

4.

En de boom was gelukkig

We weten dat bomen duizenden jaren oud kunnen worden. We weten ook vrij goed hoe we die oude bomen in het landschap kunnen herkennen en hoe we ze moeten bemonsteren – hint: niet met een kettingzaag. Maar hoe halen we dendrochronologische informatie uit deze bomen? Hoe peuren we uit hun lange bestaan informatie die we kunnen gebruiken om kostbare violen te dateren of temperaturen uit het verleden te reconstrueren?

In hun boek *Climate of Hunger* uit 1977 schrijven Reid Bryson en Thomas Murray: ‘De natuur maakt geen vergissingen in de archieven die ze nalaat. Soms begrijpen we ze niet goed; dat is de bron van het probleem.’ Bomen hebben een geheugen. Ze leggen de geschiedenis vast en liegen niet. Maar om de verhalen die bomen ons vertellen juist te interpreteren moeten we hun jaarringpatronen lezen met de aandacht die ze verdienen. Dit vergt enig talent voor patroonherkenning, veel oefening en concentratie, en een helder begrip van de leefwijze van bomen. Gelukkig voor dendrochronologen zijn bomen relatief ongecompliceerde organismen. Ze stammen uit een geologisch tijdvak ver voor de komst van de mens, toen het leven nog eenvoudig was. Bomen hebben veel minder bewegende of rudimentaire delen dan mensen, zoals stuitjes of mannelijke tepels. Om de rijkdom aan informatie te vinden die bomen ons te vertellen hebben, moeten we simpelweg goed leren kijken.

Als onze met pijn en moeite verzamelde jaarringmonsters eenmaal het lab hebben bereikt, lijmen we eerst de kernen vast in houten houders. Zo stabiliseren we de kernen en zorgen we voor een effen kernoppervlak dat we goed door een microscoop kunnen bekijken. Daarna gaan we schuren: het is bij ruwe, niet-opgeschuurde monsters moeilijk smalle ringen

van elkaar te onderscheiden en de breedte van een ring precies op te meten. De houtbewerkers onder u zullen het waarderen dat we de schijven die we in Tanzania hadden verzameld met een steeds fijnere korrel van P80 tot P1200¹⁵ hebben geschuurd en vervolgens nog gepolijst. Het superfijne schuurpapier was misschien een beetje overdreven aangezien de meeste monsters worden geschuurd met een korrelgrootte van P400 tot P800. Maar voor onze monsters uit Tanzania hadden we een superschoon oppervlak nodig om de grenzen tussen de ringen te ontdekken, die vaak slechts een paar cellen breed waren.

Als je door een microscoop naar fijn geschuurd hout kijkt (en dat moet u beslist eens doen), kun je individuele houtcellen en zelfs de details van hun celwanden zien (fig. 4). Bomen zijn uitstekend geolieerde koolstofvangmachines met een elegante eenvoud die je terugziet in hun fysiologie en in de anatomie van hun hout. Elk van hun cellen heeft een specifieke en onmisbare functie. Bij coniferen vormen individuele houtcellen rechte rijen, als Romeinse soldaten in het gelid, voor optimale sterkte en functionaliteit. Bij loofbomen, die later zijn geëvolueerd, vormen de houtcellen ingewikkelde en opvallende patronen die uniek zijn voor elke boomsoort, zodat een geoefende houtanatoom een boomsoort kan herkennen door alleen naar zijn hout te kijken.

Bomen groeien harder in de lente, als ze na een goede winterslaap zijn uitgerust, dan in de herfst, als ze zich klaarmaken voor hun winterse rustperiode. Het hout dat in de lente wordt gevormd, *vroeghout*, weerspiegelt de energieke lentegroei van de boom. Coniferen vormen grote vroeghoutcellen met dunne celwanden¹⁶, terwijl loofbomen vroeghoutvaten vormen, die specifiek zijn ontworpen om water te transporteren. Het vroeghout van zowel coniferen als loofbomen is zodoende geoptimaliseerd om water en voedingsstoffen van de wortels naar het groeiende bladerdak in de lente te transporteren. Later in het groeiseizoen worden structurele ondersteuning en opslag van koolstof voor bomen belangrijker dan het watertransport. Daardoor zijn *laathoutcellen*, die in de zomer en de herfst worden gevormd, kleiner en hebben ze dikkere celwanden.

15 P geeft aan hoeveel schurende deeltjes het schuurpapier per cm² telt. Ruw schuurpapier heeft een kleiner aantal korrels; fijn en superfijn schuurpapier heeft een groter aantal korrels.

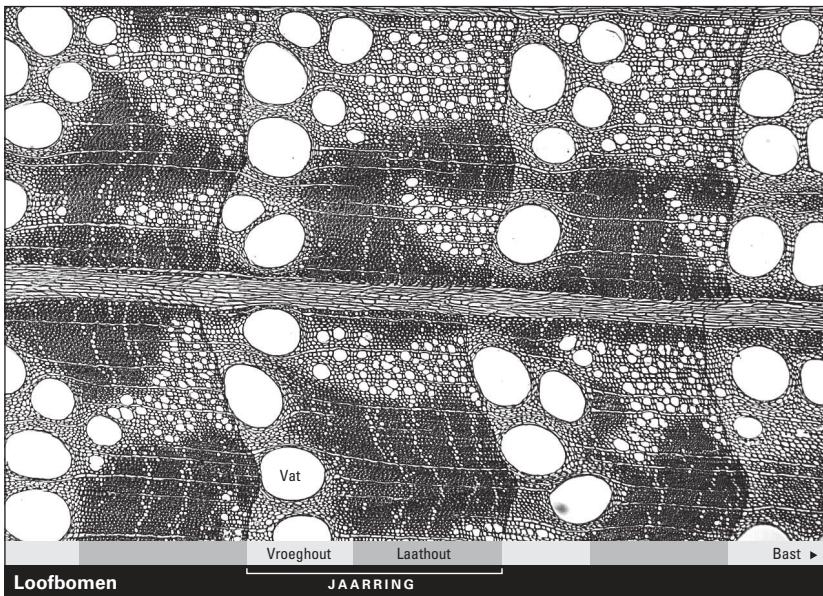
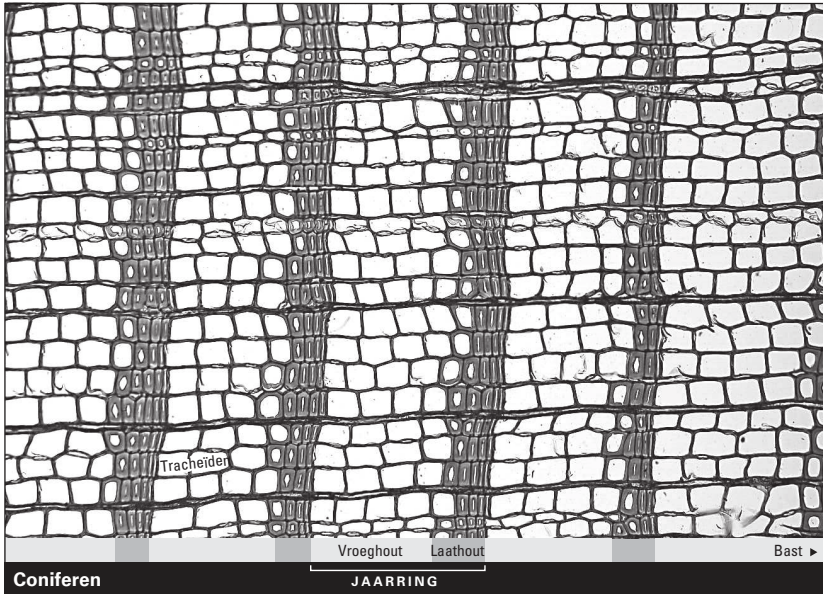
16 Houtcellen in coniferen worden 'tracheïden' genoemd.

Sommige loofboomsoorten (met als meest dramatische voorbeeld de eik) vormen in het vroeghout veel grotere vaten dan in het laathout. Door deze opeenvolging van grote voeghoutvaten en kleinere laathoutvaten ontstaan duidelijke jaarringen en prachtig *ringporig hout*. Vroeghoutvaten in eikenhout zijn vaak zo groot dat ze met het blote oog zichtbaar zijn, bijvoorbeeld aan de kopse zijkant van een massiefeiken tafel.

Deze opeenvolging van een groeispuurt van vroeghout in de lente, een overgang naar de groei van laathout in de herfst en dan een groeistop in de winter herhaalt zich in het leven van een doorsneeboom in een gematigd klimaat elk jaar opnieuw. De abrupte overgang van het laathout met zijn kleine cellen van het vorige jaar naar het vroeghout met zijn grote cellen het volgende jaar creëert een duidelijke grens tussen ringen, die de groei van het ene jaar scheiden van de groei van het volgende jaar en ons in staat stellen jaarringen te zien en te tellen en hun breedte op te meten. Zulke goed onderscheiden jaarringgrenzen zijn vaak afwezig bij bomen die in klimaten zonder duidelijke seizoensverschillen groeien, zoals de tropen, waar de daglengte en de temperatuur in de loop van een jaar maar weinig variëren. Tropische klimaten zijn bovendien zo nat en warm dat bomen het hele jaar door groeien. Als gevolg daarvan hebben veel tropische bomen niet per se de gewoonte een jaarlijkse groeipauze in te lassen of duidelijk te onderscheiden vroeghout, laathout en jaarringgrenzen te vormen. Tropische bomen vormen dan ook een uitdaging voor dendrochronologen. In vergelijking met gematigde en polaire klimaatregio's zijn de tropen (waarin bijvoorbeeld Tanzania ligt) een reusachtige, bijna lege plek op de wereldkaart van jaarringchronologieën. Wie weet welke draken daar huizen...

Het gebrek aan tropische jaarringchronologieën is mede een gevolg van het feit dat er in de tropen maar heel weinig coniferensoorten groeien, waarvan de ringen het gemakkelijkst te onderscheiden zijn. Maar net als alle goede regels heeft ook de regel geen-jaarringchronologieën-in-de-tropen zijn uitzonderingen. Teakbomen (*Tectona grandis*) in Zuidoost-Azië hebben bijvoorbeeld ringporig hout met grote vroeghoutvaten en veel kleinere laathoutvaten en vormen prachtige jaarringen, net als eiken in gematigde klimaatzones. Teak werd al in de jaren dertig van de vorige eeuw gebruikt om eeuwenlange jaarringchronologieën op te stellen. Ara-

Houtcellen



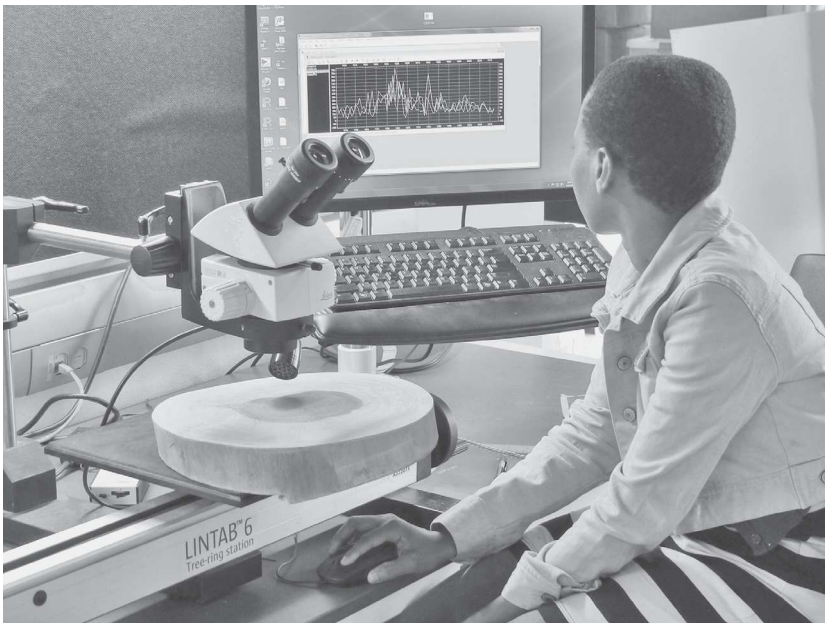
Figuur 4A: Coniferen vormen tracheiden, die vierkantig zijn en rechte rijen vormen naarmate de boom groeit. De vroeghoutcellen zijn groot en hebben dunne wanden; de laathoutcellen, die zich in de late zomer en in de herfst vormen, zijn kleiner en hebben dikke wanden.
Figuur 4B: Bij loofbomen vormen de houtcellen ingewikkelder patronen die uniek zijn voor elke boomsoort. De ronde gebieden zijn vaten, cellen die zijn ontworpen om water te transporteren. De opeenvolging van grote vroeghoutcellen en kleinere laathoutcellen bij sommige soorten, zoals de eik, creëert duidelijke jaarringen en een prachtige houtnerf.

pari's (*Macrobium acaciifolium*) in het overstromingsgebied van de Amazone (*varzea*) in Brazilië vormen ook jaarringen, zij het onder totaal andere seizoenscondities. Hun groei wordt elk jaar onderbroken door overstromingen die vier tot acht maanden duren; daardoor dringt er geen zuurstof in de bodem door en stoppen de bomen met groeien.

Ik ben dol op bomen, maar ik ben geen bomenknuffelaar. Er zijn maar twee gelegenheden waarbij ik doe alsof bomen een bewustzijn hebben: (a) als ik mijn neefje voorlees uit *De gulle boom* (The Giving Tree) en (b) als ik uitleg geef over kruisdatering, het proces waarbij je het jaarringpatroon van de ene boom vergelijkt met het jaarringpatroon van een andere boom. Bomen zijn gelukkig als ze genoeg te eten en te drinken hebben en er niemand is die ze dwarszit of aanvalt. In een goed jaar groeit een boom veel en vormt hij een brede ring. In een minder goed jaar – bijvoorbeeld als gevolg van droogte, kou of een storm die hem van al zijn bladeren en takken berooft – heeft de boom weinig energie om te groeien en vormt hij een smalle ring. Het geluk van bomen wordt dus sterk beïnvloed door het klimaat. Bomen hebben niet alleen last van seizoensgebonden stemmingsstoornissen – ze houden een winterslaap in het donkere jaargetijde – maar ook van jaargebonden stemmingsstoornissen: ze worden depressief in jaren waarin het klimaat slecht is. Of die slechte klimaatjaren voor bomen het gevolg zijn van koude of van droogte is afhankelijk van de regio. In halfdroge regio's zoals het Amerikaanse zuidwesten raken bomen in een depressie en vormen ze smalle ringen in droge jaren. Maar in alpine of arctische regio's vormen ze smalle ringen in koude jaren, en niet in droge jaren. Maar binnen een bepaalde regio zullen slechte klimaatjaren, of ze nu droog zijn of koud, de meeste bomen op dezelfde manier beïnvloeden en een smalle ring in het jaarringpatroon veroorzaken.

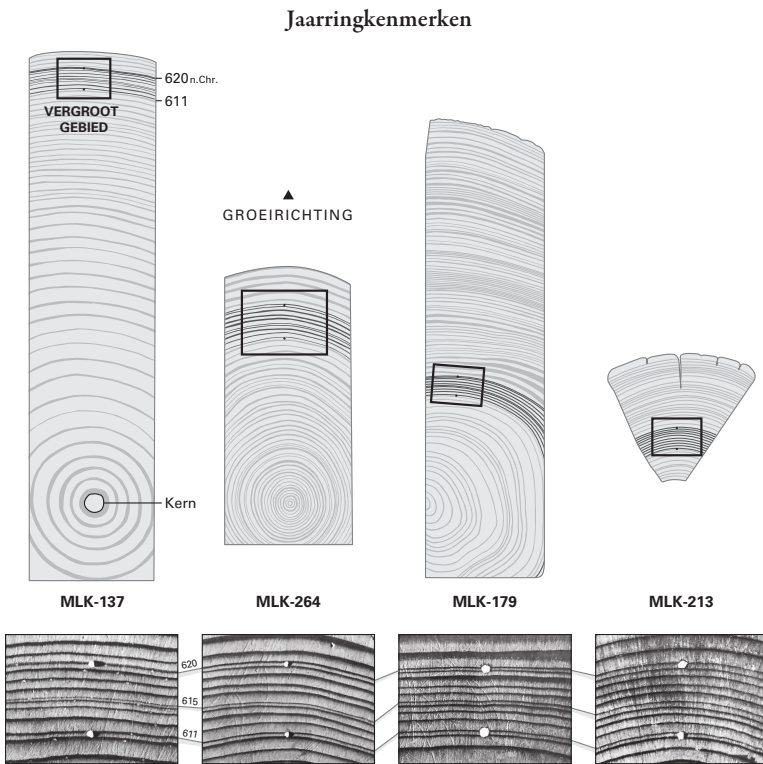
In het Amerikaanse zuidwesten leiden droge jaren bijvoorbeeld in de meeste bomen tot smalle ringen, terwijl diezelfde bomen brede ringen vormen in jaren met veel neerslag. De klimatologische opeenvolging van natte (gelukkige) en droge (ongelukkige) jaren vindt haar weerslag in een herkenbaar patroon van afwisselend brede en smalle ringen in de bomen, de morsecode waarover ik in hoofdstuk 1 heb gesproken. Als we een kruisdatering uitvoeren, nemen we verschillende monsters en vergelijken hun respectievelijke jaarringpatronen die in deze lange code zijn vastge-

legd. Daarbij maken we gebruik van visuele of statistische methoden voor patroonvergelijking, en in de meeste gevallen een combinatie van beide. We kunnen de breedte van elke individuele ring van de monsters die we willen kruisdateren meten en vervolgens de opgemeten jaarringreeksen met elkaar vergelijken om de beste statistische match te vinden. Om de ringen exact te kunnen opmeten gebruiken we een beweegbaar digitaal meetplatform dat ons in staat stelt individuele ringbreedten met een muisklik te meten en vast te leggen (fig. 5). Het opmeten van de ringbreedten kost echter ontzettend veel tijd en moeite. Ervaren wetenschappers die werken aan toepassingen waarvoor het dateren (en niet bijvoorbeeld klimaatreconstructie) het belangrijkste doel is, zoals dendroarcheologen, kunnen voorbijgaan aan het proces van meten en statistisch kruisdateren en in plaats daarvan vertrouwen op hun geheugen en hun vermogen tot patroonherkenning om jaarringpatronen visueel te kruisdateren, zonder digitale hulpmiddelen.



Figuur 5: Dendrochronoloog Zakia Hassan Khamisi meet de ringbreedten op een schijf van *Brachystegia spiciformis* uit Tanzania met behulp van een digitaal meetplatform dat verbonden is met een pc, waardoor ze tegelijkertijd een grafische voorstelling van de metingen kan maken. Foto met dank aan het Laboratorium voor Jaarringonderzoek, Universiteit van Arizona.

Het proces van visuele kruisdatering begint vaak met *jaarringkenmerken*, zoals Douglass het noemde: typerende reeksen van opeenvolgende smalle en brede jaarringen – fragmenten van morsecode, met duidelijke ijkjaren – die herkenbaar zijn in een karakteristiek patroon. Toen hij de archeologische monsters uit het zuidwesten van de Verenigde Staten begon te dateren, keek Douglass eerst bij ongedateerde monsters of er jaarringkenmerken tussen zaten die hij kende en herkende, zoals het kenmerk 611 (smal) – 615 (smal) – 620 n.Chr. (smal). Als hij dit kenmerk van de jaren tien van de zevende eeuw n.Chr. in een monster tegenkwam, had hij daarmee een plek om te beginnen met zijn kruisdatering en het ongedateerde monster te verankeren in de tijd (fig. 6). Om Douglass' jaarring-



Figuur 6: Jaarringkenmerken zijn specifieke groepen van opeenvolgende smalle en brede ijkringen, die herkenbaar zijn als karakteristiek patroon. Het hier getoonde kenmerk in vier monsters is de opeenvolging van 611 (smal) – 615 (smal) – 620 n.Chr. (smal) die Douglass heeft gebruikt toen hij archeologische monsters uit het zuidwesten van de Verenigde Staten kruisdateerde.

kenmerk in historisch perspectief te plaatsen: dit was het decennium waarin Mohammed zijn goddelijke openbaringen kreeg, in Mekka de Koran begon te verkondigen en zo de islam in de wereld introduceerde. Geofende dendrochronologen kennen vaak de jaarringkenmerken en de eeuwenlange reeks van smalle en brede ringen die de meeste bomen in een bepaalde regio gemeen hebben. Door er alleen maar naar te kijken matchen ze het patroon dat ze onder de microscoop in een ongedateerd monster zien met het patroon dat ze in hun hoofd hebben.

Toen ik bezig was met monsters uit de Sierra Nevada in Californië, zag het jaarringkenmerk voor het einde van de achttiende en het begin van de negentiende eeuw er als volgt uit:

1783: smal

1792: breed

1795: smal

1796: heel smal

1809: breed

1822: smal

1829: heel smal

De breedte van de ringen tussen de bovenstaande ijkjaren was doorgaans weinig opmerkelijk. Het prominentste ijkjaar van het jaarringkenmerk was 1796, het laatste jaar van het presidentschap van George Washington. Dat moet in de Sierra Nevada een ontzettend droog jaar zijn geweest, aangezien de desbetreffende jaarring in vrijwel elk monster dat ik bekeken had erg smal was. Als ik een nieuw ongedateerd monster wilde analyseren, ging ik als eerste op zoek naar de smalste ring die ik kon vinden. Omdat ik wist dat de ring voor 1796 in vrijwel elk monster heel smal was, wilde ik bekijken of de smalste ring in dit specifieke monster misschien de ring van 1796 zou kunnen zijn. De meeste monsters die we in de Sierra Nevada hadden verzameld, waren afkomstig van bomen die tijdens de mijnbouw in Californië, ergens tussen 1850 en 1900, waren gekapt. Zodoende wist ik dat ik tussen de circa vijftig en honderd ringen vanaf de rand – de buitenste, meest recente ring – van het monster op zoek moest naar de smalle ring van 1796.

Vervolgens moest ik bekijken of de ring vóór de ring waarvan ik vermoedde dat het de 1796-ring was, ook smal was, net als de 1795-ring in het jaarringkenmerk. Als dat het geval was, telde ik nog eens drie ringen terug om te zien of de 1792-ring breed was. Daarna telde ik nog eens negen jaren terug om te zien of de 1783-ring smal was, enzovoort. Ik keek ook voorwaarts in de tijd: ik telde dertien ringen naar buiten om te zien of de 1809-ring breed was, of de 1822-ring smal was, enzovoort. Ik kon al snel zien of het patroon van brede en smalle ringen van het monster overeenkwam met het patroon in het jaarringkenmerk en dus of ik terecht had aangenomen dat de heel smalle ring die ik had gevonden de 1796-ring was. Als dat zo was, dan was dat geweldig: dan kon ik alle ijkjaren in de richting van de kern van de stam, die geregeld dateerde uit de vijftiende eeuw of nog vroeger, matchen. Het jaarringkenmerk van 1783-1829 van de Sierra Nevada was op zichzelf niet voldoende om een monster op betrouwbare wijze te kruisdateren, maar ze gaf me wel een uitgangspunt. Als de eerste smalle ring die ik had gekozen niet overeenkwam met het jaarringkenmerk van de Sierra Nevada, begon de hele oefening opnieuw en ging ik op zoek naar een andere smalle ring die wellicht de ring van 1796 zou kunnen zijn. Leverde dat niets op, dan nam ik weer een andere ring, en weer een andere ring, en weer een andere ring, totdat ik een match had gevonden met het jaarringkenmerk. Zeker in het begin was dit soms een lang en frustrerend proces, maar op deze manier konden we wel ongeveer 90 procent van de tweeduizend monsters die we in de Sierra Nevada hadden verzameld, dateren.

Je kunt het jaarringkenmerk voor een bepaalde regio, zoals het jaarringkenmerk van 1783-1829 voor de Sierra Nevada, uit je hoofd leren door heel veel monsters uit die regio te bekijken, en daarna nog meer monsters te bekijken, en daarna nog meer. Geen enkele jaarringreeks is identiek aan een andere. Zelfs twee monsters van dezelfde boom zijn niet identiek! Maar als je monsters afkomstig zijn uit hetzelfde gebied, zullen ze allemaal dezelfde ijkjaren hebben, en die ijkjaren zullen je steeds meer gaan opvallen naarmate je steeds meer monsters bestudeert. Als je onderzoek verricht aan wat soms een eindeloos aantal monsters lijkt, zullen de jaren waarin veel bomen allemaal smalle of brede ringen hebben je gaan opvallen, en voor je het weet heb je een reeks ijkjaren voor die regio in je hoofd, of in elk geval op papier. Aan het einde van het twee jaar durende Sierra

Nevada-project wist ik na de kruisdatering van bijna tweeduizend monsters precies hoe ik die smalle 1796-ring moest vinden. Ik kon het lab binnen lopen, een monster uit de stapel ongedateerde monsters nemen en de 1796-ring aanwijzen voordat ik er zelfs maar onder een microscoop naar had gekeken.

Hetzelfde principe van monsterreplicatie passen we toe als we een absoluut gedateerde referentiechronologie samenstellen die we kunnen gebruiken om nieuwe ongedateerde monsters te kruisdateren. Een absolute referentiechronologie is verankerd in het heden omdat ze is gebaseerd op levende bomen waarvan de meest recente ring exact gedateerd is¹⁷ en die de sleutel biedt voor de regionale morsecode. Hoe meer monsters hebben bijgedragen aan de referentiechronologie, hoe beter ze het algemene patroon in alle monsters vertegenwoordigt, omdat de specifieke eigenaardigheden van individuele monsters (willekeurige afwijkingen in niet-ijkjaren) zijn uitgemiddeld. Als we een referentiechronologie ontwikkelen voor een nieuw gebied, bemonsteren we doorgaans minimaal twintig maar vaak veel meer bomen, zodat we genoeg monsters hebben om het algehele jaarringpatroon vast te stellen.

Voor een betrouwbare kruisdatering moeten we niet alleen voldoende monsters hebben, maar moet elk monster ook voldoende jaarringen tellen. Hoe langer de bemonsterde boom of houten balk heeft geleefd, hoe meer ringen er beschikbaar zijn voor kruisdatering. Hoe langer een boom heeft geleefd voordat hij werd geveld of bemonsterd, hoe meer jaren met abnormale weersomstandigheden en groei hij heeft meegemaakt en hoe meer ijkjaren we hebben om het hout af te zetten tegen een referentiechronologie. Hoe meer matchende ijkjaren, hoe minder ruimte voor fouten of onzekerheid over de overeenkomst tussen het monster en de referentiechronologie en uiteindelijk over zijn datering. Zie het als een legpuzzel: hoe gevarieerder en talrijker de uitstulpingen van het stukje zijn, hoe minder plekken er zijn waar het stukje past. In werkelijkheid is er slechts één juiste oplossing voor de puzzel, slechts één juiste match tussen monster en referentiechronologie. Elke boom heeft maar één keer gegroeid en daarom past zijn jaarringpatroon maar op één punt in de chronologische tijdlijn. Je kunt proberen het puzzelstukje te leggen op een

17 Het jaar waarin de boom werd bemonsterd.

plek waar het niet thuishoort, maar je zult het er dan met geweld in moeten proppen; het zal niet goed in de puzzel passen en je houdt jezelf alleen maar voor de gek. Boomringen liegen niet.

De opwinding die je ervaart als je een stuk hout kunt dateren door gewoon naar zijn ringenpatroon te kijken, lijkt ook wel wat op het gevoel dat je krijgt als je een puzzel oplost. Het vereist een vergelijkbaar concentratieniveau: het is niet waarschijnlijk dat je kruisdatering efficiënt of zelfs maar succesvol zal verlopen als je weinig geslapen hebt of als je bijvoorbeeld vanwege je labpartner moet luisteren naar harde jambandmuziek van de door Phish geïnspireerde radiozender Pandora. Het proces van kruisdatering is het ware hart van de dendrochronologie. Het is de reden waarom het een wetenschap is, en niet alleen maar een kwestie van ringen tellen. Zijn je hersenen eenmaal geoefend, dan kan kruisdateren ook ontzettend veel voldoening schenken, ook al is de weg ernaartoe hobbelig en de leercurve steil.

Een ander probleem waar je bij het kruisdateren mee te maken krijgt – en dat niet te maken heeft met labcollega's die van hippiemuziek houden – is het incidentele verschijnsel van *ontbrekende ringen* en *valse ringen*. Sommige bomen zijn zo slecht bestand tegen stress dat ze er tijdens extreem droge jaren gewoon de brui aan geven. In plaats van een onmogelijk smal ringetje te vormen, vormen ze überhaupt geen ring. Het is alsof het hart van de boom een keer overslaat, en het resultaat is een ontbrekende ring. Zulke ontbrekende ringen komen vaker voor in droge omgevingen en bij oudere bomen. Het jaar 1580 n.Chr. was in het zuidwesten van de Verenigde Staten en in Californië bijvoorbeeld zo droog dat de meeste bomen in dat jaar geen ring hebben gevormd. Voor een geoefend oog zijn de meeste ontbrekende ringen door middel van kruisdatering vrij eenvoudig te ontdekken. Als je weet hoe een jaarringpatroon er behoort uit te zien, zul je een hiaat in dat patroon onmiddellijk opmerken. Het valt op als het jaarringpatroon dat je door een microscoop bestudeert een hartslag heeft overgeslagen in vergelijking met de jaarringpatronen in je hoofd.

Het tegenovergestelde kan ook gebeuren: een boom kan af en toe in één jaar meerdere ringen vormen. Dergelijke valse ringen zijn gebruikelijk in klimaten met een zomerwoesson, waar een droogteperiode voor de woesson aan het einde van de lente de boom het idee kan geven dat

het alweer herfst is geworden. In dit geval begint de boom te vroeg zijn dichtere laathout te vormen, nog voordat de zomerwoestons toeslaan. Dan bemerkt hij zijn vergissing en begint hij weer grotere vroeghoutcellen te vormen. Wanneer het dan echt herfst wordt, produceert de boom in hetzelfde jaar een tweede ring van laathoutcellen. Onder een microscoop is de premature, vóór de woesson gevormde band van vals laathout gemakkelijk te onderscheiden van het echte laathout. De overgang tussen het valse laathout en het daaropvolgende vroeghout van het woessonseizoen verloopt geleidelijk, terwijl de overgang tussen echt laathout en het vroeghout van het volgende jaar messcherp is. Valse ringen komen bij sommige boomsoorten (zoals de jeneverbes) veel vaker voor dan bij andere, en net als ontbrekende ringen kun je ze opsporen door middel van kruisdatering. Als je ontbrekende en valse ringen echter niet ontdekt, kunnen ze de tijdlijn flink in de war schoppen en de nauwkeurigheid van een jaarringchronologie ondermijnen.

In het algemeen is kruisdatering het gemakkelijkst en met de meeste kans op succes uit te voeren in regio's waarin één dominante beperkende klimaatsfactor de meeste bomen in die regio op dezelfde manier beïnvloedt. Als de meeste bomen in een regio met dezelfde dominante beperkende factor te maken hebben, zullen hun morsecodes met elkaar overeenkomen en verloopt het kruisdateren gemakkelijk. Mijn eerste poging tot kruisdateren in ons Sierra Nevada-project verliep soepel omdat Californië zeer hevige droogteperioden kent (zoals de recente droogte van 2012-2016 of de droogte van 1796), die bij de meeste bomen hun stempel achterlaten. Ponderosadennen in het Amerikaanse zuidwesten hebben ook regelmatig te kampen met ernstige droogte, waardoor Douglass het concept van kruisdatering kon ontwikkelen en toepassen.

Maar kruisdateren heeft ook zijn mysterieuze kanten. De redenen waarom dit instrument effectief is, zijn niet overal zo evident als in het geval van de dennen in het zuidwesten van de Verenigde Staten. De tot nu toe langste ononderbroken jaarringchronologie ter wereld is gebaseerd op vondsten van subfossiele zomereiken en wintereiken (*Quercus robur* en *Quercus petraea*) in Duitse grindafgravingen. De subfossiele boomstammen zijn overblijfselen van bossen die ooit langs grote Duitse rivieren (de Rijn, de Main en de Donau) groeiden maar in de loop van de tijd

door erosie zijn weggevaagd. Als bomen in water of turf vallen, wordt hun hout bewaard in een anaerobe omgeving, waarin zuurstof en hout-etende organismen – die immers zuurstof nodig hebben om te ademen – ontbreken. De eiken en dennen die ooit deze bossen bevolkten en waarvan verreweg de meeste nog geen driehonderd jaar oud zijn geworden, zijn sindsdien bedekt geweest door sedimenten. Zodoende beschikken wij nu over restanten die dankzij kruisdatering een jaarringchronologie van meer dan tienduizend jaar hebben opgeleverd. De Duitse eikenchronologie is gebaseerd op 6775 monsters en bestrijkt een periode van meer dan 10.500 jaar, zonder een enkel hiaat: van het heden tot aan 8480 v.Chr. Wetenschappers hebben deze chronologie zelfs kunnen kruisdateren met monsters van nog oudere subfossiele grove dennen (*Pinus sylvestris*) die in dezelfde regio zijn gevonden. Daarmee is de chronologie met nog eens zo'n tweeduizend jaar verlengd.

Een chronologie van deze lengte ontwikkelen op een continent waarvan de oudste levende boom nauwelijks ouder is dan duizend jaar, is op zichzelf al een knappe prestatie. Maar het wordt nog moeilijker te bevatten als we het verhaal aanvullen met onderzoek dat op de Britse Eilanden is uitgevoerd door Mike Baillie, een dendrochronoloog van de Universiteit van Belfast. Mike ontwikkelde een 7272 jaar lange jaarringchronologie op basis van oeroud zomer- en wintereikenhout dat in Ierse veengronden is bewaard. Uit kruisdatering blijkt dat alle meer dan zeventuizend Ierse jaarringen precies overlappen met de Duitse ringen. Maar we begrijpen niet helemaal waarom. We weten nog niet waarom de harten van de Duitse en de Ierse eiken synchroon kloppen en wat hun gemeenschappelijke beperkende factor is. Hoewel zomers in Duitsland en Ierland voor eiken zo nat en warm zijn dat ze meestal gelukkig zijn en weinig ijkringen vormen, lijken de zomerklimaten van deze landen helemaal niet zoveel op elkaar: droge en natte zomers in Duitsland komen niet perse overeen met droge en natte zomers in Ierland. Toch hebben de eiken in de afgelopen zeventuizend jaar duidelijke en herkenbare corresponderende patronen van brede en smalle ringen gevormd. De zomereik is een van de meest bestudeerde soorten in de dendrochronologie, maar na meer dan veertig jaar onderzoek is de drijvende kracht achter deze groot-schalige groeisynchroniciteit nog een mysterie.

Het Duitse en Ierse subfossiele eikenhout in rivierafzettingen, meren en veengronden bevindt zich pas in de eerste fase van het versteningsproces, dat uiteindelijk miljoenen jaren in beslag neemt. Een verrassend aantal stammen en stronken van oeroude bomen zijn bewaard gebleven als *versteend hout*, bijvoorbeeld in het Nationaal Park *Petrified Forest* in het oosten van Arizona. Versteend hout is fossiel hout waarin al het organisch materiaal is vervangen door mineralen – vaak kwarts of calcium – en de oorspronkelijke structuur van het hout intact is gebleven. Hout kan alleen op deze wijze in steen veranderen als het begraven ligt onder zand- of sliedsedimenten of vulkanische as, zodat er geen zuurstof bij kan komen en het hout bewaard blijft. In de loop der tijd sijpelt mineraalhoudend water door de sedimenten die het hout toedekken en zet een deel van de mineralen in de houtcellen af. De minerale afzettingen vormen een steenen mal in de houtcellen en als de organische celwanden vergaan, blijft een inwendig, driedimensionaal ‘afgietsel’ van de cellen en het hout als geheel over. Niet alleen de structuur van de houtcellen blijft in de stenen afgietsels behouden, maar ook de jaarringen. En verbazingwekkend genoeg zijn die vaak duidelijk zichtbaar, alsof ze vorig jaar zijn gevormd in plaats van miljoenen jaren geleden. Je kunt deze ringen in versteend hout net zo opmeten en kruisdateren als hedendaagse jaarringen. Maar aangezien versteend hout miljoenen jaren oud is en de langste jaarringchronologie slechts de afgelopen twaalfduizend jaar bestrijkt, zullen de jaarringen van beide archieven nooit aan elkaar gekoppeld kunnen worden.

Toch kan de studie van versteende jaarringen (*paleodendrochronologie*) ons een hoop vertellen over het bos, het klimaat en de omgeving waarin de oude bomen groeiden. Zo is er bijvoorbeeld een versteend bos gevonden op Antarctica, waar het huidige glaciële klimaat te koud en droog is voor bomen. Maar dit is dus niet altijd zo geweest. Tijdens het late perm en het trias (ruwweg van 255 miljoen tot 200 miljoen jaar geleden) en meer recentelijk tijdens het krijt en het paleogeen (van ongeveer 145 miljoen tot 23 miljoen jaar geleden) was het klimaat op het Antarctisch Schiereiland warm en nat genoeg om diverse plantengemeenschappen te herbergen, waaronder bossen met coniferen en in de latere perioden zelfs met loofbomen. Ooit was Antarctica met de andere continenten op het zuidelijk halfrond verenigd in het oeroude supercontinent Gondwana. Als gevolg van de plaattektoniek begon Gondwana zo’n 180 miljoen jaar geleden in stuk-

ken te breken, maar Zuid-Amerika, het meest recentelijk gevormde continent, splitste zich pas zo'n 30 miljoen jaar geleden van Antarctica af. Als gevolg van deze lange gedeelde geologische geschiedenis kunnen we verwanten van de reeds lang uitgestorven Antarctische plantenfamilies, zoals de Antarctische beuk (*Nothofagus antarctica*) en de geslachten Podocarpus en Araucaria, nog aantreffen in het zuiden van Zuid-Amerika, in het zuidelijkste deel van Afrika en in Oceanië.

Het Antarctische versteende bos bestond uit uitgestorven boomsoorten die ooit groeiden op een supercontinent dat zelf ook niet meer bestaat. Maar de wel nog bestaande overblijfselen van versteende bossen van 145 miljoen tot 23 miljoen jaar geleden tonen onweerlegbaar aan dat de Zuidpool in deze perioden warmer was en vrij van grote ijskappen. Het feit dat we duidelijk onderscheiden jaarringen in de fossielen zien, bewijst dat het Antarctische klimaat verschillende seizoenen kende en dat de warme perioden niet waren veroorzaakt door een drastisch afgenomen helling van de aardas, zoals wel is geopperd. Nee, de klimaatmodellen tonen aan dat de hoge temperaturen op de Zuidpool (en de Noordpool) tijdens het krijt en het paleogeen alleen te verklaren zijn door een toename van CO₂ in de atmosfeer, waardoor in de poolgebieden niet alleen de temperatuur is gestegen maar ook de boomgroei is versterkt. De brede jaarringen in versteend hout zijn dan ook misschien te verklaren doordat de Antarctische bossen indertijd in een broeikasklimaat groeiden, een natuurlijke parallel met de klimaatomstandigheden die we op dit moment kunstmatig creëren door enorme hoeveelheden broeikasgasen uit te stoten. Het onderzoek van paleodendrochronologen naar deze oeroude versteende jaarringen zou ons nieuw inzicht kunnen verschaffen in de klimaatverandering op aarde miljoenen jaar geleden; maar de dendrochronologie wordt vaker gebruikt om onderzoek te doen naar het klimaat en de geschiedenis van veel recentere perioden en de invloed die de mens heeft uitgeoefend sinds hij op het toneel is verschenen.