

Ir H. van Uchelen

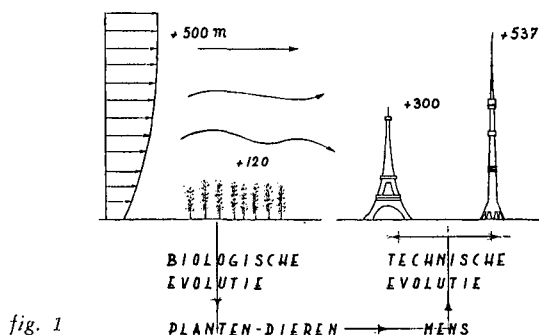
De levende natuur in strijd tegen zwaartekracht en wind

Inleiding

De orkaan die in de nacht van 12 op 13 november j.l. over ons land raasde, vernietigde miljoenen bomen. Door de wind werden ze ontworteld of gebroken en met behulp van de zwaartekracht tegen de grond gesmakt. Even werden we ons weer bewust van de meedogenloze strijd die de levende natuur voert tegen de natuurkrachten.

In onderstaande beschouwingen wordt allereerst de oorsprong van deze strijd opgespoord. Daarna wordt de schijnbare kracht van insecten ontmaskerd en de sterke overeenkomst van hout (en bot) met gewapend beton verklaard.

Beton is een steenachtig bouw materiaal dat goed druk kan opnemen, maar tegen trekkrachten moet worden gewapend met stalen staven. De microscopische structuur van hout is overeenkomstig. Hout en gewapend beton zijn zg. gewapende materialen die door de levende natuur en de techniek met enorm succes worden gebruikt om machtige betonconstructies te realiseren, die de natuurkrachten kunnen weerstaan (fig. 1, links: bomen, rechts: televisietoren in Moskou).



Dr J. J. Willemse heeft in *Natura* van september 1970 reeds gewezen op de merkwaardige overeenkomst tussen betonskeletten en beenbalkjes. Dit betrof poreuze botgedeelten die behalve een dragende ook een ruimtelijke functie hebben waardoor ruimtevakwerken ontstaan. Trouwens ik moet met nadruk stellen dat de titel van mijn artikel een veel groter gebied bestrijkt dan er in wordt behandeld. Over de vormgeving bijvoorbeeld wordt nauwelijks gesproken. Zo laat een rietstengel of een spinnenweb weer geheel andere facetten van het onderwerp zien.

Zwaartekracht en wind

Dit zijn twee belangrijke natuurkundige grootheden (natuurkrachten) in de levensomstandigheden. Er zijn vele andere natuurkundige grootheden die op het leven inwerken

en de loop van de ontwikkeling bepaald hebben, zoals temperatuur, luchtdruk, straling, enz.

Wat de zwaartekracht is, weten we niet. Op 't ogenblik is het, wetenschappelijk geformuleerd, 'een kromming in het vierdimensionale continuüm'.

Wind is een stroming van de lucht. Door de wrijving met de aardkust ontstaat in de onderste lagen van de atmosfeer, tot ongeveer 500 m hoogte, een turbulente stroming.

De levende natuur

Hieronder wordt alles verstaan wat leeft: de planten, de dieren en ook de mens. Hierbij moet eveneens uitdrukkelijk gerekend worden de menselijke techniek, met zijn bouwwerken en gewapend-betonconstructies. Ik zal dit laatste nog nader toelichten en wijs er hier alleen op dat bij de strijd tegen wind en zwaartekracht de planten (bomen) en dieren (draagskelet) gebruik moeten maken van dezelfde materiële middelen als de mens. Tussen organische en anorganische stoffen bestaat in principe geen verschil.

Voor een goed begrip van de levende natuur is het van belang om de gedachte van de biologische evolutie centraal te stellen. Deze doet het leven zien als een groot organisme dat zich in de tijd ontplooit. Evolutie betekent ontplooiing, zoals bijvoorbeeld de evolutie van het gewapend beton. Deze is een deel van de technische evolutie, die weer de sociale evolutie van de mens bewerkt.

Strijd

Bij beschouwing van de strijd van de levende natuur tegen zwaartekracht en wind dient men allereerst vast te stellen dat het leven gedurende de biologische en technische evolutie zo is aangepast aan deze natuurkrachten, dat meer van een benutting dan van strijd sprake lijkt. Ja, zonder zwaartekracht en wind is het aardse leven nagenoeg ondenkbaar. Zonder wind is er geen bestuiving van grassen en granen, zijn er geen zeilschepen, windmolens, enz.

Planten maken gebruik van de zwaartekracht om hun stengel omhoog te steken en hun wortels naar beneden in de grond: negatief resp. positief geotropisme (fig. 2). Een plantje dat ontkiemt uit een zaadje in een ruimteschip gaat spoedig dood.

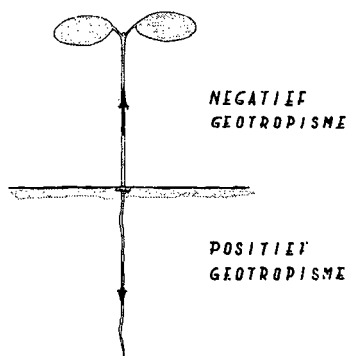
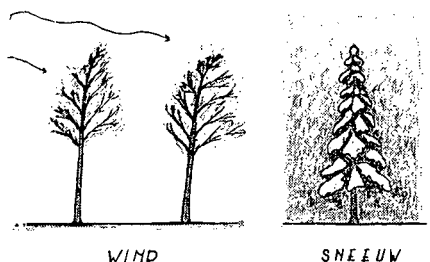


fig. 2



BOOM: CONSTRUCTIEVE CODE IN CEL
MENS: BETONVOORSCHRIFTEN
TOEGEPASTE MECHANICA

fig. 3

Maar er is wel degelijk ook een zware strijd tegen zwaartekracht en wind. En dan denk ik aan een grote boom (bouwwerk) in de storm of met een sneeuwlast (fig. 3). De boom stelt zich hiertegen te weer door tijdens zijn groei gebruik te maken van zijn erfelijke constructieve vermogens die in de cellen in een chemische code zijn opgeslagen. Analoo

hiermee voert de betonconstructeur een strijd om met een minimum aan bouwmaterialen en arbeidskrachten de natuurkrachten te weerstaan bij het voldoen aan bepaalde functionele eisen. Hij gebruikt daarbij ook rekencodes.

Toch bedoel ik met de strijd van de levende natuur tegen wind en zwaartekracht vooral nog iets geheel anders. Daarbij baseer ik me op Teilhard de Chardin, een Franse jezuïet, beroemd paleontoloog, die er sterk op heeft gewezen dat de biologische evolutie een richting vertoont - ongetwijfeld tastenderwijs - naar steeds grotere ingewikkeldheid en tenslotte naar de hersenen en het menselijke bewustzijn (*fig. 4*). Grotere ingewikkeldheid

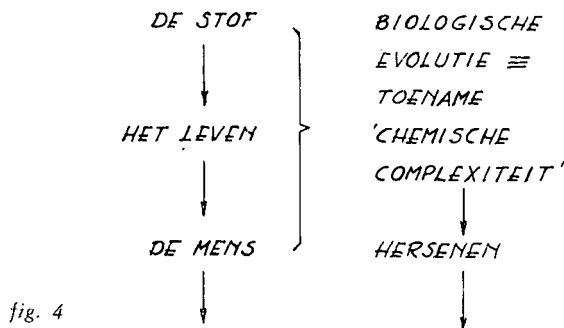


fig. 4

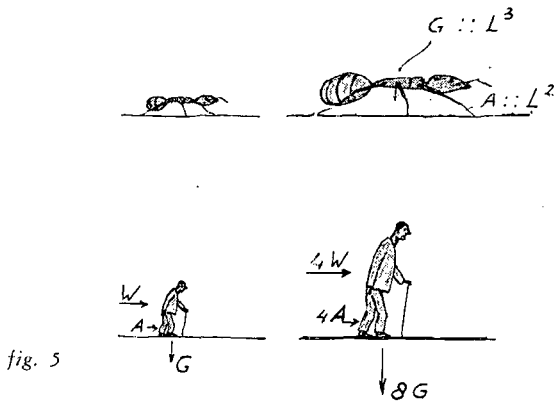
betekent echter groter volume en groter gewicht, en daarbij ontstaat een verbeterd strijd tegen de zwaartekracht. De biologische evolutie is boordevol met voorbeelden. De olifant met 5 ton gewicht, de brontosaurus - een reptiel - met 40 ton, bomen van 120 m hoogte. Ten gevolge van rigoureuze natuurwetten gaat dat niet zo maar. Het is weer Teilhard de Chardin geweest die er op heeft gewezen dat ten gevolge van natuurkundige omstandigheden, zoals grote zwaartekracht, de complexiteit van het leven er niet in zou kunnen slagen die waarde te bereiken waaraan een graad van bewustzijn beantwoordt, met andere woorden de mens te scheppen. Op onze planeet is dat inderdaad maar nauwelijks gelukt. Op weg naar zijn grenzen maakt de biologische evolutie gebruik van zijn scherpste wapenen, alle mogelijke chemische en natuurkundige methoden. Ik zal u dat laten zien. De impuls voor deze laatste strijd ligt dus verborgen achter de biologische evolutie. Welke religie of filosofie hierbij wordt aanvaard doet er niet toe.

Niet alleen de biologische evolutie construeert tot zijn uiterste grenzen, maar ook de mens, voortgekomen uit die evolutie, is blijkbaar met alle drijfkrachten nog onverzwakt werkzaam. Nergens is de strijd van de constructeur tegen wind en zwaartekracht duidelijker gedemonstreerd dan in de evolutie van de bruggenbouw. Maar ook bij gebouwen is enorme strijd geleverd: toren van Babel, gotische kathedralen, Eiffeltoren (1889, 300 m), Empire State Building (1931, 381 m), televisietoren in Moskou (1970, 537 m). Er is in mijn hele betoog wat eenzijdig de nadruk gelegd op het grote, het spectaculaire. Echter analoog hiermee is de strijd voor een meer economisch materiaalgebruik bij het alledaagse. Hierbij kan men aan Darwin denken, aan de natuurlijke selectie in de strijd om het bestaan.

Een probleem van reuzen

Het is echter nog steeds niet duidelijk geworden waardoor de grenzen eigenlijk ontstaan. De zwaartekracht lijkt zo ogenschijnlijk nauwelijks een gevaarlijk tegenstander. Toch zit iets dieper een enorme belemmering voor het leven, in zijn streven steeds grotere planten en dieren - of ook bouwwerken - te realiseren.

Er is reeds ongeveer anderhalve eeuw geleden in een studie over de bouw van insecten op gewezen dat de kracht van een spier, evenals de sterkte van een touw of staaldraad, evenredig is met het oppervlak van de dwarse doorsnede ervan. Wordt een dier groter, dan neemt zijn gewicht toe in de derde macht; de spierdoorsnede echter, dus spierkracht, in het kwadraat van de lineaire afmeting. Hetzelfde geldt voor de draagkracht van zijn skelet. Met andere woorden, de krachten per oppervlakte-eenheid (spanningen) nemen evenredig toe of af met de lineaire afmetingen. Dit is een eenvoudige schaalwet. Daardoor gaat bij grote dieren de zwaartekracht een belangrijke invloed op de bouw van het lichaam uitoefenen. Een sterke vent kan zijn eigen gewicht nóg eens van de grond tillen, een olifant kan dat lang niet, sommige insecten wel honderden malen.



Laten we de mens eens 2 maal zo groot denken (*fig. 5*). Zijn gewicht is dan 8 maal zo groot geworden; de doorsnede van zijn spieren en botten slechts 4 maal. De spanningen door de zwaartekracht worden dus het dubbele. De spanningen bij deze vergrote mens kunnen blijkbaar worden berekend door een normale mens te plaatsen in een dubbel zwaartekrachtsveld. Andersom is het alsof een kind dat half zo groot is als een volwassene, zich slechts in een half zwaartekrachtsveld bevindt en zuigelingen in een kwart van het normale veld.

In feite ondergaat de mens bij zijn groei naar volwassenheid een sterk toenemen van het zwaartekrachtsveld tot een uiterst drukkende hoogte. Metafysica, mystiek en magie in de bouwkunst hangen hier nauw mee samen.

Wat geldt voor reuzen in het planten- en dierenrijk geldt ook voor de reuzen bij onze bouwconstructies. Bij schaalvergroting nemen de spanningen evenredig toe. De winddruk is niet zo ernstig, doordat deze evenredig is met het oppervlak, niet met de inhoud. Wel neemt hij op grotere hoogte sterk toe, echter minder dan evenredig.

De grenzen die de schaalwet stelt, kunnen worden verschoven door verandering van de constructievormen - zoals dat bij de dieren sterk het geval is - en verder door toepassing van sterkere en stijvere bouwmaterialen.

Vermogens van insecten

Om zeer verbreide misverstanden weg te nemen, moeten we nog even tot de insecten terugkeren. Wat men doet bij het praten over de verbijsterende vermogens van insecten, zoals vlooien wat betreft kracht en spronghoogte, is dat wij deze beesten op onze eigen menselijke grootte denken. Daar is geen bezwaar tegen mits dan de zwaartekracht evenredig wordt verminderd zoals de schaalwet eist. Een mier of vlo van 2 mm bijvoorbeeld,

die op menselijke grootte wordt gebracht, moet worden gedacht in een zwaartekrachtsveld van $\frac{1}{1000}$ g.

In feite is niet de mier maar de mens verbijsterd sterk. Een mier van onze grootte zou 1000 maal grotere spanningen ondergaan en door de zwaartekracht waarschijnlijk dood worden gedrukt. De mens overleeft dat, echter niet zonder lasten waaraan we overigens zó gewend zijn dat we het meestal niet opmerken. Ik denk wel eens aan het variétnummer dat ik zou kunnen leveren in een zwaartekrachtsveld van $\frac{1}{1000}$ g. Alle tonnen worden kilogrammen in het gereduceerde zwaartekrachtsveld. Een brontosaurus en een olifant wegen dan bij elkaar niet meer dan $40 + 5 \text{ kg} = 45 \text{ kg}$, een gewicht dat wij allemaal nog wel omhoog kunnen brengen (fig. 6). Als we dit beeld vergelijken met wat wij echt kunnen, dan is duidelijk dat de mens aardig tegen de grens zit. Men kan zich afvragen waarom wij dan niet wat kleiner zijn gemaakt. Maar - afgezien van het gevaar - duizend maal kleiner betekent duizend miljoen maal minder hersencellen en er zou niets overblijven van de fijne structuur van onze hersenen, speciaal in de hersenschors.

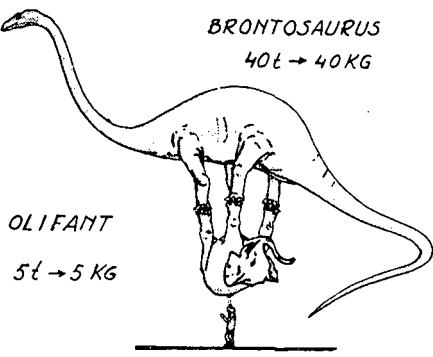


fig. 6

	MOEDER MATERIAAL	WAPENING
GEWAPEND BETON	CEMENT- BETON	STAAL
GEWAPEND KUNSTSTOF	POLYESTER	GLAS
HOUT	LIGNINE	CELLULOSE
BOT	HYDROXY- APATIEF	COLLAGIEN

fig. 7

De gewapende materialen (versterkte, samengestelde)

Het zal duidelijk zijn geworden dat ijzeren wiskundige wetten voor het opdringende leven ernstige belemmeringen opwerpen. De levende natuur heeft daartegen de meest geraffineerde vormen en materialen ontwikkeld. Wat de laatste betreft, is de groep van de gewapende materialen, waartoe het gewapend beton behoort, het belangrijkste (fig. 7). De organische gewapende materialen - hout en bot - vertonen door een elektronen-microscoop een structuur overeenkomstig die van gewapend beton. Alle gewapende materialen, ook hout en bot, zijn dood en worden door het leven gebruikt om te construeren. In feite is er nauwelijks verschil tussen de stam van een grote boom en een televisietoren van beton (zie fig. 1).

In principe zijn al deze gewapende materialen sterk verwant. Alle zijn samengesteld uit een meer of minder amorf moedermateriaal = het beton, de kunststof, de lignine (houtstof) = dat betrekkelijk goed druk kan opnemen maar slecht trek. Deze wordt daarom opgenomen door een wapening, die vaak sterk kristallijn is en in ieder geval anisotroop, d.w.z. naar verschillende richting van elkaar verschillende eigenschappen vertonend. Het moedermateriaal zorgt daarbij weer voor de overdracht der trek- en schuifkrachten tussen de wapeningselementen en beschermt deze tegen knik. Merkwaardig is dat in de biologische evolutie en in de technische evolutie van de mens de wapening er steeds was vóór het moedermateriaal. De stalen staaf was er vóór het portlandcement-beton, de glasvezel vóór het polyester, de cellulose (celstof) vóór de lignine

en de collagene ('lijmgevende') vezels vóór de hydroxy-apatiet (= 'bottenkalk'). Het maken van de wapening geschiedt steeds het eerst en onder zeer speciale omstandigheden in de fabriek, of bij hout en bot in een gel.

De gewapende materialen zijn beslist niet ontwikkeld omdat ze zo eenvoudig zijn. Een homogene, isotrope (d.i. naar alle richtingen de zelfde eigenschappen vertonende) stof die zowel trek als druk kan opnemen, zou te verkiezen zijn. Het samenspel, de samenwerking, van de twee constructieve elementen levert uiteraard moeilijke problemen op. Het gewapende materiaal is echter steeds weer in de evolutie naar voren gekomen, doordat daarmee de uiterste sterkte kan worden bereikt die in de natuur theoretisch haalbaar is. Deze wordt namelijk geleverd door lange rechte moleculen die tot draadkristallen zijn gebundeld. Hout bijv. bestaat voor 40 tot 45 % van zijn droog gewicht uit lange cellulose kristallen die een treksterkte hebben van bijna 100 (honderd) maal dat van normaal constructiestaal bij hetzelfde gewicht. Met de meest eenvoudige stoffen weten de bomen dus al honderden miljoenen jaren constructiematerialen te maken waar de mens nog niet tegen op kan.

Bomen in de wind

Een van de meest geraffineerde gewapende materialen is hout. Bomen zijn dan ook de grootste levende wezens die op aarde voorkomen. Vele soorten kunnen tot meer dan 80 m hoog worden. Enkele soorten halen de 120 m, zoals de Eucalyptus in Australië. Er zijn soorten bomen die wel 5000 jaar oud worden. *Foto 8* toont Redwood-bomen, exemplaren van 500 tot 1000 jaar oud. Deze kunnen een hoogte van 130 m bereiken. Het record wordt beperkt door saptransport.

De stam van een boom wordt vooral belast door wind; zwaartekracht is hier van ondergeschikte betekenis. De strijd tegen wind en daarmee tegen grote buigende momenten is nergens in de natuur zó zwaar.

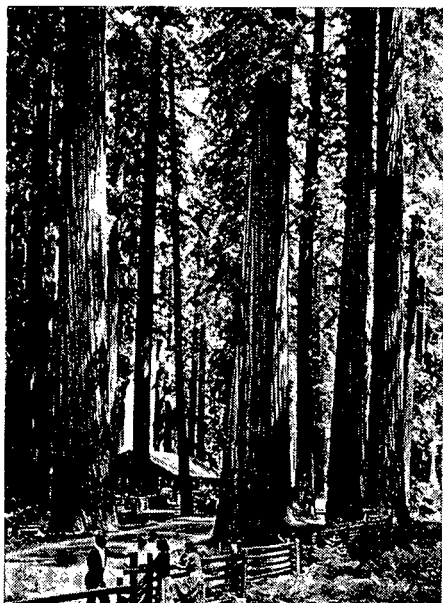


foto 8



foto 9

Indien een boom bezwijkt, is dat meestal niet door het falen van de stam maar door moeilijkheden met de grond ten gevolge van te hoge waterstanden, door erosie van de oevers van beken of door het schuiven van berghellingen. Alleen onder buitengewone omstandigheden, bij een windhoos, worden de stammen afgedraaid. Kennelijk houdt de boom daar geen rekening mee omdat het gevaarloos is voor de sóort. Wij doen dat ook niet bij onze gebouwen.

Een boom in een bos is gewikkeld in een strijd op leven en dood (*foto 9*). Constructief gezien bevindt hij zich tussen twee vuren, zoals trouwens iedere constructeur. Voedingsstoffen, water en zonne-energie zijn slechts beperkt verkrijgbaar en met het geproduceerde hout moet zo doelmatig mogelijk worden omgegaan. Enerzijds moet de stam niet te dun worden want dan breekt hij in de storm, anderzijds ook niet te dik want dan verliest de boom de slag om het licht. Deze strijd is meedogenloos en een boom moet dan ook wel over een uiterst scherp mechanisme beschikken om de veiligheid op elk punt zo krap mogelijk boven één te houden en alleen daarvan af te wijken als voor saptransport grotere doorsneden nodig zijn.

Wat de wind betreft kan een boom in sterk verschillende omstandigheden opgroeien en zich aanpassen. Daardoor is het ontstaan van gaten in een bos, door ondoelmatig kappen bijvoorbeeld, uiterst riskant. De omringende bomen kunnen zich slechts langzaam aan de sterk gewijzigde windkrachten aanpassen en vaak vreet de storm zich door het bos (*foto 10*).



foto 10

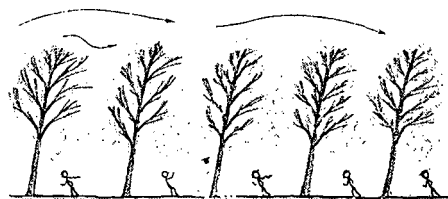


fig. 11

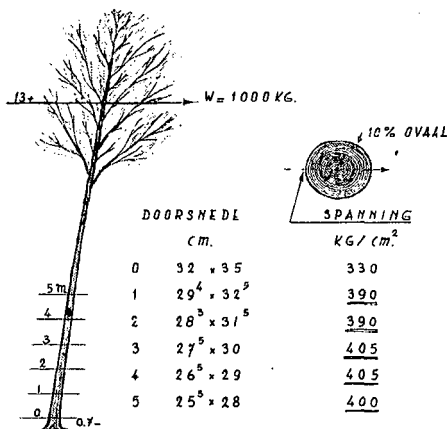


fig. 12

Bomen in de wind trachten zich te onttrekken aan de windkrachten (*fig. 11*). Indien de windkracht werd waargenomen als de zwaartekracht, zouden de bomen tegen de wind in moeten gaan staan, zoals wij doen. Ten einde bovenstaande gedachtengang omtrent de doelmatige vormgeving van de stam te controleren, heb ik metingen gedaan aan populieren bij Bergeijk langs de Belgische grens. Deze zijn voor metingen bijzonder geschikt.

De onderste takken worden regelmatig weggenomen, waardoor een lange boom met betrekkelijk kleine kruin ontstaat. (fig. 12). Uitgekozen werd een exemplaar dat vrij in de wind staat. De volle doorsnede wordt gerekend bij te dragen, aangezien in het algemeen de bast, het spinthout en de kern ongeveer evengrote treksterkte hebben. De uitkomsten zijn frappant en bevestigen de theorie geheel. Bij het in figuur 12 getekende exemplaar waren alle doorsneden iets ovaal, omstreeks 10 procent. Een dergelijke waarde wordt in het algemeen gevonden voor populieren die op deze plaats vrij in de wind staan. De grote as van de ellips ligt uiteraard in de heersende windrichting. De grootte van de windkracht is niet bekend en aangenomen op 1000 kg. Het is duidelijk dat de boom in staat is op iedere plaats de 'maximum spanningen' gelijk te houden.

Indien een boom in een storm komt, kan hij niet op dat ogenblik reageren, zeker 's winters niet als de groei stilstaat. Verder moet een populier van stel 20 jaar oud stormen kunnen trotseren die slechts zelden voorkomen, bijvoorbeeld éénmaal in de 100 jaar. De natuur vertoont in alles een sterke variabiliteit. Die bomen welke het gunstigste mechanisme bezitten om de windstructuur te evalueren, blijven over.

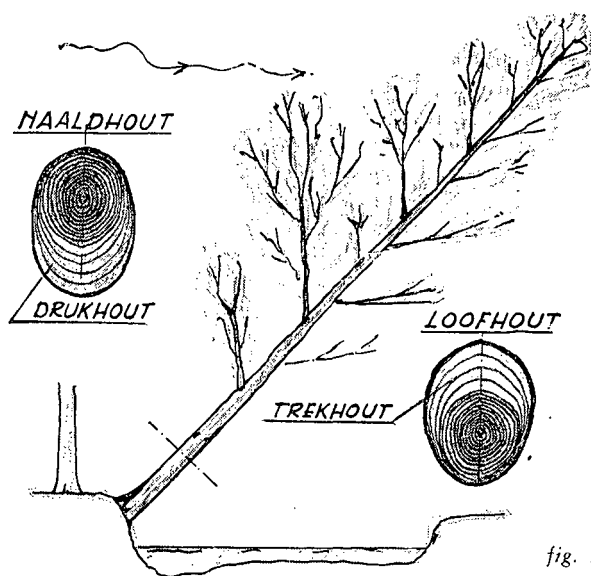


fig. 13

Bomen uit het lood

Bomen beschikken over een uiterst merkwaardig mechanisme indien de stam uit het lood raakt door schuiving op een berghelling of door erosie veroorzaakt door een beek (fig. 13). Bij kruidachtige planten levert dit weinig moeilijkheden. Hier kan nog groei plaatshebben in de stengel die dan ombuigt. Een boomstam is evenwel verhout en de kern is morsdood. De schuine boom verliest aan licht, hetgeen nog verergert door de doorbuiging. De problemen die zo'n boom moet oplossen zijn niet gering. Echter na korte tijd worden enorme tegenkrachten ingezet.

Langs een beek ten zuiden van Bergeijk staat een aantal van dergelijke ondermijnde populieren die ook nog het ongeluk hebben dat de heersende wind de momenten vergroot. Het zijn al grote en zware bomen maar ze zijn er toch nog in geslaagd een nieuw evenwicht te vinden. Ik heb daar metingen aan de stammen uitgevoerd en vond 30 procent ovaalheid. Dit is een waarde die ik méér heb gevonden bij bomen die om de een

of andere reden erg scheef staan. De bomen hadden blijkbaar tijd gevonden zich aan te passen. De stammen waren recht of zelfs iets omhoog gebogen. Het was enkele jaren geleden laat in de herfst stormachtig weer. Toen ik er was stak de storm onstuimig op, zoals misschien eens in de 10 jaar voorkomt. Ik heb nog nooit zo'n gigantische proefbelasting gezien. Als de geweldige wervelwinden met grote snelheden van hoog uit de atmosfeer op de bomen neerdoken, veerden deze heel ver weg, soms draaiden ze wat, maar steeds kwamen ze uiterst beheerst terug. Geen takje brak. Blijkbaar hadden ze alle problemen onder de knie. Aan de overkant van de beek sloegen zware sparren tegen de grond, langs een windgat in het bos. In alle punten van een boom worden bij zo'n storm de spanningen nagemeten met het piëzo-elektrisch effect en verwerkt. Maar daarover later.

Indien men de vraag stelt hoe een schuin doorhangende stam weer zo goed mogelijk omhoog kan worden gebogen zonder andere hulpmiddelen dan die stam zelf, met zijn jaarlijkse groeiringen maar bijna geheel verhoute stam met dode kern, dan zouden er vanuit de betontechniek twee oplossingen naar voren komen:

1. langs de onderkant van de stam al het beschikbare materiaal deponeren, dit grote druksterkte geven en mengen met een zwelstof;
2. langs de bovenkant van de stam al het materiaal brengen en dit wapenen met sterk aangespannen kabels.

Beide methoden worden door bomen toegepast. De eerste, de oudste, door naaldbomen; de tweede door loofbomen.

Bij een naaldboom ontstaat aan de onderkant van de schuine stam een afzetting van zogenaamd drukhout. Dit is in het algemeen roodachtig gekleurd en staat na zijn vorming onder grote druk (*fig. 13*). Men zou kunnen denken dat het drukhout gevormd wordt onder invloed van grote drukspanningen. Proeven hebben aangetoond dat dit niet zo is. Drukhout wordt gevormd onder de meer rechtstreeks invloed van de zwaartekracht. Wel heeft het drukhout een grote druksterkte, wat uiteraard nodig is. De stimulans voor vorming van het drukhout wordt geleverd door een groeistof, het auxine (indol-azijnzuur). Het mechanisme is niet nauwkeurig bekend. Onder invloed van deze groeistof wordt de celdeling van het cambium aan de onderzijde van de stam sterk gestimuleerd, althans bij naaldbomen. De doorsnede wordt daardoor ovaal en de kern komt excentrisch te liggen. Loofhout heeft een geheel ander mechanisme om de stam omhoog te buigen, namelijk door aan de bovenkant van de schuine stam dikke lagen trekhout te vormen. Dit bestaat grotendeels uit cellen waarvan de wand vol zit met cellulose microvezels die bijna in de lengterichting van de cel liggen en sterk aangespannen zijn.

Het is duidelijk geworden dat wind en zwaartekracht grote invloed uitoefenen op de differentiatie van de houtcellen. Dit geschiedt met groeistoffen maar ook rechtstreeks door de zwaartekracht. Verder spelen elektrische verschijnselen een grote rol.

Het piëzo-elektrisch effect (fig. 14)

Door Russische en Japanse onderzoekers is aangetoond dat in hout en bot bij belasting door druk of buiging elektrische potentiaalverschillen ontstaan. Ongetwijfeld wordt dit veroorzaakt door kristallen en hebben wij te maken met het piëzo-elektrisch effect, dat bij de grammofoonnaald toepassing vindt. Bij het vervormen van bepaalde kristallen ontstaan elektrische potentiaalverschillen op het oppervlak.

Er is 30 jaar geleden al op gewezen dat bij micro-kristallijne vezels in een amorf moeder-materiaal zoals hout dit effect eveneens kan ontstaan. Waarschijnlijk ligt de bron bij hout in de cellulose microvezels, die voornamelijk de mechanische sterkte van het hout leveren. Juist doordat die vezels zo prachtig evenwijdig liggen in de richting van de stam, versterken de potentiaalverschillen elkaar. Er ontstaan tenslotte spanningsverschillen in het

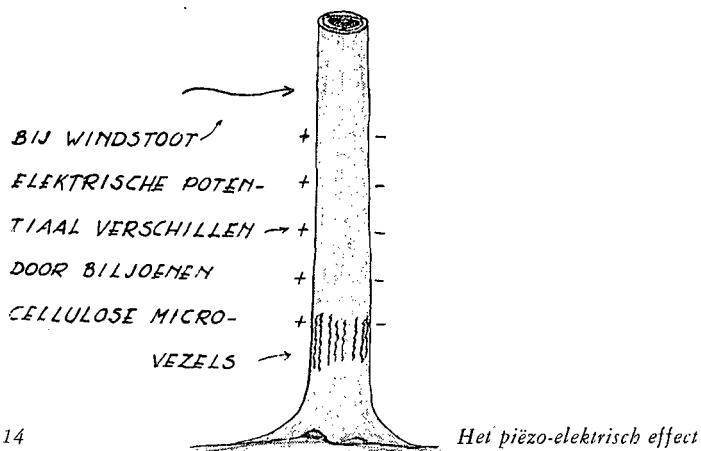


fig. 14

cambium. Vermoedelijk worden de waarnemingen in het cambium chemisch opgeslagen in de vorming van speciale stoffen die geleidelijk worden gebruikt bij de realisering van de opdracht: de vorming van meer cellen voor de mechanische sterkte. Bewezen is dit niet, de werking kan ook meer direct zijn. De cellulose microvezels dienen dus niet alleen voor de mechanische sterkte, maar voeren spanningsmetingen uit en geven instructies door aan het cambium: een soort terugkoppeling, een zichzelf regulerend systeem. Bij bot ligt de bron in de collagene vezels.

Onze landgenoot, prof. dr P. Wittebol, heeft voor bot aangetoond dat het aanleggen van een elektrische spanning van buitenaf inderdaad het groeiproces stimuleert. Bij hout is dit ongetwijfeld eveneens het geval. Het cambium kan door uitwendige elektrische potentialen in de waan worden gebracht dat er een zware storm staat of dat er een sneeuwbelasting is. Bij hout, bij een levende boom, is dit alles uiterst eenvoudig te doen. Desondanks is dit nog niet gebeurd.

Dynamisch evenwicht bij bot

Op zwaar belaste plaatsen bestaat bot uit cilindrische elementen (osteonen), die zijn opgebouwd uit lamellen (fig. 15). De opbouw doet sterk denken aan naaldhout-tracheiden van zomerhout. De osteonen zijn gewapend met collagene vezels in een matrix (grondsubstantie) bestaande uit kalkverbindingen. Fig. 15 is genomen met een polarisatiemicroscop. Op lichte plaatsen in het beeld liggen de vezels vlak (kleine spoed) en op donkere plaatsen steil. Vaak wisselen vlakke en steile vezels elkaar af, aldus een kruiswapening vormend in elke lamel.

Bot heeft een verrassend hoge treksterkte, gezien de brosheid van de hydroxy-apatiet en de betrekkelijk lage stijfheid van de wapening (= collagene vezels). De moeilijkheden moeten hier nog veel groter zijn geweest dan bij gewapend beton.

Er zijn aanwijzingen dat de collagene vezels onder voorspanning staan, zoals bij hout waarschijnlijk ook het geval is.

Bot is minder sterk dan hout. Uit sterkte-oogpunt gezien is een gewone poot inferieur aan een houten poot. Bot heeft echter andere kwaliteiten. Het kan worden aangepast aan de belastingen door middel van opbouw en afbraak. De ruimtevaarders ondervinden dit. Het piëzo-elektrisch effect regelt het proces. Bij onderbelasting wordt de kalk (hydroxy-apatiet) opgelost.



foto 15

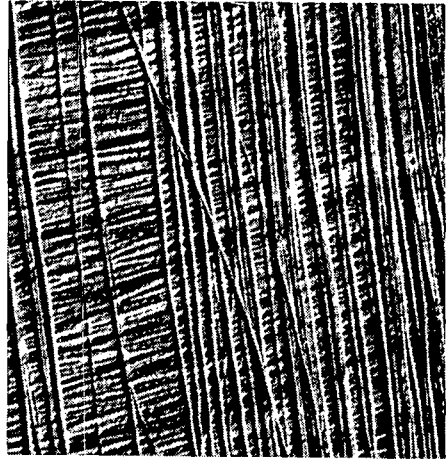


foto 16

Perspectief

Laten we het verkregen perspectief eens overzien. Het leven is in de zee ontstaan en de strijd tegen wind en zwaartekracht speelde nauwelijks een rol. Vele organische stoffen hebben een soortelijk gewicht in de buurt van één, en walvissen kunnen in zee gedijen tot een gewicht van omstreeks 135 ton. De grens wordt bepaald door andere factoren, zoals de warmtehuishouding en de voedselvoorziening. Wél ontstond in de zee reeds de cellulose kruiswapening. Foto 16 laat de binnenste lamel van de cilindrische celwand van zeewier zien (gezien van buitenaf, cel-as verticaal, elektronenmicroscop 30 000 maal). Misschien was deze wapening er al 500 miljoen jaren geleden om de golfslag (wind) te weerstaan.



foto 17

Toen het leven zich 300 miljoen jaar geleden op het land trachtte te ontplooien, ontstond de eerste verbeterde strijd tegen wind en zwaartekracht. Fig. 17 toont een reconstructie van het landschap in dit tijdperk, in constructief opzicht het meest kritieke moment in het leven van de landplanten en daarmee van de gehele levende natuur. Onder de grote druk werd door het plantenrijk de lignine, een unieke stof, ontwikkeld, het eerste grote organische beton, die aanzienlijke drukspanningen kan opnemen. Deze lignine diende om de reeds aanwezige cellulose vezelconstructies te verstevigen tot de eerste organische 'gewapend-beton'constructie: het hout. Hierdoor werd een explosieve ontwikkeling van de landplanten en een verovering van het vaste land mogelijk.

Foto 18 laat de extra ringwapeningen zien rondom een dunne plek (voor saptransport) in de wand van een naaldhout-tracheide. Een fantastisch stukje wapeningstechniek (elektro-nenmicroscoop, 30 000 maal).

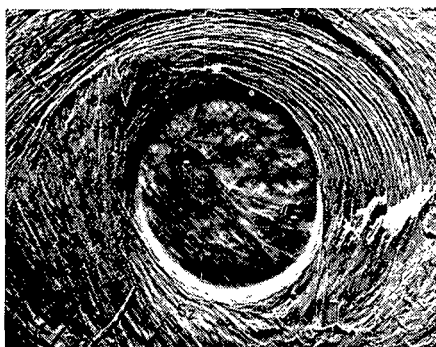


foto 18

Bij de schaalvergroting van de landplanten zijn de landdieren niet achtergebleven door de ontwikkeling van het bot. Door de ontwikkeling van het hout konden de tropische wouden ontstaan met hun overvloedige soortenrijkdom en versnelde evolutie (*fig. 19*). In dergelijke wouden zijn onze voorvaders ontstaan en ten slotte de mens die zich wat moeizaam tegen de zwaartekracht oprichtte. Zonder het hout en het bot, zonder deze organische 'gewapend-beton' technieken was de mens er nooit gekomen. Hoewel hij niet de grootste soort is, is ook bij de mens met zijn platvoeten, zijn spataderen, zijn bakkersknieën en zijn defecten aan het lende gedeelte van de wervelkolom de grens wel zowat bereikt. En het is wel zeker dat de grootte en de bouw van de mens sterk bepaald wordt door de versnelling g en dus door de grootte van de aardbol. Evenzo geldt dit voor zijn bouwwerken.

De mens heeft bij zijn ontplooiing, in zijn technische evolutie welke een verlengstuk is van de biologische evolutie, een derde gewapend bouw materiaal tot ontwikkeling gebracht, het gewapend beton. Dit is niet een wat onnatuurlijke, kunstmatige samenvoeging van staal en beton, maar een natuurlijk materiaal dat juist door zijn twee componenten enorme constructieve kwaliteiten heeft.

Voor de sprong in de ruimte, de grootste prestatie die de levende natuur ooit tegen wind en zwaartekracht geleverd heeft, gebruikte de mens de gewapende kunststoffen in de wanden van brandstoftanks en de huizen (hulzen) van raketmotoren. Het gewapend beton is een nog jong materiaal en een sterke evolutie ligt nog wel in het verschiet. Daartoe moeten de gewapende materialen in de natuur veel dieper bestudeerd worden. Er liggen daar nog veel waardevolle geheimen. In ieder geval weten we al dat het niet een



foto 19

Franse tuinman was die als eerste het principe van het gewapende materiaal toepaste, maar dat de levende natuur dit 300 miljoen jaren geleden deed, toen het leven zich op het land ontplooidde. Het was ook niet de Fransman Henri Lossier die het eerst probeerde, voor een zwelstof technische toepassingen te vinden, het werd misschien 200 miljoen jaren geleden al gebruikt toen een naaldhoutstammetje zich, na een kleine catastrofe, weer terugboog naar het licht. En het zijn de loofhoutbomen die het eerst op grote schaal de voorspanning toepasten, al sinds 100 miljoen jaren.

In een gewone boom liggen ongetwijfeld nog veel meer grote wijsheden betreffende constructie, veiligheidsfilosofie, stabiliteit, dynamische aspecten enz. Miljoenen jaren van triomfen en tegenslagen bij ontelbare proefbelastingen op bomen over de gehele aarde liggen opgeslagen in de cellen in een chemische code. Bosbouwkundigen, scheikundigen, natuurkundigen en biologen beseffen te weinig, dat bij grote congressen over de fijne structuur van hout ook constructeurs aanwezig dienen te zijn. Het zijn immers juist de gewapend-beton-constructeurs met hun op dit gebied sterk wetenschappelijke scholing, die een grote stoot kunnen geven tot het ontsluiten van de diepste geheimen van de constructieve vermogens van de levende natuur.

In aansluiting op en in samenhang met bovenstaand artikel laat ik op de volgende bladzijden nog een beschouwing volgen over de mogelijke oorzaken van de enorme schade, die de najaarsstorm van november 1972 in onze bossen, vooral die in het noorden van ons land, heeft teweeggebracht.