

De vormveranderingen van het bot als gevolg van mechanische krachtwerkingen*)

door H. van Hartingsvelt

De grondslag

Van tijd tot tijd is het nuttig en nodig, dat de beoefenaren van een wetenschap zich bezinnen op hare grondbeginselen. Een sprekend voorbeeld hiervan vinden wij in de natuurkunde.

De natuurkunde was in het begin van deze eeuw bezig zich vast te werken in een waaier van waarnemingen, die niet in overeenstemming waren te brengen met het theoretisch inzicht van die dagen. De natuurkundigen hadden het gevoel, tussen twee hoge rotsen te zijn gekomen, die een steeds nauwer kloof begrepsden, hoe verder men haar binnendrong. Bij verder voortgaan had men het gevoel, niet meer op open terrein te komen. Men zat vast in begrippen als wereldaether, waarvan het bestaan nimmer was aangetoond, doch dat uitsluitend ten gerieve van het voorstellingsvermogen was ingevoerd; men kende de afmetingen in de ruimte volstreekte waarde toe en ook de tijd was een factor, zij het van andere orde, aan het absolute bestaan waarvan men niet mocht twijfelen. Slechts de bezinning op haar grondbeginselen heeft de natuurkunde uit deze impasse gered. Bij critische beschouwing bleek het beschrijvingsraam te bekrompen te zijn geweest, het aether-begrip kon overboord worden gezet, ruimte en tijd bleken niet meer volstrekt te zijn, doch onafhankelijke coördinaten van een beschrijvingsraam, die in een bepaalde relatie tot de bewegings-toestand van de waarnemer staan. In de wiskundige vorm, waarin de resultaten van de waarnemingen werden gegoten, bleek zelfs het subjectieve element van de waarneming te sluipen. Pastoende natuurkunde zich bevrijd had uit de knellende traditie van het absolute, ontving zij opnieuw die krachtige impuls, die haar beoefenaren in staat stelde, de fakkel der wetenschap te doen lichten over figuurlijke en letterlijke kernproblemen.

De wijziging van fundamentele inzichten in de aard van natuurkundige problemen heeft andere wetenschappen medegesleept.

*) Voordracht, gehouden voor de Nederlandse Vereniging v. Orthodontische Studie op 8 Februari 1950.

Van welke grote wijsgerige waarde is b.v. niet de natuurkundige ontdekking, die samenhangt met de verandering in opvatting betreffende de basis der natuurkennis, n.l. dat materie en energie twee woorden voor eenzelfde begrip zijn! En welke waarde heeft het niet voor de chemie, dat de natuurkunde het reeds bekende periodieke systeem der elementen kan verklaren als een besloten stelsel van electromagnetische dynamiek. Dit zijn slechts twee voorbeelden!

Nu is gewoonlijk een wetenschap ontstaan rondom één of meer overwegingen van voor de mens practische of nuttige aard. Soms ook zien wij een wetenschap groeien om een bepaalde techniek. Als voorbeeld van eerstgenoemde mogelijkheid moge de ontwikkeling der medische wetenschap dienen, daarentegen heeft de specifiek technische aard der scheikunde haar afzonderlijke ontwikkeling juist weer sterk in de hand gewerkt.

Door bezinning op haar grondbeginselen heeft men de medische wetenschap leren kennen als een loot aan de boom der biologie. En als zodanig is zij gebouwd op de kennis van levende eenheden en hun onderling verband; op de kennis van cellen en van celgemeenschappen of organismen. Het is nog niet zo lang geleden, dat men in de biologie heeft ingezien, dat door het gehele weefsel dezer wetenschap de chemische draad loopt van de eiwit-structuur. De moleculen der eiwitten toch kunnen zich tot buitengewoon ingewikkelde combinaties verenigen; zij vormen als het ware het chemische geraamte, waaromheen het leven zich groepeerd. Men heeft echter steeds opnieuw bevestigd gevonden, dat de cellen van een organisme, naar gelang de onderlinge afhankelijkheid der organen toeneemt, steeds meer beheerst worden door een op alle cellen inwerkend organiserend parallel-systeem, dat men gewoonlijk samenvat onder de naam „psyche”. De bezinning op de grondslagen der medische wetenschap heeft tot de erkenning geleid, dat deze psyche van enorm belang kan zijn bij het verloop van verschillende ziekten naast de meer direct en automatisch verlopende stoffelijke processen. De psyche vormt als het ware de tegenpool van de te eenzijdige, uitsluitend materialistische opvatting van de grondslagen van het leven op aarde. Volgens de opvatting van vele moderne denkers is deze psyche van de eerste kiemaanleg af samengegroeid met het wordende organisme en heeft zich dit organiserende parallel-systeem tegelijk met het organisme ontwikkeld. Men spreekt daarom van de psychisch-physisch monistische

inslag der moderne wetenschap. Bij iedere biologische beschouwing en dus ook bij deze is het naar mijn mening noodzakelijk, dat men zich voortdurend het bestaan van een organiserend parallelsysteem realiseert.

De specialismen in de geneeskunde zijn als afzonderlijke wetenschappen ontstaan uit praktische, topografische, orgaan-specifieke en technische overwegingen. Soms werken deze oorzaken min of meer samen. Dit zien wij b.v. in de tandheelkunde.

Als biologisch-medisch specialisme is de tandheelkunde dus gebouwd op dezelfde grondslagen. Ook de tandheelkunde wordt beheerst door de bijzonderheden van de eiwitstructuren. De bouw der weefsels, die het bijzondere studiegebied der tandheelkunde omvatten, wordt eveneens door deze categorie van stoffen bepaald.

De weefsels en organen, waarmede de tandheelkunde zich bezighoudt, onderscheiden zich evenwel van vele andere organen en orgaanstelsels, doordat zij behoren tot de „harde” weefsels, n.l. been, dentine en glazuur. Gaan wij na, door welke gemeenschappelijke kenmerken deze weefsels kunnen worden gekarakteriseerd, dan aarzelen wij niet, de combinatie eiwit-apatiet-kristal als het meest essentiële en fundamentele te beschouwen.

Dat er een intensief verband bestaat tussen deze fundamentele weefseleigenschap en de verschillende ondergebieden der tandheelkunde moge met enkele voorbeelden worden verduidelijkt:

In de tandheelkundige *chirurgie* werkt men hoofdzakelijk in het bot en men is daarbij volkomen afhankelijk van het typische regeneratievermogen van deze weefselsoort. Steeds heeft de chirurgie dus te maken met ombouw en opbouw van het bot, d.i. met de vorming van eiwit-apatietstructuren.

In de *conserverende* tandheelkunde wordt men voor 90 % in beslag genomen door de behandeling der tandcaries. Dit is evenwel een pathologische aandoening van glazuur en dentine, beide eiwit-apatietstructuren. Dit onderdeel van ons beroep heeft dus zijn bestaan te danken aan de ziekelijke veranderingen dezer structuren.

De beoefenaren der *paradentologie* occuperen zich met de ziekelijke resorptie van het alveolaire been. Zij moeten dus in het bijzonder zijn geïnteresseerd in de voorwaarden, die tot de resorptie van deze eiwit-apatietstructuur leiden.

De *prothetiek* heeft weliswaar op andere wijze doch in even belangrijke mate te maken met het proces der alveolaire resorptie en zij moet in de practijk hiermede voortdurend rekening houden.

Tenslotte is de *orthodontie* waarschijnlijk wel in de sterkste mate geïnteresseerd in de veranderingen, die onder invloed van mechanische krachtwerkingen in het bot plaats grijpen, m.a.w. in de specifieke structuurveranderingen in de eiwit-apatiet-combinatie, als gevolg van druk- en trekkrachten.

Door mijn belangstelling voor het cariesvraagstuk ben ik in nauwe aanraking gekomen met de bijzonderheden van dit soort biochemische structuren. En daar ik eveneens belang stel in de orthodontie, heb ik mij niet uitsluitend tot de harde tandweefsels beperkt. Ik ben thans in staat U kennis te doen maken met enige details van de mechanische en biochemische reactie-processen, die zich afspelen in het bot, wanneer terwille van orthodontische doeleinden een element in de kaak verplaatst wordt. Vóór ik echter tot een uiteraard enigszins summiere beschrijving hiervan overga, is het wenselijk, de aard van het probleem, waarvoor de practijk van de orthodontie ons stelt, nog eens scherp te belichten en nauwkeurig samen te vatten. Dit probleem nu is het *aanpassingsvermogen*.

Hoe is het mogelijk, dat men door druk op een tand enerzijds een resorptie, door trek aan een tand anderzijds een appositie van beenweefsel teweeg kan brengen, zodat een blijvende vormverandering van het bot optreedt? Om dit te begrijpen moeten wij terugkeren tot de fundamenteën van het orthodontische specialisme en het zal U dan duidelijk zijn, dat de inleiding van dit artikel heeft gediend, U deze grondslagen helder voor de geest te plaatsen. Hieruit volgt tevens dat wij het specifieke orthodontische probleem slechts van een algemene gezichtshoek uit kunnen benaderen. Dit probleem is n.l. een bijzonder geval van het aanpassingsvermogen van het bot.

In het algemeen past het bot zich aan door vormveranderingen, wanneer er trekkende, drukkende of buigende krachten op worden uitgeoefend. Dit vermogen uit zich 1) door direct waarneembare veranderingen in de uiterlijke vorm van het bot, 2) door inwendige structuurwijziging, 3) in de microscopische en submicroscopische opbouw van het weefsel, 4) in de chemische veranderingen, die tijdens het proces der vervorming optreden.

Het blijkt nu, dat zowel in de uitwendige vorm als in de inwendige constructie van het bot een alleszins merkwaardige aanpassing optreedt bij een bepaalde mechanische belasting. Het spreekt vanzelf, dat deze aanpassing gebaseerd is op erfelijke groeitendities, ongeveer zoals bouwconstructies een uitvloeisel zijn van een bepaal-

de bouwstijl. Wij zullen echter de erfelijke tendenties, evenals de bouwstijlen, buiten beschouwing laten; deze toch moeten zich ook voegen naar mechanische grondbeginselen.

Als orthodontist heeft men uiteraard bijzondere belangstelling voor de inwendige bouw van de schedel. Een indruk hiervan krijgt men bij het bestuderen van het verloop van de spanningslijnen in de schedelbeenderen, zoals men die heeft leren kennen door klieving met naalden. Het is buitengewoon belangwekkend, op te merken, dat deze „krachtlijnen” een zekere onafhankelijkheid vertonen van het tandstelsel.

Om nu de vraag, hoe dit structuurbeeld feitelijk tot stand komt, in zijn volle omvang te kunnen begrijpen, is de kennis van de ontwikkeling van het bot vereist. Het zou misplaatst zijn, de anatomische en histologische aspecten van deze ontwikkelingsgang uitvoerig te schilderen, doch een bespreking van het principe, dat de natuur bij dit proces volgt, is wel van belang.

Principe der beengroei

Zoals bekend is, bestaat het bindweefsel uit cellen, waartussen een slijmachtige stof ligt, die vezels bevat. Deze vezels zijn bundels van ketens, bestaande uit lange eiwitmoleculen. In gewoon bindweefsel zijn zij talrijk, in embryonaal bindweefsel worden zij daarentegen nagenoeg niet aangetroffen; dit weefsel is dan ook van een veel wekere consistentie. De overgang van embryonaal bindweefsel tot steviger bindweefsel berust dan ook op de vorming van vezelstructuren in de slijmachtige tussenstof. Zo komt in principe de verandering van bindweefsel in kraakbeenweefsel neer op een eigenlijk slechts kleine verandering in de biochemische werkzaamheid der bindweefselcellen. Het resultaat hiervan is, dat enkele molecuulgroepen van de slijmstof enigszins anders in elkander komen te sluiten, zodat deze verandert in de veerkrachtige kraakbeentussenstof. In wezen is deze verandering niets anders dan de vorming van galactosamine uit glucosamine, waarbij de ring van zes atomen van het glucose vervangen wordt door de vijfing van galactose. Dit komt door een enigszins gewijzigde zuurstofbinding vrij gemakkelijk tot stand, daar hiervoor slechts een geringe energietoever nodig is. Het glucosamine nu is een onderdeel van de slijmstof, terwijl het galactosamine een onderdeel vormt van de kraakbeentussenstof. En steeds weer staan wij met grote verwondering, wanneer wij beseffen hoe de natuur a.h.w. een dergelijke

reactie gevonden heeft, die resulteert in een stof met volkomen andere mechanische eigenschappen.

De vezelige eiwitstructuren blijven bij bovengenoemd proces onaangetast. Dat de ligging der cellen in het kraakbeen hierdoor anders wordt, doet principieel niets ter zake; dit is slechts het gevolg van het fixeren der cellen in de elastische tussenstof. De stoffen, die de cellen voor hun metabolisme nodig hebben, kunnen gemakkelijk door de ruime chemische structuren van de tussenstof heen diffunderen, vanuit de haarvaten, die buiten dit weefsel liggen.

Wanneer nu het kraakbeenweefsel in beenweefsel verandert, wordt in principe de veerkrachtige intercellulaire substantie van het kraakbeen, met uitzondering van de vezels, afgebroken door bepaalde enzymen, de z.g. sulfatasen. Ook het hyaluronidase oefent bij dit proces een zekere werking uit. Genoemde substantie wordt gesplitst in eenvoudiger stoffen, welke met de bloedstroom worden afgevoerd. Hiertoe dringen bloedvaten in het kraakbeen. Bloedvaten pulseren evenwel en de vezelstructuren der eiwitten uit het kraakbeen worden onder invloed van andere enzymen en van de afwisseling van druk en rek om de pulserende bloedvaten omgebouwd, zodat de vezels zich zowel circulair als in de lengterichting om de bloedvaten gaan leggen. Waar de vezels onvoldoende door het pulseren der vaten worden beïnvloed, blijven zij, wat hun ligging betreft, in eerste instantie beantwoorden aan de spanningsveranderingen, die door andere oorzaken in het weefsel optreden.

Tegelijkertijd voltrekken zich belangrijke wijzigingen in de grondsubstantie. Deze gaat zich n.l. mineraliseren en wel het eerst om de bloedvaten, die het materiaal aanvoeren. Er vormen zich apatietkristallen. Dit zijn op zichzelf ondoorlaatbare kristalstructuren, die geen materiaal langs de weg der diffusie laten passeren. De delende cellen van het groeiende weefsel laten elkaar daarom niet los en blijven, a.h.w. uit zelfbehoud, door uitlopers met elkaar verbonden. Zij rangschikken zich tussen de vezels om de voedende bloedvaten, teneinde zoveel mogelijk hun deel te krijgen. Op deze wijze kunnen zij elkaar zo gemakkelijk mogelijk de voeding in het ondoordringbare medium toespelen. De mineralisatie dringt echter steeds verder door, totdat eindelijk ook de grondsubstantie geheel aan elkander gekit wordt door de in elkaar grijpende kristallen. Hierbij wordt overigens geen volkomen star systeem gevormd: de kristallen kunnen nog glijdende en schuivende bewegingen

uitvoeren, zij het in geringe mate. Bovendien houden de vezelstructuren het geheel elastisch bijeen.

Het bot wordt op deze wijze een systeem van eiwitvezels en apatietkristallen, waartussen de bloedvaten lopen en waarin de cellen met hun uitlopers een plaats vinden. Men houde echter voor ogen, dat met deze opsomming van physiologisch-chemische processen slechts het beginsel is weergegeven en dat in iedere schakel van het gehele proces nog een aantal volkomen onopgeloste vraagstukken verscholen ligt.

In het bijzonder wil ik nog eens de nadruk leggen op een opvatting, die naar ik meen door sommige histologen uit vroegere scholen niet gedeeld wordt, n.l. dat de eiwitvezels in het bindweefsel, kraakbeen- en beenweefsel extracellulair worden gevormd, zij het dan onder de biochemische invloed van de cellen. Ik kan n.l. geen enkel doorslaggevend argument vinden, waarom de cellen direct zouden moeten worden betrokken bij de mechanische belastingen van het weefsel, die worden opgevangen door de vezels. Bovendien is nooit met zekerheid aangetoond, dat de vezels aan de cellen ontspruiten en ik meen ook, dat iedere waarneming van het tegengestelde berust op het over elkaar liggen van cellen en vezels in de weefselcoupes. In onze verdere beschouwingen zullen wij dan ook aan de relatieve zelfstandigheid van de vezels vasthouden.

Hoewel men bij de huidige stand van de microscopische techniek nog niet in staat is, het ontstaan van de bindweefselfibrillen te volgen, kan men toch met behulp van het electronenmicroscop wel een analoog proces aantonen, n.l. het ontstaan van cellulosevezels in de omgeving van cellulose bacteriën, die op bier voorkomen. Bij een vergroting van ongeveer 20.000 maal ziet men dan hoe de bacteriën-cellen eerst een amorph slijm afscheiden (te vergelijken met bindweefselfibrillen) en dat hierin, om de cellen heen dus, de vezels ontstaan, als bij een soort van kristallisatieproces, waarschijnlijk onder invloed van enzymen. Op analoge wijze moeten wij ons m.i. de verandering van bundels eiwitmoleculen tot bindweefselfibrillen voorstellen.

Reactie op krachtwerkingen

Bovenstaande beschouwingen over enige submicroscopische details van de beenstructuur stellen mij gemakkelijker in staat, aan te knopen bij de reacties, waarmee de beenstructuur antwoordt op mechanische belastingen.

Het is bekend, dat het dode bot, d.i. het bot waarin de apatiet-verbindingen met de eiwitketens zijn verbroken, bros is en niet elastisch, terwijl het levende bot een zekere mate van veerkracht bezit, die het geschikt maakt om plotselinge krachtwerkingen te weerstaan. Dat het dode bot een geheel andere elasticiteit vertoont, kan in hoofdzaak worden teruggebracht tot het feit, dat door de uitdroging het collageen der vezels niet langer gezwollen is, of dat een ontleding der eiwitten opgetreden is, waardoor de atomaire afstanden gewijzigd zijn of dat het bot een andere chemische samenstelling en dientengevolge ook andere mechanische eigenschappen heeft gekregen.

In eerste instantie worden elastische vervormingen van het bot beheerst door fysieke wetten; pas bij langduriger krachtwerkingen komen fysiologisch-chemische reacties in het spel. Het onderdeel der physica, dat zich met de elastische vervormingen der materie bezighoudt en de hierbij optredende, weerstand biedende krachten bestudeert, heet *rheologie*. In deze wetenschap wordt een fundamenteel onderscheid gemaakt tussen de reactie-weerstanden die optreden bij belasting van grofkorrelige en van fijnkorrelige structuren. Biologische structuren, waaronder het bot, worden tot de grofkorrelige gerekend. De elastische eigenschappen dezer structuren kunnen buitengewoon goed worden bestudeerd met behulp van modellen van rubberspons, daar men hiermede zowel veranderingen van volume als van vorm kan reproduceren, terwijl men ze bovendien in verschillende graden van poreusiteit kan vervaardigen. Wanneer men van standaardafmetingen uitgaat, kan men met behulp van zulke sponsmodellen voortreffelijk de reactie op druk en trek vergelijken.

Het is mij niet bekend of dergelijke belastingsproeven ooit met vers bot zijn uitgevoerd. Niettegenstaande de belangrijke verschillen in mechanische eigenschappen tussen sponsrubber en groeiend bot, die kunnen worden vergeleken met de verschillen tussen isotrope en anisotrope substanties, bestaat er tussen beide naar mijn mening toch voldoende overeenkomst in mechanisch opzicht, dat men uit zodanige proeven, wat het bot betreft, conclusies zou kunnen trekken. Ter toelichting moge worden opgemerkt, dat onder isotrope substanties stoffen worden verstaan, die in alle ruimterichtingen dezelfde fysieke eigenschappen bezitten, zoals in dit geval dus de sponsrubber; terwijl onder anisotrope substanties die stoffen worden begrepen, die in verschillende ruimterichtingen ook ver-

schillen in fysische eigenschappen vertonen, zoals hier dus het bot.

Afgezien nu van deze verschillen kan worden gezegd, dat zowel spons als bot veranderingen ondergaan ten aanzien van de driedimensionale vorm en van het volume. Het zeer belangrijke en opmerkelijke hierbij is nu, *dat bij compressie de volumevermindering relatief veel sterker is dan de volumevermindering bij trek onder aanwending van gelijke kracht en aangrijpingsoppervlak.*

De fysische vervorming, die bij kortdurende en incidentele belasting van het bot optreedt, leidt niet tot een blijvende verandering. Dit geschiedt pas wanneer fysiologisch-chemische factoren worden ingeschakeld bij een belasting van langere duur. Men moet hierbij vooral niet denken, dat er dan misschien andere fysische verschijnselen optreden, zoals men b.v. ziet, wanneer een glazen plaat, d.i. een taai vloeibare massa, onder druk wordt gezet. Een vergelijking, die voor het groeiende bot wellicht enigszins op zou kunnen gaan, kan worden gevonden in een boom, die, blootgesteld aan een overheersende westenwind, onder die voortdurende krachtwerking kromgroeit. Toch gaat ook deze vergelijking mank, daar het hier een eenzijdig overheersend groeiproces betreft, waarbij dus aan beide zijden een massavermeerdering plaatsvindt, terwijl juist de buigingen in het bot gekarakteriseerd zijn door massaverplaatsing. Naast appositie is er ook resorptie.

Willen wij ons een beeld vormen van de reactiewerking van het bot op druk- en trekkrachten en van het fysiologische samenstel van chemische reacties, dan moeten wij teruggrijpen op de mechanisch-fysische reactie, welke primair is. Wij vergelijken daartoe de bloedvaten in het wortelvlies der elementen met de openingen in de sponsrubber en gaan na, hoe deze zich gedragen bij belasting. Wat echter voor het wortelvlies gezegd wordt, geldt natuurlijk evenzeer voor andere delen van het skelet (fig. 1-3).

Wij kunnen opmerken, dat bij geringe druk de openingen in de rubber ovaal inplaats van rond worden. Bij sterke compressie worden zij dichtgedrukt. Hetzelfde geschiedt bij de bloedvaten van een gecompriëerd weefsel. De vezels, d.w.z. de bundels eiwitmoleculen, worden dikker en korter.

Bij trek worden de openingen eveneens ovaal op doorsnede; zij zullen bij sterke trek nooit zo platgedrukt worden als bij compressie. Ook bij bloedvaten ziet men dit. De oorzaak hiervan is het volgende: bij compressie is de mogelijkheid tot dichtdrukken afhankelijk van

de elasticiteit van het bloedvat en van de samendrukbaarheid der weefsels zijdelings van het bloedvat, dus loodrecht op de drukrichting. Aangezien de hoeveelheid weefsel zijdelings van het bloedvat relatief groot is, is de samendrukbaarheid ook groot.



Fig. 1. Schema van een bloedvat liggend tussen een vezelbundel



Fig. 2. Compressie van een bloedvat in een vezelbundel bij druk. Resultaat: dichtdrukken van het bloedvat, verkorting en verbreding van de vezelbundel, speciaal zijdelings van het bloedvat. Bij sterk elastische vaatwand ronding van de samengevouwen wand. Bij minder elastische vaatwand scherper vouwen (niet afgebeeld)

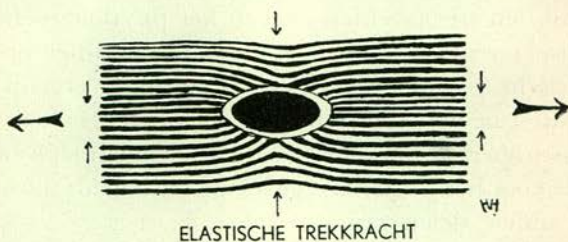


Fig. 3. Vernauwing van een bloedvat bij trek aan de vezelbundel. De doorsnede van het bloedvat wordt ovaal. Zijdelings is slechts een matige versmalling van de vezelbundel mogelijk, daar de vezels elkaar in de weg liggen. Het bloedvat blijft open

Bij weefsel, waarop trekkrachten werken, is de zijdelingse dichtdrukking van het vat afhankelijk van de samendrukbaarheid der trekkende vezels, die immers over de gehele breedte van het bloedvat trekken en het dus tegelijk open houden. Als tweede mechanisch gevolg van trek zien wij een uitrekken van de vezelstructuur (fig. 4).

De mechanische werkingen op bloedvaten en vezels bepalen nu geheel de afloop van het physiologische vervormingsproces van het bot, wanneer genoemde krachten althans voldoende lang werkzaam zijn. Wij zullen nu het verloop van dit vervormingsproces nagaan bij alveolair bot, aan de hand van het op histologische gegevens opgebouwde schema van Gottlieb en Orban, die naar gelang

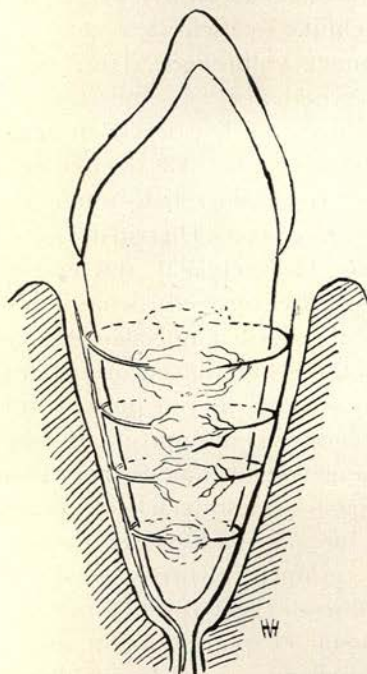


Fig. 4. Schema van de bloedvoorziening van het periodontium. Doordat de bloedvaten verspreid liggen in de ruimte van de nauwe periodontale spleet is dichtdrukken mogelijk, hetgeen moeilijker zou zijn wanneer het voedingsstelsel zo zou zijn ingericht, dat de bloedvaten uit verschillende plaatsen van het bot in het periodontium zouden overgaan

van de op de tand aangewende kracht vier soorten van reactie van het bot onderscheiden. Inplaats van de histologische verschijnselen zal ik echter trachten, de physiologische werkingen meer naar voren te brengen. Het eerst gaan wij na wat er aan de drukzijde gebeurt.

In het eerste stadium zien wij hier een vernauwing van de venen, die door hun minder gespierde vaatwand het eerst zullen worden dichtgedrukt. Aldus ontstaat een passieve hyperaemie, waardoor een — zij het geringe — opeenhoping van de stofwisselingsproducten der cellen in het weefsel plaats heeft.

In het tweede stadium worden de venen nagenoeg dichtgedrukt en de arteriën vernauwd. Dit leidt tot een vermeerderde opeenhoping van afvalstoffen in het weefsel. In dit stadium komen er meerkernige cellen in het weefsel voor, die men osteoclasten heeft genoemd. Deze cellen kunnen door hun meerkernigheid hun stofwisseling voldoende op gang houden in zuurstofarme gebieden. Zij zijn in staat, afvalproducten van het weefsel te verwerken, een verichting, die de eigenlijke weefselcellen onder deze omstandigheden niet goed meer kunnen volbrengen. Hun aanwezigheid kan door chemotaxis worden verklaard.

In het derde stadium worden de venen geheel dichtgedrukt en de arteriën zeer sterk vernauwd. De weefselademhaling wordt door de verminderde zuurstoftoevoer belemmerd. Er heeft slechts een gedeeltelijke verbranding plaats. Dit is in de beenafbraak het stadium, waarom alles draait. Het betekent, dat er een opeenhoping van zure stoffen in het weefsel optreedt, waardoor de pH daalt. In het begin zal deze daling worden opgevangen door de alkaliereserve van het weefsel; daar echter de gevormde hoeveelheid koolzuur hierin steeds groter wordt, zal een punt worden bereikt, waarbij deze reserve is uitgeput en de zuurgraad dus snel valt. (Hierbij dient te worden aangetekend, dat vermeerdering van CO_2 in het weefsel op zichzelf reeds de oplosbaarheid van het apatiet verhoogt). Het gevolg is, dat bij aanwending van de juiste compressedruk er enige tijd moet verlopen, alvorens de pH een kritische waarde bereikt. Als onvoldoende geneutraliseerde zuren ontstaan dan in het weefsel zwavelzuur en fosforzuur als bijproducten van de eiwitstofwisseling, melkzuur door de onvolkomen verbranding en diaceetzuur en β -oxyboterzuur door de gestoorde koolhydraatstofwisseling. Dit betekent onherroepelijk een afbraak van het apatiet. In het been ontstaan resorptie-ruimten, de z.g. lacunes van Howship. In deze ruimten werken de reeds eerder genoemde osteoclasten als opruimers van afvalstoffen. Deze zullen in dit stadium bestaan uit producten van de verminderde weefselstofwisseling, uit ionen, die vrijkomen bij de afbraak van apatiet en uit ontledingsproducten der eiwitvezels.

Door de compressie zal een kronkeling der vezels plaats hebben, waardoor chemisch actieve groepen hiervan met elkaar gaan reageren; de ketens worden verkort. Sommige proteolytische enzymen krijgen een grotere werkingsmogelijkheid. Onder de eiwit-afbrekende enzymen, die de vezelafbraak tot stand brengen, zal waar-

schijnlijk een door Polonovski en Cartier gevonden proteïnase moeten worden gerekend. Het optimum van werking van dit enzym ligt bij een $\text{pH} = 4$ en het ontplooit juist in een zuurstof-arme omgeving zijn volle werkingskracht. Dit zijn voorwaarden, die, zoals wij zagen, samengaan met het proces der apatietafbraak. Genoemd enzym werd gevonden in extracten van bot met glycerine.

Anderzijds wordt de PO_4^{--} gebonden aan organische stoffen door middel van de activiteit van de zure phosphatase der osteoclasten.

Hier is dus de opvatting, dat het been door de osteoclasten *aangevreten* wordt, verlaten. Deze opvatting berustte uitsluitend op histologische waarnemingen, doch de juistheid ervan wordt door de beschikbare fysiologisch-chemische feiten zeer twijfelachtig. Deze cellen doen dienst als opruimers. Het beenweefsel wordt onder druk aangevreten door de zure reactie van het weefsel, het eerst natuurlijk op plaatsen, die om de bloedvaten liggen, de resten worden door de osteoclasten opgeruimd.

In het vierde stadium zijn alle bloedvaten geheel dichtgedrukt en door het gebrek aan voedende stoffen en zuurstof treedt necrose van het weefsel op. De zuurgraad kan zó toenemen, dat zelfs de veel dichter gepakte apatietkristallen van het tandbeen kunnen worden afgebroken.

Gaan wij thans na, wat er aan de trekzijde gebeurt. Hier blijven de bloedvaten grotendeels open en er treedt dan ook geen ondervoeding van het weefsel op. Het is zeer waarschijnlijk, dat de veranderingen, die in dit weefsel plaats grijpen, in de eerste plaats kunnen worden toegeschreven aan de spanning, die in de eiwitvezels ontstaat. Op den duur zal deze spanning moeten leiden tot een verbreken van de zwakste schakels in de ketens en hiermede tot het vrijkomen van chemisch actieve molecuul-groepen. Dit is op zichzelf reeds voldoende om verschuivingen in het eiwit-metabolisme der cellen teweeg te brengen. Een verschuiving naar de alkalische kant, zoals men waarneemt bij het vrijkomen van basische eiwitgroepen, heeft tot gevolg, dat de activiteit der alkalische phosphatase wordt vergroot. Het is dit enzym, dat fosphaat uit organische bindingen vrij maakt en dus zodoende de hoeveelheid niet organisch gebonden fosphaat in het weefsel verhoogt, hetwelk dan beschikbaar komt voor de vorming van apatiet (fig. 5).

Tevens zullen de collagene vezels worden bijgebouwd door middel van enige andere enzymen met eiwitplitsend vermogen, die

eveneens door Polonovski en Cartier in glycerine-extracten van het been zijn ontdekt. Het werkingsoptimum van deze enzymen ligt bij een $\text{pH} = 7,6$ en zij ontvouwen juist hun grootste activiteit in

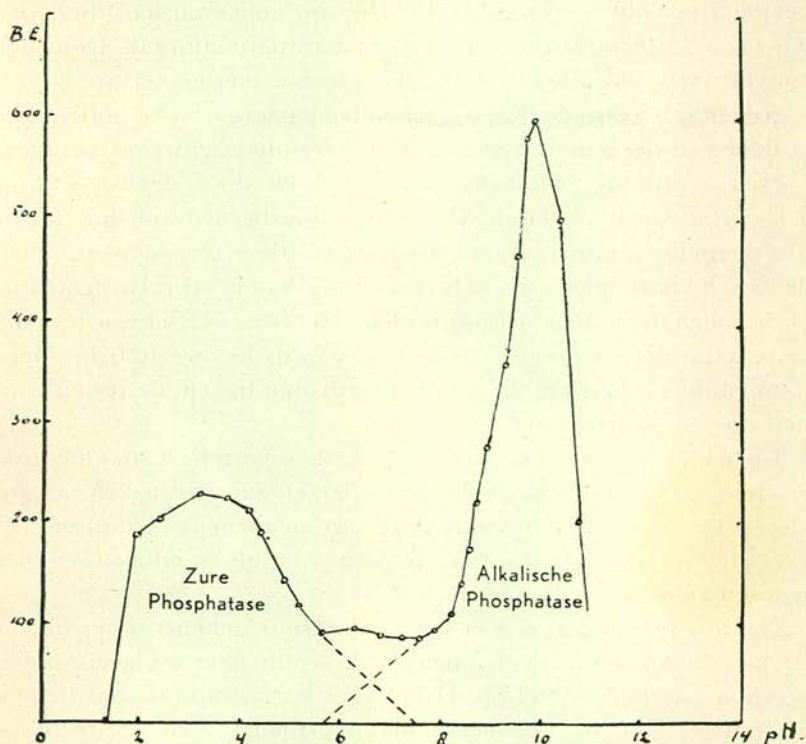


Fig. 5. Curve van de phosphatase activiteit van een extract van de konijnenlever bij verschillende pH , gemeten met $\text{Na-}\beta$ -glycero-phosfaat als substraat, naar een registratie van D. B. Kroon, H. Neumann en W. J. A. Th. Kraayenhoff-Sloot. (N.T.v.G. jg 90, (1946) p. 1154, Enzymologia Vol. 11, (1943—1945), p. 186).

De brede, platte top van de curve kan worden toegeschreven aan de werkzaamheid van de zure phosphatasen en de scherpe top aan die van de alkalische phosphatasen. De verhouding tussen de hoogte van de toppen is karakteristiek voor het orgaan. De gestippelde lijnen stellen een extrapolatie voor van de curven, die men ongeveer van elk der beide enzymen afzonderlijk verkrijgen zou.

Men kan uit deze afbeelding leren, dat in het pH -gebied, waar men bij de omvorming van het bot mee te maken heeft, aan de zure kant (resorptie) slechts de zure phosphatase en aan de alkalische kant (appositie) slechts de alkalische phosphatase haar werkzaamheid kan ontplooiën

een zuurstofrijke omgeving. In totaal zijn drie van zulke enzymen aangetoond, n.l. een proteïnase, dat veel overeenkomst vertoont met het bekende trypsine en dat in staat is, lange eiwitketens in kleinere stukken te delen, en voorts twee peptidasen, die deze kleinere stukken nog verder splitsen.

De schijnbare tegenstelling, dat deze eiwitsplitsende enzymen deel nemen aan de vezelopbouw en aldus een eiwitsynthese tot stand brengen, is te verklaren uit de omstandigheid, dat enzymen in het algemeen in staat zijn, twee soorten van reacties te bewerken, die een tegengesteld verloop hebben. In welke richting nu een zodanig enzym werkzaam is, hangt samen met de energetische verhoudingen in het substraat. Voor eiwitsynthese is energie nodig. Deze moet ergens vandaan komen en in het bot zal zij voor een deel worden gevonden in het vrijmaken van fosphaat uit organische verbindingen, voor een ander deel in alle mogelijke specifieke werkingen der levende cellen.

Tal van nevenreacties compliceren dit proces. Men denke aan de invloed van de vitaminen C en D, van het parathyreoïd hormoon en van activatoren, zoals magnesium. Het is nog niet bekend hoe al deze factoren in elkander grijpen.

Tezamen met het phosphor moet ook het calcium worden genoemd. Door de onderzoekingen van talrijke chemici zijn in de laatste decennia vele bijzondere eigenschappen van het phosphor en de phosphaten aan het licht gekomen. Daardoor is de belangstelling voor het calcium wat teruggedrongen, hetgeen niet wegneemt, dat dit element bij de opbouw van het bot een aan het phosphor gelijkwaardige plaats inneemt. Het calcium in het bot is, voorzover wij thans weten, van drie bronnen afkomstig, die alle in het serum aanwezig zijn. Dit zijn a) de vrije calcium-ionen, b) een verbinding van calcium-citraat en eiwit, en c) een calcium-phosphaat-eiwit-verbinding. Hoe het calcium uit deze beide laatste verbindingen bij de beenvorming wordt bevrijd, is nog niet volkomen duidelijk. Het moet waarschijnlijk worden geacht, dat hierbij zowel proteïne-splitsende enzymen als phosphatasen betrokken zijn. In ieder geval is er sprake van een ingewikkeld proces.

Hoe nu de verlenging der eiwitketens de vorming van apatietkristallen kan bevorderen, wordt duidelijk, wanneer wij enkele bijzonderheden van de eiwit- en de apatietstructuur in aanmerking nemen, en wel speciaal de afstanden der atomen in beide structuren. De apatietkristallen bestaan uit zeer harde en weinig veerkrachtige zeshoekige staafjes, waarin de geïoniseerde atomen zeer dicht gepakt zitten. In de lengterichting dezer zeshoekige staafjes bevinden zich aan het oppervlak op regelmatige afstanden van ongeveer $6,9 \text{ \AA}$. (d.i. 69 honderd-millioenste millimeter) chemisch actieve ionen. Wanneer men daarnaast nagaat, op welke onderlinge

afstand in het door wateropneming gezwollen collageen de actieve groepen zich bevinden, dan komt men tot een bedrag van 6,8 Å. voor deze eiwitsubstentie. De chemisch actieve groepen van apatiet en eiwit zouden nu een verbinding kunnen vormen met een redelijke stevigheid, wanneer de afstanden der beide actieve groepen geen verschil vertoonden van 0,1 Å. Het is hiermede eigenlijk als met een radio-ontvanger, die niet op de golflengte van de zender is afgestemd. Een kleine afwijking in afstemming is voldoende om te maken dat de zender niet „doorkomt”.

Oefent men nu echter een spanning uit op de eiwitvezels, dan worden de moleculen uitgerekt en plotseling komt er een graad van uitrekking, waarbij de actieve groepen der apatietkristallen „in phase” zijn met de actieve groepen van het eiwit. De „golflengten” van apatiet en eiwit zijn dan a.h.w. plotseling op elkaar afgestemd en dit feit is voldoende om het eiwit der collageene of lijmgevende fibrillen plotseling tot een actief molecule te maken bij de kristallisatie van het apatiet, wanneer de andere factoren, waarvan ik U enkele noemde, hiervoor gunstig zijn. Het is nog niet duidelijk, of hier de fosphaat-ionen door het eiwit worden vastgehouden en in positie gebracht, of dat er verbindingen optreden tussen de hydroxylionen der beide substanties. Ook zou men kunnen denken, dat calcium aan de basische eiwitgroepen wordt vastgehouden. Voor het eerste pleit m.i. de relatief zeer grote hoeveelheid anorganisch fosphaat (ten opzichte van het calcium) in het bot, vóór de kristallisatie begint; voor het laatste de gemakkelijke

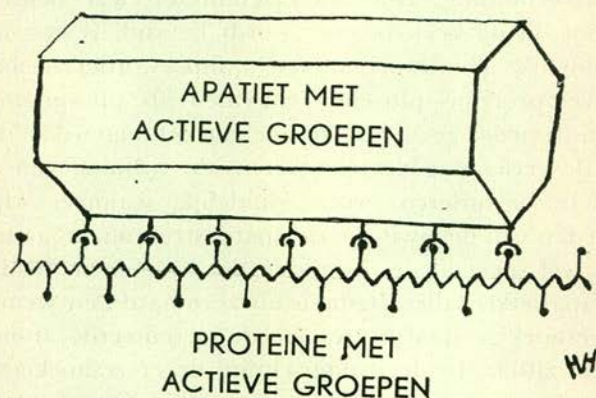


Fig. 6. Schema van de „ruimtelijke afstemming” van de chemisch actieve groepen op het oppervlak van het apatiet met die van het eiwit. Wordt door trek deze afstemming bereikt, dan gaat het vezeleiwit als kristallisatie-kern fungeren

adsorptie van calcium-hydroxyde aan apatiet en de affiniteit tussen calcium en hydroxyl-groep (fig. 6).

Het zoëven vermelde verklaart onmiddellijk tal van bijzonderheden aangaande de beenstructuur. Ten eerste, dat de kristallisatie plaats vindt langs de vezelrichting en dat de lengte-as der kristallen zich oriënteert volgens het verloop der eiwitbundels. In groter verband betekent dit, dat de spanningslijnen in het bot in de richting der vezels verlopen en dat de beenbalkjes ook in deze richting georiënteerd zijn. In dood been, waarvan de vezelstructuur verloren is gegaan, moet men dus ook de spanningslijnen terug kunnen vinden door het verloop der beenbalkjes na te gaan. (Dat hier het eiwit van de elastische vezels, het elastine, geen rol van betekenis kan vervullen, is het gevolg van de geheel andere structuur van dit eiwit, waarbij geen bundelvorming ontstaat).

Ten tweede wordt er de betere kristallisatie bij trek en vooral bij een geringe, afwisselende trekbelasting door verklaard; in geval van fractuur dus de betere callusvorming bij een functionele genezing.

Ten derde is duidelijk, dat bij druk de kans op apatietvorming verminderd is.

Wanneer men nu de verscheidenheid in het verloop van de vezels in de verschillende botten bestudeert, dan is het niet direct duidelijk, in hoeverre dit verloop een aanpassing betekent op de krachten, die op het bot werkzaam zijn. Zo zou men b.v. aangaande het vezelverloop der pijpbeenderen als volgt kunnen redeneren: Het bot zal hoofdzakelijk belast worden loodrecht op de lengterichting; diensgevolge zullen de vezels in elkander worden gedrukt, zij zullen a.h.w. omvallen en loodrecht op de as van het bot komen te staan. Deze redenering is echter fout. Men bedenke ten eerste, dat de botten niet overal tegelijk worden gevormd, doch dat de groei-centra voornamelijk in de epiphysen zijn gelegen. Voorts moet men in gedachten houden, dat de vezelrichting wordt bepaald door de trekkrachten en niet door de compressies. Dit kan men aanschouwelijk maken door een bundel touwtjes tussen beide handen te spannen. Pas wanneer aan de bundel getrokken wordt is er sprake van oriëntatie der afzonderlijke touwtjes. Brengt men daarentegen de handen naar elkaar toe, dan schuiven de touwtjes gedesoriënteerd in elkander. Doch nu wordt het vezelverloop in de pijpbeenderen veel begrijpelijker. Bij een belasting in de lengterichting treden in het pijpbeen ook buigspanningen op en wel hoofdzakelijk in de uiteinden der beenderen die nog kraakbeen bevatten. Het zijn deze

wekere uiteinden, die de eerste aanleg der vezels bepalen. Bij de doorbuiging treedt een eenzijdige vezelrekking op, die precies het verloop moet hebben van de vezels, die men in het volwassen bot vindt.

In dit licht bezien moet het U duidelijk zijn, dat bij orthodontisch verplaatsing van tanden twee zones van rek optreden; in beide vindt dus een nieuwvorming van been plaats. De eerste ligt natuur-

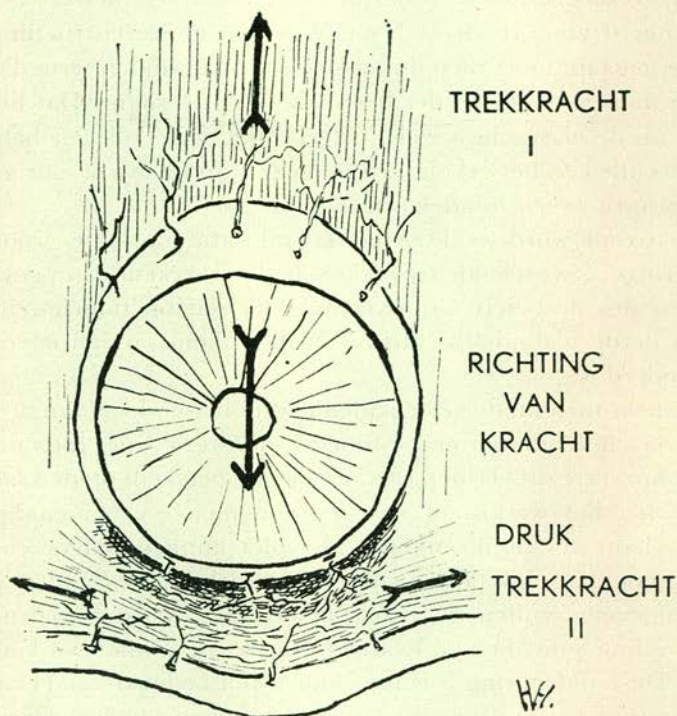
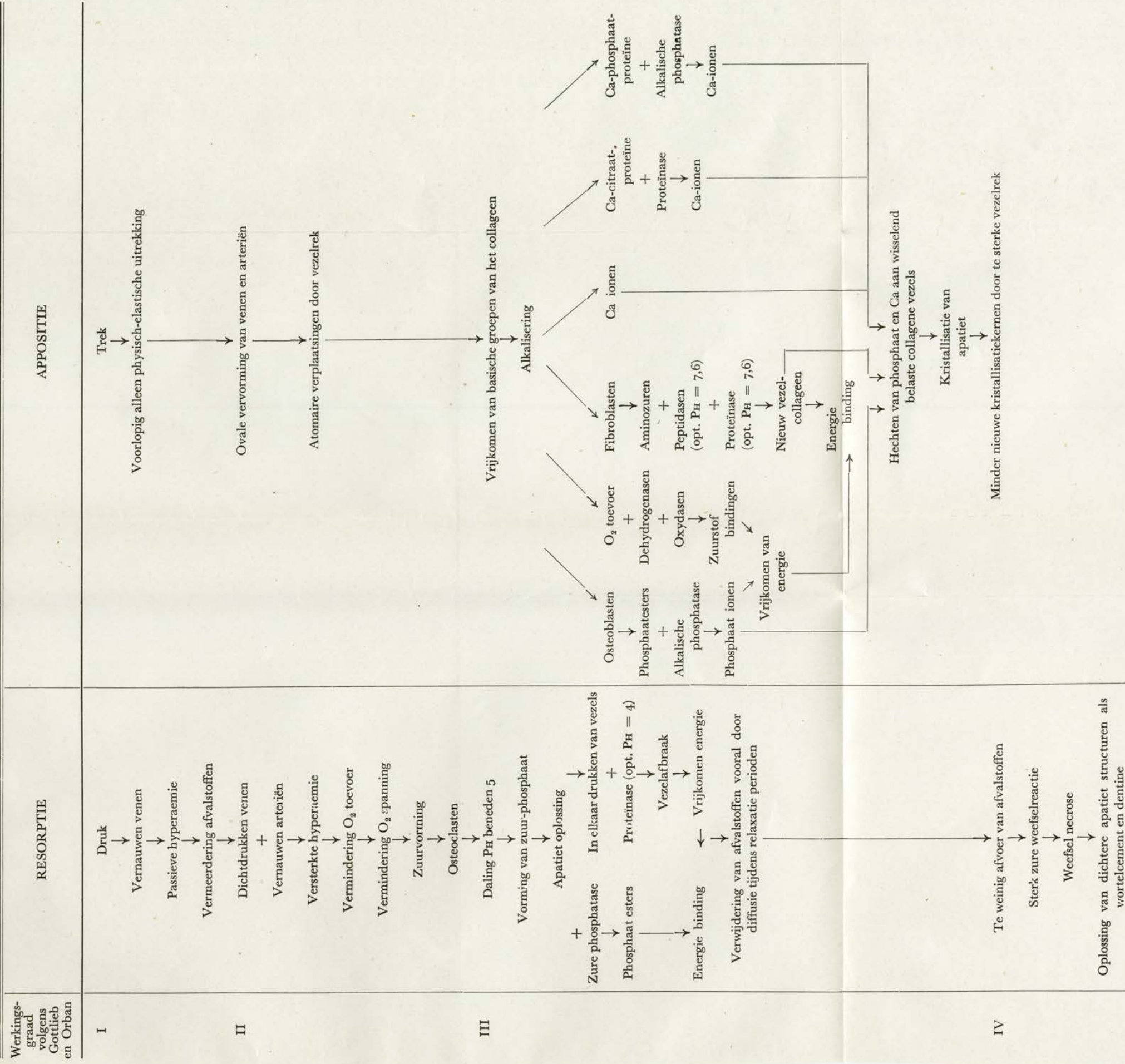


Fig. 7. Schema van de druk en trekzones bij de belasting van een tand

lijk aan de zijde tegenover het gecompriëerde weefsel. De andere ontstaat evenwel aan de drukzijde, voorbij de zone van compressie. Dit laatste gebied toch wordt gewoonlijk van de buitenzijde af gevoed en bij pressie van binnenuit treedt geen tegendruk op, die de bloedvaten dichtdrukt en aldus de voeding verstoort. De rek, die hier ontstaat, is dus te vergelijken met de buigingsrek aan de uiteinden der pijpbeenderen (fig. 7). Het bestaan van *beide* rekzones maakt in feite pas de verplaatsing van tanden in de kaken mogelijk.

Komen wij thans terug tot de ombouw van bot, onder invloed

OVERZICHT VAN HET MECHANISME VAN BEEN RESORPTIE EN APPOSITIE



van trekkrachten. Deze ombouw zou zeker niet mogelijk zijn zonder de actieve medewerking van de beencellen. In deze cellen moeten wij ons voorstellen dat de aanmaak geschiedt èn van nieuw collageen eiwit èn van grondstof voor de mineralisatie. Dit zijn twee functies, die zich „cel-chemisch” blijkbaar niet goed laten verenigen; de osteoblasten differentiëren zich dan ook in vezelvormers en producenten van grondsubstantie.

Het zal U na deze uiteenzetting gebleken zijn, dat er zeer grote verschillen bestaan tussen de gebieden in het bot, waar compressie overheerst en die, waar elastische rekspanningen ontstaan, tengevolge van uitwendige krachtwerkingen. En U zult thans begrijpen, dat er een zeer nauw verband moet bestaan tussen mechanische functie, anatomische verhoudingen, histologische structuur en fysiologisch-chemische constitutie van het beenweefsel op een bepaald moment.

De opbouw van de kennis van het bot is uitgegaan van de anatomie en het doet U misschien vreemd aan, wanneer ik hier met opzet de gecompliceerde anatomische en histologische verhoudingen op de achtergrond heb geplaatst en de nadruk heb gelegd op de fysiologisch-chemische zijde van de functionele beenstructuur. Mij dunkt evenwel, dat dit het inzicht in het vraagstuk ten goede komt. (Zie overzicht op vouwblad).

Melktandresorptie

In de geschetste gang van zaken bij de resorptie en appositie van het bot past de bespreking van aanverwante problemen. Eén hiervan is het *probleem der melktandresorptie*, dat altijd de belangstelling der orthodontisten heeft gehad en dat daarom ook in dit verband zal worden behandeld. Dit vraagstuk behelst dus het hoe en waarom van de resorptie van de melktandwortels in de kaak. Bij dit resorptieproces kunnen enige bijzonderheden worden opgemerkt, die niet als toevallige bijkomstigheden kunnen worden beschouwd.

Wij hebben dan in de eerste plaats te maken met het feit, dat resorptie voornamelijk optreedt, wanneer de blijvende tand onder of achter de wortels van de melktand aanwezig is. Het effect van de blijvende elementen op het resorptieproces komt duidelijk tot uiting door het merkwaardige verschijnsel dat de kroonvorm van het blijvende element sluit in het geresorbeerde wortelgedeelte van de melktand.

Voorts zien wij de resorptie veelal uitblijven, wanneer onder de melktand geen blijvend element aanwezig is, hetzij in geval van

agenesie, hetzij in gebitten, waar zoveel ruimte is, dat het melkelement rustig naast zijn blijvende opvolger kan blijven staan, zoals wij bij cuspidaten nog al eens zien. Op latere leeftijd kan men dan dikwijls wel een wortelresorptie aantreffen, maar dan ook juist veel in die gevallen, waar de melkelementen door een verder uitgroeien van het permanente gebit niet belast worden.

Ten tweede is het een bekend feit, dat de pulpa van een melkelement geen secundaire dentine kan vormen, een omstandigheid, die bij de conserverende behandeling van melktanden steeds voor ogen moet worden gehouden.

Ten derde zien wij in aansluiting op carieuze aandoeningen van de temporeaire elementen dikwijls gangraen optreden.

Al deze feiten kunnen worden verklaard in het licht van de hierboven in grote lijnen aangegeven theorie. Wat toch is het geval? De groeiende wortel oefent ongetwijfeld een zekere druk uit; dit is een eigenschap van alle groeiende celgemeenschappen. Men heeft misschien wel eens gehoord van de boom, die een grafzerk in tweeën splijt, als gevolg van de opeengestapelde druk door de osmotische zwelling der zich delende cellen afzonderlijk. De cellen gebruiken de vrijkomende energie der reducerende en oxyderende enzymatische reacties gedeeltelijk, om, tegen de wetten der diffusie in, bepaalde moleculen en ionen door hun celmembranen binnen te laten. Tegelijkertijd moeten echter de concentraties van osmotisch werkzame partikeltjes in het protoplasma binnen nauwe grenzen constant worden gehouden. Dit betekent osmotische zwelling, dus het gelijktijdig opslorpen van water door de cel.

Bij de groeiende tandwortel wil dat zeggen, dat er een druk wordt uitgeoefend zowel in occlusale als in apicale richting. De natuur houdt hiermede echter rekening! Apicaal wordt deze druk opgevangen in het weke kussen van de wijde pulpa, die uitkomt in het dentine-vormende orgaan, waardoor a.h.w. de druk hydraulisch in alle richtingen wordt verdeeld. Occlusaal echter wordt de druk opgevangen in de nauwe ruimte tussen de kroon van het blijvende element en de worteldentine van de melktand. Het weefsel in deze ruimte zal dus in de knel komen. De bloedvaten zullen worden dichtgedrukt op de wijze als reeds beschreven is en de voorziening van de melktandpulpa met voedende stoffen komt in het gedrang. Hieruit vloeit weer een pH-daling voort, het eerst in de nauwe weefselspleet tussen beide elementen en ook in de melktandpulpa, welke samengaat met een daling van de zuurstofspanning in dit

weefsel. Het is duidelijk, dat in een zuur reagerend pulpaweefsel de alkalische phosphatase, die bij de vorming der apatietkristallen een hoofdrol speelt, haar werking niet kan uitoefenen. En dit is dan ook de reden, dat een melktand geen secundaire dentine kan vormen. Bovendien zal er niet zo heel veel behoeven te gebeuren, of het ondervoede pulpaweefsel sterft af, waardoor de zo frequent optredende gevallen van pulpangraen worden verklaard.

Alleen reeds de pH-daling is voldoende om het apatiet van de melktandwortel op te lossen. In gevallen, waar de melktand geruime tijd zonder antagonist blijft, zal uiteraard een geringere samenpersing van weefsel tussen beide tanden optreden; wij kunnen dan waarnemen, dat de resorptie geringer is, terwijl tegelijkertijd de melktand omhoog uit de kaak wordt gedrukt.

Nu zou men hiertegen kunnen aanvoeren, dat dan ook de kroon van het blijvende element zou moeten oplossen. Hoewel dit argument ogenschijnlijk juist is, pleiten hiertegen vier punten. Uit nog niet gepubliceerde proefnemingen is mij ten eerste gebleken, dat door het veel grotere gehalte van dentine aan organische bestanddelen dit weefsel veel meer doorlaatbaar voor zuren is dan glazuur; dat bovendien het glazuur in de dalen tussen de perikymatiën, waar het membraan van Nasmyth het dikst is, minder gemakkelijk door zuren wordt aangetast. Het is dus waarschijnlijk, dat het membraan een zekere beschermende werking tegen zuren bezit. Dit hangt wellicht samen met de bufferende capaciteit van keratine, waarvan het iso-electrische punt bij een $\text{pH} = 3,5$ ligt. Een eigenschap, die het collageen niet bezit, en dit is, zoals men weet, het eiwit uit de dentine. Want het iso-electrische punt van gelatine, dat door hydrolyse uit collageen kan worden vrijgemaakt, ligt bij een $\text{pH} = 5$ of hoger, al naar gelang de soort van gelatine.

Ten derde treedt bij de inwerking van zuren een pH-gradiënt in het glazuur op, die niet alleen afhankelijk is van de uitwendige pH, doch ook van de pH in de pulpa en deze is bij het blijvende element met zijn goed gevoede pulpa zeker niet aan zure kant. In het bestaan van deze gradiënt is dus nog een factor te vinden, die de mogelijkheid van inwerking van zuren op het glazuur verkleint.

Ten vierde zijn volgens talrijke onderzoekingen op dit gebied de kristallen van de dentine kleiner in omvang dan die van het glazuur, een factor, die de aantasting door zuren in belangrijke mate beïnvloedt, daar kleine kristallen een veel groter gezamenlijk oppervlak hebben dan grote.

De kans op de oplossing van de melktandwortels zal daarom veel groter zijn dan die op de oplossing van het glazuur der blijvende elementen. Het is duidelijk, dat alle genoemde verschijnselen bij de oplossing van melktandwortels hiermede samenhangen.

Blijft nog te verklaren, waarom een melktand, die door de groei der permanente elementen buiten functie is geraakt, op den duur wordt geresorbeerd. Oplettende waarnemers zullen ongetwijfeld hebben opgemerkt, dat zulke elementen wel degelijk secundaire dentine kunnen vormen. Dit punt is in overeenstemming met de gegeven wijze van voorstelling. Dat zij tenslotte echter toch oplossen, hangt misschien samen met de werking van bepaalde chemische factoren, die in de structuur van de melktand besloten liggen en waarover wij nog niet zijn ingelicht. Maar ook het gebrek aan functie zal een factor van belang zijn. Functie toch betekent een voortdurende afwisselende vezelrek. Ontbreekt deze en laat door toevallige invloeden van moleculaire beweging de betrekkelijk zwakke binding tussen eiwit- en apatietstructuren hier en daar los, dan zal de oorspronkelijke binding niet meer hersteld worden, want de vezels contraheren. Bovendien zal het CO_2 -gehalte in het weefsel verhoogd worden en de pH zal dalen. Dit zijn alle factoren, die gezamenlijk tot een gemakkelijker resorptie kunnen voeren.

Deze uiteenzetting zal er misschien toe leiden, dat U in het vervolg meer aandacht zult besteden aan de zo interessante tandwisseling, waarbij enige schijnbaar onbetekenende factoren in werkelijkheid van groot belang zijn en soms het proces op beslissende wijze beïnvloeden.

Practische toepassingen

Nu zouden de voorafgaande beschouwingen weinig nut afwerpen wanneer zij ons niet in staat stelden, de nodige praktische gevolgtrekkingen te maken. Voorzover dit de orthodontische practijk betreft, laat ik hier enige van de meest belangrijke conclusies volgen:

Conclusie 1. Uit het bovenstaande volgt, dat voor beenvervormingen, en dus voor verplaatsing van tanden, de gunstigste verhoudingen ontstaan bij afwisseling van verschillende drukintensiteiten. Dit is in de practijk al lang bekend, doch de praktizerende orthodontisten slaan er vaak nog te weinig acht op. Genoemde afwisseling is niet alleen gunstig voor de afvoer van voor het weefsel schadelijke stoffen in de drukzone, maar bovendien vergroot het de kansen op een gunstige afstemming tussen de actieve groepen van

het hydroxyl-apatiet en het collageen. De dientengevolge verhoogde beenvorming in de trekzone zal verkortend werken op de tijd, die voor de retentie benodigd is.

De tegenwerping, dat de zuurgraad in het weefsel der drukzone in de periodes van verminderde druk niet gehandhaafd blijft, wordt geneutraliseerd door het feit, dat tijdens de pauzes in de afbraak, de afbraakproducten worden verwijderd en gunstige voorwaarden worden geschapen voor een hernieuwde aanval. Tijdens iedere campagne heeft een leger periodes van respijt nodig om de verbindingswegen te herstellen en de eenmaal ingenomen stellingen te consolideren.

Conclusie 2. Zoals men weet, zijn er twee soorten van orthodontische tandbewegingen mogelijk, ten eerste de kippende beweging en ten tweede de evenwijdige verplaatsing, de z.g. „bodily movement”.

Men heeft proeven genomen om na te gaan, hoe de kracht, die op de tanden wordt uitgeoefend, zich over de tandkas verdeelt. Zo heeft men modellen gemaakt, waarin de tanden elastisch opgehangen waren en onderzocht, welke gebieden van compressie er optreden in het bot. Zeer vernuftig zijn in dit opzicht de proeven van Zák, die een doorsnede van de tandkas maakte in doorschijnend kunsthars, de tand belastte en het geheel tussen een paar gekruiste polarisatiefilters plaatste, waardoor hij aan de kleurveranderingen de spanningsmaxima in het kunsthars kon observeren. Duidelijk is hierbij naar voren gekomen, dat bij de gewone kippende beweging het draaipunt gewoonlijk niet halverwege de tandkas in de tandwortel komt te liggen, doch apicaalwaarts wordt verschoven. De verklaring van deze verschuiving is te zoeken in de extra weerstand, die optreedt aan de apex door het weefsel om de wortelpunt.

Wanneer wij nu op een schematische voorstelling enerzijds het verband tussen de grootte der compressie en de optredende reactiekrachten en anderzijds het verband tussen de weefselrek en de elastische spanning nagaan, dan komen wij tot een merkwaardig krachtenbeeld, dat in vele opzichten afwijkt van de reeds jaren in de tandheelkunde ingeburgerde voorstelling van Schröder. Wij zien ten eerste, dat de ruimteverandering in de periodontale spleet bij compressievermindering niet lineair afneemt, omdat het draaipunt in de as van de wortel ligt. De volumewijziging in de periodontale spleet neemt coronairwaarts en apicaalwaarts van het draaipunt

in sterker mate toe. Ten tweede spreekt het feit mede, dat bij trek de uitrekking van het weefsel tot een zeker optimum vrijwel lineair evenredig is met de ter plaatse werkzame trekkracht, terwijl bij sterke druk juist de samenpersing relatief geringer is dan bij zwakke druk, omdat eerst de grotere ruimten in het weefsel worden dichtgedrukt (fig. 8).

In totaal zijn de reactieve krachten, die in ieder punt gelijk moeten zijn met de actieve krachten, over het worteloppervlak ver-

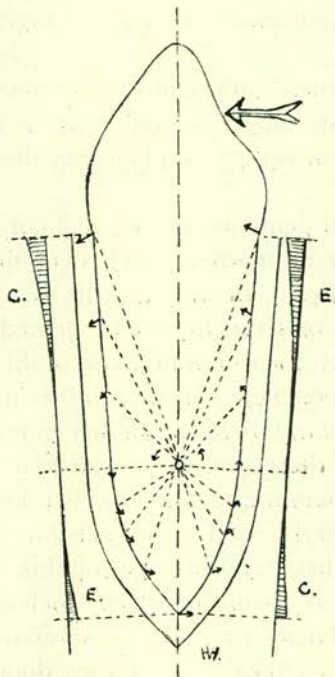


Fig. 8. Schema van de graad van compressie en tensie in verschillende partijen van het periodontium bij een kip-beweging. C = samendrukking, E = elastische rek

deeld als bij benadering in bijgaande schema's is aangegeven, die voor zichzelf spreken. E stelt de relatieve ruimtetoename in de trekzones voor en C de relatieve afname in de drukzones. F_E stelt de reactiekracht in de trekzones en F_C die in de drukzones voor. F_T is de totale reactiekracht, die de wortel ondervindt en die is geprojecteerd op de tandwortel!

Het is duidelijk, dat de compressiekracht (= reactiekracht) coronairwaarts groter is dan aan de tegenovergestelde apicale

zone, zodat aan de tandhals bij druk eerder resorptie zal optreden. Hierbij dient evenwel in aanmerking te worden genomen, dat de wortels gewoonlijk apicaalwaarts versmallen, zodat dit de invloed der compressiekracht in de apicale zones weer iets doet

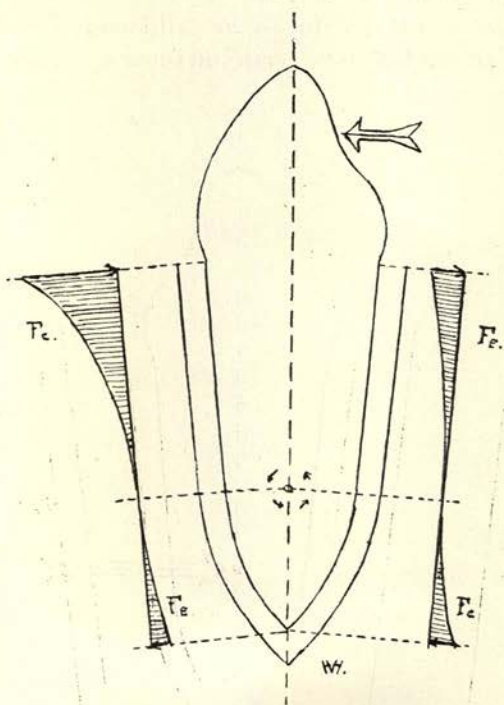


Fig. 9. Schema van de verdeling van de reactiekrachten over de zones van druk en trek in het periodontium. Opgemerkt dient, dat de reactiekracht bij toenemende volumevermindering door compressie relatief veel sterker toeneemt dan de reactiekracht bij eenzelfde procentuele volumevergroting door trek. In combinatie met fig. 7 komt men zo tot het bovenstaande schema, waarin F_c de reactiekrachten bij samendrukking en F_e de reactiekrachten bij rek voorstellen

toenemen. In werkelijkheid ligt dus de toestand voor apicale drukresorpties iets gunstiger.

Vergelijkt men nu de totale reactiekracht van een tand, die volgens het principe der „bodily movement” wordt verplaatst, met de reactiekracht die ontstaat, wanneer een tand wordt gekipt, dan blijkt uit de figuur overduidelijk, dat de eerste vele malen groter moet zijn dan de tweede (fig. 9-11).

Hoewel de hier geschetste gedachtengang niet in extenso is uitgewerkt, zal het U toch duidelijk zijn, hoe moeilijk het in werkelijk-

heid moet zijn, een tand evenwijdig te verplaatsen. *Proeven tonen aan, dat voor „bodily movement” ongeveer een zes maal zo grote kracht nodig is als voor een kippbeweging, reden waarom ik meen, hier de misschien revolutionnaire stelling te kunnen poneren, dat een werkelijke „bodily movement” vrijwel onmogelijk is uit te voeren.*

Op deze wijze wordt ons dus de mogelijkheid geboden om twee volkomen gelijke tanden, b.v. eerste incisieven, door een geschikte

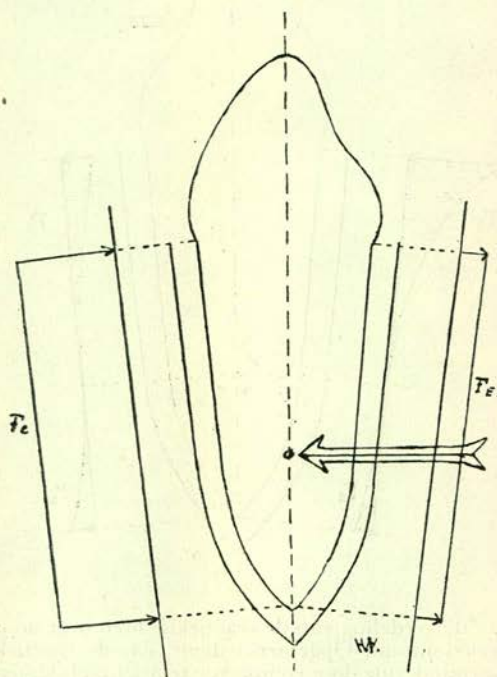


Fig. 10. Schema van de verdeling van de reactiekrachten bij een eventuele bodily movement

keuze van kracht en een juiste wijze van aangrijping zodanig uit elkaar of naar elkaar toe te drijven, dat de ene blijft staan en de andere gaat kippen. Voorts vinden wij hier een nieuwe grondslag om de altijd zo moeilijke eenzijdige expansie uit te voeren, over de gehele kaakhelft tegelijk. De hiervoor benodigde apparatuur zal ik thans niet bespreken, daar dit onderwerp buiten het kader van deze bespreking valt.

Uitdrukkelijk wil ik er nog eens de aandacht op vestigen, dat dus het principe van een dergelijke behandeling berust op het feit, dat

pas boven een bepaalde krachtwerking resorptie begint en dat beneden deze kritische spanning de zuurgraad in het weefsel niet voldoende daalt om het been tot oplossing te brengen.

Conclusie 3. Er is geen bepaalde grootte van kracht aan te wijzen, die biologisch of, zo U wilt, onbiologisch is. De overgrote meerderheid der aangewende krachten in de orthodontie is onbiologisch,

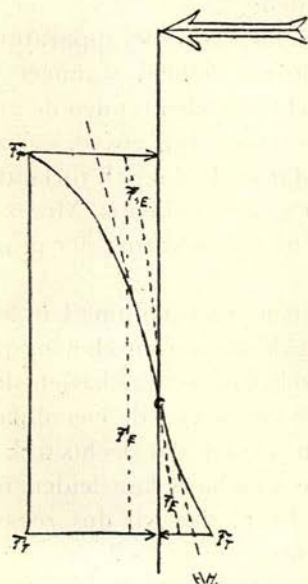


Fig. 11. Vergelijking van de reactiekrachten bij een kip-beweging en bodily movement. Om een vergelijking mogelijk te maken is de maximale reactiekracht gelijk aan die compressiekracht gekozen, welke juist een beenoplossing begint te geven, die dus in het weefsel een p^H veroorzaakt, welke beneden 5 ligt.

De curven F_t stellen de totale kracht voor, verdeeld over de lengte van de tand. Men ziet uit de figuur, dat de kracht, die door een apparaat op de tandkroon moet worden uitgeoefend om resorptie te verkrijgen kan worden gevonden door integratie van deze curven. Bovendien is het zonder meer duidelijk, dat de totale kracht die voor bodily movement nodig is, vele malen groter is dan die voor een kip-beweging

alleen reeds door de tijd van inwerking. Wanneer men de z.g. biologische krachten in de orthodontie definieert als krachten, die niet tot een weefselnecrose of tot een tandresorptie leiden, dan kan men zeggen, dat de uiterst toelaatbare kracht afhankelijk is van de weefselelasticiteit, zowel van het bot als van de vaatwand, van de bloeddruk in de capillairen en van de stofwisselingsactiviteit van het weefsel.

Ten tweede is de kracht, vallende binnen de tolerantie van het

bot, afhankelijk van de wijze van aangrijpen van de apparatuur.

Ten derde is deze tolerantie afhankelijk van de tijd van aanwending en het interval van onderbreking. Zo zal deze kracht geheel anders kunnen zijn bij losse apparaten dan bij vastzittende apparatuur. Bij voldoende onderbreking zullen de afbraakproducten genoegzaam met de bloedstroom worden verwijderd en zal er minder spoedig necrose optreden.

Het meten van krachten, die de apparatuur op de tanden uitoefent, is dus een zinloze bezigheid, wanneer zij ten doel heeft vast te stellen, of deze krachten vallen binnen de grenzen van het biologisch toelaatbare. Hier toch zijn zóveel variabele en onmeetbare factoren in het spel, dat de biologisch toelaatbare kracht voor een individueel geval niet vast te stellen is. Men zal zich daarom voorlopig moeten redden met de ervaring der practijk en een vaktechnische feeling.

Conclusie 4. Slechts een vezelspanning kan leiden tot de appositie van bot. Nu is het uit de besproken klievingsproeven wel duidelijk geworden, dat de vezels van de tandkassen slechts aan de apex in verband staan met de vezels van de eigenlijke kaakbasis. Uit hetgeen verder besproken is volgt, dat slechts trek aan, of buigbelasting van de vezels van de kaakbasis kan leiden tot een intermediaire appositie van nieuw been, dat wil dus zeggen tot een appositie buiten het groeicentrum van de kaak om. Deze trek kan door de kيبbewegingen van de tanden nauwelijks worden uitgeoefend en dit zijn toch de bewegingen, die door de meeste apparaten tot stand gebracht worden. Dit verklaart de mening van velen, n.l. dat de kaakbasis door de beweging der tanden niet kan worden vergroot. Zij, die een apparatuur gebruiken, die een evenwijdige verplaatsing tot stand brengt, huldigen misschien een andere mening.

Want zodra dit laatste het geval is en de vezels der tandkassen voldoende in de basis uitstralen, moeten de spanningen op de basis worden overgebracht en zal een tandbeweging, zij het dan in beperkte mate, moeten leiden tot een verandering in de basis. Of deze verandering echter blijvend is, zal niet alleen afhangen van de functionele krachten, die tijdens de kauwactie door de tanden worden uitgeoefend en als buigspanningen op de kaken worden overgebracht. Zij zal in eerste instantie afhangen van de buigspanningen, die door de spierwerking op de kaken wordt uitgeoefend, want het zijn de spierspanningen, die nagenoeg geheel het vezelverloop in de kaken bepalen. Voor men echter van geval tot geval een oor-

deel kan geven, zullen eerst meer de finesses van het verband tussen de aangrijping der spieren en het verloop van de vezels in de kaken moeten worden bestudeerd.

Bij een „bodily movement” zal dus de kaakbasis in vorm wel enigermate te wijzigen zijn; of hierbij op een blijvend resultaat gehoopt mag worden, hangt van allerlei factoren af, zoals spierspanningen hun aangrijping en uitwerking op het kaakstelsel. Onze huidige kennis vermag echter deze factoren in hun samenhang nog niet te overzien.

Bovenstaande beschouwingen over de fundamentele problemen van de orthodontie, die in sommige opzichten van de traditionele opvattingen afwijken, hebben ten doel, aan te tonen, dat dit onderdeel der tandheelkunde is gebouwd op de specifieke karakteristika van de eiwit-apatiet-structuren van het bot. Ik meen dan ook, dat een grondige kennis van deze structuren een vereiste is voor de praktizerende orthodontist, daar zij voor de praktijk nieuwe perspectieven opent. Teneinde deze beschouwingen niet te ingewikkeld te maken, heb ik afgezien van de vermelding van talrijke technische details. Voor een dieper inzicht in de hier gegeven oordelen zijn deze echter feitelijk onontbeerlijk.

SAMENVATTING

A. Algemene theoretische beschouwing:

1. De fundamentele van de tandheelkunde en haar specialismen liggen in de fysiologisch-chemische veranderingen van de eiwit-apatiet-structuren der weefselementen in het kaakstelsel.

B. Bijzondere theoretische beschouwing:

2. De bloedvaten in het weefsel ondergaan bij druk andere vormwijzigingen dan bij trek. In het eerste geval kunnen de bloedvaten geheel worden dichtgedrukt, terwijl zij bij trek altijd enigszins open blijven.
3. De beenoplossing geschiedt in eerste instantie niet door de specifieke werking der osteoclasten, maar door daling van de pH in de drukzone.
4. De vezelvorming in het bot geschiedt niet, zoals wel eens wordt aangenomen, intracellulair, doch zeer waarschijnlijk extracellulair.
5. De mineralisering van het bot is in hoge mate afhankelijk van de mechanische rek der eiwitvezels.
6. De wortelresorptie der melkelementen geschiedt hoofdzakelijk door de groeidruk van het blijvende element eronder.

C. Practische gevolgtrekkingen:

7. Bij mechanische belasting der tanden is een afwisseling van de periodes van druk door periodes van relaxatie noodzakelijk voor een snelle en doeltreffende verplaatsing der elementen.
8. De minimale drukkracht op een element, die nog juist een beenresorptie teweegbrengt, is, behalve van bepaalde individuele factoren, afhankelijk van de wijze van aangrijpen der krachten (kippen of bodily movement).
9. De maximaal toelaatbare drukkracht, die niet tot weefselnecrose of wortelresorptie leidt, wordt bepaald door individuele factoren en de aangrijpingswijze der krachten, uitgeoefend door de apparatuur.
10. Een eventuele vervorming van de kaakbasis zal slechts kunnen geschieden door middel van de zeer moeilijk uit te voeren „bodily movement”; het blijvend resultaat der vervorming zal afhangen van de spierspanningen en hun aangrijping op de kaken.

SUMMARY

A. General theoretical view:

1. The foundations of dentistry and its special branches lie in the physiological-chemical changes in the protein-apatite-structures of the tissue elements in the jaw-system;

B. Special theoretical view:

2. The form-changes caused to blood-vessels in the tissue by pressure are different from those caused by tension. In the first instance the blood-vessels may be entirely closed, while in the case of tension they always remain partially open;

3. Dissolution of bone is caused in the first instance, not by the specific working of osteoclasts, but the lowering of the pH in the pressure-zone;

4. Fibre-forming in the bone does not occur, as is often supposed, intracellular, but most probably extracellular;

5. The mineralization of the bone is dependent to a high degree upon the mechanical stretching of the protein-fibres;

6. The root-resorption of the temporary teeth is caused chiefly by the pressure exerted by the permanent-teeth underneath;

C. Practical conclusions:

7. In the case of mechanical pressure on the teeth it is necessary to alternate the periods of pressure with periods of relaxation in order to obtain a quick and satisfactory movement of the teeth;

8. The minimum pressure on a tooth which will precisely cause bone-resorption, is, except for particular individual factors, dependant on the method of applying the forces (tilting or bodily movement);

9. The maximum admissible pressure, which will not entail necrosis of tissue or root-resorption, is decided by individual factors and by the method of exerting the pressure by the apparatus;

10. An eventual remodelling of the jaw-basis can only be brought about by means of the extremely difficult „bodily movement”; the lasting result of the deformation will depend on the tension of the muscles and their hold upon the jaws.

RÉSUMÉ

A. Considération théorique générale:

1. Les fondements de l'odontologie et de ses spécialismes sont constitués par les changements physiologico-chimiques des structures de protéine-apatite des éléments tissulaires du système maxillaire.

B. Considération théorique spéciale:

2. Les vaisseaux sanguins du tissu subissent des modifications morphologiques différentes selon qu'il y a pression ou traction. Dans le premier cas, les vaisseaux sanguins peuvent être complètement fermés, tandis que s'il y a traction ils peuvent rester quelque peu ouverts.

3. L'ostéolyse ne se produit pas en première instance par suite de l'action spécifique des ostéoclastes, mais par suite de l'abaissement du pH dans la zone de pression.

4. La formation de fibres dans l'os ne se produit pas, comme on l'admet quelquefois, intracellulairement, mais très vraisemblablement extracellulairement;

5. La minéralisation de l'os dépend fortement de l'étirage mécanique de la trame protéique;

6. La résorption des éléments de lait est produite principalement par la pression de croissance de l'élément permanent qui se trouve au dessous.

C. Conclusions pratiques:

7. En cas de charge mécanique des dents, une alternance de périodes de pression et de périodes de relaxation est nécessaire quant à un déplacement rapide et efficace des éléments.

8. La force minimale de pression exercée sur un élément et capable de provoquer tout juste encore la résorption d'un os, dépend, non seulement de certains facteurs individuels, mais aussi du mode d'intervention des forces (basculement ou „bodily movement”);

9. La force maximale admissible, celle qui ne conduit point à la nécrose tissulaire ou à la résorption de la racine, est déterminée par des facteurs individuels et par le mode d'intervention des forces exercées par l'appareil.

10. Un changement éventuel de la forme de la base de la mâchoire ne peut se produire qu'au moyen du „bodily movement”, lequel est très difficile à exécuter; la permanence du résultat du changement de forme est dépendante des tensions musculaires et de leur prise sur la mâchoire.

ZUSAMMENFASSUNG

A. Allgemeine theoretische Übersicht:

1. Die Grundlage der Zahnheilkunde und ihrer Spezialgebiete beruht auf der physiologisch-chemischen Veränderung der Eiweiss-Apatit-Struktur im Kiefer-Gewebe;

B. Besondere theoretische Übersicht:

2. Die Blutgefäße im Gewebe erfahren eine andere Formveränderung beim Druck als beim Zug. Im ersten Falle können die Gefäße vollkommen zusammengedrückt werden, während sie im zweiten Falle immer etwas offen bleiben.

3. Die Resorption des Knochens entsteht in erster Linie nicht durch die spezifische Wirkung der Osteoklasten, sondern durch Verminderung des pH in der Druckzone.

4. Die Faserbildung im Knochen entsteht wahrscheinlich nicht intrazellulär, wie man wohl zum Teil annimmt, doch sehr wahrscheinlich extrazellulär.

5. Die Mineralisierung des Knochens ist weitgehendst abhängig von der mechanischen Beanspruchung der Eiweissfasern.

6. Die Wurzelresorption des Milchgebisses entsteht vor allem durch den Wachstumsdruck der unter ihr liegenden bleibenden Elemente.

C. Praktische Schlussfolgerungen:

7. Bei mechanischer Inanspruchnahme der Zähne ist nach einer Druckperiode eine Ruhepause notwendig, damit die Elemente schnell und zweckmässig verschoben werden können.

8. Der geringste Druck der gerade noch eine Knochenresorption verursacht, ist nicht allein abhängig von bestimmten individuellen Faktoren, sondern auch vom Angriffspunkt der Kräfte (Kippen oder "Bodily Movement").

9. Die maximal zulässige Druckkraft, die nicht zur Gewebenekrose oder Wurzelresorption führt, wird von den individuellen Faktoren und der Angriffsform der von der Apparatur ausgeübten Kräfte bestimmt.

10. Eine eventuelle Deformierung der Kieferbasis kann nur mittels des sehr schwer auszuführenden „Bodily Movement“ geschehen. Das bleibende Ergebnis der Deformierung dürfte von der Muskelspannung und ihrem Ansatz am Kiefer abhängen.

ENKELE LITERATUURBRONNEN

1. Bauer, W.: Z. f. Stom. Afl. 3, 1925.
2. Benninghoff, A.: Parodontium, Afl. 3, p. 50, 1934.
3. Brandenberger, E., Schinz, H. R.: Über die Natur der Verkalkungen etc. Basel, 1946.
4. Corey, R. B.: Chem. Rev. Vol. 26, p. 227, 1940.
5. Dallemagne, M. J.: Nature, p. 115, 1948.
6. Eisenberger, S., Lehman, A., Turner, W. D.: Chem. Rev. Vol. 26, p. 275, 1940.
7. Ericsson, Y.: Act. Odont. Scand., Vol. 8, suppl. 3, 1949.
8. Frey-Wyssling, A.: Submicroscopic morphology of protoplasm and its derivatives, N. York-Amsterdam, 1948.
9. Holt, L. E., La Mer, V. K., Chown, H. B.: J. Biol. Chem. Vol. 64, p. 509, p. 567, 1925.
10. Kahn, Fr.: Das Leben des Menschen, Cosmos Verlag, Stuttgart.
11. Katz, A.: Vjschr. Zahnh., No 47, p. 85, 1931.
12. Korkhaus, G.: Moderne orthodontische Therapie, Berlin, 1937.
13. Kramer, B., Shear, M. J.: J. Biol. Chem., Vol. 79, p. 147, 1928.

14. Kramer, B., Shear, M. J., Siegal, J.: J. Biol. Chem. Vol. 91, p. 271, p. 723, 1931.
15. Leicester, H. M.: Biochemistry of the teeth, St. Louis, 1949.
16. Loos, S.: Z. f. Stom., p. 75, 1948.
17. Mühletaler, K.: Biochem. et Phys. Act., Vol. 3, p. 527, 1949.
18. Polonovski, M., Cartier, P.: Bull. Soc. Chim. Biol., Vol. 28, p. 242, 1946.
19. Rauber-Kopsch: Anatomie des Menschen, Dl 2, Leipzig, 1919.
20. Rozsa, G., Szent-Györgyi, A., Wyckoff, R. W. G.: Biochem. et Phys. Act., Vol. 3, p. 527, 1949.
21. Schröder, H.: Deutsche Z. Wschr. Afl. 5, 1930.
22. Wolff, J.: Arch. f. Anat. u. Phys. Suppl. Vol. 1901.
23. Winkler, R.: Z. f. Stom. Afl. 19, p. 401, 1921.
24. Zák, B.: Deutsche Z. M. K. Afl. 3, p. 161, 1938.
25. Zeigr, K.: Paradentium, Afl. 1, p. 1, 1933.