



Een echt quantumland

Artistieke impressie van
quantumverband tussen twee diamanten.

Auteur: Martijn van Calmthout (Nikhef), auteur van het boek *Echt Quantum* | Illustratie: Hanson Lab@TU Delft

Geen natuurkunde gekker dan de quantumfysica. Maar toepassingen worden steeds concreter en Nederland is daarbij een hoofdrolspeler.

Op 21 februari 2019 zoef een kleine stoet zwarte limousines de campus van de TU Delft op en houdt halt voor de entree van de faculteit Technische Natuurkunde. Uit het openzwaaiend portier stapt Koning Willem-Alexander die deze kille mistige ochtend arriveert voor de officiële opening van een nieuw onderzoekslaboratorium op de universiteit. De directeur van dat lab, fysicus Leo Kouwenhoven, schudt strak in het pak de huijerende vorst de hand en troont hem mee naar binnen. Recht de duizelingwekkende wereld van de quantumfysica in. Het koninklijke bezoek onderstreept dat er iets bijzonders gaande is aan de Mekelweg in Delft. Het lab dat de Koning deze ochtend met een swipe op een aanraakscherm opent, is het Microsoft Quantum Lab Delft. Dat juist de Amerikaanse techgigant Microsoft een heel lab op een Nederlandse universiteit laat bouwen, zegt veel over in dit geval de status van Nederland als ambitieus quantumland. Ook Intel, Fujitsu en andere grote namen weten er inmiddels de weg. Kennelijk is hier op het vlak van de quantumtechnologie iets gaande dat internationaal de aandacht trekt. Maar wat?

Quantumdelta

Een halfjaar later wordt dat haarfijn samengevat bij de lancering in Den Haag van de Nationale Agenda Quantumtechnologie, gemaakt in opdracht van het Ministerie van Economische Zaken. Nederland heeft, zoals in dat document staat, een aantal toonaangevende onderzoekscentra in Delft, Amsterdam en Eindhoven. Plus een pool aan goede researchers en studenten bij andere universiteiten en ook bedrijven die brood zien in de opkomende quantumtechnologie. Bovendien is er

een overheid die quantum als sleuteltechnologie ziet die de wereld kan veranderen.

Nu is het zaak om al die puzzelstukjes aan elkaar te leggen. Nederland moet Quantum Delta Nederland worden, is het voorstel. Een internationaal centrum en knooppunt voor een cruciale nieuwe technologie, die baanbrekende nieuwe computers, sensoren en netwerken gaat betekenen. Met een internationale miljardenmarkt, dat ook. Wat Silicon Valley is voor de informatietechnologie, kan Nederland voor quantumtechnologie worden. Dat zijn grote en meeslepende woorden en ideeën. Maar Nederlandse onderzoekers en technici spelen inderdaad een prominente rol in de voorhoede van de wereldwijde quantumrevolutie. Hun artikelen worden internationaal bovengemiddeld veel geciteerd door collega's, hun netwerken en werkwijze worden elders gretig gekopieerd. Zoiets trekt koningen aan, talent en bedrijfskapitaal uit de hele wereld.

Qubits

Fysicus Leo Kouwenhoven is op dat moment een van de boegbeelden van de revolutie in Nederland. Hij studeerde technische natuurkunde in Delft en werd al in zijn promotietijd in Delft gegrepen door de fysica op de kleinste schaal. Nu zet hij met zijn medewerkers in op een nieuw soort rekeneenheid voor de computer van de toekomst, de qubit. Gewone computers werken met bits, de enen en nullen waarmee informatie kan worden gecodeerd.

Qubits zijn anders. Die zijn niet een of nul, zoals klassieke bits, maar tegelijk 1 en 0. Iets wat natuurkundigen een superpositie van toestanden noemen, waarmee ondanks de onbepaaldheid wel gerekend kan worden. En veel effectiever: in plaats van stap voor stap kunnen door slimme algoritmes alle mogelijke combinaties tegelijkertijd worden doorgerekend.

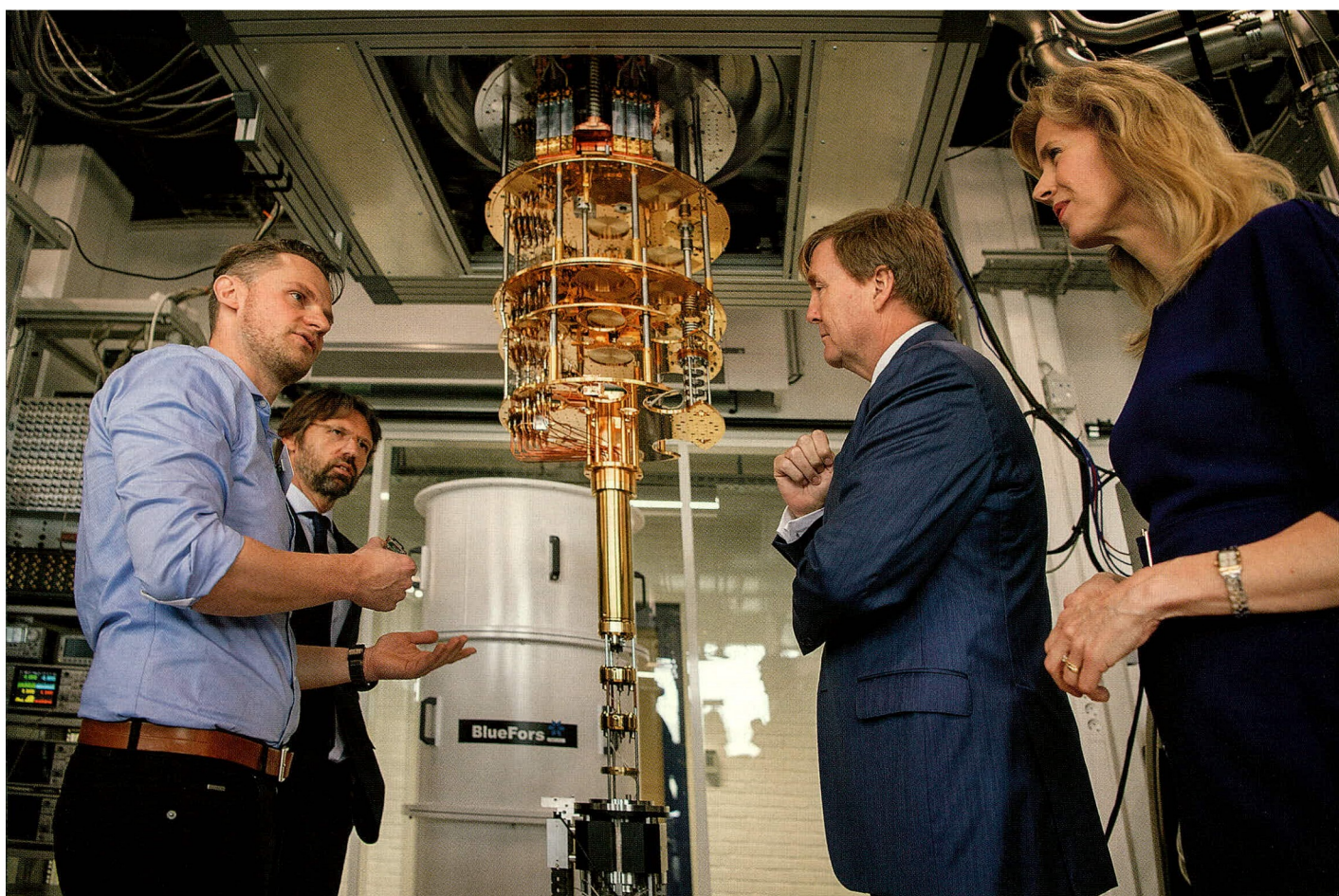
Dat maakt berekeningen denkbaar waar zelfs de huidige supercomputers de tanden op stukbijten. Een klassiek terrein van toepassing is de cryptografie, waar informatie gecodeerd wordt

en ontcijferd. Quantumcomputers zullen codes kraken die onkraakbaar leken. Maar ook op andere terreinen zou het quantumrekenen een doorbraak kunnen betekenen, bijvoorbeeld in het voorspellen van eiwitstructuren, of de werkzaamheid van geneesmiddelen. En oh ironie: quantumcomputers zullen ook quantumvraagstukken kunnen oplossen die nu nog te hoog gegrepen lijken, is de verwachting.

Op papier is de quantumrevolutie haast onvermijdelijk. Maar de praktijk is een heel ander verhaal. Gewone bits zijn beproefde technologie, vooral in halfgeleiders. Qubits zijn een stuk fragieler. Er zijn diverse manieren denkbaar om een qubit te realiseren, maar allemaal berusten die op delicate natuurkundige verschijnselen. In materialen en structuren die zich ingewikkelder gedragen dan verwacht. Een instituut als QuTech, het quantum onderzoeksinstituut in Delft van de universiteit en TNO, besteedt bijvoorbeeld veel tijd aan de beheersing en correctie van rekenfouten in quantumsystemen. Een ander speerpunt is de fysieke opbouw van quantumbits, waar posities en verbindingen een wezenlijke rol blijken te spelen. Binnen QuTech werken fysici innig samen met elektrotechnici en informatici. Bijvoorbeeld van de faculteit Elektrotechniek, Wiskunde en Informatica, aan de overkant van de Mekelweg, en met de Amerikaanse chipbouwer Intel. De ontwikkelingen gaan letterlijk razendsnel, zegt Lieven Vandersypen, wetenschappelijk directeur van QuTech.

Majorana

Sinds 2019 is Microsoft de buur van onderzoekscentrum QuTech. Basis voor de inspanningen van het Amerikaanse Microsoft zijn metingen van Kouwenhoven en zijn team uit 2012. Op een chip met een structuur van supergeleiders en ragfijne, aan de TU Eindhoven ontworpen draden van halfgeleiders zagen zij een effect waar fysici al zeventig jaar naar op zoek waren. Onder bepaalde omstandigheden leek een zogeheten majoranatoestand te ontstaan, een soort synthetisch deeltje dat op papier ideaal is als qubit. Gewone qubits zijn ongemak-



Opening van het Microsoft Quantum Lab door de Koning, met Leo Kouwenhoven (tweede van links). Foto: QuTech - Photo Republic.

kelijk gevoelig voor verstoringen van buiten. Majoranaparen hebben vooral oog voor elkaar en negeren van nature de roerige omgeving. Kouwenhoven haalde er destijds het omslag van het topblad *Science* mee.

Bijna tien jaar later, eerlijk is eerlijk, worstelen onderzoekers nog steeds met de praktische toepasbaarheid van de waarnemingen. Sterker, een nieuw bewijs uit 2018 voor majoranatoestanden in de Delftse nanodraadjes bleek onlangs toch niet hard genoeg, ook volgens het team van Kouwenhoven zelf. In een recente publicatie lieten zij weten hun artikel uit 2018 terug te trekken. (Meer is op het moment van schrijven niet bekend – red.) Een tegenslag voor de technische toepassingen, maar tegelijk niet heel ongewoon in grensverleggend onderzoek. Een vleugel verder zegt wetenschappelijk QuTech-directeur Lieven Vandersypen in het natuurkundegebouw in Delft: “Het onderzoek

beweegt zich op de grens van wat we weten, en tegelijk is er de belofte van de geweldige toepassing.” Bij QuTech werken zo’n 250 onderzoekers en studenten aan de basistechnieken voor quantumcomputers en ook het quantuminternet. De focus ligt hier vooral op quantumtoepassingen in chiptechnologie.

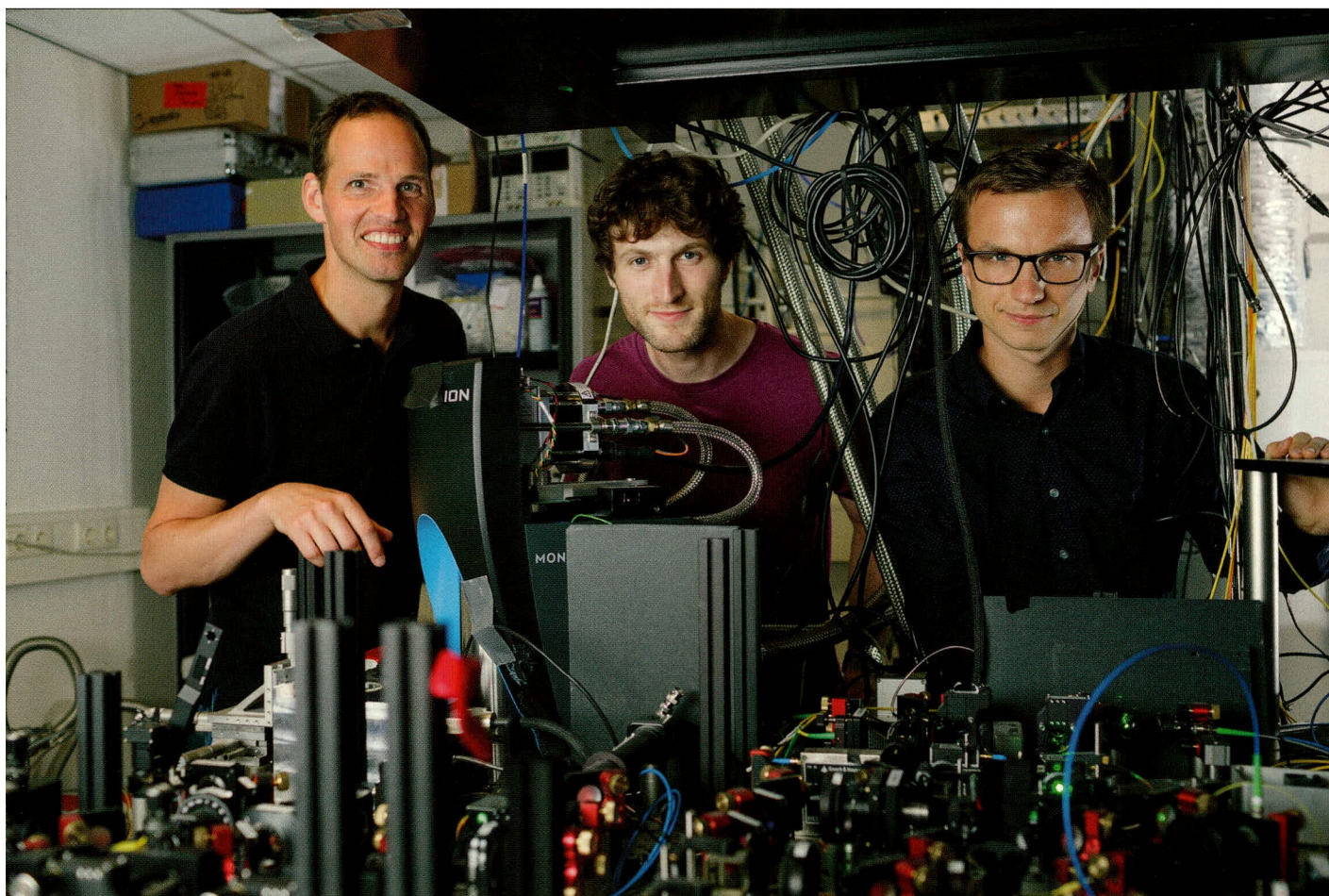
Spookachtig

Het QuTech-lab staat vol ultramoderne meetopstellingen, optische laserbanken en manshoge koelsystemen. Het is de plek waar naar de optimale qubit wordt gezocht, maar ook waar een paar jaar geleden hoogleraar Ronald Hanson voor wereldnieuws zorgde. Hij bracht een quantumverband tot stand tussen twee diamanten op meer dan een kilometer onderlinge afstand, die aantoonbaar weten van en reageren op elkaars toestand. Spookachtig noemde Einstein die mogelijkheid al. Maar een realiteit,

toonde Delft aan. En misschien ook een goede basis voor een internetachtig netwerk dat principieel niet is af te luisteren. QuTech werkt hard aan zo’n quantuminternet in de groep van natuurkundige en computerwetenschapper Stefanie Wehner, zelf ooit een van de eerste professionele hackers in de wereld. In de Randstad wordt de komende jaren aan een prototype gewerkt tussen Delft, Amsterdam en Utrecht.

Samenspel

Ook opende onlangs het Finse bedrijf Bluefors, dat koelsystemen levert voor quantumtechnologie, een eigen lab in Delft, vlak bij hun meest geavanceerde gebruikers. En eerder sloot QuTech om dezelfde reden een deal met de Amerikaanse chipmaker Intel. Een win-winsituatie, noemt Vandersypen dat soort samenwerking. De opkomst van de quantumtechnologie is te danken aan een nauw samen-



Ronald Hanson (links) met collega's in zijn lab. Foto: Marieke de Lorijn/Marsprine.

spel van fundamentele natuurkunde enerzijds en technologie anderzijds. De quantumtheorie zelf stamt in de basis al uit het begin van de vorige eeuw. Die theorie leidde halverwege die eeuw tot de uitvinding van de transistor en andere microtechnologie. Maar diezelfde technologie maakte het omgekeerd mogelijk om het gedrag van superkleine materiële structuren in detail te bestuderen, waardoor de quantumwereld verder kon worden doorgrond.

In Nederland is daarbij één naam onontkoombaar: Hans Mooij. In de jaren negentig van de vorige eeuw was hij hoogleraar technische natuurkunde in Delft. Mooij zette met jonge collega's als Leo Kouwenhoven en anderen een onderzoeksprogramma op naar het quantumgedrag van steeds kleinere bouwsels van halfgeleiders, supergeleiders en andere materialen. Dat leverde een reeks intrigerende ontdekkingen en inzichten op, maar legde ook de ba-

sis voor de Nederlandse quantumfaam wereldwijd. Zijn promovendi zitten van Delft, Eindhoven en Groningen tot verre buitenland. Mooijs voortdurende combinatie van techniek en fundamentele natuurkunde bleek een gouden greep, oordeelde de jury van de oeuvreprijs die hij als nestor van het vak onlangs van de Koninklijke Hollandse Maatschappij der Wetenschappen in Haarlem ontving. En begin dit jaar werd de belangrijkste collegezaal van de afdeling Technische Natuurkunde op de TU Delft omgedoopt tot de Mooijzaal.

Titanengevecht

Inmiddels is de race naar de quantumcomputer een titanengevecht tussen de grootste techbedrijven ter wereld geworden. Google, IBM en andere proberen als eerste een werkende machine te realiseren, vaak nadrukkelijk de publiciteit zoekend. Kan Nederland in dat geweld eigenlijk wel iets klaarmaken?

Vandersypen ziet een wezenlijke rol voor de publieke onderzoeksinstituten. "Anders dan de industriële labs kunnen wij ons laten leiden door wat we ontdekken en door de vragen die dat opwerpt. Hier, en bij andere universitaire groepen in bijvoorbeeld Leiden, Amsterdam en Twente, krijgt de wetenschappelijke nieuwsgierigheid alle ruimte", zegt hij. "Zelfs giganten als Google of IBM kunnen nooit alle ideeën gaan genereren die nodig zijn om quantumcomputing te realiseren." Tegelijk noemt hij samenwerking met industriële partners en bijvoorbeeld ook TNO wel cruciaal. Toepassing en fundamenteel hebben elkaar voortdurend nodig. In Delft ontmoeten onderzoekers, start-ups en bedrijven elkaar ook letterlijk in een gezelschap dat Quantum Delft is genoemd. En op fundamenteel niveau is er nog een wereld te winnen. De quantumtechnologie staat nog in de kinderschoenen, is een veelgehoord oordeel.

GEKKER DAN QUANTUM WORDT HET NIET

De pioniers van de quantumfysica, in de jaren twintig van de vorige eeuw, mensen als Albert Einstein, Niels Bohr en Werner Heisenberg, zouden vermoedelijk onder de indruk zijn van alle baanbrekende technologie anno 2021 waarvoor hun theorie de basis is. In essentie zegt de quantumtheorie dat op de allerkleinste schaal materie en energie uit pakketjes bestaan: tegelijkertijd deeltjes en quanta. De wetten die in die wereld gelden, zijn anders dan die van de klassieke natuurkunde. Deeltjes kunnen op verschillende plaatsen tegelijk zijn, hun eigenschappen onbepaald en de uitkomsten van metingen aan deze deeltjes dus toeval, als een lot uit een loterij. Geen basis voor betrouwbare technologie, lijkt het. Pas in de tweede helft van de vorige eeuw, groeide het inzicht dat die quantumschimmigheid ook kansen biedt. Bijvoorbeeld in berekeningen die opeens simultaan kunnen worden uitgevoerd, in plaats van stap voor stap.

NEDERLANDSE QUANTUMPIONIEREN

Nederlandse natuurkundigen hebben van meet af aan een rol gespeeld bij de ontwikkeling van de quantumfysica. Een van de eerste concrete quantumverschijnselen, de supergeleiding, werd in 1913 in Leiden ontdekt door Heike Kamerlingh Onnes. In Leiden maakte Paul Ehrenfest met gemengde gevoelens de opkomst mee van de nieuwe theorie van grote namen als zijn vriend Albert Einstein, Werner Heisenberg, Arnold Sommerfeld, Max Born en Erwin Schrödinger. Een aantal van zijn leerlingen leverde wel grote bijdragen, zoals Sam Goudsmit en George Uhlenbeck, die in 1925 de quantumspin van het elektron begrepen. Hendrik Kramers en Hendrik Casimir waren in de jaren twintig van de vorige eeuw een tijdlang de secondant van quantumpionier Niels Bohr in Kopenhagen, en verantwoordelijk voor een aantal belangrijke inzichten. In de jaren negentig zette Hans Mooij in Delft de quantumtechnologie op de kaart, de kiem voor Quantum Delta Nederland. Tegenwoordig gelden ook Leo Kouwenhoven, Ronald Hanson en de Amerikaanse Nederlander Dirk Bouwmeester internationaal als grote namen.



Lieven Vandersypen. Foto: QuTech - New Media Centre.

Dat is vergelijkbaar met hoe in de jaren veertig van de vorige eeuw de transistor werd bedacht die tot de huidige digitale wereld heeft geleid. En niet alleen op technisch vlak is er nog reusachtig veel werk te verzetten.

In Amsterdam is bijvoorbeeld Harry Buhrman, hoogleraar informatica bij het Centrum voor Wiskunde en informatica, grondlegger van QuSoft. Dat is een collectief van tientallen onderzoekers dat zich concentreert op de software en protocollen die voor quantumrekenen nodig zullen zijn. Rekenen met concrete enen en nullen is een ding, rekenen met onbepaalde qubits iets heel anders en onderwerp van fundamenteel onderzoek. Volgens de Nationale Wetenschapsagenda vormt QuSoft samen met QuTech, Leiden en de QT/e-groep in Eindhoven de ruggengraat van de Nederlandse quantumdelta.

Nooit perfect

Resteert de vraag wanneer de eerste quantumcomputer een feit is, en of die Nederlands zal zijn. QuTech-directeur Lieven Vandersypen is er nuchter onder. Maar er is nog veel werk te doen, zegt hij.

“Het ligt er helemaal aan waar je de lat legt. Systemen met vijftig qubits zijn er al, en die kunnen rekenen. Maar wat je wilt is een machine die iets oplost wat een supercomputer niet kan oplossen. Dat vergt een paar honderd perfecte qubits. En omdat ze nooit perfect zijn in werkelijkheid honderdduizend of een miljoen qubits. Dat is nog ver weg. Maar er wordt aan gewerkt, en niet in de laatste plaats in Nederland.”

In het gevolg van de Koning wandelde op die februaridag in 2019 in Delft ook diens broer Prins Constantijn mee, zelf betrokken bij het opzetten van start-ups rond de TU Delft. De quantummagie, stelt hij vast, is uiteindelijk ook maar gewoon een gebouw met kantoren en werkplaatsen, waar hard en nuchter wordt gewerkt. “Het klinkt misschien als Jules Verne, maar het is toch ook heel gewoon. Niemand die het quantum helemaal begrijpt, ook de onderzoekers niet. Maar ze ontwerpen en bouwen een grote machine en zien hoe ver ze gaan komen. Dat is mooi.”