de n. axillaris	215
Letsels van de n. ulnaris	215
Letsels van de n. radialis	215
Letsels van de n. medianus	217
Hoofdstuk 5 Bekkengordel en been	
Peripartaal bekkenpijnsyndroom	240
Coxartrose	248
Heupfracturen	250
Heupluxatie	252
Quadricepsatrofie	257
Liesblessures	259
Letsels van de hamstrings	262
Fracturen van het onderbeen	267
Gonartrose	273
Bursitis in het gebied van de knie	277
Letsels van de kniebanden	280
Meniscusletsel	281
Arthroscopie van het kniegewricht	283
Enkelletsels	285
Blessures door overbelasting	291
Logesyndromen	294
Zweepslag	298
Plat-, hol- en spitsvoeten	305
Varices	310
Letsels van de n. femoralis	312
Letsels van de nn. glutei	313
Peroneusverlamming	319
Hoofdstuk 6 Hoofd en hals	
Kaakluxatie	352
Craniomandibulaire dysfunctie (CMD)	353
Trigeminusneuralgie	356
Perifere facialisuitval	357
Hoofdstuk 7 Het centrale zenuwstelsel	
Dwarslaesie van het ruggenmerg	376
Pijnbestrijding	378
Cerebrovasculaire accidenten	380
Het piramidale syndroom	381
De ziekte van Parkinson	382
Cerebellaire dysfunctie	383
Hoofdstuk 8 Stand en beweging	
De lumbale lordose, het lichaamszwaartepunt en de positie van de wervelkolom tijdens de zwangerschap	395

1 De opbouw van het bewegingsapparaat

Inleiding

De weefsels waaruit het bewegingsapparaat is opgebouwd, zijn het steunweefsel en het dwarsgestreepte spierweefsel. Het steunweefsel bestaat uit bindweefsel, kraakbeen en been. De door deze weefsels gevormde organen zijn de beenderen, de gewrichten en de dwarsgestreepte spieren. Zij worden gevasculariseerd door arteriën en venen, die met het hart verbonden zijn, en geïnnerveerd door zenuwen die hun oorsprong of eindiging hebben in het ruggenmerg en de hersenstam. De bloedvaten en zenuwen worden apart besproken in hoofdstuk 2.

In de tekst en de figuren worden de volgende afkortingen gebruikt:

- a. = arteria (arterie = slagader)
- aa. = arteriae
- lig. = ligamentum (gewrichtsband)
- ligg. = ligamenta
- m. = musculus (spier)
- mm. = muscoli
- n. = nervus (zenuw)
- nn. = nervi
- v. = vena (vene = ader)
- vv. = venae

Bindweefsel

Het bindweefsel bestaat uit twee samenstellende delen: 1. cellen, die naar vorm en functie bij elkaar horen, en 2. de tussen de cellen gelegen tussenstof of intercellulaire substantie. Hierin zijn weer twee componenten te onderscheiden: de amorf component, ook wel de grondsubstantie genoemd, en de vezelige component, gevormd door collageen, elastische en reticulair vezels.

De *grondsubstantie* bevat allerlei anorganische en organische stoffen, waarvan de glycosaminoglycanen (aan eiwit gebonden, meerwaardige suikers) de belangrijkste plaats innemen. In het bindweefsel bestaan de glycosaminoglycanen grotendeels uit hyaluronzuur dat aan de grondsubstantie een geleïachtige consistentie verleent. In het kraakbeen en het been be-

staan de glycosaminoglycanen uit chondroïtinesulfaat, waardoor de grondsubstantie van deze weefsels veel vaster is dan die van het bindweefsel.

Van de in de grondsubstantie ingebed liggende vezels zijn de *collagene vezels*, die bij koken lijm geven, het dikst (1-12 μm).^{*} Zij vertonen een dwarse streping met een interval van gemiddeld 64 nm en zijn opgebouwd uit evenwijdig aan elkaar gelegen, 0,3-0,5 μm dikke fibrillen, die bijeen worden gehouden door een cementachtige substantie. De meestal in bundels gelegen vezels zijn wel buigzaam, maar vrijwel niet rekbaar. Een bijzondere vorm van collageen vezels zijn de *reticulair vezels*. Deze zijn dunner, hebben een iets andere chemische samenstelling en liggen in het algemeen netvormig gerangschikt.

De *elastische vezels* zijn veel dunner (0,2-1,0 μm) dan de collageen vezels en vertonen geen fibrillaire structuur. Zij zijn zeer rekbaar (tot 150% van hun oorspronkelijke lengte) en keren na uitrekking weer tot hun uitgangslengte terug. Meestal vertakken de vezels zich veelvuldig en vormen verbindingen met elkaar. De op deze wijze gevormde elastische vezelnetten treft men onder andere aan in de wand van de grote bloedvaten.

Het bindweefsel, dat zich overal in het lichaam in, om en tussen de organen bevindt, kan naargelang de plaats waar het wordt aangetroffen een ander aspect vertonen. In het ene geval is het wat losser van structuur en heeft het meer cellen, in het andere geval is het meer compact en bevat het meer vezels; soms zijn de vezels onregelmatig of netvormig gerangschikt en soms in compacte bundels of membranen. Op grond hiervan kan men drie typen bindweefsel onderscheiden: het losmazige, het reticulair en het vezelige bindweefsel.

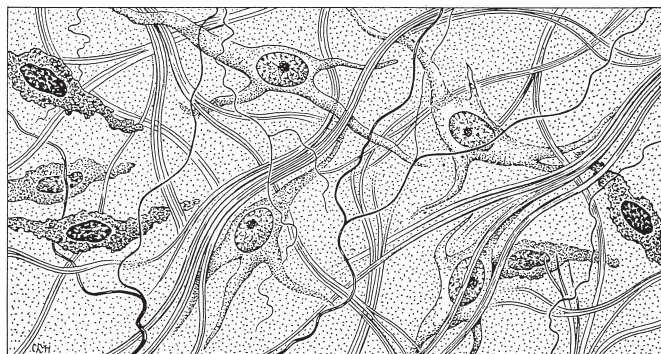
Het *losmazige bindweefsel* bevat veel intercellulaire substantie met veel collageen en weinig elastische vezels, terwijl reticulair vezels alleen op die plaatsen worden aangetroffen waar het bindweefsel aan een orgaan of aan een ander weef-

Losmazig
bindweefsel

^{*} 1 μm is 10^{-6} meter; 1 nm is 10^{-9} meter.

Figuur 1-1

Losmazig bindweefsel met spoelvormige fibroblasten, donkere mestcellen, dikke collagene vezels en dunne elastische vezels.



sel grenst. Zo komt in de basale membraan, die het epitheel van de huid van het onderliggende bindweefsel scheidt, een verdichting van reticulaire vezels voor.

De cellen, die in het losmazige bindweefsel voorkomen, worden onderscheiden in fibroblasten, macrofagen, mestcellen, vetcellen, pigmentcellen en ongedifferentieerde cellen. Ook kunnen er cellen in voorkomen die vanuit de bloedvaten het bindweefsel zijn binnengedrongen. De *fibroblasten* (de vezelvormers) zijn lange, spoelvormige cellen met een ovale kern. Zij spelen een rol bij de vorming van tussenstof, zowel wat betreft de amorfe als de vezelige component. De *macrofagen* worden gekarakteriseerd door hun vermogen om afgestorven weefsel en lichaamsvreemde stoffen op te nemen. Deze eigenschap wordt *fagocytose* genoemd. *Mestcellen* zijn grote cellen, waarvan het cytoplasma gevuld is met kleine, donkerkleurende korrels. Deze cellen produceren farmacologisch actieve stoffen, zoals histamine, die een belangrijke rol spelen bij hooikoorts en andere overgevoelheidsreacties.

Hoewel in elke cel van het bindweefsel kleine vetdruppels aanwezig kunnen zijn, hebben alleen *vetcellen* een echte vetstapelende functie. Het in de cel opgehoopte vet kan in zo grote hoeveelheid aanwezig zijn dat het gehele cytoplasma met de kern van de cel naar de rand wordt gedrukt. Men spreekt dan van een zegelringcel. Wanneer vetcellen in grote aantallen in het weefsel voorkomen en de andere cellen verdringen, wordt het losmazige bindweefsel tot vetweefsel. Deze transformatie is niet op elke plaats van het lichaam mogelijk. Zo mist bijvoorbeeld het onderhuidse bindweefsel van de voetrug het vermogen om vet te stapelen, terwijl daarentegen het bindweefsel onder de

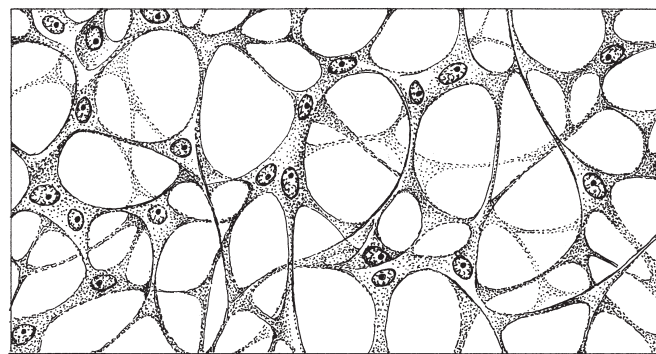
hiel en de bal van de voet voornamelijk uit vetweefsel bestaat.

De *pigmentcellen* zijn langgerekte cellen die kleine korrels melanine bevatten. Wanneer deze cellen talrijk zijn en veel pigmentgranula bevatten, krijgt het weefsel een bruine tot zwarte kleur. Ten slotte kunnen in het losmazige bindweefsel ook nog zogenoemde *ongedifferentieerde cellen* voorkomen. Deze hebben dezelfde vorm als de fibroblasten en zijn meestal rondom de bloedvaten gelegen. Het zijn cellen die zich pas onder invloed van bepaalde prikkels, zoals een ontsteking, gaan differentiëren tot een bepaald celtype.

De functie van het losmazige bindweefsel is drieledig. Het heeft ten eerste een mechanische functie, in die zin dat het de organen, de bloedvaten en de zenuwen van het lichaam omgeeft en zich hierom verdicht tot kapsels of scheden. Hierdoor wordt aan deze structuren een zekere stevigheid gegeven. Ook verbindt het bindweefsel de organen met elkaar en maakt door zijn buigzame, collagene vezels beweging hiertussen mogelijk. In de tweede plaats heeft het een fagocyterende en herstellende werking bij processen zoals ontstekingen, waardoor het een bijdrage levert aan het verdedigingsmechanisme van het lichaam. Ten derde is het bindweefsel ook voor de stofwisseling van belang: de stoffen uit de bloedvaten worden altijd via het omringende bindweefsel door de organen opgenomen, terwijl omgekeerd de door de organen gevormde producten en afvalstoffen weer via het bindweefsel naar de bloedbaan worden afgevoerd.

Het *reticulaire bindweefsel*, dat voornamelijk voorkomt in het beenmerg, de milt en de lymfeklieren, is opgebouwd uit zogenaamde reticulumcellen en reticulaire vezels. De vezels vormen een driedimensionaal netwerk en ondersteunen de cyto-

Reticulair
bindweefsel



Figuur 1-2
Reticulair bindweefsel.
De uitlopers van de cellen en de reticulaire vezels vormen samen een driedimensionaal netwerk.

plasma-uitlopers van de cellen. In de mazen van het netwerk komt bloed of lymfe voor en vindt de vorming plaats van bloedcellen en bloedplaatjes.* In het beenmerg worden erythrocyten, granulocyten, monoccyten en trombocyten aangemaakt, in de milt en in de lymfeklieren vindt productie van lymfocyten plaats.

Bij de geboorte is het beenmerg in alle beenderen bloedvormend (*rood beenmerg*); bij de volwassen mens worden bloedcellen alleen aangemaakt in het beenmerg van de platte beenderen (borstbeen, ribben en schedelbeenderen), de wervels en de proximale epifysen van de humerus en het femur. Op de andere plaatsen vindt opslag van vet plaats en wordt het reticulaire bindweefsel tot *geel beenmerg*.

Het *vezelige bindweefsel* wordt zo genoemd, omdat het óf veel elastische óf veel collageen vezels bevat. Bindweefsel met veel elastische vezels wordt onder andere gevonden in de wanden van de grote arteriën en in de ligamenta flava van de wervelkolom. Het weefsel geeft hierdoor gemakkelijk toe aan de druk of trek die van buitenaf worden uitgeoefend, maar

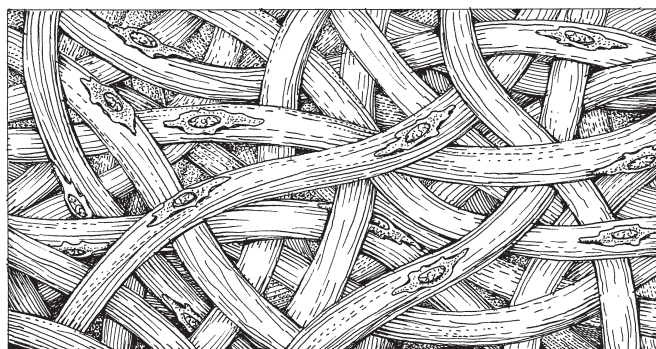
keert zo gauw deze krachten wegvallen tot zijn oorspronkelijke lengte terug. Door de compacte massa elastische vezels ontstaat een gele kleur.

Vezelig bindweefsel met veel collageen vezels komt voor in de vorm van pezen, peesbladen (*aponeurosen*) en gewrichtsbanden (*ligamenten*). Deze bieden alle een grote weerstand aan trekkrachten. De vezels zijn in grove bundels, evenwijdig aan elkaar gerangschikt, terwijl de betrekkelijk spaarzame cellen in rijen tussen de vezelbundels liggen. Hierdoor vertonen deze structuren een wit-glanzend aspect.

Ook de spieren of spiergroepen omhullende bindweefselbladen (*fasciën*) zijn opgebouwd uit collageen vezels. Deze lopen niet evenwijdig, maar zijn met elkaar verweven tot een meer of minder dicht netwerk. Voorbeelden hiervan zijn de fascia lata, die de spieren van het bovenbeen omgeeft, en de fascia cruris, die zich om de spieren van het onderbeen bevindt. Waar dergelijke fasciën als oorsprong of insertie van spieren fungeren, lopen de vezels meer parallel en krijgen de fasciën een aponeurotisch karakter.

* De gevormde bestanddelen van het bloed zijn de rode bloedcellen of erythrocyten, de witte bloedcellen of leukocyten (granulocyten, lymfocyten en monoccyten) en de bloedplaatjes of trombocyten.

Vezelig bindweefsel



Figuur 1-3
Vezelig bindweefsel met vele, met elkaar verwlochten collageen vezels. Dit type weefsel treft men onder andere aan in de lederhuid.

Kraakbeen

Het kraakbeen bestaat evenals het bindweefsel uit twee samenstellende delen: cellen en intercellulaire substantie of tussenstof. De cellen hebben echter alleen betekenis voor zover zij een rol spelen bij de aanmaak van de tussenstof. De amorfe component van de tussenstof bestaat ook bij het kraakbeen voor het grootste deel uit glycosaminoglycanen en heeft een vaste, veerkrachtige consistentie. De vezelige component bestaat uit collagene of uit elastische vezels.

Ontwikkeling en groei

Kraakbeen wordt gevormd uit bindweefsel. Op de plaatsen waar dat plaatsvindt, ziet men dat de bindweefselcellen hun uitlopers intrekken en dicht opeengehoopt komen te liggen. De cellen, nu kraakbeenvormers of *chondroblasten* genoemd, zwellen op, worden rond en scheiden kraakbeentussenstof af. Hierdoor schuiven de cellen uit elkaar en komen geïsoleerd te liggen. Zij zijn nu omgeven door een stof, die door een hoger gehalte aan glycosaminoglycanen anders kleurt dan de rest van de tussenstof. Om het kraakbeen gaat het bindweefsel zich verdichten tot het kraakbeenvlies of *perichondrium*. Dit bestaat uit twee lagen: een buitenste laag met veel vezels en weinig cellen en een binnenste laag met weinig vezels en vele, overwegend ongedifferentieerde cellen.

De groei van het kraakbeen, zowel tijdens de embryonale ontwikkeling als na de geboorte, vindt op twee manieren plaats. Ten eerste kunnen de cellen van reeds gevormd kraakbeen, de *chondrocyten*, zich weer gaan delen en kunnen hun dochtercellen nieuwe kraakbeentussen-

stof afscheiden. Door de vastheid van de tussenstof blijven de dochtercellen en eventuele volgende generaties bij elkaar liggen. Deze groepjes van cellen, die ontstaan zijn door deling uit één cel, worden *isogene celgroepen* genoemd. Naast deze *interstitiële groei* in het kraakbeen zelf, vindt er ook een *appositionele groei* vanuit het perichondrium plaats. De ongedifferentieerde cellen van de binnenste laag van dit vlies vormen zich om tot chondroblasten, scheiden kraakbeentussenstof af en voegen aldus nieuwe cellen en tussenstof aan het oppervlak van het kraakbeen toe.

Naar het aantal en de aard van de vezels die in de tussenstof liggen, kunnen drie typen kraakbeen worden onderscheiden: het hyaliene of glasachtige kraakbeen, het elastische kraakbeen en het vezelige kraakbeen.

In het *hyaliene kraakbeen* komen relatief weinig collagene vezels voor. Deze hebben dezelfde brekingsindex als de omringende tussenstof, waardoor zij worden gemaskeerd en het glasachtige aspect ontstaat waaraan dit kraakbeen zijn naam ontleent. Het hyaliene kraakbeen treft men aan als gewrichtsvlakken op de botuiteinden en als ribkraakbeen in de voorste uiteinden van de ribben. Ook de kraakbenige voorlopers van de beenderen bestaan uit hyalien kraakbeen.

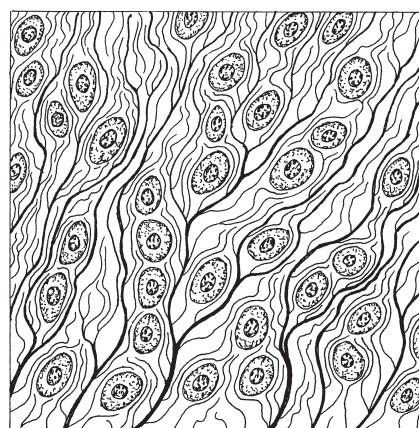
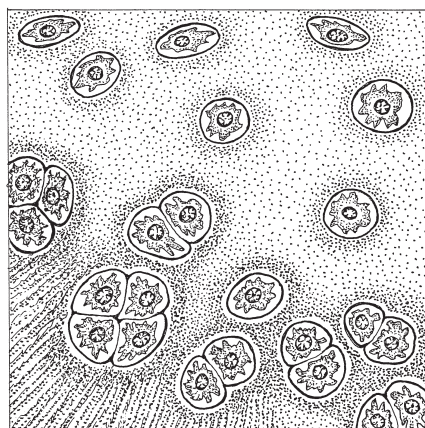
Hyalien kraakbeen

In het *elastische kraakbeen* zijn de cellen en de grondsubstantie beperkt door de grote hoeveelheid elastische vezels die aan het weefsel een grote buigzaamheid en elasticiteit verlenen. Dit kraakbeen komt onder meer voor in de oorschelp. Buigt men deze om, dan veert de oorschelp na loslaten onmiddellijk in zijn oorspronkelijke vorm terug.

Elastisch kraakbeen

Figuur 1-4

Hyalien kraakbeen met asbestvezeling (links-onder).

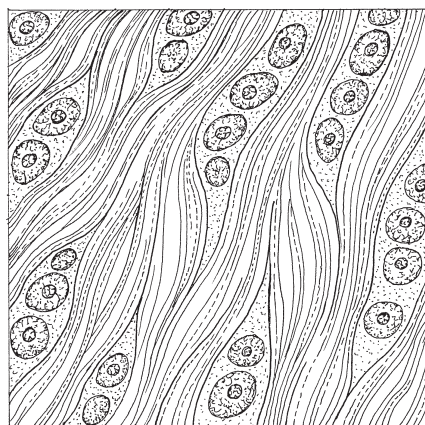


Figuur 1-5

Elastisch kraakbeen.

Figuur 1-6

Vezelig kraakbeen met grote bundels collagene vezels.



Vezelig kraakbeen

Het *vezelige kraakbeen* bestaat grotendeels uit collagene vezels die in evenwijdige bundels gerangschikt zijn en waar-tussen de cellen en de grondsubstantie liggen. Hierdoor heeft het weefsel een duidelijk vezelige structuur. Men vindt vezelig kraakbeen voornamelijk op die plaatsen waar kraakbeen aan druk onderhevig is, met name in de anulus fibrosus van de tussenwervelschijven en in de disci en de menisci van synoviale gewrichten.

Een opmerkelijke eigenschap van kraakbeen is dat het geen bloedvaten bezit. De cellen worden gevoed door stoffen die vanuit het omringende bindweefsel door de tussenstof diffunderen. De consequentie hiervan is dat kraakbeen in het volwassen lichaam nooit in massieve hoeveelheden zal worden aangetroffen, maar altijd als vrij dunne weefselplaten, waardoor de afstand tussen de bloedvaten en de te voeden cellen niet al te groot is. Dat deze wijze van voeding iets te maken heeft met de vroegtijdige ouderdomsveranderingen die het kraakbeen en vooral het ribkraakbeen ondergaat, is niet onwaarschijnlijk. Reeds voor de volwassen leeftijd ziet men namelijk dat er in de homogene, intercellulaire substantie van dit kraakbeentype evenwijdige vezels verschijnen die niets van doen hebben met collagene vezels (*asbestvezeling*). Verder bevat de intercellulaire substantie minder water en worden kalkzouten in de intercellulaire substantie neergeslagen. Niet zelden treedt er zelfs verbening op. Het is duidelijk dat door deze processen de elasticiteit van het kraakbeen in aanzienlijke mate vermindert.

Been en algemene osteologie

Been vormt het harde, maar toch ook veer-

krachtige weefsel van de botstukken van het lichaam. De tussenstof, die zich tussen de cellen bevindt, is opgebouwd uit twee componenten: 1. een organische matrix (35%), en 2. anorganische zouten (65%). De organische matrix bestaat overwegend uit collagene vezels en bevat slechts weinig glycosaminoglycanen. De anorganische zouten, die aan het been de harde consistentie verlenen, zijn voornamelijk calciumfosfaten en verder magnesium, natrium, carbonaten en citraten. Zij komen voor in de vorm van kristallen die tussen de fibrillen van de collagene vezels liggen.

De cellen van het been (*osteocyten*) liggen in kleine holten (*lacunae*) en hangen door fijne uitlopers met elkaar samen. De kanaaltjes (*canaliculi*), die door deze uitlopers in het weefsel worden uitgespaard, zijn bijzonder belangrijk voor de voeding van de osteocyten, want alleen via deze kanaaltjes kunnen de voedingsstoffen vanuit de in het been aanwezige bloedvaten de cellen bereiken. Bij kinderen bevat het been meer collagene vezels en minder kalkzouten dan bij volwassenen, wat een grotere buigzaamheid van de botstukken tot gevolg heeft. Bij oudere mensen neemt de hoeveelheid tussenstof, en daarmee ook de hoeveelheid mineralen af.

Het been komt in het lichaam op twee manieren voor: als aaneengesloten of compact been, en als spongieus been, dat uit een sponsachtig netwerk van dunne beenplaatjes (trabekels) bestaat. Bekijk men als voorbeeld een lang pijpbeen, dan ziet men dat de schacht hiervan is opgebouwd uit een compacte botmanchet (*substantia compacta*), die naar het midden overgaat in spongieus been dat een met reticulair bindweefsel gevulde mergholte (*cavitas medullaris*) omsluit. De beide uiteinden van het botstuk bestaan uit spongieus been (*substantia spongiosa*) dat weer omgeven is door een dunne laag compact been (*substantia corticalis*). In de mazen tussen de beenplaatjes bevindt zich ook hier reticulair bindweefsel. Op de plaatsen waar het pijpbeen met andere botstukken articuleert, is het bekleed met hyalien kraakbeen.

Aan de buitenzijde is het bot, behalve op de gewrichtsvlakken, bekleed met beenvlies of *periost*. Dit bestaat evenals het perichondrium uit een buitenste, vezelige laag en uit een binnenste laag, die losser is en meer cellen bevat. Het is door de vezels

Bouw van een lang pijpbeen

van Sharpey, die in het been uitstralen, verankerd aan het botstuk. Verder bevindt zich aan de binnenzijde van het been het *endost*, dat een verdichting is van het reticulaire bindweefsel. Het heeft eenzelfde structuur als de binnenste laag van het periost en bevat evenals deze laag ongedifferentieerde cellen, die een botvormende functie kunnen gaan uitoefenen.

In elk van de beide uiteinden van het lange pijpbeen wordt het spongieuze been onderbroken door een dunne, dwarsverlopende beenplaat, die een overblijfsel is van de kraakbenige epifysaire schijf. Dit kraakbeen is verantwoordelijk voor de lengtetoeename van het bot, maar wordt na de groei vervangen door been. Door de epifysaire schijven wordt het botstuk verdeeld in de aan de gewrichtszijden gelegen *epifysen* en de in het midden gelegen *diafyse*. De aan de epifysaire schijven grenzende delen van de diafyse, die meestal een grotere omtrek hebben dan de rest van het middengedeelte, worden *metafysen* genoemd.

Substantia compacta

In de substantia compacta is het been opgebouwd uit *lamellair been*. De botafzetting heeft hier plaatsgehad in opeenvolgende lagen (lamellen), die zich gerangschikt hebben om de kanalen van Havers. Dit zijn kanalen die in de lengte van het bot lopen en arteriën en venen bevatten. Op de grenzen tussen de lamellen bevinden zich de cellichamen van de osteocyten. Een kanaal van Havers met de eromheen liggende lamellen van Havers wordt een *systeem van Havers* of *osteon* ge-

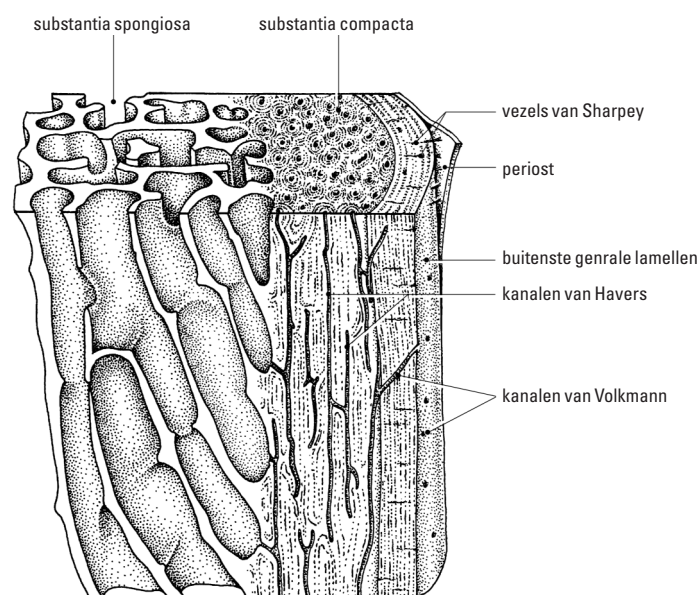
noemd. Tussen de verschillende osteonen bevinden zich kitlijnen, of beter gezegd kitvlakken, die van de lamellen kunnen worden onderscheiden omdat zij geen collageen vezels en geen calciumzoutkristallen bevatten. Aan de buiten- en binnenzijden van de substantia compacta zijn de lamellen niet gerangschikt rondom de kanalen van Havers, maar evenwijdig aan de buiten- en binnenomtrek van het been. Dit zijn de buitenste en binnenste generale lamellen.

Door de voortdurende opbouw en afbraak van been tijdens de groei, maar ook nog daarna, vertoont het volwassen pijpbeen geen regelmatige structuur van naast elkaar gelegen osteonen, maar heeft het geheel meer het karakter van een mozaïekstructuur, waarin naast volledig gevormde osteonen ook gedeeltelijk afgebroken en gedeeltelijk opgebouwde systemen voorkomen. Hierdoor kunnen de tussen de osteonen gelegen interstitiële lamellen worden verklaard.

De in de lamellen van de osteonen gelegen collageen vezels zijn, evenals de lamellen zelf, gerangschikt om de kanalen van Havers en wel spiraalsgewijs. In de opeenvolgende lamellen hebben de vezelspiralen een verschillende spoed: in de ene lamel lopen zij met een zeer geringe stijging nagenoeg horizontaal, in de andere lamel vertonen zij een zeer snelle stijging en liggen dan bijna in de lengterichting van het osteon. Ook is de spoed in een bepaalde lamel niet overal dezelfde: de vezels kunnen op een hoger of lager ni-

Figuur 1-7

Schematische tekening van een gedeelte van een pijpbeen.



veau een meer of minder steil verloop hebben. Deze rangschikking van de collagene vezels levert een belangrijke bijdrage aan het weerstandsvermogen van de schacht van de pijpbeenderen, zodat een optimale tegenkracht kan worden geboden aan op het been uitgeoefende krachten: osteonen met collagene vezels die voornamelijk in de lengterichting lopen zijn vooral trekvast, terwijl osteonen met collagene vezels die voornamelijk circulair lopen vooral drukvast zijn.

Niet het gehele compacte been bestaat uit lamellair been. Op plaatsen waar ligamenten en pezen het bot binnendringen, vindt men *vezelbeen*, waarin de collagene vezels een overwegend parallel verloop hebben. Hierbij kan nog worden opgemerkt dat daar waar spieren met een lange eindpees aanhechten, de beenderen uitsteeksels of *apofysen* (processus, tuberculum, trochanter enz.) vertonen, en daar waar spieren pas vlakbij hun aanhechtingen in pezen overgaan, de botstukken óf een zeer flauwe óf geen verhevenheid bezitten. Dat hierbij ook een min of meer sterke ontwikkeling van de musculatuur een rol speelt, is duidelijk te zien aan het verschil in uitwendige vorm van de beenderen van vrouwen en mannen.

De beenplaatjes waaruit de substantia spongiosa is opgebouwd, vertonen evenals het compacte been een lamellaire structuur, maar alleen in de dikkere plaatjes komen kanalen van Havers voor. Ook hier vindt men dat op de plaatsen waar pezen en ligamenten vasthechten, het lamellaire been plaatsmaakt voor vezelbeen.

Zo op het oog vertonen de spongiosaplaatjes in de uiteinden van de pijpbeenderen een bepaalde architectuur. In het proximale uiteinde van het femur bijvoorbeeld lopen de plaatjes als het ware in bogen, die elkaar min of meer loodrecht snijden, terwijl zij in het distale uiteinde van dit botstuk meer rechtlijnig en parallel aan elkaar verlopen.* Dat deze rangschikking in functionele betekenis zinvol moet zijn en aangepast aan de eisen die eraan gesteld worden, is buiten twijfel. Of zij echter een zuiver mechanische is, en wel in die zin dat de spongiosaplaatjes gerangschikt zijn in de richting van de grootste trek en druk die op het bot worden uit-

Osteoporose

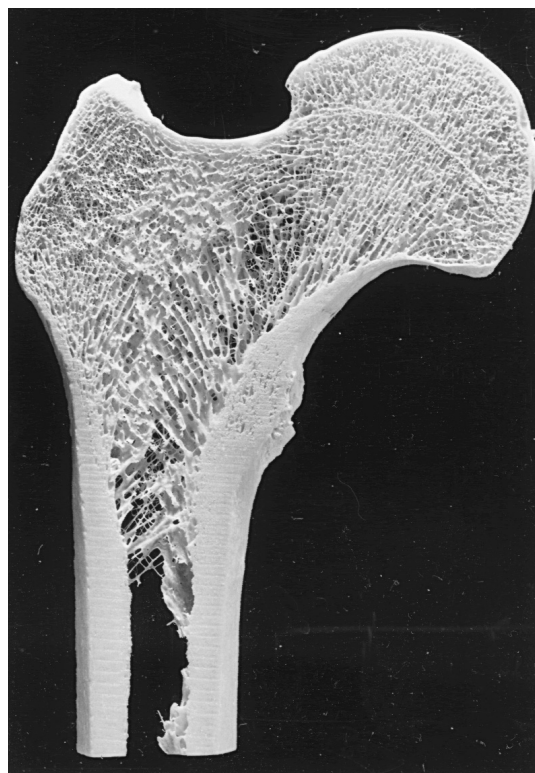
Er is sprake van osteoporose als het volume van het botweefsel afneemt, voornamelijk door een vermindering van de trabeculaire botmassa. Het kalkgehalte van het bot is normaal, maar doordat het bot dun is en in massa afgenomen, is het totale calciumgehalte toch verminderd. De afgenomen massa leidt tot verlies van de structuur van het botweefsel, met als gevolg een verhoogde kans op fractures, in het bijzonder wervel-, heup- en polsfracturen.

De eerste symptomen van osteoporose zijn vaak spontaan optredende hevige rugklachten. Röntgenfoto's tonen dan, naast een opvallende contrastarme afbeelding van de beenderen door het afgenomen kalkgehalte, hoogteverlies van de wervellichamen als gevolg van spontane fractures en inzakkingen. Vanwege hormonale invloeden is osteoporose bij vrouwen een groter probleem dan bij mannen.

Om de mate van osteoporose te kwantificeren wordt gebruikgemaakt van botdichtheidsmetingen. Met deze metingen kan ook worden bepaald of begonnen moet worden met toediening van medicijnen die de botafbraak remmen. De belangrijkste maatregelen ter bestrijding van osteoporose bestaan echter uit voldoende lichaamsbeweging en een evenwichtige voeding met voldoende calcium en vitamine D.

geoefend (de trajectoriële bouw van Wolff), kan worden betwijfeld. Vooral omdat de plaatjes niet overal een zo regelma-

Substantia
spongiosa



Figuur 1-8
Beenplaatjes in
het proximale
uiteinde van
het femur. De
verbeende epi-
fysaire schijf is
duidelijk zicht-
baar.

* Proximaal: naar de romp toe. Distaal: van de romp af.

Bloedvoorziening van een lang pijpbeen

tig verloop hebben als bij een trajectoriële bouw verwacht mag worden. Een andere zienswijze is dat de substantia spongiosa primair uit onregelmatig geordende elementen bestaat en pas secundair onder invloed van de functie een zekere architectuur gaat vertonen. Hiervan is het trajectoriële karakter slechts hypothetisch (Huiskes, 2000).

De bloedvoorziening van de schacht van een lang pijpbeen vindt plaats door een of twee *aa. nutriciae* die in het middenge-deelte van de diafyse het botstuk binnentreden. Zij maken gebruik van canales nutriciai die door de substantia compacta lopen en onmiddellijk toegang geven tot de cavitas medullaris. In de cavitas vertakt elke *a. nutricia* zich in arteriën die naar de beide uiteinden van het pijpbeen lopen. Deze geven op hun beurt takken af naar de substantia compacta, die aldus op centrifugale wijze, dat wil zeggen vanuit de cavitas medullaris, van bloed wordt voorzien. De bloedvaten die het meest perifeer in het compacte been lopen, hebben anastomosen met de arteriën van het periost. Experimenten van Reichert e.a. (1995) hebben uitgewezen dat er na een trauma of onder andere pathologische omstandigheden ook een centripetale bloedvoorziening van het compacte been via deze anastomosen kan plaatsvinden.

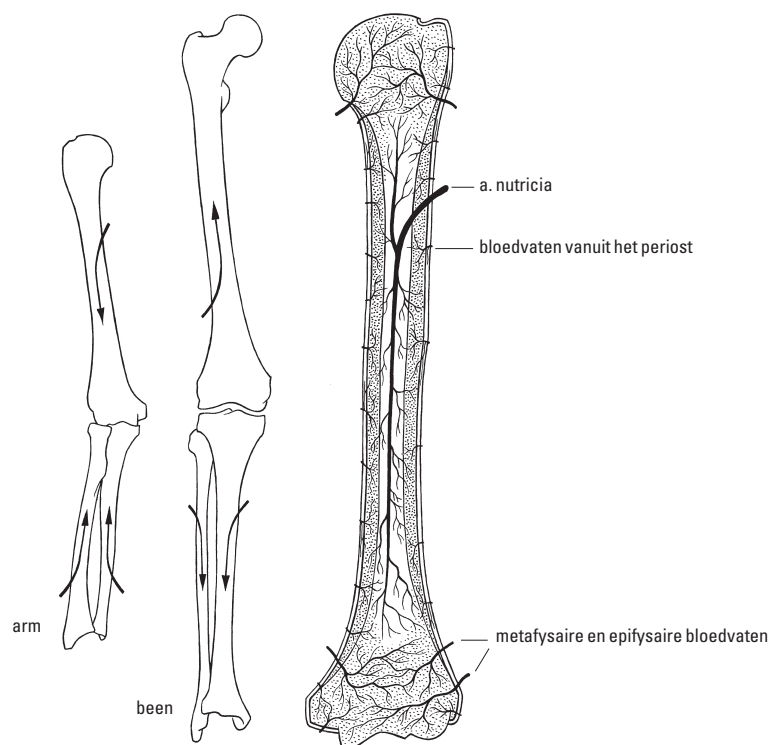
In alle lange pijpbeenderen hebben de canales nutriciai een schuin verloop, en wel zodanig dat ze in de boven- en onderarm naar de elleboog toe convergeren en in het boven- en onderbeen van de knie afdivergeren. De vascularisatie van de metafysen en de epifysen geschiedt door talrijke bloedvaten die rechtstreeks het lange pijpbeen binnendringen en zich vertakken in de substantia spongiosa. Zij zijn takken van gewrichts- en spiervaten en worden de *metafysaire* en *epifysaire arteriën* genoemd. Er zijn talrijke anastomosen tussen deze arteriën en de takken van de *a. nutricia*, die naar de beide uiteinden van het pijpbeen lopen. De anastomosen tussen de epifysaire arteriën en de takken van de *a. nutricia* komen tot stand via doorgangen in de epifysaire schijven.

De veneuze afvoer van de lange pijpbeenderen is als volgt. De venen in de substantia corticalis en in de substantia compacta voeren hun bloed af naar de venen in het periost. De overige venen van de diafyse verzamelen zich in de cavitas medullaris tot grotere vaten. Deze draineren óf op de vene die met de *a. nutricia* door de canalis nutricius loopt óf treden op andere plaatsen dwars door het compacte been naar buiten. Voor de venen van de epifysen bestaat alleen de laatste mogelijkheid.

Met de bloedvaten die het bot intreden,

Figuur 1-9

Schema van de loop van de *aa. nutriciae* in arm en been en (rechts) bloedvoorziening van een lang pijpbeen.



Bottypen

lopen sympathische zenuwvezels mee die een vasoconstrictoire functie hebben. Daarnaast vindt men in het periost somatisch sensibele zenuwen die in dienst staan van de pijnperceptie.

Behalve als lange pijpbeenderen komen de botstukken van het lichaam voor als korte pijpbeenderen, platte beenderen en onregelmatige beenderen. Korte pijpbeenderen, zoals middenhands- en middenvoetsbeentjes, vinger- en teenkootjes, bestaan bijna geheel uit spongieus been, omgeven door een dunne laag compact been. Ze hebben meestal maar één epifysaire schijf, óf in het proximale óf in het distale uiteinde van het bot, en worden gevasculariseerd door een enkele a. nutricia en door bloedvaatjes vanuit het periost.

De platte beenderen, zoals de ribben, het borstbeen en de dekbeenderen van de schedel, bestaan uit een buitenste en een binnenste laag compact been (*lamina externa* en *lamina interna*) met ertussen spongieus been. Bij de schedelbeenderen wordt deze substantia spongiosa betiteld als *diploë*.

Ten slotte worden alle andere botstukken, die geen specifieke vorm of structuur hebben, samengevat als onregelmatige beenderen. Hiertoe behoren de wervels, de hand- en voetwortelbeentjes en de sesambeentjes (*ossa sesamoidea*), die ingebed liggen in gewrichtskapsels of in pezen van spieren. Evenals de korte pijpbeenderen bestaan deze botstukken uit spongieus been, met daaromheen een dunne laag substantia compacta.

De verbening

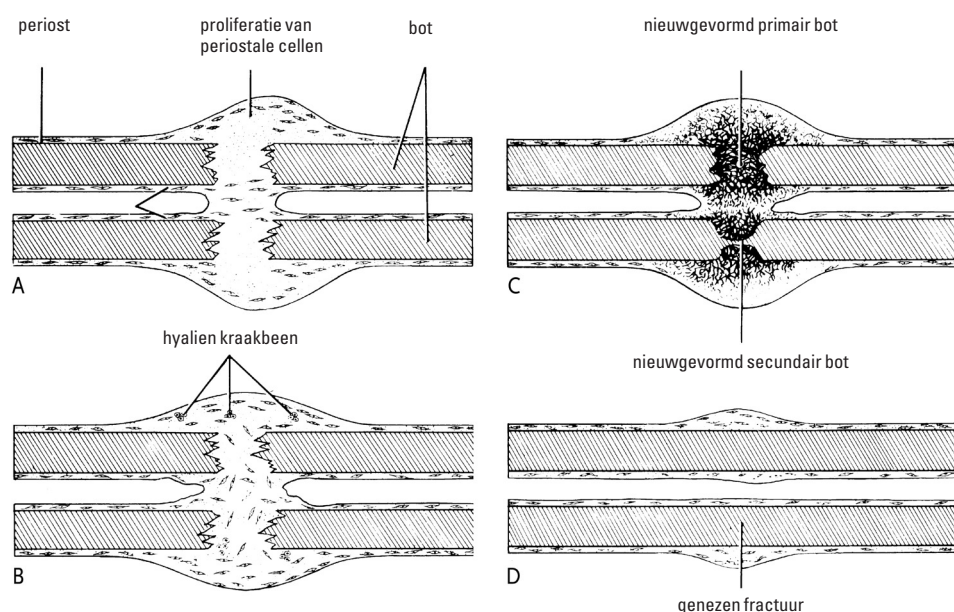
Been kan in de embryologie op twee manieren ontstaan: enerzijds kan het direct uit het mesenchym worden gevormd (*bindweefsel- of desmale verbening*), anderzijds kan het tot stand komen door verbening van reeds eerder aangelegd kraakbeen (*kraakbeen- of chondrale verbening*). Beenderen die alleen door bindweefselverbening ontstaan én groeien, zijn de platte beenderen van de schedel; alle andere beenderen hebben eerst een kraakbenig voorstadium, dat tijdelijk als skelet dienstdoet en door been wordt vervangen. De groei hiervan vindt zowel door kraakbeen- als door bindweefselverbening plaats.

De onderkaak en het sleutelbeen nemen een uitzonderingspositie in. Bij de vorming van de onderkaak wordt eerst kraakbeen aangelegd, dat weer te gronde gaat en vervangen wordt door verbening van het omringende bindweefsel. Het sleutelbeen ontstaat in het midden door bindweefselverbening en groeit aan de uiteinden door kraakbeenverbening.

De ontwikkeling van de korte en lange pijpbeenderen begint met de vorming van een kraakbeenmodel. Hieraan kunnen een centraal gelegen diafyse en twee perifeer gelegen epifysen worden onderscheiden. Het geheel wordt, behalve aan de beide uiteinden, omgeven door een perichondrium.

De vervanging van kraakbeen tot been begint in het midden van het kraakbeen-

Vorming van de pijpbeenderen



Figuur 1-10
A-D Vier stadia in het herstel van een gebroken pijpbeen (ontleend aan Junqueira e.a., 2002).

model. De vorming van deze zogenaamde primaire beenkern begint in het perichondrium, waarin zich cellen gaan ontwikkelen tot *osteoblasten* (beenvormers). Deze vormen een beenmanchet om de diafyse (*periostale beenvorming*). Het perichondrium wordt nu periost genoemd. Zodra de manchets gevormd vinden twee processen plaats. Ten eerste ziet men dat de kraakbeencellen in het midden van de dia-

fyse opzwellen en in verval raken. Tijdens dit proces wordt een deel van de kraakbeentussenstof geresorbeerd, met als gevolg dat daarin holten (lacunen) ontstaan. In de rest van de kraakbeentussenstof worden kalkzouten afgezet. Op deze wijze ontstaat een systeem van lacunen en verkalkte kraakbeenbalkjes. Het tweede proces begint met de vorming van periostale knoppen die uit celrijk bindweefsel met bloedvaten bestaan. De knoppen groeien door de beenmanchet en dringen het kraakbeenmodel binnen. Cellen van dit bindweefsel differentiëren zich tot osteoblasten die tegen de verkalkte kraakbeenbalkjes aan gaan liggen en deze geleidelijk vervangen door been (*enchondrale beenvorming*). De rest van het binnengedrongen weefsel ontwikkelt zich tot reticulair bindweefsel dat in de lacunen komt te liggen. Bij de lange pijpbeenderen worden in het midden van de diafyse de nieuwgevormde beenbalkjes weer afgebroken, waardoor hier een mergholte ontstaat.

Vanuit de primaire beenkern in het midden van de diafyse zet zich het verbenningsproces naar de beide uiteinden van het bot voort, terwijl ondertussen de kraakbeencellen in de epifysen doorgaan met zich te delen waardoor het botstuk in lengte toeneemt. Ook de beenmanchet wordt langer en omgeeft nu niet alleen de diafyse, maar ook de beide epifysen.

Omstreeks het einde van de embryonale ontwikkeling en na de geboorte verschijnen er ook beenkernen in de epifysen. Bij sommige lange pijpbeenderen komen ook in de grote uitsteeksels aparte beenkernen voor; bij de korte pijpbeenderen is slechts één epifysaire beenkern aanwezig, óf in de proximale óf in de distale epifyse. Ook deze epifysaire beenkernen breiden zich uit, echter nooit zo ver dat ze aansluiten bij de beenkern van de diafyse of het buitenoppervlak bereiken. De kraakbeenzone die hierdoor tussen de epifyse en de diafyse overblijft, wordt epifysaire schijf genoemd. Hierin vindt een intensieve vermeerdering van kraakbeencellen plaats en, omdat het nieuwgevormde kraakbeen aan de zijde van de diafyse door enchondrale verbening in been wordt omgezet, komt hierdoor de lengtegroei van de schacht tot stand.

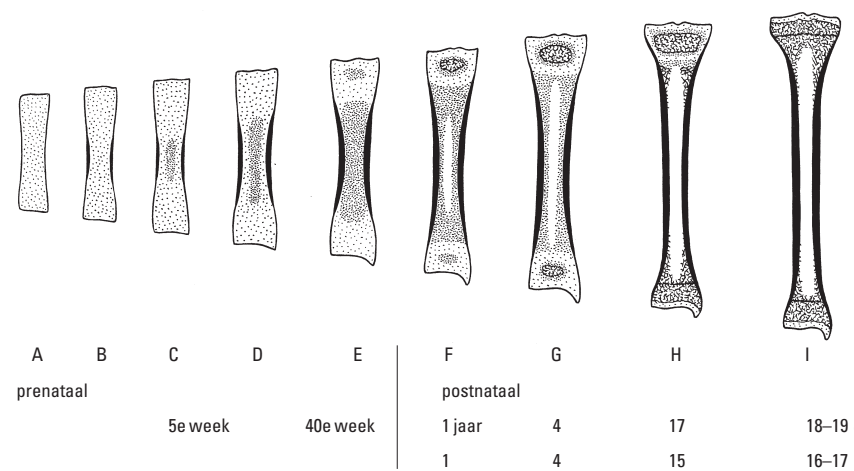
De epifysaire schijf blijft gedurende de gehele groeiperiode bestaan, hoewel hij

Fracturen en fractuurgenezing

Een *fractuur*, een botbreuk, wordt gedefinieerd als een onderbreking van de continuïteit van het bot, doordat inwerkende krachten de samenhang van het weefsel hebben verstoord. De grote pijpbeenderen zullen slechts breken bij fors inwerkend geweld, zoals dat bijvoorbeeld bij verkeersongevallen het geval kan zijn. Bij kinderen is het periost zo sterk dat de fractuurdelen vaak bij elkaar worden gehouden en 'inknikken' waardoor een zogenaamde 'green stick'-fractuur ontstaat. Bij volwassenen zal bij enige dislocatie het periost scheuren. Door de dislocatie van de fractuureinden kunnen omringende structuren zoals zenuwen en bloedvaten worden beschadigd. Fracturen ontstaan echter niet alleen ten gevolge van fors geweld, maar ook spontaan door pathologische processen in het bot of door vermoeidheid.

Een *spontane fractuur* ontstaat na een gering trauma of zelfs zonder enig trauma. Dit kan het gevolg zijn van een lokaal proces zoals een bottumor, of van een meer gegeneraliseerde aandoening van het skelet zoals osteoporose. *Vermoeidheids- of stressfracturen* ontstaan door een zich steeds herhalende grote spanning op een botstuk. Bekend zijn de marsfractuur van de ossa metatarsalia II en III die bij rekruten tijdens langeafstandsmarsen kan optreden en fracturen van het distale deel van de fibula of van het proximale een derde deel van de tibia respectievelijk bij hardlopers en bij hoogspringers en balletdansers.

Fractuurgenezing is een biologisch proces waarbij alleen moet worden gezorgd voor de juiste voorwaarden, zoals botcontact tussen de verschillende fractuurstukken en voldoende immobilisatie. Fractuurgenezing vindt plaats door *callusvorming* (fig. 1-10). De verscheuring van bloedvaten veroorzaakt een plaatselijke bloeditstorting die wordt gevolgd door de vorming van een bloedstolsel. Het herstel in het fractuurgebied begint met het opruimen van het bloedstolsel, van de dode botcellen en van de botmatrix. Revascularisatie van het fractuurgebied is hierbij belangrijk. Periost, endost en omliggende weefsels reageren met een sterke celvermeerdering, waardoor celrijk weefsel wordt gevormd rond de breukplaats en tussen de beide botstukken. Het weefsel dat tussen de beide botstukken ontstaat en dat een tijdelijke overbrugging vormt, wordt de *callus* genoemd. Afhankelijk van de mate van vascularisatie wordt kraakbeen of botweefsel gevormd. In het niet sterk gevasculariseerde deel van de callus wordt eerst kraakbeen gevormd, dat door enchondrale botvorming wordt omgezet in bot. Uiteindelijk ontstaat er een sterke benige callus die weer belast kan worden.



Figuur 1-11

Schema van de ontwikkeling van een lang pijpbeen uit een kraakbeen-model.

Er ontstaat een primaire beenkern in het midden van het model. Om de diafyse wordt een beenmanchet gevormd (B) en in de diafyse gaan de kraakbeencellen opzwel-len en ontstaan er lacunen (C). Later ver-schijnen er ook been-kernen in de epifysen en ontstaat een mergholte in het centrum van de diafyse (E en F). De epi-fysaire schijven nemen in hoogte af en geleide-lijk ontstaat de volwas-sen vorm van het bot-stuk (G, H en I).

geleidelijk in hoogte afneemt. Heeft het pijpbeen zijn uiteindelijke lengte bereikt, dan verbeent de epifysaire schijf en ontstaat er een benige verbinding tussen epi-fyse en diafyse.

Het kraakbeen dat de botuiteinden bekleedt, wordt gewrichtskraakbeen, maar is tevens verantwoordelijk voor de lengte- en de breedtegroei van de epifyse. De breedtegroei in het midden van de schacht vindt plaats doordat aan de buitenkant vanuit het periost steeds nieuwe lagen bot worden afgezet, terwijl aan de binnenkant, vanuit het merg, bot wordt geresorbeerd. Hierdoor neemt zowel de buitenomtrek als de binnenomtrek van de schacht toe.

In de oorspronkelijk bredere uiteinden van de schacht gebeurt het omgekeerde: aan de buitenzijde van het bot vindt resorptie plaats en aan de binnenzijde wordt nieuw bot afgezet. Op deze wijze gaan ook de proximale en distale delen van de schacht deel uitmaken van de meestal slanke diafyse. Alleen de delen van de schacht die grenzen aan de epifysaire schijven behouden meestal een grotere omtrek dan de rest van de schacht. Dit worden de metafysen van het volwassen pijpbeen.

Al het been van de pijpbeenderen wordt aangelegd als vezelbeen, waarin de collagene vezels geen bepaalde rangschikking vertonen. Pas na de geboorte wordt het geleidelijk vervangen door lamellair been. Alleen op de plaatsen waar ligamenten en pezen in het groeiende bot worden ingebouwd, blijft vezelbeen bestaan.

Op de plaatsen waar de platte schedelbeenderen worden aangelegd, verdicht zich het mesenchym door een toename

van cellen. Deze differentiëren zich tot osteoblasten en vormen een organische matrix, die rijk is aan collagene vezels en bekendstaat als *osteoïd weefsel*. Vervolgens worden hierin vanuit het bloed calcium-zouten afgezet. De plaats waar de verbeening van een bepaald botstuk begint, wordt primaire beenkern genoemd. De eerste beenkernen verschijnen reeds in de zesde week van de embryonale ontwikkeling.

Het gevormde been bestaat uit dunne spangetjes, die omgeven worden door bindweefsel met osteoblasten. De cellen blijven doorgaan met beenvorming, waardoor de spangetjes dikker worden en in de lengte uitgroeien. Bij de geboorte bestaat het botstuk uit één geheel van compact, vezelig been, dat aan de buiten- en binnenzijde bekleed is met periost. In de verdere ontwikkeling gaan zich de laminae externa en interna en de ertussen gelegen substantia spongiosa ontwikkelen. Tegelijkertijd wordt het vezelbeen omgebouwd tot lamellair been, waarin osteonen voorkomen.

Met de groei voor en na de geboorte neemt ook de omtrek van het hoofd toe en moeten de schedelbeenderen een minder gebogen vorm krijgen. Dit komt tot stand door afzetting van been aan de buitenzijden en door resorptie van been aan de binnenzijden van de botstukken. Omdat de afzetting de overhand heeft over de resorptie worden de beenderen tevens dikker.

De vorming van onregelmatige botten is meestal gecompliceerder dan die van de lange en korte pijpbeenderen. Zo treft men in de kraakbenige wervelaanleg drie primaire beenkernen aan: één in het toe-

komstige wervellichaam en twee in de toekomstige wervelboog. Bovendien ontstaan er tegen de puberteit nog secundaire verbeningscentra in de uiteinden van de uitsteeksels van de wervel en in het wervellichaam. Uit de laatste ontstaan de benige randlijsten, die het wervellichaam aan de onder- en bovenzijde omsluiten.

Algemene gewrichtsleer

De verbindingen die tussen beenderen of beenstukken voorkomen, worden gewrichten of *articulationes* genoemd. Deze kunnen een grote beweeglijkheid bezitten, zoals het gewricht tussen het schouderblad en de bovenarm, of zij zijn slechts weinig of niet beweeglijk, zoals voorkomt bij de verbindingen tussen de beenderen van de schedel.

Men onderscheidt drie typen *articulationes*:

- 1 de *articulatio fibrosa*, waarbij de beenderen door bindweefsel met elkaar verbonden zijn;
- 2 de *articulatio cartilaginea*, waarbij kraakbeen het verbindend element is; en
- 3 de *articulatio synovialis* (synoviaal gewricht), waarin de botten door een gewrichtsholte van elkaar gescheiden worden.

De *articulationes fibrosae* kunnen op drie manieren voorkomen. Wanneer beenderen door collageen of elastische vezels met elkaar verbonden zijn, spreekt men

van *syndesmosis* (syndesmose). Voorbeelden hiervan zijn de uit collageen vezels bestaande *membrana interossea* tussen de radius en de ulna van de onderarm en de elastische *ligamenta flava* die de wervelbogen met elkaar verbinden. Is er tussen twee aan elkaar grenzende, platte beenderen slechts een smalle bindweefselzone aanwezig, dan noemt men dit een *sutura* (sutura of naadverbinding). De suturen komen alleen in de schedel voor. Een derde type bindweefselverbinding is de *gomphosis*, de verbinding tussen tand en tandkas door middel van het periodontium.

Van de *articulationes cartilagineae* kunnen twee vormen worden onderscheiden. Indien de verbinding alleen tot stand komt door hyalien kraakbeen, dan noemt men dit een *synchondrosis* (synchondrose); is daarentegen in het midden vezelig kraakbeen aanwezig en zijn de botstukken slechts met een dun laagje hyalien kraakbeen bekleed, dan spreekt men van een *symphysis* (symfyse). Een voorbeeld van een synchondrose is de verbinding tussen het manubrium en het corpus van het borstbeen, een voorbeeld van een symfyse is de verbinding tussen de corpora van de beide ossa pubis.

In een synoviaal gewricht articuleren twee of meer beenderen in een gewrichtsholte (de *cavitas articularis*) die omgeven wordt door een gewrichtskapsel. Komen twee botstukken in één gewrichtskapsel

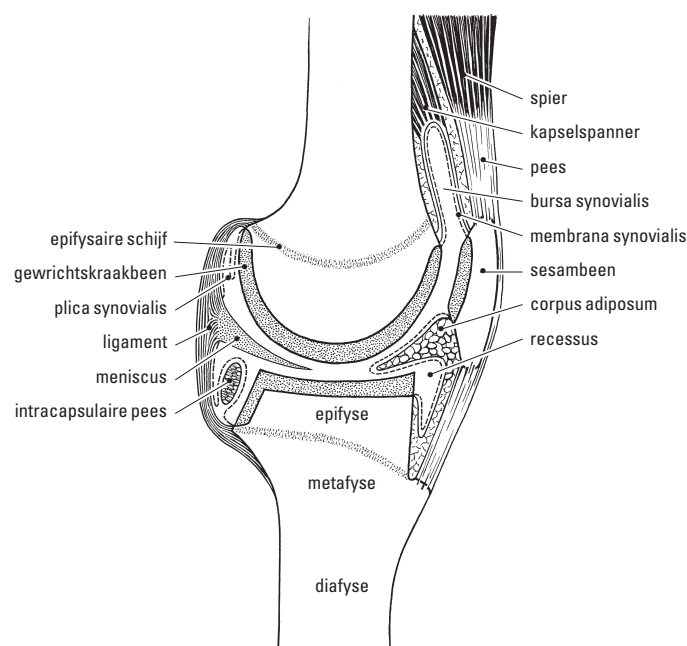
Articulatio
cartilaginea

Articulatio synovialis

Articulatio fibrosa

Figuur 1-12

Schematische tekening van een synoviaal gewricht.



samen, dan noemt men dit een enkelvoudig gewricht of *articulatio simplex*; nemen meer dan twee botstukken aan het gewricht deel, dan is dit een samengesteld gewricht of *articulatio composita*. Wanneer twee beenderen op twee plaatsen een gewricht met elkaar vormen, spreekt men van een *articulatio duplex*. Een voorbeeld hiervan is de verbinding tussen de twee condyli van het os occipitale en de twee bovenste gewrichtsvlakken van de atlas. Wanneer een dergelijke verbinding bestaat, zal nooit in het ene gewricht kunnen worden bewogen zonder dat ook tegelijk in het andere gewricht een beweging plaatsvindt.

Gewrichtskraakbeen

De gewrichtsvlakken zijn bekleed met kraakbeen (*cartilago articularis*). In de meeste gewrichten is dit hyalien kraakbeen; in sommige verbindingen, zoals de *articulatio sternoclavicularis* (het gewricht tussen het sternum en de clavicula) en de *articulatio temporomandibularis* (het kaakgewricht), komt vezelig kraakbeen voor. Het kraakbeen heeft een glanzend aspect en is elastisch vervormbaar. De dikte varieert van 1-7 mm. Uit onderzoek met behulp van de scanning-elektronenmicroscopie is gebleken dat het oppervlak talrijke oneffenheden vertoont en dus niet glad is. Het kraakbeen bevat geen zenuwen en bloedvaten en wordt gevoed door de in de gewrichtsholte aanwezige gewrichtssmeer of synovia en door diffusie vanuit de bloedvaten in het onder het kraakbeen gelegen been. Bij de pijpbeenderen zorgt het gewrichtskraakbeen voor de lengte- en de breedtegroei van de epifysen; na het stoppen van de groei verkalkt de onderste, aan het been grenzende laag. Algemeen wordt aangenomen dat bij volwassenen de cellen van het gewrichtskraakbeen niet meer in staat zijn zich te delen. Bij het ouder worden wordt het kraakbeen wat gelig, meer doorzichtig en minder vervormbaar. Verbeniging vindt echter nooit plaats.

Het hyaliene kraakbeen op de gewrichtsvlakken heeft twee belangrijke functies. Ten eerste kan het door zijn vervormbaarheid belastingen die op een gewricht worden uitgeoefend over het hele gewrichtsvlak verspreiden. Dit heeft als resultaat dat een kracht, die op een bepaalde plaats op het kraakbeen wordt uitgeoefend, met de helft of zelfs met nog meer kan worden teruggebracht (Weight-

man en Kempson, 1997). De andere belangrijke functie van het hyaliene kraakbeen is de vermindering van de wrijving in de synoviale gewrichten. De mate van wrijving tussen twee botstukken wordt aangegeven met de *wrijvingscoëfficiënt* (μ). Dit getal geeft de verhouding aan tussen de kracht die nodig is voor beweging (F_q) en de kracht (de belasting) die het ene bot op het andere uitoefent (F_p). $F_q = \mu F_p$ ofwel $\mu = F_q / F_p$. Wanneer alleen kraakbeen op kraakbeen beweegt, heeft μ een waarde van $\pm 0,05$. Dat wil zeggen dat de kracht die nodig is voor een beweging slechts 5% bedraagt van de belasting. Door de aanwezigheid van de viskeuze synovia (de gewrichtssmeer), die het hyaliene kraakbeen met een dunne film bedekt, wordt de wrijvingscoëfficiënt nog aanzienlijk verkleind en wel tot $\pm 0,01$. Hierdoor wordt de wrijving tot een minimum beperkt en vindt er nagenoeg geen slijtage van de gewrichtsvlakken plaats.

Het gewrichtskapsel (de *capsula articularis*) bestaat uit een binnenste en een buitenste laag. De binnenste laag, de *membrana synovialis*, is opgebouwd uit losmazig bindweefsel; de buitenste laag, de *membrana fibrosa*, wordt gevormd door vezelig bindweefsel met veel collageenvezels. Beide lagen zijn vastgehecht aan de botstukken die aan het gewricht deelnemen. Onder de aanhechting van het gewrichtskapsel wordt echter alleen de aanhechting van de *membrana fibrosa* verstaan. Hierbij lopen de collageenvezels voor het merendeel in het beenweefsel door, terwijl slechts een minderheid van de vezels overgaat in het periost. Dit kan óf rondom het gewrichtskraakbeen óf op enige afstand ervan geschieden. In het laatste geval slaat de *membrana synovialis*, die altijd aan de randen van het gewrichtskraakbeen is vastgehecht, naar binnen om en loopt over het periost tot aan het kraakbeen.

Gewrichtskapsel

De *membrana synovialis* is aan de zijde van de gewrichtsholte bekleed met een continue laag platte cellen. Direct hieronder bevindt zich een sterk ontwikkeld netwerk van capillaire bloedvaten. Waar de gewrichtsvlakken niet goed op elkaar aansluiten vertoont de membraan vlokken of plooien (*villi* en *plicae synoviales*), die soms met vet gevuld zijn en meer of minder ver in de gewrichtsholte kunnen uitpuilen. Liggen er pezen of ligamenten binnen het

gewricht, dan worden deze ook bekleed door een dunne laag membrana synovialis. De vele bloedvaten in de binnenste laag van het kapsel spelen een rol bij de vorming van gewrichtssmeer (de *synovia*). Dit is een dialysaat van het bloedplasma en bezit een hoog gehalte aan hyaluronzuur dat geproduceerd wordt door de cellen van de membrana synovialis.

De membrana fibrosa kan zeer wisselend van dikte zijn. Op sommige plaatsen ontbreekt hij bijna geheel, op andere plaatsen is hij zeer stevig en dik en bevat vele, parallel lopende collagene vezels. Deze plaatselijke versterkingen worden gewrichtsbanden of *ligamenten* genoemd. Waar zij vasthechten in het bot, vindt in de meeste gevallen een geleidelijke overgang plaats van vezelig bindweefsel in vezelig kraakbeen, vervolgens in verkalkt kraakbeen en ten slotte in been (Benjamin en Ralphs, 1998). Niet alle ligamenten hoeven in het kapsel (capsulair) te liggen. Zij kunnen ook buiten de membrana fibrosa voorkomen (extracapsulaire ligamenten) of in het gewricht zelf (intra-articulaire ligamenten). In het laatste geval worden zij door een dunne membrana synovialis bekleed en hierdoor gescheiden van de gewrichtsholte.

Bij vele, vooral grotere gewrichten vindt men dat pezen van spieren die het gewricht overbruggen, tevens een uitstraling hebben in het gewrichtskapsel. Meestal hebben deze uitstralende vezels de functie te verhinderen dat delen van het kapsel tussen de gewrichtsvlakken

worden ingeklemd. Gaat bijna de gehele pees in het kapsel over, zoals het geval is bij spieren van het schoudergewricht, dan zijn dergelijke uitstralingen te beschouwen als verstelbare ligamenten en spelen zij evenals de gewone ligamenten een belangrijke rol bij de geleiding en de remming van de bewegingen die in het gewricht plaatsvinden.

De vascularisatie van het gewrichtskapsel vindt plaats door takjes van bloedvaten die de in het gewricht samenkomende botstukken van bloed voorzien. Bij de pijpbeenderen zijn dit takjes van de bloedvaten die naar de epifysen lopen. De zenuwen van het kapsel ontspringen uit de grotere zenuwen voor de huid en de over het gewricht gelegen spieren. Zij bestaan uit sympathische vezels die de bloedvaten innervieren, en uit somatisch sensibele vezels voor de pijnperceptie en voor de registratie van de bewegingen die in het gewricht plaatsvinden.

Tussen de gewrichtsvlakken kan een *discus articularis* of kunnen *menisci articulares* voorkomen. Dit zijn structuren die gedeeltelijk uit vezelig kraakbeen, gedeeltelijk uit vezelig bindweefsel bestaan en niet bekleed zijn met membrana synovialis. De gewrichtsholte wordt door de disci en menisci geheel of ten dele in tweeën gesplitst. Als belangrijkste functie hebben zij waarschijnlijk de verspreiding van de synovia, zodat de gewichtdragende oppervlakken altijd bedekt blijven door een dunne film vloeistof. Andere mogelijke functies zijn: schokdempende werking, vergroting van de bewegingsmogelijkheden en vergroting van de stabiliteit van het gewricht, omdat zij door hun vorm een bestaande discrepantie tussen de gewrichtsvlakken verminderen. De factoren die de botstukken in een synoviaal gewricht bij elkaar houden, zijn behalve het gewrichtskapsel en de ligamenten:

- 1 de atmosferische druk en de bekleding van de gewrichtsvlakken met synovia; hierdoor is het contact tussen de gewrichtsvlakken te vergelijken met twee glazen platen waartussen zich vocht bevindt;
 - 2 de spieren en pezen die over het gewricht heen lopen;
 - 3 de zwaartekracht; deze speelt vooral een rol bij de gewrichten van het been.
- De bewegingen die in een gewricht tussen de botstukken kunnen plaatsvinden, zijn

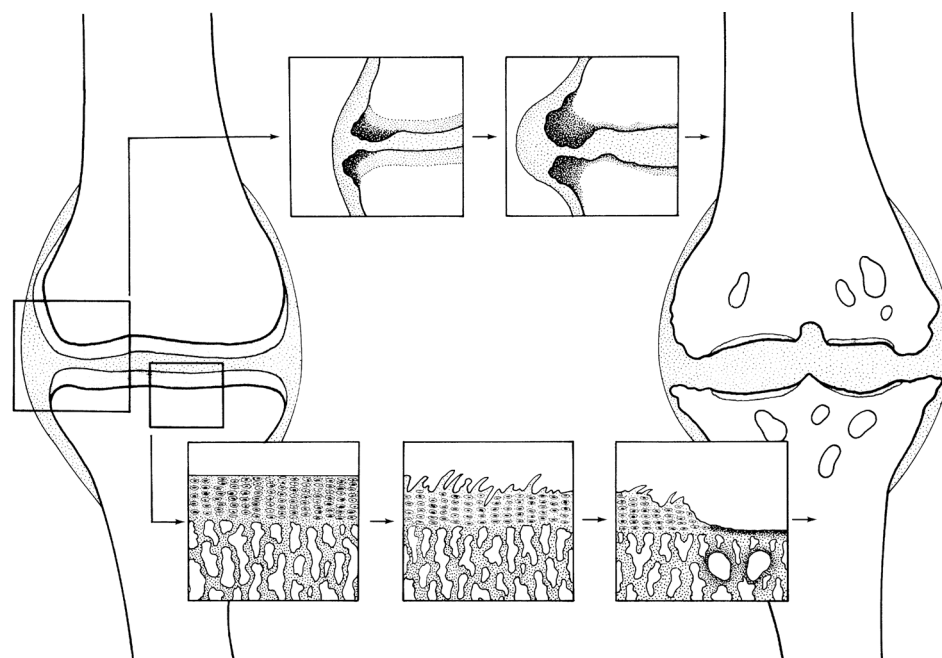
Disci en menisci
articulares

Arthrosis deformans

Degeneratieve afwijkingen van gewrichten worden aangeduid met de term arthrosis deformans. Arthrosis deformans wordt beschouwd als een langzaam progressieve aandoening die vooral de grote, meest belaste gewrichten aantast, maar ook in de handgewrichten kan optreden. De aandoening gaat gepaard met destructie van kraakbeen, vorming van cysten in het onderliggende bot en van met kraakbeen beklede uitsteeksels (*osteofyten*) aan de randen van de gewrichten (fig. 1-13). Op röntgenfoto's wordt – naast de cysten en de osteofyten – een versmalling van de gewrichtsspleet zichtbaar, met name bij opnamen waarbij het gewricht wordt belast.

Arthrosis deformans komt voornamelijk op oudere leeftijd voor en wordt vooral gevonden in het heupgewricht (*coxartrose*), in het kniegewricht (*gonartrose*), in het eerste metatarsofalangeale gewricht van de voet en in de wervelkolom.

Bewegingen in de
gewrichten



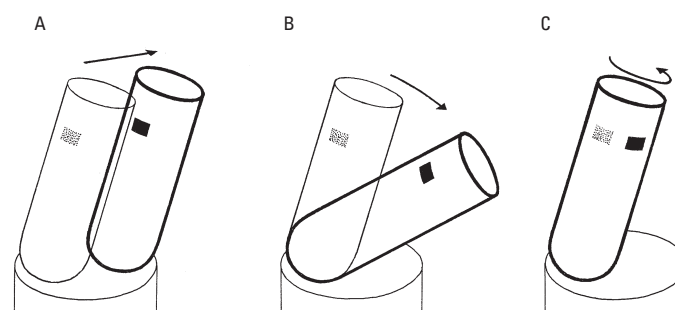
Figuur 1-13
Arthrosis deformans.
Het gewrichtskraakbeen
degenereert en er vor-
men zich osteofyten die
tot ernstige beschadi-
ging van het gewricht
leiden (ontleend aan
Hoedemaeker e.a.,
2003).

rotatoire en translatoire bewegingen.* Bij een rotatoire beweging verandert óf de hoek tussen de lengteassen van de beenderen óf draaien één of beide beenderen om hun lengteas. Bij een translatie schuift het ene botstuk langs het andere, of schuiven beide botstukken langs elkaar. Het van elkaar af bewegen van de botstukken, wat ook een translatoire beweging is, komt normaal in gewrichten niet voor.

In sommige gewrichten komt een rolbeweging voor die een combinatie is van rotatoire en translatoire bewegingen. Zo voert bij het begin van de buiging van de knie het femur ten opzichte van de tibia een rolbeweging uit waardoor het botstuk achter op het tibiaplateau komt te staan. Dit noemt men de rolfase van de buiging. Na ongeveer 20° buiging blijft het femur achter op het tibiaplateau staan en gaat alleen de rotatoire beweging ver-

der. Dit noemt men de slipfase van de buiging. Bij het strekken van de knie gebeurt hetzelfde, maar dan in omgekeerde richting. Belangrijk is op te merken dat de rolbeweging tijdens de eerste fase van de kniebuiging geen zuivere rolbeweging is. Hierbij zou immers de afstand waarover het contactoppervlak zich over het femur en de tibiacondylen verplaatst gelijk moeten zijn. De verplaatsing over de tibiacondylen blijkt echter minder te zijn. Dit komt omdat de femurcondylen gelijktijdig met de rolbeweging ook een schuifbeweging in voorwaartse richting ondergaan. Dit is een voorbeeld van de zogenoemde *convex-concaafregel* die van toepassing is op gewrichten met twee botstukken die resp. een convex en een concaaf gewrichtsvlak hebben. Wanneer in een dergelijk gewricht het botstuk met het convexe gewrichtsvlak (in dit geval het

* Bij een translatoire beweging leggen alle punten van een lichaam dezelfde afstand in dezelfde richting af. Een rotatoire beweging is een beweging waarbij alle punten van een lichaam cirkelbogen beschrijven om een lijn of as.



Figuur 1-14
*Translatoire (A) en rota-
toire (B en C) bewegin-
gen van botstukken.*

femur) een *rolbeweging* uitvoert wordt de beweging gecombineerd met een *schuifbeweging* in tegengestelde richting. Wanneer, omgekeerd, het botstuk met het concave gewrichtsvlak (in dit geval de tibia met de menisci) beweegt, wordt de beweging die identiek is aan de rolbeweging, de *schommelbeweging* genoemd. Deze wordt gecombineerd met een *glijbeweging* die identiek is aan de schuifbeweging van het andere botstuk maar die nu dezelfde richting heeft als de schommelbeweging (Oonk, 1988).

Het aantal rotatoire en translatoire bewegingen dat in een gewricht mogelijk is, wordt ook wel aangeduid als de graden van vrijheid van het gewricht. Deze zijn gelijk aan het aantal grootheden dat minimaal nodig is om de verplaatsingen van het ene botstuk ten opzichte van het andere aan te geven. In figuur 1-15 is een rechthoekig coördinatenstelsel getekend. Kan botstuk A langs botstuk B in één richting verschuiven, bijvoorbeeld alleen langs as x, dan heeft het gewricht één vrijheidsgraad. Omdat bij een translatoire beweging alle punten van botstuk A dezelfde afstand in dezelfde richting afleggen, is er immers maar één grootheid nodig om de verplaatsing van botstuk A aan te geven, namelijk de afgelegde afstand langs as x. Kan botstuk A ook in andere richtingen langs botstuk B verschuiven, dan heeft het gewricht twee vrijheidsgraden. Er zijn nu twee grootheden nodig om de verplaatsing van botstuk A aan te geven: de verschuiving ten opzichte van as x en de verschuiving ten opzichte van as y.

Het gewricht heeft eveneens één vrijheidsgraad wanneer botstuk A in staat is alleen een rotatoire beweging uit te voeren om één as. Ook nu is slechts één groot-

heid nodig om de verplaatsing aan te geven, namelijk de grootte-verandering van de hoek die de lengte- of breedteassen van de beide botstukken in de eindstand en in de beginstand met elkaar maken. Kunnen rotatoire bewegingen plaatsvinden om twee assen die onderling loodrecht op elkaar staan, dan heeft het gewricht weer twee graden van vrijheid. Drie vrijheidsgraden worden bereikt wanneer bovendien een beweging kan plaatsvinden om een derde as. Deze as moet dan wel weer loodrecht staan op het vlak dat door de andere twee assen wordt gevormd.

Bij gewrichten met drie graden van vrijheid zijn rotatoire bewegingen niet alleen mogelijk om de drie hierboven aangegeven assen, maar zij kunnen om een oneindig aantal assen plaatsvinden, mits deze gaan door de oorsprong van het assenstelsel. Steeds zullen drie grootheden voldoende zijn om de verplaatsingen van botstuk A aan te geven. Ook bij gewrichten met twee vrijheidsgraden kunnen rotatoire bewegingen om een oneindig aantal assen plaatsvinden. In tegenstelling tot gewrichten met drie vrijheidsgraden geldt hierbij echter de beperking dat alle assen in één vlak moeten liggen.

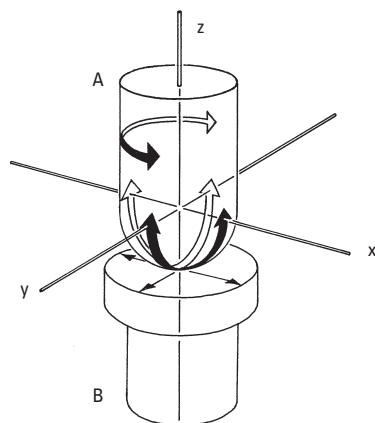
Afgezien van een enkele uitzondering (zie p. 19) worden gewrichten met meer dan drie vrijheidsgraden in het menselijk lichaam niet aangetroffen. In alle andere gevallen worden de hogere graden van vrijheid, waarbij een botstuk ten opzichte van andere botstukken zowel verscheidene rotatoire als verscheidene translatoire bewegingen kan uitvoeren, alleen bereikt door sommatie van bewegingen in twee of meer gewrichten.

Bij de meeste bewegingen is niet één gewricht, maar zijn combinaties van meerdere, achter elkaar geschakelde gewrichten betrokken. Dergelijke combinaties worden kinematische ketens genoemd en er kan onderscheid worden gemaakt tussen open en gesloten ketens. Bij een *open kinematische keten* kan in het eindgewricht vrij worden bewogen. Dit type ketens ziet men vooral bij de arm. Wanneer men bijvoorbeeld een hand naar de mond brengt, wordt achtereenvolgens het schoudergewricht, het ellebooggewricht en het polsgewricht in de beweging betrokken. Bij een *gesloten kinematische keten* kan in het eindgewricht niet vrij

Kinematische ketens

Figuur 1-15

Twee botstukken met ingetekend coördinatenstelsel. De pijlen geven translatoire en rotatoire bewegingsmogelijkheden aan.



Benoeming van bewegingen

worden bewogen. Dit heeft tot gevolg dat wanneer in dit gewricht of in een van de andere gewrichten een beweging plaatsvindt, ook in de overige gewrichten van de keten wordt bewogen. Bij het lopen vormt het been tijdens de standfase, waarin de voet contact maakt met de grond, een gesloten kinematische keten. Wanneer in deze fase wordt bewogen in het enkelgewricht, vinden tegelijkertijd bewegingen plaats in de knie en in de heup. Tijdens de zwaai fase van het lopen is de voet los van de grond en vormt het been een open keten.

Voor de benoeming van de van buitenaf zichtbare bewegingen in de gewrichten wordt in het algemeen uitgegaan van de hoofdvlakken van het lichaam. Heft men bijvoorbeeld in het schoudergewricht, dat drie vrijheidsgraden bezit, de naast de romp hangende bovenarm in het sagittale vlak voorwaarts, dan heet dit *anteflexie*. Deze beweging wordt ook wel anteversie of flexie genoemd. Heft men de bovenarm in hetzelfde vlak achterwaarts, dan heet dit *retroflexie*. Deze beweging wordt ook wel retroversie of extensie genoemd. De bewegingen vinden plaats om een dwarse of *transversale as* die in het frontale vlak ligt. Zijwaarts heffen van de bovenarm in het frontale vlak wordt *abductie* genoemd en het aanvoeren naar de romp toe heet *adductie*. Deze bewegingen vinden plaats om een *sagittale as* die in het sagittale vlak ligt. Draaien om de *lengteas van de bovenarm*, waarbij de voorzijde van de bovenarm naar binnen wordt gekeerd, heet *endorotatie*; wordt de voorzijde van de bovenarm naar buiten gekeerd, dan wordt dit *exorotatie* genoemd. Met de arm kan ook een ronddraaiende beweging worden gemaakt, zodat een kegeloppervlak wordt beschreven. Deze beweging heet *circumductie*.

Niet in alle gewrichten wordt dezelfde terminologie voor de bewegingen gebruikt als in het schoudergewricht. De buig-strekbeweging van de onderarm ten opzichte van de bovenarm in het ellebooggewricht bijvoorbeeld wordt flexie en extensie genoemd, terwijl de scharnierbeweging van de voet ten opzichte van het onderbeen in het enkelgewricht wordt aangeduid met plantairflexie en dorsaalflexie. Bij de bespreking van de afzonderlijke gewrichten wordt hierop verder ingegaan.

Het is belangrijk zich te realiseren dat de

benoeming van de beweging, die uitwendig kan worden waargenomen, niet altijd overeenstemt met wat er in het gewricht zelf gebeurt. Zo vindt in het kniegewricht bij 'buiging' van het been niet alleen een rotatoire beweging om een transversale as plaats, maar ook een rolbeweging waarbij de condylen van het femur achter op het tibiaplateau komen te staan.

De gewrichten van het menselijk lichaam worden ingedeeld op grond van vergelijking van hun vorm met omwentelingslichamen. Dit zijn lichamen die ontstaan door figuren uit de vlakke meetkunde, zoals een lijn of een cirkel, te laten draaien om een rechte lijn, waarbij deze rechte lijn tevens als as van de beweging fungeert. Draait bijvoorbeeld een rechte lijn om een andere, met hem evenwijdige lijn, dan krijgt men een cilinderoppervlak; draait een cirkel om een lijn die tevens de middellijn van de cirkel is, dan krijgt men een boloppervlak.

De vergelijking van gewrichtsvlakken met omwentelingslichamen heeft het voordeel dat men een uitspraak kan doen over de bewegingen die mogelijk zijn en kan aangeven welke de assen voor deze bewegingen zijn. Men moet zich echter realiseren dat bij de meeste gewrichten van het lichaam de kop en de kom niet congruent zijn en dat de gewrichtsvlakken een veel gecompliceerder vorm kunnen hebben dan uit de door vergelijking met omwentelingslichamen gekozen naamgeving valt af te leiden. Ook de vervormbaarheid van het gewrichtskraakbeen en de eventuele aanwezigheid van disci en menisci spelen een rol bij de uiteindelijke bepaling van het karakter van de bewegingen. Of de bewegingen, die in een gewricht mogelijk zijn ook werkelijk kunnen worden uitgevoerd, hangt af van het kapsel en van aanwezige ligamenten en van het voorhanden zijn van spieren om de bewegingen uit te voeren.

Bij vele gewrichten komt een stand voor waarin de vorm van de kop en die van de kom het beste met elkaar overeenkomen. Dit noemt men in het Engels de *close-packed position*. Deze conditie wordt alleen in uiterste gewrichtsstanden bereikt: dit is bijvoorbeeld bij de elleboog en de knie in maximale extensie en bij de pols en de enkel in maximale dorsaalflexie. In de *close-packed position* is niet alleen het contactvlak tussen kop en kom het grootst, maar

Indeling van de gewrichten

Gewrichtstypen

zijn ook alle ligamenten aangespannen en is geen verdere beweging mogelijk. Alle andere gewrichtsstanden, waarbij er minder overeenstemming tussen kop en kom is, worden *loose-packed positions* genoemd.

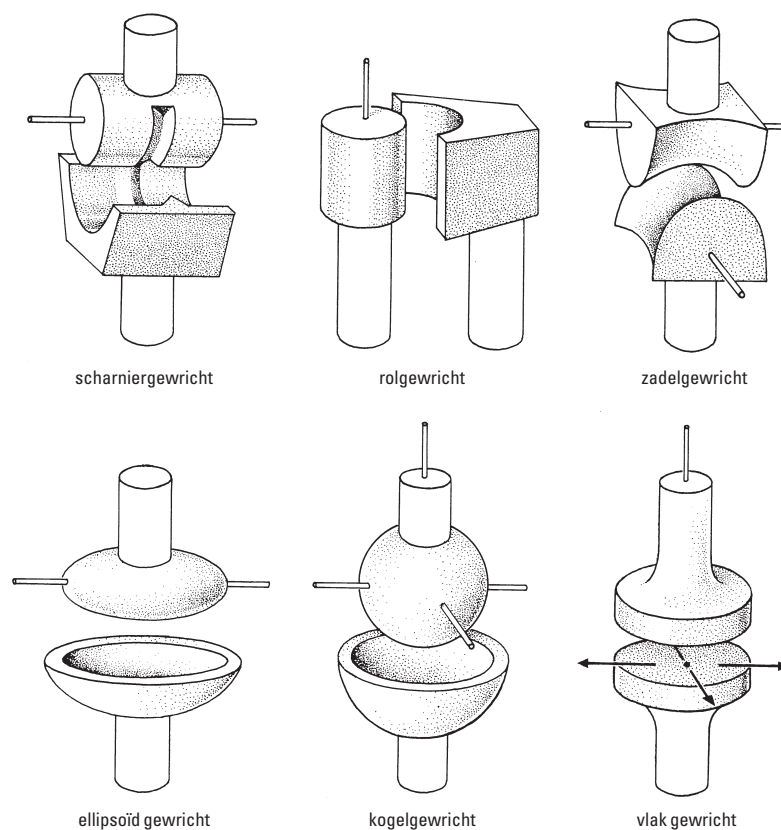
De gewrichtsvlakken van het *cilinderge-
wricht* (articulatio cylindrica) hebben een cilindervorm. Het ene gewrichtsvlak is convex en vormt de kop van het gewricht, het andere is concaaf en vormt de kom. Er kunnen twee vormen van cilinderge-
wrichten worden onderscheiden. Staat de as van de cilindermantel loodrecht of na-
genoeg loodrecht op de lengteassen van de beenderen, dan spreekt men van een *scharniergewricht* (ginglymus). Een dergelijk gewricht heeft twee vrijheidsgraden: flexie- en extensiebewegingen zijn moge-
lijk, en de botstukken kunnen ten opzichte van elkaar zijdelings verschuiven. Deze laatste beweging wordt echter verhinderd door: 1. een richel die in het midden van de gewrichtskom dwars op de lengteas van de cilinder loopt en die correspon-
deert met een groeve in de kop van het gewricht, en door 2. twee zogenoemde collaterale ligamenten die zich aan de zij-
kanten van het gewricht bevinden. Voor-
beelden van scharniergewrichten zijn de

verbindingen tussen de vingerkootjes.

De tweede vorm van het cilinderge-
wricht is het *draai- of rolgewricht* (articulatio trochoidea). Hierbij valt de as van de ci-
lindermantel samen met de lengteas van een van de botstukken. De beweging die plaatsvindt, is een rotatoire beweging waarbij het ene botstuk om het andere draait. De theoretisch mogelijke transla-
toire beweging wordt verhinderd door ligamenten. Een uitgesproken voorbeeld van een rolgewricht is het gewricht tussen het caput van de radius en het proximale uiteinde van de ulna (articulatio radio-
ulnaris proximalis).

In een *zadelgewricht* (articulatio sellaris) vertonen de gewrichtsvlakken van de kop en de kom beide een convexe en een concave kromming. Dit gewrichtstype heeft theoretisch twee vrijheidsgraden: er zijn rotatoire bewegingen mogelijk om de twee omwentelingsassen van de ge-
wrichtsvlakken. Translatoire bewegingen komen niet voor. In het zadelgewricht van de duim, dat zich tussen de handwortel en het eerste middenhandsbeentje bevindt, kan behalve de twee genoemde rotatoire bewegingen ook nog een circumductiebe-
weging plaatsvinden. Deze wordt moge-
lijk gemaakt door de vervormbaarheid van

Figuur 1-16
Schematische
tekeningen van een
aantal gewrichtstypen.



het gewrichtskraakbeen en de wijde en de slappe van het gewrichtskapsel.

Bij een *ellipsoïd gewricht* (articulatio ellipsoidea) zijn de gewrichtsvlakken in twee loodrecht op elkaar staande richtingen verschillend sterk gekromd. Bij de kop van het gewricht zijn de krommingen convex, bij de kom zijn zij concaaf. Theoretisch heeft het ellipsoïde gewricht één vrijheidsgraad: er kan, zonder dat de gewrichtsvlakken van elkaar af gaan, alleen een rotatoire beweging plaatsvinden om de omwentelingsas die behoort bij het sterkst gekromde oppervlak. In het gewricht tussen de radius en de handwortel, dat als karakteristiek ellipsoïd gewricht te boek staat, zijn echter veel meer bewegingen mogelijk. Dit komt omdat de gewrichtsvlakken duidelijk afwijken van de geïdealiseerde ellipsoïdvorm. Bovendien speelt de vervormbaarheid van het kraakbeen een rol en ook het feit dat de handwortel, die de kop van het gewricht vormt, uit verscheidene, onderling beweeglijke botstukken bestaat.

In een *kogelgewricht* (articulatio spheroida) heeft de gewrichtskop de vorm van een bol en is de kom hieraan aangepast. Voorbeelden van kogelgewrichten zijn het heupgewricht en het schoudergewricht. Kunnen in een dergelijk gewricht de botstukken niet ten opzichte van elkaar verschuiven, zoals bij het heupgewricht het geval is, dan bezit het gewricht drie vrijheidsgraden. Is er wel verschuiving mogelijk, wat bij het schoudergewricht voorkomt, dan heeft het gewricht meer dan drie vrijheidsgraden.

Uit wat reeds eerder is opgemerkt, zal duidelijk zijn dat een gewricht niet per se bolvormige oppervlakken hoeft te bezitten om dezelfde bewegingen uit te kunnen voeren als een kogelgewricht. Een voorbeeld is het gewricht tussen het borstbeen en het sleutelbeen. Omdat zijn gewrichtsvlakken een zadelvorm hebben, heeft dit gewricht theoretisch twee vrijheidsgraden. Echter, door de goed ontwikkelde discus articularis gedraagt dit gewricht zich functioneel als een kogelgewricht.

Een *vlak gewricht* (articulatio plana), waarvan de gewrichtsvlakken nagenoeg niet gekromd zijn, heeft eveneens drie graden van vrijheid: zowel in theorie als in werkelijkheid kunnen de botstukken in al-

le richtingen langs elkaar heen schuiven en zij kunnen ook roteren om een as die loodrecht op de gewrichtsvlakken staat. Fraaie voorbeelden van vlakke gewrichten vindt men in de halswervelkolom tussen de gewrichtsuitsteeksels van twee opeenvolgende wervels.

Bij de bespreking van de afzonderlijke gewrichten zullen, voor zover bekend, telkens de grootten van de bewegingsuitslagen worden vermeld. De opgaven zijn gemiddelde waarden van metingen bij volwassen individuen en hebben, tenzij anders vermeld, betrekking op bewegingen die actief door de onderzochte personen werden uitgevoerd. Het mag als bekend worden verondersteld dat, ook bij normale, gezonde individuen, de grootten van de bewegingsuitslagen duidelijk afhankelijk zijn van de leeftijd en de mate van geoefendheid. Ook de aanleg speelt een belangrijke rol.

Bewegingsuitslagen

Algemene spierleer

De structuren die in het menselijk lichaam verantwoordelijk zijn voor de bewegende kracht, zijn de spiervezels. Dit zijn gedifferentieerde cellen, waarvan men drie soorten kan onderscheiden: gladde spiervezels, hartspiervezels en dwarsgestreepte spiervezels.

Gladde spiervezels zijn spoelvormig uitgerekte cellen die gemiddeld 0,2 millimeter lang zijn. Zij hebben een kern, die meestal in het midden van het cellichaam ligt, en hun protoplasma (hier sarcoplasma genoemd) bevat zeer dunne, draadvormige elementen (myofibrillen), die homogeen van structuur zijn. Men vindt dit soort vezels in de wanden van organen en bloedvaten. Zij worden geïnnerveerd door vezels van het autonome zenuwstelsel en zijn niet door de wil te beïnvloeden. Daarom worden zij ook wel betiteld als onwillekeurige spiervezels.

De vezels van de hartspier hebben ongeveer dezelfde bouw als de gladde spiercellen, maar de in het sarcoplasma gelegen myofibrillen vertonen onder de microscoop een dwarse streping: lichte en donkere stukken wisselen elkaar regelmatig af. Zij worden evenals de gladde spiervezels geïnnerveerd door vezels van het autonome zenuwstelsel en staan, evenmin als deze, onder de invloed van de wil.

Bouw van de dwarsgestreepte spieren

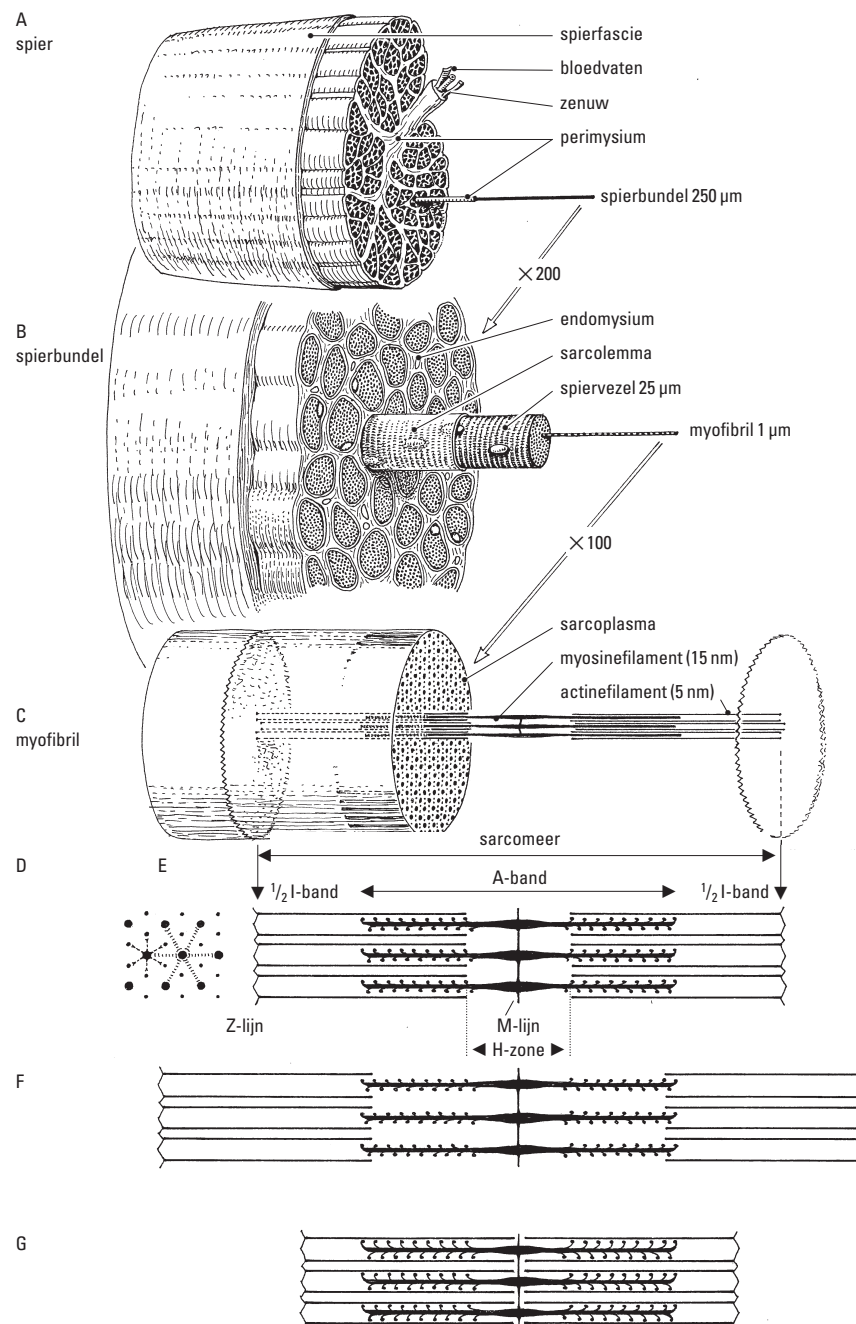
De dwarsgestreepte spiervezels vormen de spierbuiken van de dwarsgestreepte spieren of skeletspieren, en zijn door pezen of peesbladen verbonden met de bewegende delen van het lichaam. In de meeste spieren lopen de spiervezels van pees tot pees. Alleen bij lange spieren eindigen of ontspringen de vezels aan bindweefselsepta in de spierbuik. In zulke spieren, zoals in de lange bovenbeenspieren, hebben de meeste vezels een lengte

van 6-18 cm. De langste vezels die werden gevonden waren 20 cm.

De vezels zijn altijd in bundels (fasciculi) gelegen en verschillende bundels vormen een spierbuik. Deze wordt omgeven door een bindweefselmembraan, het *epimysium* of de *spierfascie*, die soms wel en soms niet te scheiden is van de fasciën die de romp en de extremiteiten omhullen. Waar deze laatste fasciën een duidelijke membraan vormen, zijn zij door losmazig bindweefsel gescheiden van de spierfasciën. Een voorbeeld hiervan is de fascia lata van het

Figuur 1-17

De bouw van een dwarsgestreepte spier. **E**, **F** en **G** zijn schematische tekeningen van de myosine- en actinefilamenten in rust (**E**), bij passieve rek (**F**) en bij concentrische werking (**G**).



bovenbeen. Wanneer zij echter minder goed ontwikkeld zijn of tevens dienstdoen als oorsprong of aanhechting voor spieren, dan is de scheiding veel moeilijker te maken en vormen zij als het ware één geheel met de fasciën om de afzonderlijke spieren. Ook in het inwendige van de spierbuik bevindt zich bindweefsel tussen de spierbundels (het *perimysium*) en tussen de vezels van de bundels (het *endomysium*). Hierdoor ontstaat de mogelijkheid dat de spiervezels en spierbundels ten opzichte van elkaar kunnen verschuiven. Het bindweefsel in de spierbuik hangt samen met het epimysium en omgeeft en geleidt de bloedvaten en zenuwen die de spier van buiten af binnendringen.

De 10-100 μm dikke vezels van de dwarsgestreepte spieren zijn multinucleaire cellen die sarcoplasma en myofibrillen bevatten. De membraan van de spiercel noemt men het *sarcolemma*. De spierkernen liggen tegen het sarcolemma aan en zijn ovaalvormig met de lange as van het ovaal in de lengterichting van de spiervezel.

De dunne, draadvormige *myofibrillen* zijn ongeveer 1 μm dik en lopen over de gehele lengte van de spiervezels. Zij liggen regelmatig door de gehele spiervezel verspreid. Lichtmicroscopisch vertonen zij over hun gehele lengte een regelmatige afwisseling van lichte en donkere stukken, die bij alle fibrillen op dezelfde plaats liggen en waardoor de dwarse streping van de spiervezel ontstaat. De donkere gedeelten zijn optisch anisotroop en worden daarom A-banden genoemd; de lichte delen zijn optisch isotroop en worden I-banden genoemd. Het midden van de A-band is iets lichter dan de beide zijden en wordt naar Hensen, de eerste beschrijver van deze structuur, de H-zone genoemd. Verder worden de I-banden in het midden met elkaar verbonden door donkere, dwarsverlopende lijnen: de Z-lijnen. Deze Z-lijnen verdelen de myofibril in een aantal segmenten of *sarcomeren* die een lengte hebben van 2 à 3 μm .

Uit elektronenmicroscopische onderzoeken is gebleken dat iedere myofibril weer is opgebouwd uit nog fijnere vezelstructuren, de *myofilamenten*. Hiervan kunnen twee typen worden onderscheiden: dikke filamenten, die uit het eiwit myosine bestaan, en dunne filamenten,

die overwegend uit het eiwit actine zijn opgebouwd. Verder bevinden zich in de dunne filamenten kleine hoeveelheden van de eiwitten tropomyosine en troponine. De dikke filamenten hebben een doorsnede van ongeveer 15 nm en zijn in het midden iets dikker dan aan de uiteinden. De dunne filamenten zijn ongeveer 5 à 8 nm dik.

De beide typen filamenten overlappen elkaar gedeeltelijk, waardoor de dwarse streping te verklaren is die reeds met de lichtmicroscop te zien is. In de I-band zijn alleen dunne filamenten aanwezig, in de A-band zowel dunne als dikke. De dunne filamenten lopen echter niet door in de in het midden van de A-band gelegen H-zone, waardoor deze weer iets lichter is dan de rest van de A-band. Omdat de dikke filamenten in hun midden iets dikker zijn en door dunne verbindingen met elkaar worden verbonden, wordt hierdoor in het midden van de A-band, en dus ook in het midden van de H-zone, een dunne, donkere lijn gevormd: de M-lijn. Verder komen tussen de beide typen filamenten op regelmatige afstanden schuin verlopende dwarsverbindingen voor. Deze gaan uit van de dikke myosinefilamenten.

Op een dwarsdoorsnede door de A-band, waar zowel dikke als dunne filamenten aanwezig zijn, blijkt dat het aantal dunne filamenten groter is dan het aantal dikke: de dunne filamenten zijn in regelmatige zeshoeken om de dikke filamenten gerangschikt.

Over de relatie tussen de bouw van de myofibrillen en de verkorting van de spiervezels die bij contractie (aanspanning) van een spier kan optreden, bestonden oorspronkelijk verschillende opvattingen. De door Huxley in de jaren vijftig van de twintigste eeuw opgestelde hypothese, waarbij wordt aangenomen dat tijdens de verkorting de dikke en dunne filamenten niet veranderen van lengte maar in elkaar schuiven, is nu algemeen aanvaard. De dunne filamenten komen verder in de A-banden te liggen en de dikke filamenten naderen en bereiken ten slotte de Z-lijnen. De H-zones worden geleidelijk smaller en verdwijnen op een gegeven moment geheel; bij verdere verkorting ontstaat in het centrum van de A-band een nieuwe, dichte zone, omdat op deze plaats de dunne filamenten van beide zijden elkaar gaan overlappen. Het glijden

Rode, witte en intermediaire vezels

van de filamenten komt tot stand door de tussenliggende dwarsverbindingen die, door telkens hun aangrijpingspunt te verplaatsen, de filamenten in elkaar laten schuiven.

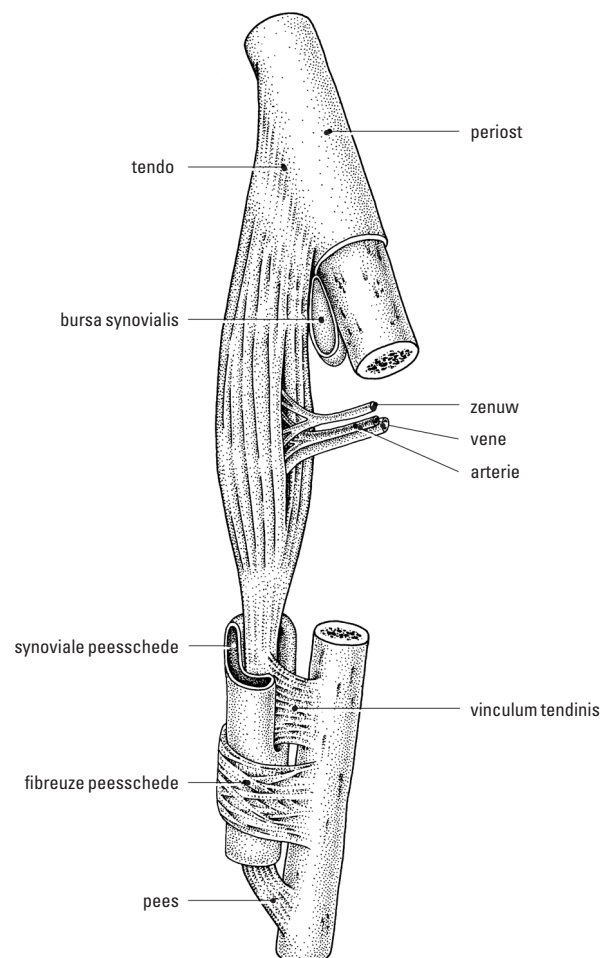
Het tussen de myofibrillen gelegen sarcoplasma is rijk aan glycogeen. Verder bevat het mitochondriën en het eiwit myoglobine, dat verwant is aan de hemoglobine van de rode bloedcellen en ook zuurstof kan binden. Naar het aantal mitochondriën en de hoeveelheid myoglobine die aanwezig zijn, worden de spiervezels verdeeld in drie typen: I, IIA en IIB. Type-I-vezels hebben een hoge activiteit van oxidatieve enzymen (aerobe stofwisseling) en kunnen langdurig worden gebruikt, dat wil zeggen zij zijn nauwelijks vermoeibaar. De vezels hebben veel mitochondriën en ook veel myoglobine, zijn sterk gevasculariseerd en worden *rode vezels* genoemd. Type-IIB-vezels bevatten weinig mitochondriën en myoglobine en worden *witte vezels* genoemd. Deze vezels hebben een lage activiteit van oxidatieve

enzymen en hebben vooral een anaerobe stofwisseling, waarbij glucose de primaire energiebron is. Zij zijn snel vermoeibaar en kunnen daarom maar kort worden gebruikt. Het *intermediaire vezeltype* IIA wordt ook wel als *roze vezels* omschreven.

De drie vezeltypen verschillen ook wat betreft kracht en snelheid van contractie. Zo kan type IIB bij contractie meer kracht produceren dan type I. Dit komt omdat type-IIB-vezels een grotere dwarsdoorsnede hebben dan type-I-vezels. De type-IIA-vezels nemen ook hierbij een tussenpositie in. De vezels van het type I zijn langzaam en die van de typen IIA en IIB zijn snel. Omdat de meeste skeletspieren een gemengde samenstelling van vezeltypen hebben, bepaalt de verhouding tussen het aantal langzame en snelle vezels in de spierbuik de maximale contractiesnelheid van een spier. Spieren die belangrijk zijn voor het bewaren van een houding, zoals de rugspieren, hebben veel langzame type-I-vezels en een kleine maximale snelheid;

Figuur 1-18

Schematische tekening van een dwarsgestreepte spier tussen twee botstukken. Tevens zijn aangegeven een bursa synovialis, de vaat- en zenuwvoorziening van de spier; een synoviale peesschede (vagina synovialis tendinis) en een fibreuse peesschede (vagina fibrosa tendinis).



spieren die voornamelijk betrokken zijn bij bewegingen, zoals de onderarm- en de handspieren, hebben veel snelle type-II-vezels en een grote maximale snelheid.

Wanneer men het voorkomen van de drie verschillende vezeltypen op personen betreft, kan worden gesteld dat degenen die spieren hebben met veel type-I-vezels, geschikt zijn om een langdurige inspanning te leveren zoals het lopen van een marathon. Zij zullen daarentegen geen snelle sprinters zijn, omdat hun spieren over weinig type-II-vezels beschikken.

Pezen en peesbladen

De pezen of peesbladen, die de spierbuiken verbinden met het skelet, met fasciën en gewrichtskapsels en soms ook met de huid, bestaan uit parallel verlopende collageen vezels, die in bundels gerangschikt zijn. Zij worden omgeven door een dunne laag losmazig bindweefsel, het *peritendineum*, dat zich ook tussen de bundels voortzet. Op de overgang van spierbuik en pees bestaat een nauwe relatie tussen de beide structuren: het epimysium zet zich voort in het peritendineum en de collageen vezels van de pees liggen ingebed in vingervormige instulpingen van het uiteinde van de spiervezel. De myofibrillen lopen echter niet door in de fibrillen van de peesvezels, maar tussen beide is altijd sarcolemma aanwezig.

Van de aanhechtingen van de pezen wordt de ene aanhechting de oorsprong (de *origo*) en de andere aanhechting de insertie (de *insertio*) van de spier (de *musculus*) genoemd. Deze naamgeving berust op het feit dat bij de meest voorkomende bewegingen de origo niet of nauwelijks (het punctum fixum) en de insertie wel beweegt (het punctum mobile). In arm en been worden daarom de proximale aanhechtingen van de spieren als de origo's en de distale aanhechtingen als de inserties betiteld. Waarschijnlijk om dezelfde reden wordt bij de dorsale rompspieren als origo het punt genomen dat het meest caudaal ligt, terwijl bij de ventrale rompspieren meestal de insertie het caudale punt is. Er moet echter op worden gewezen dat punctum fixum en punctum mobile relatieve begrippen zijn. Door aanspanning van andere spieren of door van buiten af uitgeoefende krachten kan namelijk de insertie van de spier tot punctum fixum en de origo tot punctum mobile worden gemaakt.

Pezen die een relatief kleine aanhechting hebben aan botstukken, zoals bij de insertie van waaivormige spieren, lopen door in het been. Hierbij vindt, net als bij de ligamenten, meestal een geleidelijke overgang plaats van vezelig bindweefsel in vezelig kraakbeen, vervolgens in verkalkt kraakbeen en ten slotte in been. Waarschijnlijk is de voornaamste functie van het vezelige kraakbeen het voorkomen van een te grote belasting op de overgang van pees naar bot. Op deze manier kunnen de peesvezels pas op enige afstand van hun aanhechtingsplaats, wanneer zij niet meer omgeven zijn door kraakbeen, worden gebogen. Bij spieren met een relatief grote oorsprong of aanhechting, zoals bij de parallelvezelige intercostaalspieren, lopen de peesvezels eerst in het periost en stralen zij vervolgens uit in het been (Benjamin en Ralphs, 1998).

Tendinitis

Tendinitis is een acute of chronische ontsteking van peesweefsel, die vaak ontstaat door herhaalde overbelasting. Een tendinitis van de achillespees bijvoorbeeld is meestal het gevolg van niet volledig genezen kleine scheurtjes in het peesweefsel, ontstaan door overrekking. De lokale verzwakking in het peesweefsel kan bij een chronische ontsteking uiteindelijk leiden tot een ruptuur van de achillespees. Indien de lokale irritatie van peesweefsel zich uitbreidt naar het peritendineum, heeft dit een belangrijke consequentie voor de behandeling: de fysiotherapeutische behandelingen van een *tendinitis* en een *peritendinitis* zijn namelijk verschillend.

Wanneer irritatie ontstaat ter plaatse van de peesaanhechting aan het bot, wordt gesproken van een *tendoperiostose*. Bekende voorkeursplaatsen zijn de aanhechting van de adductoren aan het bekken (adductorentendinitis of 'liesblessure') en de aanhechtingen van de oppervlakkige dorsale onderarmspieren en de oppervlakkige ventrale onderarmspieren op de laterale respectievelijk de mediale epicondyl van de humerus (epicondylitis lateralis of *tenniselleboog* en epicondylitis medialis of *golferselleboog*).

Bij een *tendovaginitis* is de synoviale peesschede aangedaan. Door reumatoïde artritis treedt vaak zwelling op van de buig- en strekpeesscheden rond het polsgewricht. Omdat een chronische ontsteking kan leiden tot peesrupturen wordt door medicatie en operatieve verwijdering van de afwijkende synovia de tendovaginitis bestreden. Een tendovaginitis kan ook worden veroorzaakt door een lokale bacteriële ontsteking, bijvoorbeeld na een prikverwonding van een van de vingers. Omdat de peesscheden van de vingers proximaal in de handpalm onderling zijn verbonden, kan een lokale tendovaginitis zich snel uitbreiden over de gehele hand.

Peesscheden

Op plaatsen waar pezen aan wrijving blootstaan, worden zij meestal omgeven door een synoviale peesschede of *vagina synovialis tendinis*. Dit is een dubbelwandige bindweefselkoker die gevuld is met synovia en waarvan de binnenwand vast met de pees is verbonden. De koker ligt niet geheel rondom de pees, maar wordt aan één zijde onderbroken door bindweefsel. Hierdoor kunnen bloedvaten en zenuwen de pees bereiken. Het bindweefsel kan over de gehele lengte van de peesschede voorkomen (*mesotendineum*) of slechts op enkele plaatsen (*vincula tendinum*).

Om de synoviale schede kan zich nog een fibreuze peesschede, *vagina fibrosa tendinis*, bevinden. Dergelijke fibreuze scheden vindt men aan de buigzijden van de vingers en de tenen. Zij bestaan uit collagene vezels die ontspringen van de randen van de vinger- en teenkootjes. Samen hiermee vormen zij osteofibreuze kanalen, waardoor de pezen en de synoviale scheden tegen de botstukken worden gehouden.

Bursae synoviales

De *bursae synoviales*, die onder meer tussen twee pezen of tussen een pees en een botstuk worden aangetroffen, hebben dezelfde functie als de peesscheden. Zij bestaan uit een dunne wand, samengesteld uit een membrana synovialis en een membrana fibrosa, en een holte die gevuld is met synovia. De bursae staan dikwijls in verbinding met een gewrichtsholte en kunnen in dat geval worden beschouwd als een uitstulping (recessus) van die holte.

Motor unit

De spieren worden geïnnerveerd door zenuwen die uit motorische en sensibele vezels bestaan.* In de spierbuik splitsen de motorische vezels zich in kleinere takjes, die elk een aantal spiervezels innerve-

ren. Het geheel van een motorische zenuwcel (motoneuron) in het ruggenmerg of de hersenstam, zijn zenuwvezel (axon) en alle spiervezels die hierdoor worden geïnnerveerd, wordt motorische eenheid of *motor unit* genoemd. Deze term werd voor het eerst in 1929 door Sherrington gebruikt. De spiervezels die deel uitmaken van een motor unit vormen de kleinste functionele eenheid van de spier: het kleinste deel dat afzonderlijk kan contracteren.

Het aantal spiervezels per motor unit kan volgens Buchthal en Schmalbruch variëren van minder dan 10 tot meer dan 2000. Hoe meer de spieren tot fijne en precieze bewegingen in staat zijn, hoe minder vezels zij per motor unit bevatten. Zo bestaan de oogspieren en de kleine handspieren uit vele, kleine motor units, terwijl daarentegen de schoudergordelen en de bekkengordelspiieren, die alleen grove bewegingen kunnen uitvoeren, relatief weinig motor units bevatten met veel spiervezels per unit.

Nomenclatuur en structuur van de dwarsgestreepte spieren

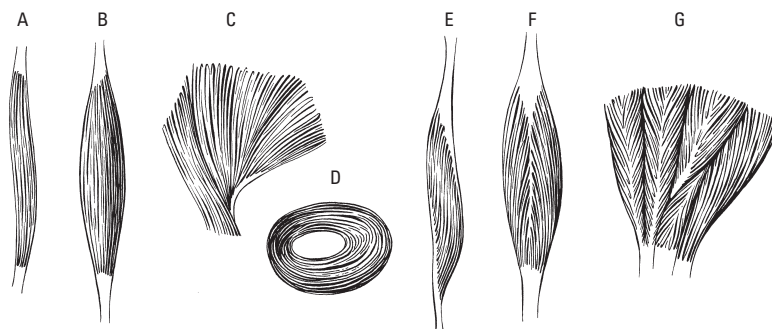
De namen, waaronder de spieren van het lichaam bekendstaan, zijn zeer willekeurig gekozen. Sommige duiden een plaats of ligging aan (m. brachialis, m. subclavius), andere een bepaalde vorm (m. gracilis, m. deltoideus) en nog andere een bepaalde functie (m. levator scapulae, m. supinator). Ook de grootte van de spier kan in de naam verwerkt zijn (m. latissimus dorsi) of het aantal koppen waarmee de spierbuik van het skelet of andere structuren ontspringt (m. biceps brachii, m. quadriceps femoris). Voorts komen veelvuldig

Figuur 1-19

Rangschikking van spiervezels in dwarsgestreepte spieren.

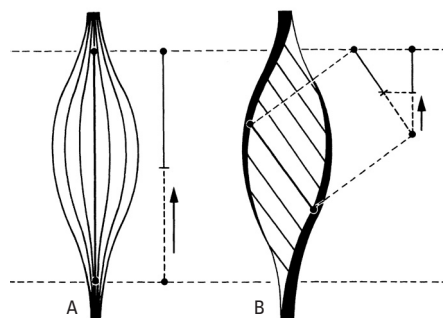
- A Parallelvezelige spier.
- B Spoelvormige of fusiforme spier.
- C Waaiervormige spier.
- D Kringspier.
- E Enkelvoudig geveerde of unipennate spier.
- F Dubbelgeveerde of bipennate spier.
- G Meervoudig geveerde of multipennate spier.

* Voor meer informatie over de innervatie van de spieren wordt verwezen naar hoofdstuk 2.



Figuur 1-20

Een spoelvormige (A) en een gevederde (B) spier. De lengten van de twee pijlen geven aan dat bij contractie spier A zich over een grotere afstand verkort dan spier B.



combinaties van de bovengenoemde aanduidingen voor, zoals bij de m. pronator teres en m. pronator quadratus en bij de m. flexor digitorum longus.

Een indeling van de spieren en spiervormen is wel te maken, maar berust op verschillende criteria. Zo kan men een-, twee- en meerkoppige spieren onderscheiden, een-, twee- en meerbuikige spieren, en spieren die met één of meer pezen aan de bewegende delen insereren. Ook kan men de spieren indelen naar de wijze waarop de spiervezels in de spierbuik gerangschikt zijn. Liggen de vezels evenwijdig aan elkaar, dan spreekt men van een *parallelvezelige spier*; zijn de vezels min of meer evenwijdig gerangschikt, maar is de spierbuik in verhouding tot de pezen abnormaal dik, dan noemt men dit een *spoelvormige* of *fusiforme spier*. Verder zijn er nog *waaivormige spieren* en *kringspijlen* (*sfincters*). Bij de eerste liggen de vezels in de vorm van een waaier, terwijl de vezels van kringspijlen ringvormig om een bepaald orgaan of een bepaalde structuur gerangschikt zijn.

Wanneer een pees van een spier zich meer of minder ver langs of in de spierbuik uitstrekt en de spiervezels onder een scherpe hoek in de peesvezels overgaan, dan heeft men te maken met *gevederde* of *pennate* spieren. Bij de meeste spieren is de hoek niet groter dan 30° (Spoor, 1992). De gevederde spieren zijn weer onder te verdelen in enkelvoudig gevederde of unipennate spieren, waarbij de spiervezels slechts aan één zijde van de pees insereren; in dubbelgevederde of bipennate spieren, waarbij de spiervezels aan beide zijden van de pees insereren, en in meervoudig gevederde of multipennate spieren. Bij deze laatste spieren dringt de pees met verschillende uitlopers in de spierbuik door, waardoor een zeer complexe structuur ontstaat (fig. 1-19).

De rangschikking van de spiervezels in

de spierbuik is van belang voor de functie van de spier. Algemeen wordt aangenomen dat een spiervezel zich tot de helft van zijn maximale lengte kan verkorten. Hieruit volgt dat bij spieren die even lang zijn en dus eenzelfde afstand overbruggen, een parallelvezelige structuur tot grotere verkorting kan leiden dan een gevederde structuur. In het tweede geval kan daarentegen een krachtiger contractie worden uitgevoerd omdat het aantal vezels dat een spierbuik bezit, bepalend is voor de absolute kracht die een spier kan ontwikkelen. Een nadeel hierbij is dat door de schuine overgang van de spierbuik in de pees, de spiervezels niet precies in de lengterichting van de pees werken. Hierdoor kan niet de gehele kracht die ontwikkeld wordt voor de verkorting van de spier worden aangewend.

Naar het aantal gewrichten dat door de spieren wordt overbrugd, kan men een indeling maken in monoarticulaire, bi-articulculaire en polyarticulaire spieren. Vooral wanneer een spier twee of meer gewrichten overspant, doet zich gelden dat hij zich nooit verder kan verkorten dan tot een bepaalde lengte en dan actief insufficiënt is om een verdere verkorting te bewerkstelligen. Een voorbeeld hiervan zijn de ischiocrurale spieren aan de achterzijde van het bovenbeen, die zowel het heupgewricht als het kniegewricht overbruggen. Zij zijn niet in staat de knie maximaal te buigen en tegelijk het bovenbeen maximaal achterwaarts te heffen.

Ook het omgekeerde doet zich voor: een spier kan nooit verder dan tot een bepaalde lengte worden uitgerekt en is dan passief insufficiënt om een verdere verlenging toe te staan. Wanneer de romp voorovergebogen wordt om met de handen bij de grond te komen, laten de ischiocrurale spieren, die door de anteflexie in de heupgewrichten worden uitgerekt, niet toe dat dit met gestrekte knieën wordt uitgevoerd. Door de passieve insufficiëntie van deze spieren worden de knieën bij de meeste mensen gebogen, wat ook wel ligamenteuze spierwerking wordt genoemd.

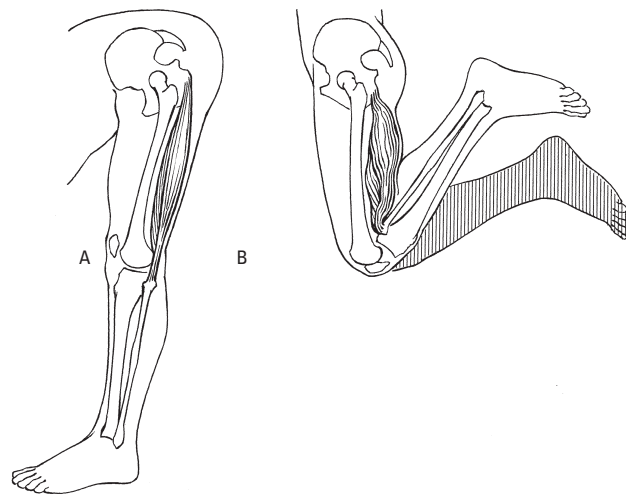
Kracht, werking en functie van de dwars-gestreepte spieren

Zoals hierboven reeds werd vermeld, hangt de absolute contractiekracht die een spier kan ontwikkelen samen met het

Spierkracht

Figuur 1-21

Passieve (A) en actieve (B) insufficiëntie van de ischiocrurale spieren. In B is de maximale actieve flexiestand (ca. 120°) gearceerd aangegeven.



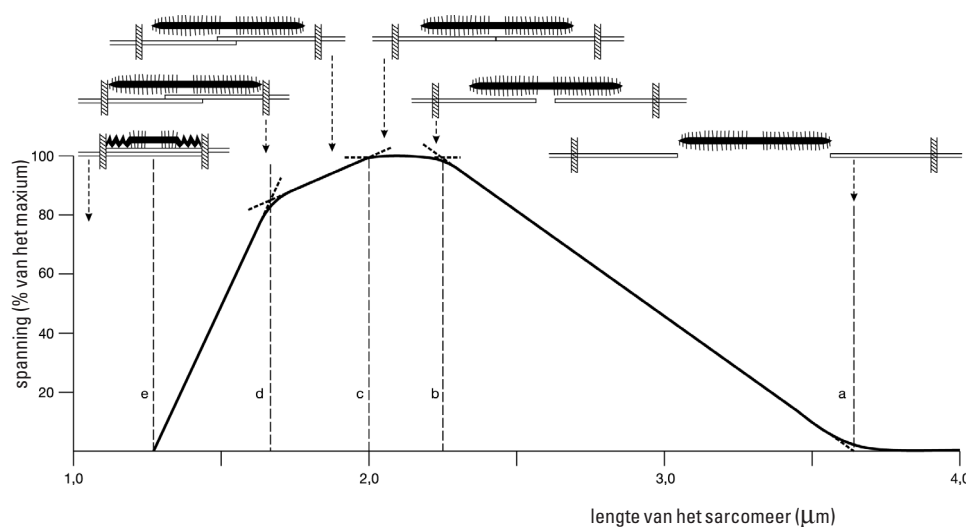
aantal spiervezels dat in een spierbuik aanwezig is (fysiologische doorsnede van een spier). Of deze absolute spierkracht daadwerkelijk wordt aangewend, hangt af van het aantal motor units dat wordt ingeschakeld (gerekruteerd) en van de frequentie waarmee de motoneuronen hun impulsen naar de spieren verzenden (de vuurfrequentie). Hoe hoger de vuurfrequentie is, hoe krachtiger de spiervezels contraheren. Uit fysiologisch onderzoek is gebleken dat de rekrutering van de motor units een zeer bepaalde volgorde heeft (het 'size principle' van Henneman e.a., 1965, 1981). Eerst worden de units gerekruteerd die kleine motoneuronen hebben en waarvan de spiervezels tot het type I behoren: langzaam, weinig krachtig, maar nauwelijks vermoeibaar. Indien meer spierkracht wordt vereist, worden eerst grotere motoneuronen ingeschakeld, die het spiervezeltype IIA innervieren, en ten slotte de grootste motoneuronen, die het spiervezeltype IIB innervieren: snel, krachtig, maar gauw vermoeibaar.

Het is verder gebleken dat ook de lengte die de spier bij de aanvang van de contractie bezit van invloed is op de kracht die geleverd kan worden. Dit laatste hangt volgens Huxley samen met de bouw van de sarcomeren. Slechts bij één bepaalde lengte is er een optimaal contact tussen de actine- en myosinefilamenten van de spierfibrillen. Hebben de sarcomeren een kleinere of grotere lengte, dan is door het in of uit elkaar geschoven zijn van de filamenten het contact minder en bestaat er een kleinere spanning tussen de beide typen filamenten. In figuur 1-22 is de ver-

houding tussen lengte en kracht van één sarcomeer afgebeeld. Deze curve is verkregen door het sarcomeer bij verschillende lengten te prikkelen en de geleverde sarcomeerkracht te registreren.

Wanneer een gehele spier wordt geprikkeld, ontstaat een meer gladde curve (curve Fa van fig. 1-23). Dit komt omdat bij isometrische spiercontracties (i.e. contracties waarbij de lengte van de spier niet verandert) waaruit de curve is opgebouwd, niet alle sarcomeren een constante lengte behouden: er vindt een kleine verkorting van de sarcomeren plaats en hierdoor worden de elastische elementen van de spier gerekt. Het is duidelijk dat de hoogte van de curve (aangegeven met H) afhankelijk is van de fysiologische doorsnede van de spier. Verder blijkt er een bijna lineair verband te bestaan tussen de breedte van de curve (aangegeven met S) en de lengte van de spiervezels: bij spieren met korte spiervezels is de breedte kleiner dan bij spieren met lange spiervezels. Dit betekent dat spieren met langere spiervezels over een langer lengtebereik kracht kunnen leveren. De curve is niet bij alle spieren geheel symmetrisch. Dit hangt vermoedelijk samen met verschillen in richting van de spiervezels en met verschillen in rek van pezen en aponeurosen.

Een spier heeft niet alleen contractiele, maar ook elastische eigenschappen. Deze laatste zijn gebaseerd op de elastische elementen in de spierbuik en de pezen (Hill, 1970; Huijing, 1992). Zij manifesteren zich wanneer bij rekking een spier langer wordt dan zijn rustlengte, dat wil zeg-



Figuur 1-22

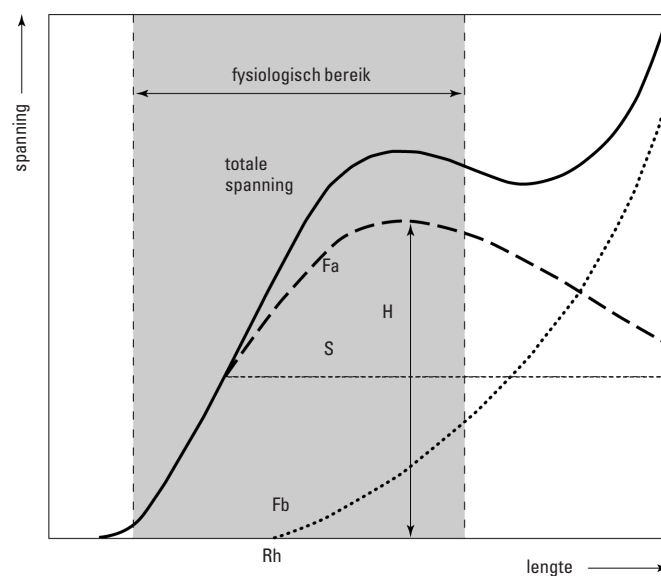
Lengte-krachtdiagram van een sarcomeer. a: Wanneer het sarcomeer zo ver wordt uitgerekt dat de dunne en dikke filamenten elkaar niet meer overlappen, wordt de spanning tussen de twee typen filamenten tot nul gereduceerd. a-b: In dit traject stijgt de spanning, terwijl het sarcomeer in lengte afneemt. De spanning stijgt omdat het aantal plaatsen waar dwarsverbindingen worden gevormd, toeneemt. b-c: In dit traject, dat samenvalt met de rustlengte van de spier, blijft de spanning even hoog omdat de centrale delen van de dikke filamenten geen dwarsverbindingen bezitten. De toename van het aantal dwarsver-

bindingen aan de uiteinden van de dunne filamenten is gelijk aan het aantal dat verloren gaat in het centrum van het sarcomeer. c-d: In dit traject schuiven de dunne filamenten steeds meer in elkaar, waardoor het aantal dwarsverbindingen afneemt en de spanning daalt. d-e: De dikke filamenten komen eerst tegen de Z-lijnen te liggen en worden vervolgens gevormd. Hierdoor neemt het aantal plaatsen waar dwarsverbindingen kunnen worden gevormd, af en wordt de spanning tussen de dunne en de dikke filamenten ten slotte tot nul gereduceerd (naar gegevens van A.M. Gordon e.a., 1966).

gen de lengte waarbij geen uitwendige krachten op de spier worden uitgeoefend (zie punt Rh in fig. 1-23). Bij verdere rekking neemt de extra-spanning steeds meer toe (lijn Fb in fig. 1-23). Het is voor de menselijke spieren niet bekend bij welke lengte zij hun maximale kracht kunnen

ontwikkelen. Uit experimenten met zoogdieren, waarop de gegevens van figuur 1-23 zijn gebaseerd, is het zeer waarschijnlijk dat dit de lengte is waarbij de spier licht is gerekt.

De kracht die een spier kan ontwikkelen en de verkorting die hij kan ondergaan,



Figuur 1-23

Lengte-krachtdiagram van een dwarsgestreepte spier. De curve Fa geeft de maximale actieve contractiekracht aan die een spier bij verschillende lengten kan ontwikkelen. Fb is de extra spanning wanneer de spier langer wordt dan zijn rustlengte (Rh). Dit komt door rekking van de elastische elementen in de spierbuis en de pezen. De totale spanning in de spier is $Fa + Fb$. H is de hoogte en S is de breedte van de curve.

blijken ook nog afhankelijk te zijn van de snelheid waarmee de spier contraheert en het gewicht waarmee hij is belast. Figuur 1-24 geeft aan dat bij toenemende contractiesnelheid de spierkracht afneemt (A); ook kan men eruit lezen dat een grotere belasting zowel tot een verlenging van de contractieduur leidt (B) als tot een minder grote verkorting van de spier (C). Het vermogen van een spier (= arbeid per tijdseenheid of snelheid maal kracht) is het grootst wanneer de uitwendige belasting ongeveer gelijk is aan één derde van de maximale contractiekracht van de

spier, en wanneer de snelheid waarmee de spier verkort ongeveer één derde van de maximale snelheid bedraagt.

Het is algemeen bekend dat de kracht van een spier door training kan toenemen. Uit dierexperimentele onderzoeken van Van Linge en Binkhorst is gebleken dat de krachttoename gepaard gaat met een hypertrofie, een vermeerdering van de hoeveelheid sarcoplasma in de spiervezels. Bovendien wordt het aantal rode spiervezels groter, wat wijst op een toename van de aerobe stofwisseling. Verder is het mogelijk dat de toename in kracht mede het gevolg is van een beter en daardoor effectiever spiergebruik. Dat er ten gevolge van de spiertraining naast een hypertrofie ook een hyperplasie, een toename van het aantal spiervezels, kan optreden, is nog steeds niet overtuigend aangetoond. Daarentegen is wel bewezen dat zeer zware training aanleiding kan geven tot het optreden van degeneratieverschijnselen in de spiervezels.

Bij de aanspanning of contractie van een spier wordt de spanning tussen oorsprong en insertie groter en tendeert de spier tot verkorting. Is de spanning die in de spier ontwikkeld wordt gelijk aan een van buiten afuitgeoefende tegenkracht, dan heeft men te maken met een statische werking of isometrische contractie: de spier wordt korter noch langer, maar is alleen meer gespannen. Is de spanning groter of kleiner dan de tegenkracht, dan voert de spier een dynamische werking uit. Wanneer de spanning groter is dan de tegenkracht, leidt dit tot verkorting van de spier en werkt de spier *concentrisch*; is de spanning kleiner dan de tegenkracht, dan wordt de spier langer en werkt hij *excentrisch*.

Uit het lengte-krachtdiagram van figuur 1-23 kan worden opgemaakt dat wanneer een spier korter wordt, zoals het geval is bij een concentrische werking, zijn contractiekracht afneemt. Dit verlies aan contractiekracht kan worden gecompenseerd door rekrutering van extra motor units en door een hogere vuurfrequentie van de motoneuronen in het ruggenmerg (Altenburg, 2008). Verder wordt, bij het korter worden van een spier, de insertiehoek tussen de pees van de spier en het botstuk dat wordt bewogen, bijna altijd minder scherp. Hierdoor neemt de gewichtsc component van de spierkracht in grootte af en neemt de draaiende compo-

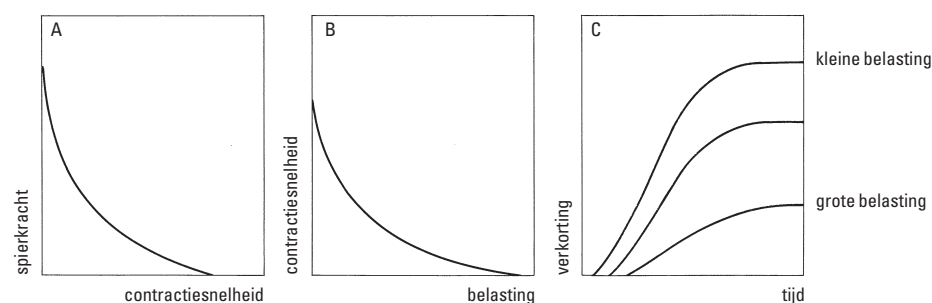
Training

Spierwerking

Myofasciale krachtoverdracht

Om te kunnen bewegen is het noodzakelijk dat de kracht, die gegenereerd wordt door de dwarsgestreepte spieren, wordt overgedragen op het skelet. Dit kan op verschillende manieren. Ten eerste, zoals bekend, via de uiteinden van de spiervezels die door pezen of peesbladen zijn verbonden met de beenderen. De krachtoverdracht via deze weg noemt men *myotendineuze krachtoverdracht*. Verder zijn de spiervezels via ketens van structurele eiwitten ook verbonden met het endomysium dat als een koker elke spiervezel bekleedt. Het endomysium vormt samen met het perimysium en het epimysium een tunnelachtig bindweefselnetwerk dat rechtstreeks is verbonden met de pezen en peesbladen. Uit onderzoek van Huijing (1999) blijkt dat er ook via deze weg kracht kan worden overgedragen. Dit wordt *intramusculaire myofasciale krachtoverdracht* genoemd.

Recent is aangetoond dat er ook sprake is van *intermusculaire* en *extramusculaire myofasciale krachtoverdracht*. De eerste geschiedt via intermusculair bindweefsel naar aangrenzende spieren, de tweede via ander extramusculair bindweefsel, zoals fasciën van spiercompartimenten, naar het skelet (Huijing en Baan, 2001; Maas e.a., 2001). Dit betekent dat een spier, die anatomisch gedefinieerd is, niet mag worden beschouwd als een functionele eenheid en dat de eigenschappen van een spier mede bepaald worden door krachten uitgeoefend via inter- of extramusculair bindweefsel. Zo is het bekend dat mensen niet één vinger kunnen bewegen zonder dat ten minste een van de andere vingers meebeweegt. Dit wordt op verschillende manieren verklaard. Ten eerste zou het voor het centrale zenuwstelsel onmogelijk zijn om de spiervezels, die slechts één bepaalde vinger kunnen bewegen, apart aan te sturen. Ten tweede zouden de dwarsverbindingen tussen de pezen van de m. extensor digitorum verhinderen dat de vingers apart worden bewogen. Het is nu gebleken dat ook myofasciale krachtoverdracht moet worden beschouwd als een van de mechanismen die een rol spelen (Maas, 2003). Myofasciale krachtoverdracht is mogelijk ook betrokken bij het ontstaan van RSI-klachten in de onderarm wanneer deze gerelateerd zijn aan taken, zoals typen en pianospelen, waarbij de vingers veelvuldig ten opzichte van elkaar moeten worden bewogen.



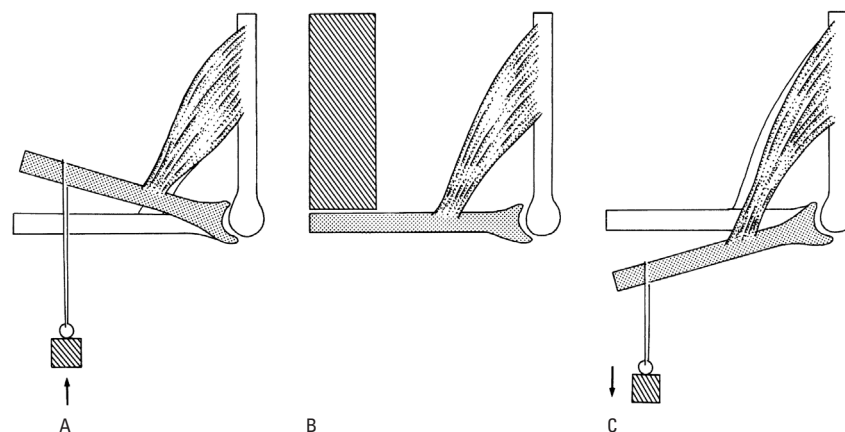
Figuur 1-24
Relatie tussen contrac-
tiesnelheid, spierkracht
en uitwendige belasting.
A Wanneer de contrac-
tiesnelheid toeneemt,
neemt de spierkracht af.
B Wanneer de belasting
groter wordt, neemt de
contractiesnelheid af.
C Bij een grote belasting
verkort de spier minder
dan bij een kleine be-
lasting (naar gegevens
van D.R. Wilkie, 1976).

nent in grootte toe (zie fig.1-26). Uit dier-
experimenten maar ook uit onderzoek bij
de mens (Lee en Herzog, 2002) is gebleken
dat, wanneer een spier wordt gerekt zoals
het geval is bij een excentrische werking,
de kracht die de spier kan ontwikkelen be-
duidend groter is dan wanneer de spier
niet wordt gerekt. Dit komt vooral door de
al genoemde extra spanning die optreedt
door de rekking van de spier (Herzog en
Leonard, 2002; Lee e.a., 2007). Het resul-
taat is dat bij een excentrische werking een
spier altijd meer kracht ontwikkelt dan
wanneer hij statisch of concentrisch
werkt. Anders gezegd, wanneer een spier
excentrisch werkt, kan hij met minder
spiervezels dezelfde kracht ontwikkelen
als bij een statische of concentrische wer-
king.

Een spier hoeft niet altijd maximaal aan
te spannen en kan bovendien zijn span-
ning variëren. Dit houdt in dat tijdens een
beweging een statische werking in een
dynamische kan worden omgezet en dat
omgekeerd een dynamische werking in
een statische kan overgaan. Het is verder
ook mogelijk dat een spier niet in zijn ge-
heel aanspant, maar dit in delen doet. Dit
is afhankelijk van de motor units die
contraheren. Hierdoor kunnen verschil-
lende gedeelten van een spier verschillen-
de en soms zelfs tegengestelde (antago-
nistische) bewegingen uitvoeren. Zo kun-

nen de voorste bundels van de om het
schoudergewricht gelegen m. deltoideus
de bovenarm voorwaarts heffen, terwijl
de achterste bundels de bovenarm achter-
waarts heffen. Met behulp van elektromy-
ografie is vastgesteld dat ook spieren
waarvan werd aangenomen dat zij als een
eenheid werken, in werkelijkheid funge-
ren als verschillende segmenten in één
spier. Een goed voorbeeld is het caput lon-
gum van de m. biceps brachii. Hiervan kon
worden vastgesteld dat, afhankelijk van de
taak die moet worden uitgevoerd (buiging
van de arm, supinatie van de onderarm of
buiging in combinatie met supinatie), mo-
tor units in verschillende delen van de
spier worden gerekruteerd (Ter Haar Ro-
meny e.a., 1984). Waarschijnlijk geldt een
dergelijke selectieve rekrutering van mo-
tor units niet voor spieren waarvan de
spierbuik eindigt in een ronde of bandvor-
mige pees die in een osteofibreus kanaal of
in een peeskoker op zijn plaats wordt ge-
houden. Hierbij resulteert de spanning van
de spierbuik altijd in een trekkracht in een
bepaalde richting, ongeacht welke bun-
dels van de spier contraheren.

De pezen, waarmee de spierbuiken met
de bewegende delen verbonden zijn, ver-
tonen wanneer de spier niet is aangespan-
nen een licht gegolfd verloop. Contra-
heert de spier, dan wordt eerst de pees
strakgetrokken en wordt de door de spier



Figuur 1-25
De werking van een
dwarsgestreepte spier.
A De spierspanning is
groter dan de tegen-
kracht, met als gevolg
dat de spier zich verkort
(concentrische werking).
B De spierspanning is
gelijk aan de tegen-
kracht, met als gevolg
dat de spier dezelfde
lengte blijft houden
(statische werking).
C De spierspanning is
kleiner dan de tegen-
kracht, met als gevolg
dat de spier langer
wordt (excentrische wer-
king).

Prestretch

uitgeoefende kracht geleidelijk overgedragen op de bewegende delen.

Het is duidelijk aangetoond dat bij het uitvoeren van snelle bewegingen, waarbij spieren concentrisch werken, een voorafgaande excentrische fase, in het Engels *prestretch* genoemd, een grotere bewegingsuitslag geeft. Zo kunnen personen vanuit een rechtopstaande houding hoger springen wanneer zij eerst inveren. De beste verklaring voor dit effect (Van Ingen Schenau e.a., 1997) is dat er bij het inveren een anteflexie in de heupen, een flexie in de knieën en een dorsaalflexie in de enkels plaatsvindt, waardoor in deze gewrichten hoekversnellingen optreden. Bij het eigenlijke springen, waarbij tegengestelde bewegingen in de drie gewrichten plaatsvinden, worden bij contracties van de spieren eerst de hoeksnelheden ongedaan gemaakt. De spieren zijn op deze wijze in staat reeds kracht op te bouwen voordat hun verkorting begint en kunnen dus in het eerste deel van hun verkorting een grotere kracht bereiken en hierdoor meer arbeid leveren dan wanneer niet was ingeveerd.

Bij de werkingen die de spieren op de botstukken van het lichaam uitoefenen, zijn niet alleen de eigenschappen van de spier zelf bepalend voor de kracht en de snelheid van de bewegingen, maar ook de hoek waaronder de spier aanhecht en de

plaats waar hij dit doet. Bezie men een theoretisch geval waarin in een plat vlak een spier is uitgespannen tussen een niet-beweeglijk botstuk A en een beweeglijk botstuk B, die in een scharniergewricht bij elkaar komen, dan kan de kracht K van de spier worden ontbonden in twee loodrecht op elkaar staande componenten. Component K_1 , die loodrecht op het te bewegen bot staat, bewerkstelligt de draaiing om de as van het scharniergewricht en wordt de draaiende component genoemd. Component K_2 werkt in de richting van het gewricht en wordt de gewrichtscomponent genoemd.

De grootte van de beide componenten hangt af van de hoek die de pees van de spier met botstuk B maakt. Is deze hoek klein, dan is de draaiende component K_1 klein en de gewrichtscomponent K_2 groot; is de hoek groot, maar niet groter dan 90° , dan is het omgekeerde het geval. Indien in de pees van de spier een sesambeentje aanwezig is, zoals het geval is bij de strekspier van de knie, dan is de aanhechtingshoek en dus ook de draaiende component K_1 groter dan zonder sesambeentje. De richting van de spierkracht wordt nu namelijk verkregen door een lijn te trekken vanaf de insertieplaats van de pees naar het sesambeentje (fig. 1-26B). Ook wanneer een spier of een pees om een ge-

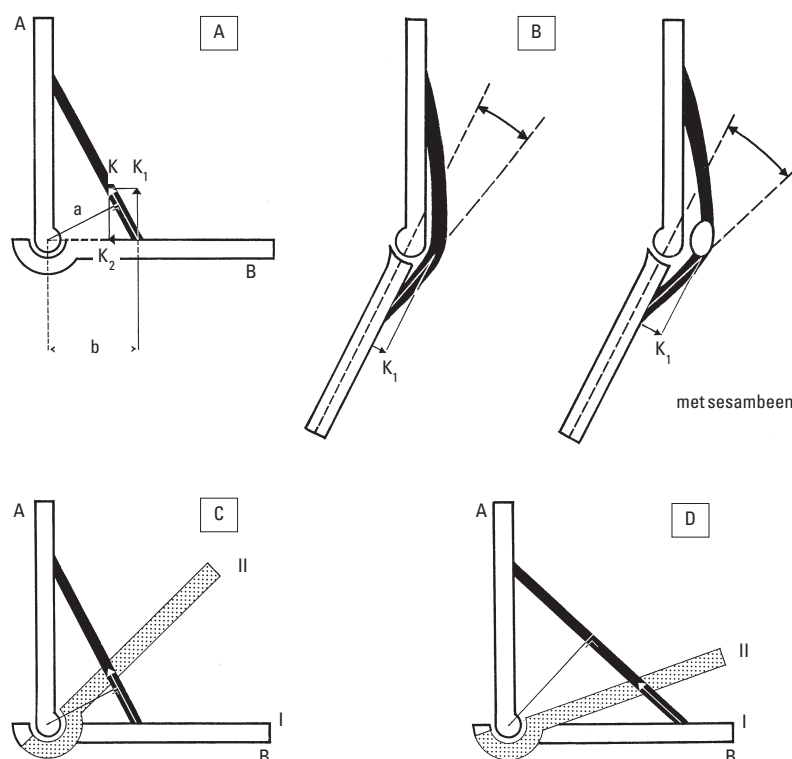
Draaimoment



E-module

Figuur 1-26

Schematische tekeningen ter illustratie van de werking van de dwarsgestreepte spieren op de botstukken van het lichaam. **A** De kracht (K) van de spier kan worden ontbonden in een draaiende component K_1 en een gewrichtscomponent K_2 . Het draaimoment is $K_1 \times b = K \times a$. **B** Component K_1 wordt groter wanneer in de pees van de spier een sesambeentje aanwezig is. **C** en **D** De grootte van de bewegingsuitslag is omgekeerd evenredig met de afstand van het aangrijpingspunt van de spier tot het draaipunt.



wricht of een botstuk is gebogen, kan de aanhechtingshoek en daarmee de richting van de kracht verandering ondergaan.

Zoals gezegd is niet alleen de hoek waaronder de spier aanhecht belangrijk, maar ook de plaats van aanhechting. De afstand b tussen de aanhechtingsplaats en het draaipunt van de botstukken, vermenigvuldigd met de draaiende component K_1 , geeft namelijk het totale draai-effect of het *draaimoment* van de spier aan. Dit product is, zoals uit fig. 1-26A valt op te maken, gelijk aan het product van de gehele spierkracht K en de loodrechte afstand a vanaf het draaipunt in het scharniergewricht naar de kracht K : $K_1 \times b = K \times a$. Met de formule van het draaimoment is nu gemakkelijk te begrijpen dat een spier, die dicht bij een gewricht aanhecht, een grotere kracht moet uitoefenen om een bepaalde verplaatsing van botstuk B teweeg te brengen dan een even krachtige spier, die van dezelfde plaats ontspringt, maar zijn aanhechting ver van het gewricht heeft (fig. 1-26C en D). Ondergaan beide spieren eenzelfde verkorting, dan geeft de eerste spier wel een grotere en snellere uitslag dan de spier die ver van het gewricht is aangehecht. Uit het feit dat in het lichaam de meeste spieren dicht bij de door hen overspannen gewrichten aangrijpen, kan misschien de conclusie worden getrokken dat bij het uitvoeren van bewegingen snelheid belangrijker is dan kracht.

Bewegingspatroon

De wijze waarop de spieren samenwerken om een beweging tot stand te brengen, wordt bepaald door het centrale zenuwstelsel en wordt meestal niet bewust ervaren. Men is zich wel bewust van het feit dat men een glas van tafel wil oppakken, maar het bewegingspatroon dat hiervoor nodig is, en dat niet alleen de spieren van de vingers maar ook die van de bovenarm en de schouder omvat, verloopt ge-

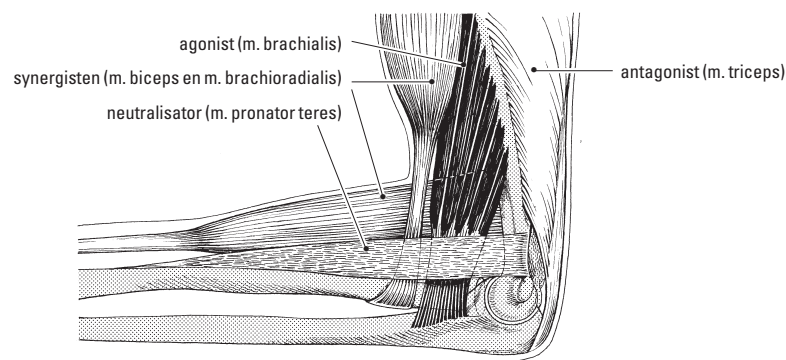
heel buiten het bewustzijn om. Dit is eveneens het geval bij het zijwaarts heffen van een been.

Naar de functies die de spieren in dergelijke bewegingspatronen hebben, kunnen ze worden onderscheiden in agonisten, synergisten, antagonist, neutraliserende spieren en fixerende of stabiliserende spieren. *Agonisten* of 'prime movers' zijn spieren die in eerste instantie de beweging uitvoeren; *synergisten* of 'secondary movers' zijn spieren die pas contraheren wanneer de beweging met kracht wordt uitgevoerd. Spieren die juist een tegengestelde beweging als de agonisten en synergisten kunnen uitvoeren, worden *antagonisten* genoemd, terwijl *neutraliserende spieren* ongewenste bijwerkingen van de agonisten en synergisten verhinderen. Het fixeren van de oorsprong of de insertie van een spier kan tot stand komen door een uitwendige kracht of door aanspanning van *fixerende of stabiliserende spieren*.

De verschillende spierfuncties kunnen worden gedemonstreerd aan de buiging van de arm in het ellebooggewricht. De m. brachialis is de enige spier die bij deze beweging altijd actief werkzaam is en fungeert dus als agonist. De m. biceps brachii en de m. brachioradialis hebben een synergistische werking, terwijl de m. triceps brachii, die de arm kan strekken, een antagonistische functie heeft. Ongewenste supinatie van de onderarm ten gevolge van de contractie van de m. biceps wordt tegengegaan door neutraliserende spieren die een pronerende functie hebben; bewegingen van de bovenarm en van de schoudergordel worden verhinderd door stabiliserende spieren die de humerus en de scapula fixeren.

De samenwerking van spieren of delen van spieren om bepaalde bewegingen uit te voeren wordt *co-contractie* genoemd.

Co-contractie



Figuur 1-27
Functie van de elleboogspieren bij buiging van de arm. Rechterarm.

Een goed voorbeeld is de samenwerking bij de supinatie van de arm door de synergistisch werkende m. supinator en m. biceps brachii en de antagonistisch werkende m. triceps brachii. De supinatie wordt tot stand gebracht door aanspanning van de m. supinator en de m. biceps. De m. biceps oefent echter ook een ongewenste buigende werking uit. Deze wordt tegengegaan door aanspanning van de m. triceps.

Mono- en bi-articulaire spieren

Op grond van waarnemingen door Van Ingen Schenau en zijn medewerkers (1992, 1995) bij complexe bewegingen zoals fietsen en hardlopen, werd de hypothese ontwikkeld dat bij het uitoefenen van krachten op de omgeving, bijvoorbeeld op de pedalen van een fiets, de bi-articulaire beenspieren vooral zorgen voor een juiste verdeling van de draaimomenten over de gewrichten die deze spieren overbruggen. Hierdoor wordt bepaald in welke richting de uitwendige kracht wordt uitgeoefend. Daarentegen is de grootte van de kracht voornamelijk afhankelijk van de activiteit van de monoarticulaire spieren. Uit het onderzoek van Doorbosch, Welter en Van Ingen Schenau (1997), waarbij proefpersonen met hun benen krachten in bepaalde richtingen moesten uitoefenen, is echter gebleken dat een dergelijke rolverdeling tussen mono- en bi-articulaire spieren geen algemene geldigheid heeft. In de proefopstelling van de onderzoekers werd aangetoond dat zowel de bi-articulaire als de monoarticulaire spieren verantwoordelijk zijn én voor de richting én voor de grootte van de krachten die door de spieren op de omgeving worden uitgeoefend.

Kinematische ketens

Bij de beschrijving van de werking die de spieren uitoefenen, wordt er op de meeste plaatsen in dit boek van uitgegaan dat zij deel uitmaken van open kinematische ketens waarbij het eindgewricht vrij kan worden bewogen. Is dit niet het geval, dan maken de spieren deel uit van een gesloten keten. Het hangt nu af van de fixaties of bewegingen in de andere gewrichten van de keten of bij contractie van een spier zijn insertie of zijn origo beweegt, of dat insertie en origo elkaar naderen. Een goed voorbeeld van een gesloten kinematische keten is het been tijdens de standfase van het lopen.

Onderzoek van spieren

Er zijn verschillende methoden om de werkingen van een spier te bestuderen.

Klinische spierkrachtmeting

Meetmethoden waarmee de spierwerking wordt beoordeeld, kunnen worden onderverdeeld in elektromyografie, weerstandstesten en isokinetische dynamometrie.

Bij *elektromyografie* worden de door een spier geproduceerde actiepotentialen opgevangen door middel van elektroden. Hiervoor zijn in gebruik naald-, draad- en oppervlakte-elektroden. De opgevangen signalen worden versterkt en vervolgens geregistreerd op een oscilloscoop, een taperecorder of op een mechanische schrijver. Het aldus verkregen elektromyogram geeft niet alleen aan wanneer de onderzochte spier actief is, maar verschaft ook informatie over de kracht waarmee de contractie plaatsvindt. Naast een diagnostische functie kan elektromyografie ook worden toegepast bij de revalidatie van spieren met gestoorde functie. Bij deze toepassing, *myofeedback* genoemd, worden de versterkte signalen hoorbaar en zichtbaar aan de patiënt aangeboden en kan deze met behulp hiervan zijn eigen prestatie controleren en zo mogelijk verbeteren.

Weerstandstesten worden bij het lichamelijk onderzoek van patiënten gebruikt om spierzwakte te kwantificeren. Internationaal is afgesproken dat sprake is van een normale spierkracht, gegradeerd als spierkracht 5, indien een volledige beweging, bijvoorbeeld het buigen van de arm, uitgevoerd kan worden tegen de zwaartekracht en krachtige weerstand in. Een verminderde, maar nog steeds goede spierkracht (4) is aanwezig indien een volledige beweging tegen de zwaartekracht mogelijk is, maar minder kracht wordt gevonden als de onderzoeker weerstand biedt aan de beweging. Met spierkracht 3 wordt een zwakke spierkracht aangeduid, waarbij wel tegen de zwaartekracht bewogen kan worden maar niet tegen weerstand. Bij spierkracht 2 is een actieve beweging slechts mogelijk zodra de zwaartekracht verminderd is, bijvoorbeeld in een bad. Bij spierkracht 1 en 0, die soms gevonden worden bij neurologische stoornissen en na ernstig spierletsel, vindt de onderzoeker alleen spierspanning die zich niet uit in een beweging, of totale afwezigheid van spiercontracties.

De laatste jaren wordt bij de revalidatie van patiënten steeds vaker gebruikgemaakt van *isokinetische dynamometrie*. Bij deze meetmethode wordt aan een patiënt door middel van een dynamometer een beweging met een vaste hoeksnelheid (iso = gelijk, kinesie = beweging) aangeboden. Tijdens het uitvoeren van de onderzochte beweging, bijvoorbeeld het strekken en buigen van de knie, wordt de patiënt aangespoord sneller dan de ingestelde hoeksnelheid te bewegen. De ingestelde hoeksnelheid wordt ervaren als een weerstand en de kracht die tijdens de beweging door de patiënt wordt geleverd, wordt door de dynamometer geregistreerd en weergegeven op een recorder of een beeldscherm. Naast de meting van de maximale kracht tijdens een bewegingstraject, kan met deze meetmethode ook de balans tussen agonistisch en antagonistisch werkende spiergroepen worden geregistreerd en kan tevens, door herhaald uitgevoerde metingen, het resultaat van revalidatie worden geobjectiveerd.

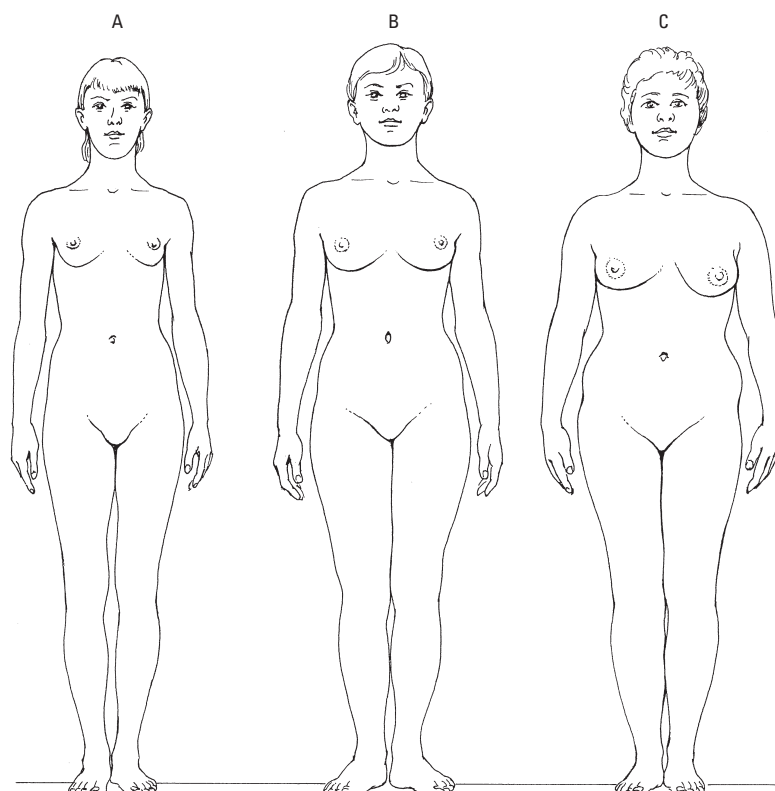
Men kan de mechanisch-analytische weg volgen en de functie voorspellen uit de ligging van de spier ten opzichte van de bewegende delen. Zo kan bijvoorbeeld worden voorspeld dat de m. biceps brachii van de bovenarm, waarvan de insertiepees aan de ventrale zijde de buig-strekas van de elleboog passeert en meer distaal de pro-supinatieas van de onderarm kruist en proximaal aan de radius vasthecht, de arm zal buigen en de onderarm zal supineren. Verder kan men een spier elektrisch prikkelen en op deze wijze nagaan wat voor werking hij bij contractie zal hebben. Beide methoden hebben het nadeel dat hieruit wel blijkt wat een spier kan doen, maar niet of hij het bij een bepaalde beweging ook werkelijk doet. Dit laatste kan men beter nagaan door de spieren te palperen of de actiepotentialen te registreren (elektromyografisch onderzoek). De moeilijkheid die hierbij nog blijft, is om vast te stellen wat precies de functie is die de spier in het bewegingspatroon vervult: of hij agonistisch werkt, synergistisch of misschien zelfs antagonistisch.

In de tabellen die aan de bespreking van de afzonderlijke spieren van het lichaam zijn toegevoegd, heeft de daarin genoemde spierfunctie zoveel mogelijk betrek-

king op gegevens die door palpatie of met elektromyografisch onderzoek zijn verkregen. Wanneer dergelijke gegevens niet voorhanden waren, werd de functie van de spieren afgeleid van hun positie in het lichaam. Wil men spieren door de huid heen palperen, dan kan dit het beste worden gedaan door de proefpersonen de in de tabellen aangegeven bewegingen met kracht en tegen een weerstand in te laten uitvoeren.

Reliëf van het lichaam

Het *oppervlakkige reliëf* van het lichaam wordt grotendeels bepaald door het skelet en de spieren. Of dit goed of minder goed tot zijn recht komt, hangt af van de ontwikkeling van het bewegingsapparaat en van de hoeveelheid onderhuids vetweefsel die aanwezig is. Factoren die hierbij een rol spelen zijn leeftijd, geslacht, constitutietype en de mate van geoefendheid. De musculatuur van mannen is in het algemeen meer ontwikkeld dan die van vrouwen en ook de botstructuren treden meer op de voorgrond. Bij vrouwen zijn het skelet en de spieren minder ontwikkeld en is de subcutane vetlaag dikker, vooral in het gebied van de benen, de heupen en de borst, waardoor de lichaams-



Figuur 1-28
Leptosoma (A), atletische (B) en pycnische (C) lichaamsbouw (naar G. Bammes, 1969).

vormen ronder zijn. Ook jonge kinderen hebben ronde lichaamsvormen omdat hun spieren nog weinig ontwikkeld zijn en er relatief veel onderhuids vetweefsel aanwezig is. Bij het ouder worden wordt de huid dunner en neemt de hoeveelheid onderhuids vetweefsel af, terwijl er tevens een atrofie van de spieren (een vermindering van de hoeveelheid sarcoplasma in de spiervezels) optreedt.

Personen met een leptosome lichaamsbouw hebben weinig vet, hun ledematen zijn betrekkelijk lang en hun gehele verschijningsvorm heeft iets graciels (fig. 1-28). Daarentegen vallen atletische personen op door hun 'kantigheid': het skelet en de musculatuur zijn uitgesproken, er is weinig subcutaan vet en de huid is strak en dik. De borst overheerst de buik. Personen met een pycnische lichaamsbouw zijn gekenmerkt door hun 'rondheid': er is veel onderhuids vetweefsel. Verder is de romp sterker ontwikkeld dan de ledematen en ligt bij de romp het accent meer op de buik dan op de borst.

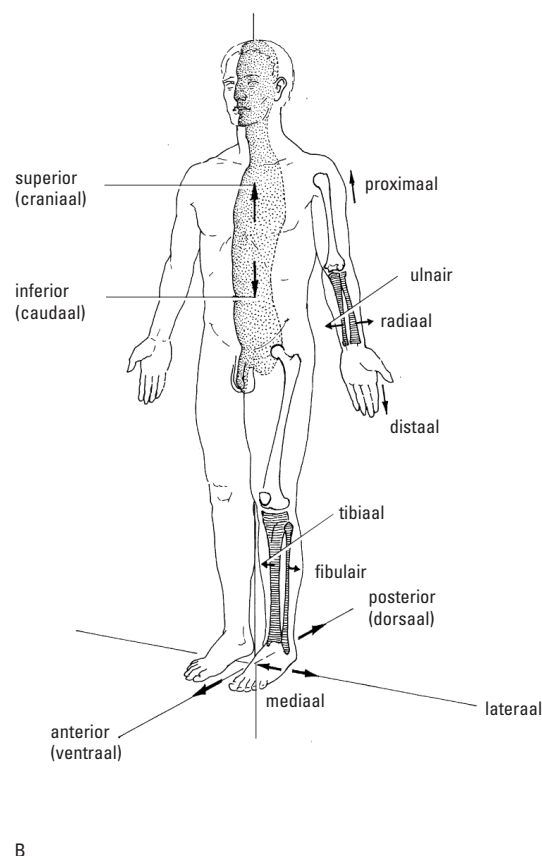
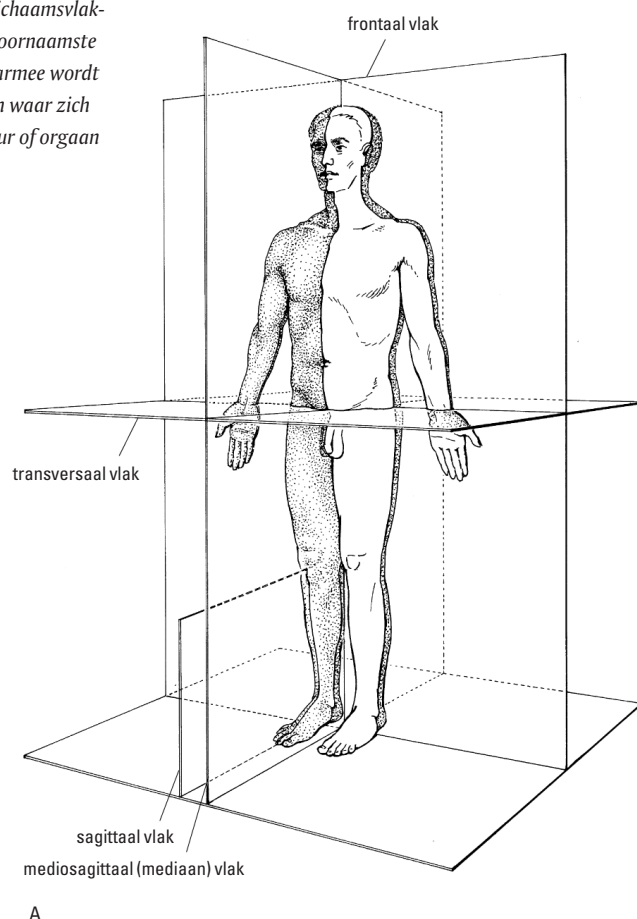
Anatomische terminologie

De beschrijvingen van de structuren van het menselijk lichaam geschieden ten opzichte van de anatomische positie (fig. 1-29). Hierbij staat het lichaam rechtop met het aangezicht en de voeten naar voren gericht en hangen de armen langs het lichaam met de handpalmen naar voren. Het hoofd wordt het *caput* genoemd, de hals het *collum*, de nek de *cervix* en de romp de *truncus*. De arm en het been worden betiteld als *membrum superius* of bovenste extremiteit en *membrum inferius* of onderste extremiteit.

De romp is met de armen verbonden door de beide schoudergordels en met de benen door de bekkengordel. Elke schoudergordel bestaat uit twee botstukken, de *clavicula* (het sleutelbeen) en de *scapula* (het schouderblad), en uit spieren die de romp met de schoudergordel en de bovenarm verbinden. Tot de spieren die vanaf de romp naar de bovenarm lopen behoren onder andere de *m. pectoralis major*

Figuur 1-29

A De anatomische positie met de lichaamsvlakken. **B** De voornaamste termen waarmee wordt aangegeven waar zich een structuur of orgaan bevindt.



(de grote borstspier) en de m. latissimus dorsi (de breedste rugspier). In de arm onderscheidt men de bovenarm, de elleboog, de onderarm, de pols en de hand. Het skelet van de bovenarm bestaat uit de *humerus* (het opperarmbeen), dat van de onderarm uit de *ulna* (de ellepijp) en de *radius* (het spaakbeen). Het skelet van de hand bestaat uit acht *ossa carpalia* of *ossa carpi* (handwortelbeentjes), vijf *ossa metacarpalia* of *ossa metacarpi* (middenhandsbeentjes) en de *phalanges* (vingerkootjes).

De bekkengordel, die is opgebouwd uit het rechter en linker *os coxae* (de heupbeenderen), is een onderdeel van de romp. Elk *os coxae* heeft een gewrichtskom (het *acetabulum*) die samen met het dijbeen het heupgewricht vormt. Rond dit gewricht bevinden zich de dorsale en de ventrale heupspieren die vanaf de wervelkolom en de *ossa coxae* naar het bovenbeen lopen. Tot de dorsale heupspieren behoort onder andere de m. *gluteus maximus* (de grote bilspier). In het been onderscheidt men het bovenbeen, de knie, het onderbeen, de enkel en de voet. Het skelet van het bovenbeen wordt gevormd door het *femur* (het dijbeen), dat van het onderbeen door de *tibia* (het scheenbeen) en de *fibula* (het kuitbeen). Aan de ventrale zijde van de knie vindt men verder nog de *patella* (de knieschijf). Het skelet van de voet bestaat uit zeven *ossa tarsalia* of *ossa tarsi* (voetwortelbeenderen), vijf *ossa metatarsalia* of *ossa metatarsi* (middenvoetsbeenderen) en de *phalanges* van de tenen.

Als hoofdvlakken van het lichaam gelden de frontale, sagittale en transversale vlakken. Een *frontaal vlak* verdeelt het lichaam in een voorste en een achterste gedeelte; een *sagittaal vlak* doet dit in een linker- en een rechterdeel. Het sagittale vlak door de middellijn of de mediaanlijn van het lichaam heet het *mediosagittale* of *mediane vlak*. Een vlak of doorsnede loodrecht op de lengteas van het lichaam verdeelt het lichaam in een bovenste en een onderste gedeelte en wordt een *transversaal vlak* of een transversale doorsnede (dwarsdoorsnede) genoemd. Ook een vlak of door-

snede loodrecht op de lengteas van een onderdeel van het lichaam, bijvoorbeeld arm of been, noemt men een transversaal vlak of transversale doorsnede.

De termen *mediaal* en *lateraal* geven aan of een structuur zich meer aan de zijde van het mediane vlak bevindt of hier juist verder van verwijderd is; ligt iets tussen mediaal en lateraal in, dan wordt het *intermediair* genoemd. *Anterior* of *ventraal* en *posterior* of *dorsaal* duiden structuren aan die meer aan de voorzijde (ventrale zijde) of aan de achterzijde (dorsale zijde) zijn gelegen; *superior* of *craniaal* en *inferior* of *caudaal* wil zeggen dat iets meer in de richting van de schedel (het cranium) ligt of meer in de richting van de staart (de cauda). *Internus* en *externus* zijn termen die aangeven of iets meer naar binnen of meer naar buiten is gelegen; *superficialis* en *profundus* duiden een oppervlakkige of een diepe ligging aan. Bij de beschrijving van het spijsverteringsstelsel en het ademhalingsstelsel worden de termen *proximaal* en *distaal* gebruikt om aan te geven of een orgaan of een deel van een orgaan dicht bij de mondholte of de neusholte ligt of verder hiervan af.

In de arm en het been betekenen proximaal en distaal dat een structuur of orgaan dichterbij dan wel verder van de romp ligt. Voorts worden in de onderarm en de hand de termen mediaal en lateraal vervangen door *ulnair* en *radiaal*, waarmee wordt aangegeven of iets aan de zijde van de ulna respectievelijk de radius, dan wel aan de zijde van de radius respectievelijk de duim ligt. In het onderbeen en de voet worden mediaal en lateraal vervangen door *tibiaal* en *fibulair*; tibiaal wil zeggen aan de zijde van de tibia respectievelijk de grote teen, fibulair aan de zijde van de fibula respectievelijk de kleine teen.

Nomenclatuur van de beenderen

Uitsteeksels of verhevenheden van beenderen worden met de volgende termen aangeduid. Alleen die meervouden worden vermeld die gebruikt worden in de tekst of de figuren.

<i>Enkelvoud</i>		<i>Meervoud</i>
caput	= kop	capita
capitulum	= kopje	
condylus	= knopvormig uitsteeksel	condyli
cornu	= hoorn	cornua
crista	= kam of richel	cristae
eminentia	= verhevenheid	eminentiae
epicondylus	= uitsteeksel op een condylus	epicondyli
hamulus	= haakvormig uitsteeksel	
labium	= lijn of lijst	labia
pecten	= kam	
processus	= uitsteeksel	processus
protuberantia	= verhevenheid	protuberantiae
spina	= puntvormig uitsteeksel	spinae
trochanter	= ruwe verhevenheid	
trochlea	= katrol	
tuber, tuberculum	= knobbel	tubera, tubercula
tuberositas	= ruwe verhevenheid	

Andere kenmerken van beenderen worden als volgt benoemd:

<i>Enkelvoud</i>		<i>Meervoud</i>
ala	= vleugel	alae
angulus	= hoek	
apex	= top	
area	= gebied	areae
arcus	= boog	
canalis	= kanaal	canales
cavitas, cavum	= holte	cavitates, cava
facies	= vlak of zijde	
fenestra	= venster	
fissura	= spleet	fissurae
foramen	= opening	foramina
fossa, fossula	= holte, kuiltje	fossae, fossulae
fovea, foveola	= groeve, kuiltje	foveae, foveolae
impressio	= indeuking	impressiones
incisura	= insnijding	incisurae
margo	= rand	
meatus	= gang	
sulcus	= groeve	sulci