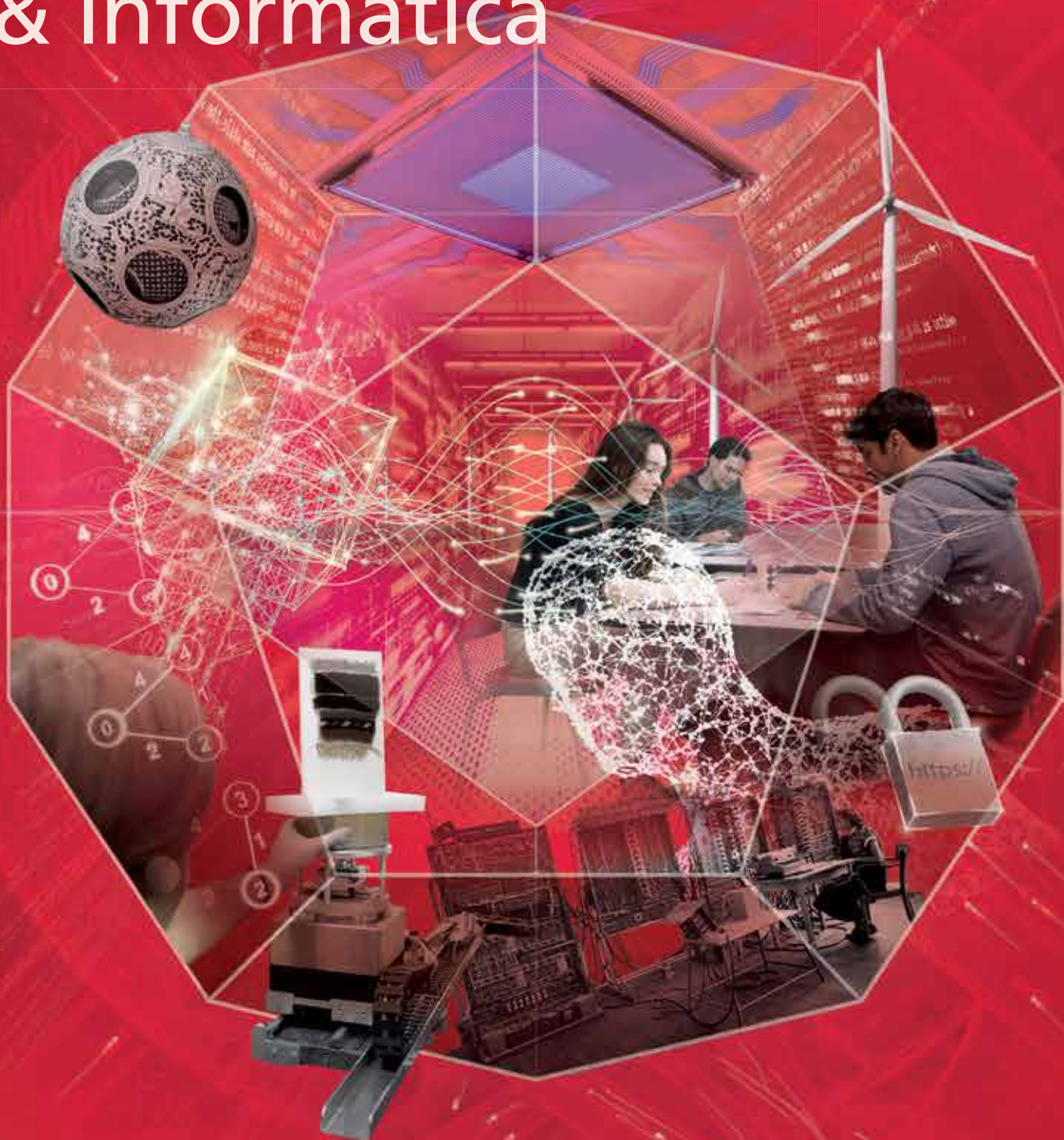


CWI

Centrum Wiskunde & Informatica

EEN UITGAVE VAN
NewScientist
2021



Looking for a research position
in computer science or mathematics?
Join CWI and find...



Societal Impact



CWI

COLOFON

Deze special is gemaakt door de redactie van *New Scientist* in opdracht van Centrum Wiskunde & Informatica ter gelegenheid van het 75-jarig bestaan.

Centrum Wiskunde & Informatica

Science Park 123
1098 XG Amsterdam
www.cwi.nl
info@cwi.nl
Twitter: @CWInl
LinkedIn: linkedin.com/company/centrum-wiskunde-en-informatica
Instagram: @cwi_amsterdam

Hoofredactie Ans Hekkenberg, Marije Huisjes, Annette Kik, Daniëlle Kollerie en Aschwin Tenfelde

Eindredactie Wim de Jong

Beeldredactie Jaap Augustinus

Aan dit nummer werkten mee Jaap Augustinus, Pepijn Barnard, Bram Belloni, Laura Bergshoeff, Bob Bronshoff, Yannick Fritschy, Fenna van der Grient, Marleen Hoebe, Jim Jansen, Joris Janssen, Wim de Jong, Jean-Paul Keulen, Ivar Pel, Maaike Putman, Dorine Schenk, Dennis Vaendel, Sebastiaan van de Water

Basisontwerp Sanna Terpstra (Twin Media bv)

Vormgeving Donna van Kessel en Claudia van der Pol (Twin Media bv)

CONTACT NEW SCIENTIST

Mail redactie@newscientist.nl (voor pers-berichten), info@newscientist.nl (uitsluitend voor vragen aan redactie), klantenservice@newscientist.nl **Tel** +31-(0)85-6202600

Adres (post en bezoek)
Oostenburgvoorstraat 165, 1018 MR Amsterdam

Brandmanager Thijs van der Post

(thijs@newscientist.nl)

Sales Alex Sieval (alex@newscientist.nl)

Druk Habo DaCosta bv
ISSN 2214-7403

De uitgever is niet aansprakelijk voor schade als gevolg van druk- en zetfouten.

COPYRIGHT Niets, maar dan ook echt helemaal niets uit deze uitgave mag op enigerlei wijze worden overgenomen of in een geautomatiseerd gegevensbestand worden opgenomen zonder schriftelijke toestemming van de uitgever.

De uitgever heeft ernaar gestreefd de auteursrechten van de illustraties volgens de wettelijke bepalingen te regelen. Zij die menen nog zekere rechten te kunnen doen gelden, kunnen zich wenden tot de uitgever.



75 jaar dynamiek

Het CWI is jarig, en dat vieren we met een kijkje in de keuken van het instituut. De afgelopen 75 jaar was dit de geboorteplek van talloze doorbraken op het gebied van wiskunde en informatica. Al in 1952, zes jaar na de oprichting, ontwikkelden onderzoekers hier bijvoorbeeld de eerste computer van Nederland. Daarna zouden nog vele successen volgen.

In dit magazine blikken we echter net zozeer terug op het verleden, maar kijken we vooral naar de toekomst. Waar werken CWI-onderzoekers nu aan, en waar liggen de grootste uitdagingen?

Die toekomstgerichte blik is kenmerkend voor de wetenschap, en het CWI is daarop geen uitzondering. Als nationaal instituut is dit de plek waar wiskunde en informatica samenkomen, en waar wetenschappers gewaagde onderzoekswegen verkennen.

Het CWI staat daarin niet alleen. Samen met acht andere instituten is het CWI onderdeel van de koepel NWO-I, ofwel de institutenorganisatie van

NWO. De instituten bestrijken gezamenlijk, elk vanuit hun eigen expertise, een veelkleurig palet aan onderzoeksvelden, van deeltjesfysica en sterrenkunde tot zee-onderzoek en criminologie. Net als de overige instituten vervult het CWI de rol van een nationaal onderzoekscentrum. Het zoekt altijd de verbinding met andere organisaties in binnen- en buitenland, zowel met academische partners als bedrijven en maatschappelijk instellingen. Dat leidt tot prachtige doorbraken, die niet alleen fundamentele kennis uitbouwen, maar ook maatschappelijke impact hebben. Ik ben dan ook trots op de prestaties van het CWI, en feliciteer alle CWI'ers met dit jubileum. Ik hoop dat u als ontvanger van het magazine er met net zoveel plezier over leest als ik.

Miriam Luizink
Directeur NWO-I



Interviews

06 Ton de Kok

'Fundamenteel onderzoek is geen luxe.'

16 Monique Laurent en Sophie Huiberts

'Het diversiteitsprobleem is geen vrouwen-probleem.'

28 Tim Baarslag

'Laat een computer onderhandelen over je salaris.'

34 Guido van Rossum

'Python is mijn halve leven.'

In beeld

04 Ingezoomd

Ambulances zijn eerder ter plekke dankzij de wiskunde van Rob van der Mei.

09 Uitgelicht

Laura Hollink leert Al omgaan met verschillende perspectieven.

10 Inzicht

Bliksem onder de wiskundige microscoop.

15 Uitgelicht

Jie Li ontwerpt omgevingen waar mensen virtueel bij elkaar kunnen komen.

20 Inzicht

CWI 75 jaar baanbrekend.

27 Uitgelicht

Peter Boncz maakt dataopslag en -analyse sneller en efficiënter.

32 Inzicht

Zo werken neurale netwerken.

En verder

12 Het hart der dingen

In het Flex-ray Lab openbaren natuur en kunst hun verscholen binnenzijde.

18 Spin in het quantum-computerweb

Als de quantum-computer er straks is, heeft QuSoft alvast de software paraat.

22 Onvermijdelijke onzekerheid

De onderzoeksgroep Scientific Computing probeert de onzekerheid die nu eenmaal bij modellen hoort zo klein mogelijk te maken.

24 Meer dan wetenschap

Talrijke onderzoeksprojecten van het CWI groeien uit tot bedrijven.

Een greep uit het aanbod van deze spin-offs.

30 Veiligheid boven alles

Verschillende onderzoeksgroepen van het CWI zorgen dat onze digitale geheimen niet op straat belanden.

36 Alledaagse wiskunde

Bijzondere wiskundige oplossingen voor heel gewone problemen.

39 Software als taal

Wetenschappers, industrie en beleidsmakers moeten elkaars taal leren spreken om de kwaliteit van software te waarborgen, betogen Jurgen Vinju en Tijs van der Storm.



COVERONTWERP: PASCAL TIEMAN
BEELD: ROBERT VAN LIERE EN JOHANNES ABELING



'Fundamenteel
onderzoek
is geen luxe'



De wiskundigen en informatici die het CWI bevolken moet je behandelen als topvoetballers, vindt directeur **Ton de Kok**: geef ze de ruimte om hun talent tot volle bloei te laten komen. Zo kunnen ze de beste oplossingen aandragen voor behoeften in de samenleving.

Tekst: Joris Janssen en Jim Jansen
Fotografie: Bob Bronshoff

Denk je aan wetenschap, dan denk je al gauw aan universiteiten. Aan omvangrijke kennisbolwerken die allerlei verschillende uit hoeken van de wetenschap verkennen en een stroom studenten opleiden. Het Centrum Wiskunde & Informatica (CWI) doet het anders. Aan dit onderzoeksinstituut is het wiskunde en informatica dat de klok slaat. En hoewel jonge onderzoekers er hun eerste stappen in de wetenschap zetten, tref je in het CWI-gebouw op het Science Park in Amsterdam geen studenten aan.

Het CWI heeft sinds 1 oktober 2020 een nieuwe directeur: Ton de Kok. Hij heeft een verleden bij Philips, waar hij zich bezighield met de wiskundige optimalisatie van bedrijfsprocessen. Daarna stapte hij over naar de Technische Universiteit Eindhoven waar hij nu een dag per week hoogleraar Quantitative Analysis of Operational Processes is. We praten met hem over de unieke positie waar het CWI zich in bevindt en over wat we van het CWI de komende vijf jaar – de periode van zijn aanstelling – kunnen verwachten.

U was een beetje verbaasd dat het CWI bij u uitkwam als mogelijke nieuwe directeur. Hoe dat zo?

‘Ik heb mezelf weleens een afgedreven wiskundige genoemd. Hier bij het CWI lopen echt de Lionel Messi’s rond van de wiskunde

en informatica. Dat zou ik over mezelf niet durven beweren. Ik heb in mijn vak best een internationale reputatie opgebouwd, maar ik ken mijn plek. Toen ik laatst een wetenschappelijk artikel van een van onze onderzoekers las over software voor toekomstige quantumcomputers dacht ik: ik ben wel wat gewend, maar dit is toch behoorlijk pittig.

Gelukkig is het mijn taak om me vooral bezig te houden met meer overkoepelende ontwikkelingen, zoals de positionering van het CWI in het grote veld van vraagstukken waar wiskunde en informatica relevant bij zijn. Dan praat je niet over vakinhoudelijke zaken, maar over hoe je jezelf samen met anderen zo organiseert dat je tot een maximaal resultaat komt. En daar heb ik wel enige kaas van gegeten.’

Eén van de unieke aspecten van het CWI is dat het wiskunde en informatica samenbrengt. Wat houdt dat in?

‘Wiskunde kan bestaan zonder realiteit. Je kunt wiskunde bedrijven in een puur abstracte wereld. Maar het CWI is er vanaf het begin op gericht geweest – toen heette het nog het Mathematisch Centrum – om wiskunde in te zetten op maatschappelijke toepassingen. Denk aan berekeningen van veilige dijkhooften in de jaren vijftig en de ontwikkeling van de eerste computers in Nederland. Een goed voorbeeld van het samenspel tussen wiskunde en informatica

is het ‘kortstepad-algoritme’ dat Edsger Dijkstra in 1959 ontwikkelde. Dat algoritme staat aan de basis van de navigatiesystemen van nu.’

Wat zijn de voordelen van het verenigen van wiskunde en informatica binnen één instituut?

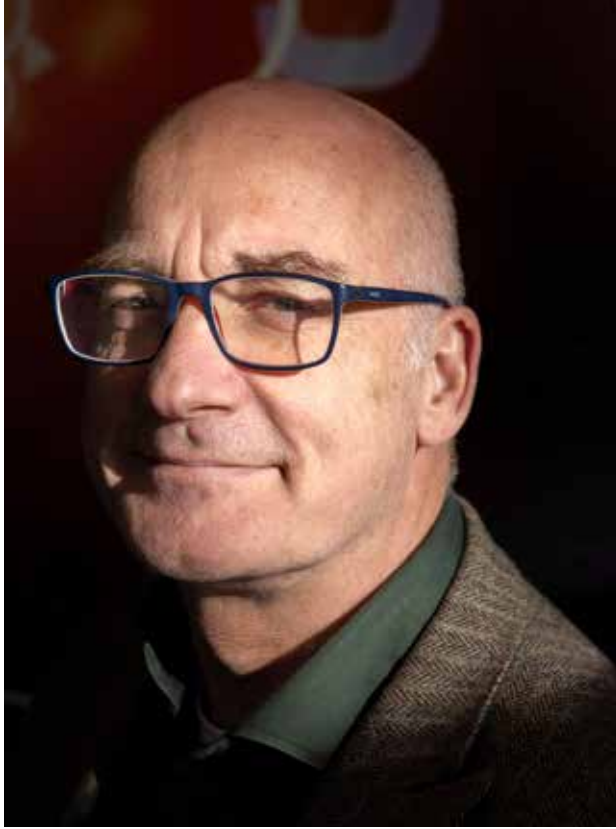
‘Midden jaren tachtig werd duidelijk dat informatica het wetenschappelijke werkveld bij uitstek is om wiskunde breed in te zetten in de samenleving. Computers en informatiesystemen begonnen een steeds grotere rol te spelen. Er ontstonden allerlei algoritmen met als doel processen optimaal te laten verlopen. Hierbij speelt wiskunde een belangrijke rol. Steeds weer proberen wiskundigen bewijzen te leveren voor de effectiviteit en efficiëntie van de algoritmen waar informatici mee komen. Zo gauw je begrijpt hoe en waarom een algoritme werkt, kun je het slimmer implementeren. Doordat op het CWI wiskundigen en informatici op één locatie werken, versnel je dit proces.’

Hoe kijkt u naar de positie die het CWI in deze ontwikkelingen inneemt?

Wat voor focus heeft u voor ogen?

‘Als je aan mij vraagt waar we goed in moeten zijn, dan is mijn antwoord: die dingen waar we al heel lang goed in zijn. We gaan wat mij betreft nu niet ineens de breedte in. Je kunt je niet overal tegelijk mee bezighou-

‘Bij het CWI lopen de Messi’s van de wiskunde en informatica rond’



Ton de Kok is sinds oktober 2020 directeur van het CWI.

‘Mensen kunnen zich hier lekker ingraven in hun onderzoek’ ↵

den, want je moet veel investeren om op een gebied een volgende stap te kunnen zetten. Vanuit de fundamenteën van wiskunde en informatica kunnen we, samen met kennispartners, inspelen op behoeften vanuit de samenleving op gebieden als energietransitie, mobiliteit, duurzame voedselproductie en communicatie. Zo investeren we nu veel in zaken zoals de quantumcomputer en cryptografie.’

Wat voor rol heeft het CWI in de ontwikkeling van de quantumcomputer?

‘Een van onze onderzoekers, Paul Vitányi, deed in de jaren negentig voor het eerst onderzoek naar algoritmen die je in toekomstige quantumcomputers zou kunnen gebruiken. Een andere informaticus van ons, Harry Buhrman, stortte zich op de complexiteit van deze algoritmen en verwierf daar wereldfaam mee. Zijn onderzoek is een goed voorbeeld van hoe wiskundigen inzicht kunnen geven in de werking van quantumalgoritmen nog voordat er überhaupt een quantumcomputer beschikbaar is om ze mee te testen.

Op het CWI onderzoeken we welke problemen quantumcomputers veel sneller zouden kunnen oplossen dan huidige com-

puters. Quantumcomputers kunnen een enorme impact hebben op bijvoorbeeld de opwekking, opslag en distributie van energie. Maar ook op het slim gebruiken van gegevens vanuit het *internet of things*, op zelfrijdende auto's, op de ontwikkeling van betere medicijnen, ga zo maar door. Als we ons blijven richten op de fundamentele aspecten van computersystemen en algoritmen dan kan het CWI over de volle breedte van deze toepassingsgebieden een bijdrage leveren.’

Hoe kun je dit soort razendsnelle ontwikkelingen bijhouden als onderzoeksinstituut?

‘Als wetenschapper moet je die ontwikkelingen eigenlijk helemaal niet bij willen houden. Je moet op zoek naar de wetenschappelijke uitdagingen die achter die ontwikkelingen schuilgaan. We moeten blijven werken aan fundamentele vraagstukken. Vaak duurt het even voordat je daarvoor oplossingen vindt. Soms lukt het met een toevalstreffer. Maar vaak vereist het stug volhouden samen met andere mensen in de wereld die het vermogen hebben om problemen te structureren, abstraheren, formuleren en daaruit resultaten af te leiden. Met dit

doorzettingsvermogen kunnen we ons bij het CWI optimaal inzetten voor welzijn en welvaart in Nederland en de rest van de wereld.’

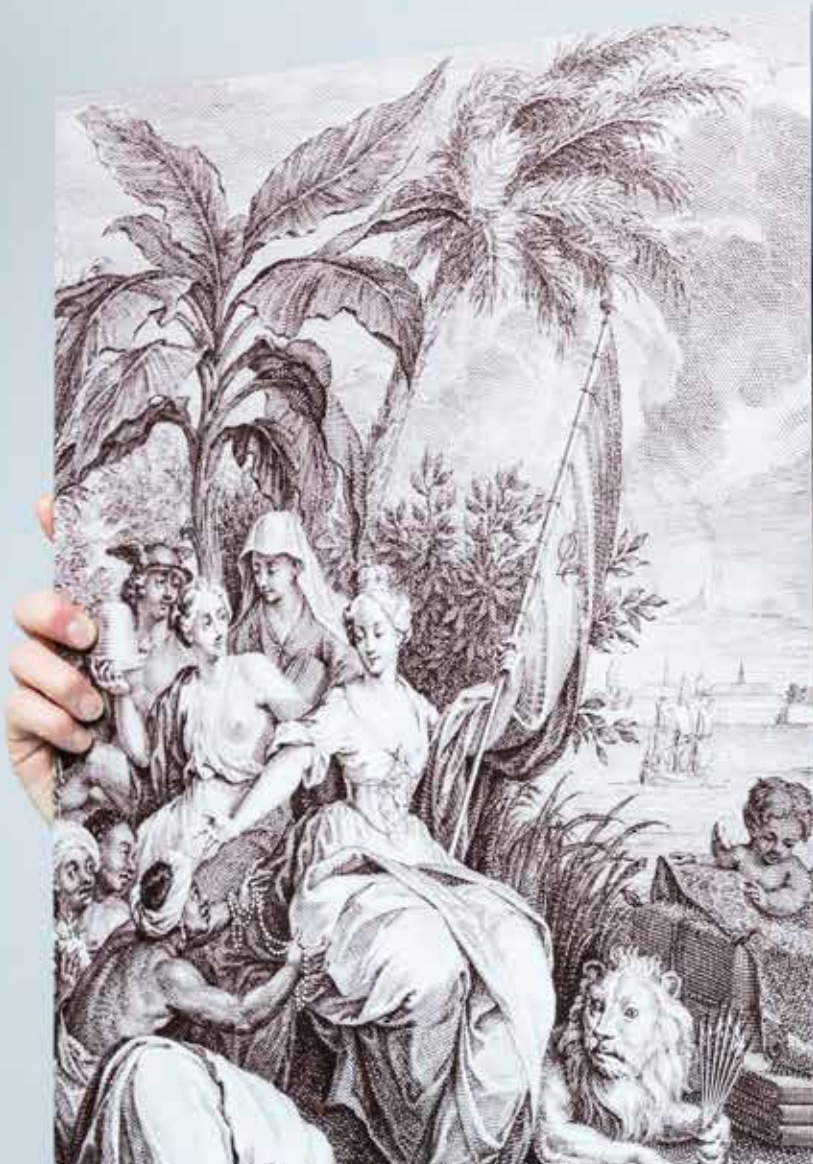
Is die focus op fundamentele wetenschap een andere eigenschap die het CWI een unieke positie geeft binnen de Nederlandse onderzoekswereld?

‘Het unieke aan het CWI is dat hier ontzettend veel buitengewoon slimme mensen zitten, die heel goed zijn in hun vak. En het mooie is dat die zich hier volledig op hun onderzoek kunnen concentreren. Mensen kunnen zich hier lekker ingraven in hun onderzoek. En dat is ook nodig. De buitenwereld ziet dat soms als vrij luxe. Maar die term vind ik niet helemaal op zijn plek. Je kunt het een beetje vergelijken met de ‘luxepositie’ waar topvoetballers in zitten. Die komt volledig op het conto van hun talent.’

Waar hoopt u dat het CWI over vijf jaar staat?

‘Uiteindelijk is succes af te meten aan wat anderen over je zeggen. Ik hoop dat men over vijf jaar nog steeds blij is met het CWI. Dat geldt voor Nederlandse universiteiten, maar bijvoorbeeld ook voor NWO. Je kunt geen goede reputatie verdienen door heel hard te schreeuwen dat je goed bent. Je wilt dat anderen zeggen: ik wil bij jou zijn.

Daarnaast vind ik dat we realistisch moeten blijven. Niet alleen wij op het CWI, maar ook de mensen eromheen. Met 17 miljoen Nederlanders bepalen we gezamenlijk hoeveel geld we aan wetenschap uitgeven. In het licht van de geschiedenis van wiskunde en informatica in Nederland vind ik dat we best een hoge ambitie mogen hebben. We moeten af van het idee dat dit soort fundamenteel onderzoek luxe is.’ ■



UITGELICHT

'We willen AI leren omgaan met verschillende perspectieven'

'Op de ets *Allegorie op de VOC*, gemaakt door Jan Punt in 1739, zie je een vrouw die geschenken ontvangt. Zij is de personificatie van de VOC. Op de achtergrond is Batavia verbeeld, destijds het middelpunt van de Nederlandse koloniale gebieden', vertelt CWI-onderzoeker Laura Hollink. 'De ets toont hoe trots Nederlanders waren op hun rijkdom en handelsgeest. Dat perspectief is de keuze van de kunstenaar. Er is ook het perspectief van inwoners van de koloniale gebieden. Zij leefden niet in rijkdom, maar werden uitgebuit. Onze huidige digitale infrastructuur is niet gebouwd om te kunnen omgaan met meerdere perspectieven. Met het nieuwe Cultural AI Lab willen wij cultureel erfgoed zoals deze ets gebruiken om kunstmatig intelligente (AI) computersystemen te leren omgaan met verschillende perspectieven.' Hiervoor werken informatici van

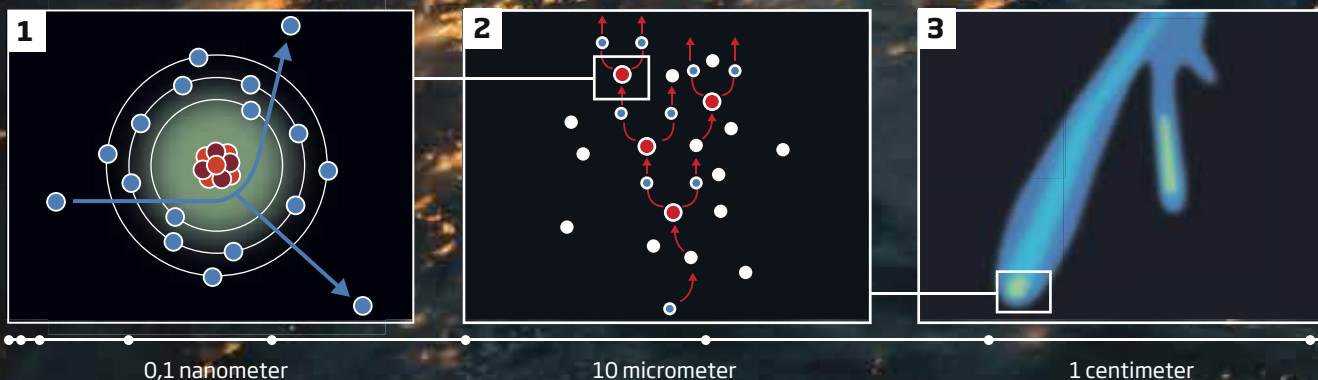
onder meer het CWI samen met geesteswetenschappers en instellingen voor cultureel erfgoed, die op dit gebied veel ervaring en kennis hebben. Hollink: 'Het doel is om uiteindelijk AI te ontwikkelen die bijvoorbeeld grote erfgoedcollecties kan doorspitten om perspectieven te vergelijken of om te analyseren hoe perspectieven veranderen in de tijd.' Het Cultural AI Lab, waar ook het Rijksmuseum deel van uitmaakt, wil collecties in een nieuwe context kunnen plaatsen en een completer beeld geven. Hollink: 'AI zou hier in de toekomst bij kunnen helpen door bijvoorbeeld impliciete perspectieven expliciet te maken, zodat je weet vanuit welk perspectief een werk beschreven is. Ook kan AI mogelijk nieuwe koppelingen vinden tussen erfgoedobjecten, bijvoorbeeld tussen deze ets en een object van iemand die destijds leefde in Batavia.' -DS

Bliksem onder de wiskundige microscoop

Elke seconde raken 45 bliksemschichten onze aardbol. Bliksem lijkt dus een vertrouwd verschijnsel, maar het fenomeen heeft steeds weer nieuwe verrassingen voor ons. Zo is nog niet zo lang bekend dat gigantische bliksemschichten ook boven de wolken omhoog kunnen schieten, dat bliksem de lucht radioactief kan maken en dat het zelfs antimaterie de ruimte in kan slingeren.

Om de kilometers lange bliksem (zie 5 en 6) te begrijpen, moeten we inzoomen op de vrije elektronen in een onweerswolk, die ruwweg na elke miljoenste meter botsen met een luchtmolecuul (zie 1). Deze microscopische processen zijn te klein en te snel om waar te nemen, maar CWI-onderzoekers kunnen ze nu met computermodellen nabootsen en de ontladingen op steeds grotere lengteschalen berekenen (zie 2 t/m 4).

noorderlicht





Mini-bliksems in de technologie

De CWI-modellen worden ook toegepast bij de ontwikkeling van nieuwe technologieën, zoals *plasma medicine*. Een 'mini-bliksem' kan agressieve stikstof- en zuurstofverbindingen en uv-straling produceren. Dit kan worden ingezet om bacteriën te doden, terwijl het menselijke cellen intact laat.

- 1 Elektron-molecuulbotsingen** In een onweerswolk ontstaan hoge elektrische velden die vrije elektronen versnellen. Als zo'n energetisch elektron botst met een luchtmolecuul, kan het molecuul splitsen in een positief ion en een tweede vrije elektron. Door de botsingen vinden ook scheikundige omzettingen van de moleculen plaats, daarom produceert onweer broeikasgassen. Scheikundige omzettingen liggen ook ten grondslag aan vele technische toepassingen (zie kader). Als de elektronenenergie hoog genoeg is, ontstaat er gammastraling, radioactiviteit en antimaterie.
- 2 Ionisatielawine** Als het elektrische veld hoog genoeg is, ontstaat er een lawine van vrije elektronen en ionen. Zo kan er een plasma ontstaan: een soep van heel veel positief geladen ionen en negatief geladen elektronen tussen de lucht moleculen.
- 3 Bundeling van krachten** Het plasma bundelt de elektrische krachten voor de punt van een langgerekt plasmakanaal. Daardoor kan het plasma voor de punt verder groeien, en af en toe vertakken. Door deze bundeling van krachten kan de bliksem ook buiten de wolk doorgroeien.
- 4 'Bliksembomen'** De bliksemgroei over afstanden van meer dan een meter modelleert het CWI als een vertakkende boom. Door goede wiskundige benaderingen nemen de onderzoekers ook alle relevante processen op kleinere schaal mee.

flits van gammastraling

bliksem



1 meter



300 meter



3 kilometer

Een duik in het **HART DER DINGEN**

Sprookjes waarschuwen ons voor de zucht naar verborgen kennis. Wie te graag weten wil hoe de mooiste dingen van binnen zijn opgebouwd, eindigt met een stapel scherven. Althans, dat gold vroeger, toen het FleX-ray Lab nog niet bestond. In deze bijzondere ruimte van het CWI openbaren natuur en kunst hun verscholen binnenzijde. In twee, drie en vier dimensies.

Tekst: Sebastiaan van de Water

/ Heb je de serie *Chernobyl* gezien? Dan komt dit je misschien bekend voor.' Sophia Bethany Coban zwaait met een handzaam apparaatje zwierig langs de metalen wanden van een grote machine. Klik, klinkt het zachtjes. Duizenden kilometers scheiden ons van de radioactieve spookstad Prypjat, maar ook hier op Science Park in Amsterdam dwingt het universele stralingslogo, gesoldeerd op de grote machine, respect af. Klik. Maar het ritme van de geigerteller blijft traag. 'We doen dit puur voor de zekerheid. Deze wanden zijn heel dik en met lood verzwaard,' zegt Coban, die als postdoc-onderzoeker verbonden is aan de Computational Imaging-groep (CI-groep) van het CWI. Trots klopt ze op de robuuste machine die ze de voorbije jaren beter heeft leren kennen dan wie dan ook. De FleX-ray scanner. Erg elegant oogt het ding niet. Een strook rode ledlampjes doet dienst als enige versiering. Het doet

een beetje denken aan een tijdmachine uit een stripverhaal. Voor wie de capaciteiten van de FleX-ray kent, is die vergelijking niet eens zo ver gezocht.

Drie jaar geleden was deze kamer op het CWI nog een veredelde bezemkast. De FleX-ray heeft daar opvallend weinig verandering in gebracht. Ook nu zijn de wandkasten gevuld met gele sponzen, korrelige stukken piepschuim, uitgelopen siliconenkitpistolen, oude smartphones met toetsenbord, pakken haveremoutzemelen, een zelfgemaakte klok, een 4x4x4 Rubik's Cube en een bijna lege doos Kinder Surprise-eieren. Al deze objecten hebben één ding met elkaar gemeen. 'Ik kan het niet helpen,' zegt Coban lachend. 'Voortdurend schiet de gedachte door mij heen: hé, wat zou ik ontdekken als ik dit of dat voorwerp in de FleX-ray plaats?' Volgens haar cv is Coban wiskundige en geen ontdekkingsreiziger, maar in dit lab blijken die twee roepingen te overlappen. Elk willekeurig object is een stukje *terra incognita*. Slechts één beperking begrenst Cobans ontdekkingsdrang. Levende



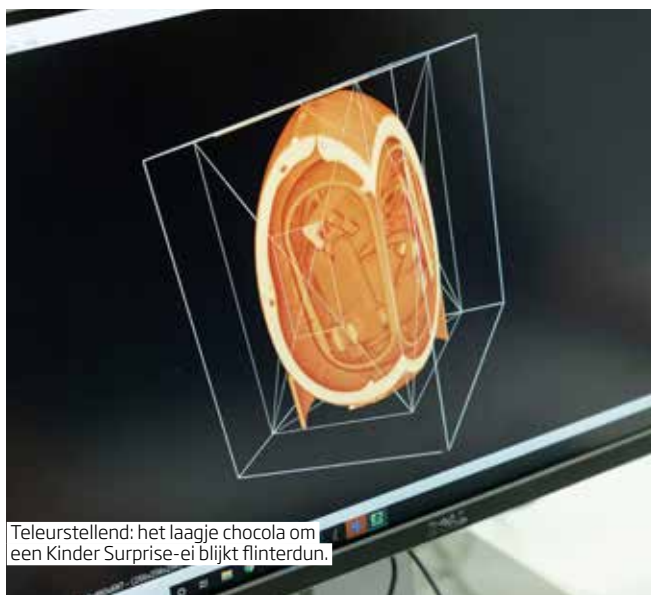
Francien Bossema: 'Soms zijn kunsthistorici sceptisch over wat een wiskundig instituut voor ze kan betekenen. Maar snel genoeg staren ze met grote ogen naar de resultaten op het scherm.'

gewervelde wezens zijn verboden onderzoeksmateriaal. 'Ik heb wel eens een slak van binnen zien rondkruipen. En een zaadje zien ontkiemen. En een lavalamp zien bubbelen.' In naam der wetenschap, uiteraard.

'Ik zal laten zien hoe het werkt,' zegt Coban, terwijl ze richting de doos Kinder Surprise-eieren loopt. Ze heeft deze demonstratie vaker gegeven. Aan kinderen, wiskundigen, politici en kunsthistorici. Van de reacties geniet ze minstens zo veel als van de briljante wiskunde die dit alles mogelijk maakt. Ze opent de cabine van de FleX-ray



Sophia Bethany Coban licht het onderzoek naar de Chinese puzzelballen toe.



Teleurstellend: het laagje chocola om een Kinder Surprise-ei blijkt flinterdun.

data. Algoritmen, uitgedokterd door de Computational Imaging-groep, integreren de steeds fijnere scans tot een gedetailleerde driedimensionale rendering. 'Dit is de meest geavanceerde manier van *real-time CT-scanning* in de wereld,' zegt Coban, terwijl ze op het scherm het virtuele ei roteert. 'We kunnen nu elke mogelijke dwarsdoorsnede maken.' Eén klik en een deel van het ei verdwijnt. We kijken nu vanaf boven in de onderste helft en duiken vervolgens in de laag chocola. Coban schudt haar hoofd. 'Zie je al die lege plekjes? Dat zijn luchtbelletjes. Typierend voor slechte kwaliteit cho-

'De impact van dit soort scans zullen we spoedig in het dagelijks leven ervaren'

colade. Dit merk gaat achteruit.' Ze verplaatst het perspectief naar midden in het ei. Alsof we een torretje zijn, dat samen met het plastic poppetje in het ei zitten opgesloten. 'Ah... helaas geen smurf dit keer. Dit ga je niet geloven, maar tijdens een vorige demonstratie zat er een röntgenarts-smurf in het ei.'

Hoe diep je met de Flex-ray inzage kunt krijgen in verscholen lagen van de werkelijkheid, blijkt uit tal van fascinerende experimenten. Zoals de keer dat het CWI een zeventiende-eeuws manuscript in handen kreeg waar iemand jaren later op alle plekken de naam van de auteur had doorgekrast. Coban scande het manuscript en probeerde virtueel ónder de bovenste inktlaag te duiken. Op enkele plekken bleek dat onmogelijk: de krasser had met zijn gekras het papier zelf beschadigd. Maar op andere plekken kwamen oorspronkelijke letters aan het licht. Door alle stukjes te combineren, werd de eeuwenoude censuur tenietgedaan. Leendert Cornelisse Romeijn, zo heette de auteur.

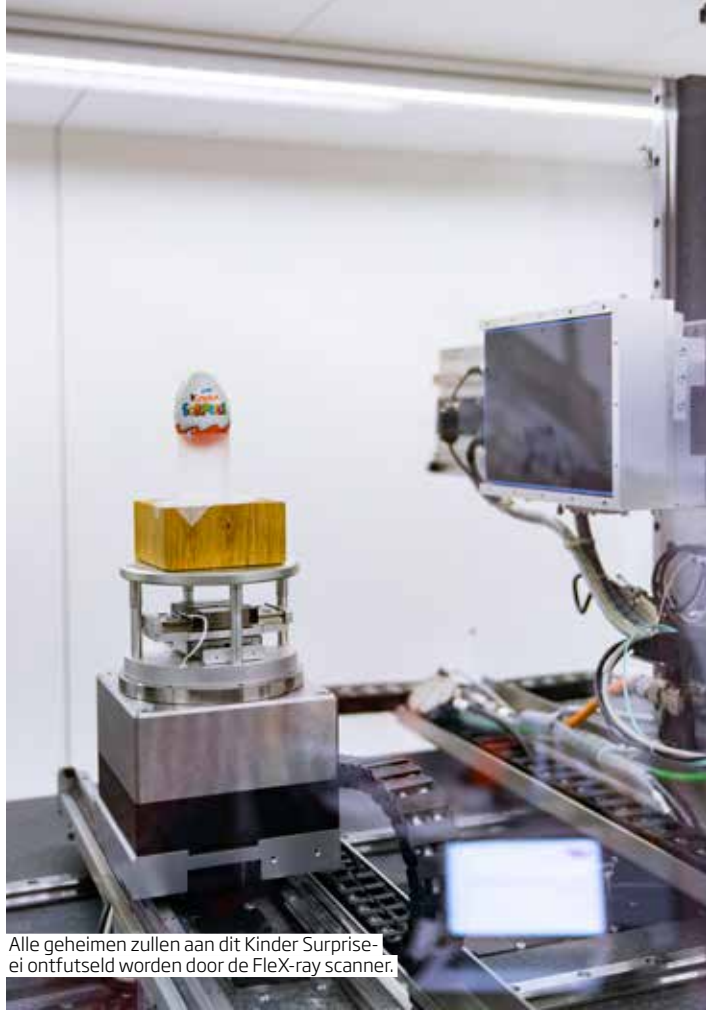
BRAM BELLONI

en klimt op een kruk. 'Helaas hebben ze bij de bouw geen rekening gehouden met mijn lengte.' Zichzelf uitstrekkend plaatst ze het rood-witte ei in de cabine. Dan sluit ze de deur en typt ze achter een computer enkele instructies. Onzichtbaar voor mensenogen lanceert een paneel links in de Flex-ray een dosis röntgenstralen die door het ei heen reizen en aan de rechterzijde tegen een zwarte plaat botsen. Op het computerscherm verschijnt een 2D-scan van een transparant ovalen voorwerp. 'Kinderen zijn altijd teleurgesteld wanneer ik ze op die dunne buitenrand wijs. Dat is de laag

chocola. Zo weinig?! reageren ze dan. Vervolgens laat ik ze raden wat het vormpje in het midden moet voorstellen. Soms is dat een smurf... maar nu?'

Slechte chocola

Tot zover doet de Flex-ray weinig meer dan een röntgenscanner op een vliegveld, die je handbagage checkt op illegale waterflesjes. Coban drukt op nog wat knoppen. Het ei begint te roteren. Binnen enkele minuten maakt de machine twaalfhonderd verschillende röntgenscans. Tegelijkertijd analyseert een krachtige computer de ruwe



Door virtueel in de kern van een Chinese puzzelbal te duiken kwamen CWI-onderzoekers tot een verrassende ontdekking.
ROBERT VAN LIERE

Alle geheimen zullen aan dit Kinder Surprise-ei ontfutseld worden door de Flex-ray scanner.

BRAM BELLONI



Verbluffende onderzoeksobjecten waren ook de Chinese puzzelballen van het Rijksmuseum. Ooit dienden deze uit ivoor geslepen kunstwerkjes als pronkstukken in Chinese paleizen. De ballen geven de illusie van een holle bal zwevend in een holle bal in een holle bal, waarbij elke bal zijn eigen geometrisch uitgesneden patronen bevat. Analyse in de Flex-ray onthulde dat sommige van de puzzelballen twaalf of meer lagen bevatten, en dat ze eindigen in een aan het zicht onttrokken solide ivooren kern. Door virtueel in die kern te duiken, kwamen experts tot een verrassende ontdekking: de ballen bestaan niet uit ivoor van Aziatische maar van Afrikaanse olifanten. Er moet dus lang geleden ivoorhandel hebben gefloreed tussen China en Sub-Saharaans Afrika.

Verstopte vingerafdruk

Afgezanten van het Rijksmuseum kloppen met groeiende regelmaat op de deur van het Flex-ray Lab, hopen meer van dit soort ontdekkingen te kunnen doen. Speciale handschoentjes dragend brengen ze kostbare gewaden, beeldjes of schilderijen naar binnen, onder toezicht

'Voortdurend denk ik: wat zou ik ontdekken als ik dit voorwerp in de Flex-ray plaats?'

van PhD-studente Francien Bossema. 'Soms zijn kunsthistorici sceptisch over wat een wiskundig instituut voor ze kan betekenen,' vertelt Bossema. 'Maar snel genoeg staren ze met grote ogen naar de resultaten op het scherm.' Midden in een terracottabeeldje van een engel trof de CI-groep een verstopte vingerafdruk aan. 'Superinteressant, want in het verleden dacht men dat dit beeldje door Michelangelo was gemaakt en werden er vele miljoenen voor betaald,' vertelt Bossema. Toen daar later twijfels over bestonden, kelderde de waarde. Wie het nu precies heeft gemaakt, is onbekend. 'Een collega formuleert nu algoritmes om aangetroffen 3D-vingerafdrukken te vertalen naar de 2D-vorm van vingerafdrukken in databases. Dan kunnen we deze kwestie misschien definitief beslechten.'

De mogelijkheden van real-time 3D CT-scanning reiken veel verder dan de wereld van beeldjes en puzzelballen. Chirurgen – en hun patiënten – zullen enorm baat hebben bij preciezere identificatie van de plaats en vorm van een tumor. Bedrijven zien weer potentie op een ander terrein: kwaliteitscontrole. Coban heeft reeds een lading appels gescand en daarin vliegengitjes aangetroffen. 'Ook hebben we de innerlijke structuur van kippenvlees vergeleken met dat van vegetarisch vlees,' aldus Tristan van Leeuwen, toekomstig leider van de CI-groep. 'De impact van dit soort scans zullen we spoedig in het dagelijks leven ervaren. Zeker als het ons lukt om een zelflerend systeem te creëren. Nu vereist elke scan nog handmatige finetuning. Ik wil dat straks het systeem zelf herkent: "Dit is een walnoot, die heb ik eerder gezien en toen waren instellingen x en y het best. Dat ga ik nu weer doen." Als we dat voor elkaar krijgen, zullen straks in alle winkels producten liggen die dankzij real-time 3D CT-scanning naar een hoger niveau zijn getild.' Te beginnen met, als het aan Sophia Coban ligt, appels zonder vliegengitjes en chocolade-eieren zonder luchtbelletjes. ■



UITGELICHT

Virtuele conferenties en taartontwerpen

Wat doe je als je workshop over sociale virtual reality die op Hawaï zou plaatsvinden wordt afgelast vanwege covid-19? Dan zet je je VR-bril op en grijp je die kans om te onderzoeken hoe je een online VR-platform kan gebruiken voor een internationale workshop. 'Zo hebben we een vijf uur durende online workshop in VR georganiseerd met 25 onderzoekers van over de hele wereld', vertelt Jie Li, postdoc-onderzoeker bij het CWI. Li ontwerpt VR-omgevingen waar mensen – met VR-bril op – virtueel bij elkaar kunnen komen voor bijvoorbeeld een conferentie, een consult met een arts (als een ziekenhuisbezoek lastig of pijnlijk is) of om virtueel een taartontwerp te bespreken met een banketbakker. 'Ik ben naast onderzoeker ook taartontwerper met een eigen café', vertelt Li. 'In dit werk komen twee van mijn interesses samen.'

Daarnaast onderzoekt Li de gebruikerservaring van deze VR-toepassingen. 'Na de VR-workshop spraken we met deelnemers. Die lieten bijvoorbeeld weten dat anderen herkennen en aanspreken lastig was.' Mensen werden namelijk gerepresenteerd door cartoonse avatars, waardoor sociale signalen, zoals oogcontact of glimlachen, niet mogelijk waren. 'We proberen VR-ervaringen realistischer te maken, met nieuwe technische ontwikkelingen. In het lab hebben we een prototype dat een 3D-weergave van iemand kan tonen in VR, als een soort hologram. Daar zijn vier camera's voor nodig. Dat zet je niet zomaar thuis neer. We werken daarom aan een manier om dit met één camera mogelijk te maken. Hierbij moet ook rekening gehouden worden met privacy. Er is nog veel ontwikkeling nodig, maar ik denk dat realistische VR-ervaringen in de toekomst mogelijk worden.' -DS

'Het diversiteitsprobleem is geen vrouwenprobleem'

Hoewel de wiskunde en informatica al lang niet meer alleen een mannenwereld is, valt er nog een flinke slag te slaan op het gebied van diversiteit, zeggen CWI's managementteamlid **Monique Laurent** en PhD-onderzoeker **Sophie Huiberts**.



CV

MONIQUE LAURENT

Laurent is onderzoeker en lid van het management team van CWI. Ze is lid van de Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen (KNAW) en hoogleraar bij Tilburg University. Als wiskundige ontwikkelt ze methoden waarmee optimaliseringsproblemen kunnen worden opgelost. Die kunnen gebruikt worden voor allerlei toepassingen, van economische systemen tot logistiek.

Tekst: Ans Hekkenberg
Fotografie: Bram Belloni

Als je kijkt naar het percentage vrouwelijke onderzoekers bij het CWI, dan heeft het instituut haar doelstellingen nog niet behaald. Hoe komt dat?

ML: 'Diversiteit is niet alleen op het CWI een lastig punt, maar wereldwijd in onze vakgebieden. Het aantal vrouwelijke studenten is groot, maar hoger op de ladder, van PhD-onderzoekers tot hoogleraren, wordt het aantal steeds kleiner. Het is een uitdaging om vrouwen ook op die posities te krijgen. We doen daar ons best voor, maar soms hebben we pech. Dan werven we talentvolle vrouwen, maar vertrekken ze weer.'

Waarom gebeurt dat?

ML: 'Wat soms speelt is het zogeheten *two-body problem*, dat ontstaat wanneer twee wetenschappers een relatie hebben. Eén van hen kan een mooie positie vinden, maar de ander moet in de buurt óók een baan kunnen krijgen. Als dat niet lukt, leidt dat tot vertrek. Bij het CWI hebben we meer-

maals meegemaakt dat we zo talentvolle vrouwen verloren. Gelukkig is het recent ook weer gelukt om een aantal getalenteerde vrouwen aan te trekken.'

Op welke manieren probeert het CWI de diversiteit te vergroten?

ML: 'De 'pool' vrouwelijke wetenschappers is kleiner. Daarom zoeken we actief naar vrouwelijke kandidaten voor posities, bijvoorbeeld door veelbelovende wetenschappers erover te mailen. En we doen mee met initiatieven van onderzoeksfinancier NWO (Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek - red.) om vrouwelijke onderzoekers te werven met extra beurzen. Daarnaast proberen we op de lange termijn impact te hebben door jonge meisjes rolmodellen te laten zien. Als meisjes alleen mannen zien in de wetenschap, dan lijkt zo'n carrière niet aantrekkelijk. Maar als ze onderzoekers zien die op ze lijken, denken ze eerder: dat is een baan die ik later ook kan doen!'

Zijn rolmodellen ook voor jonge onderzoekers belangrijk?

SH: 'Ik denk het wel. De theoretische



interview

Monique Laurent en Sophie Huiberts

informatica kent een aantal heel indrukwekkende vrouwen. Virginia Vassilevska Williams bijvoorbeeld (beroemd vanwege haar werk in het snel vermenigvuldigen van getallenverzamelingen die matrices heten – red.). Zo iemand inspireert. Je ziet als vrouw in de informatica maar weinig vrouwen om je heen. Het is dan des te belangrijker om te zien dat er vrouwen zijn die zo enorm succesvol zijn – om te zien dat dat gewoon kan.’

Wat kan er in het vakgebied veranderen om de genderbalans te verbeteren?

ML: ‘Een loopbaan in de wetenschap vraagt veel van jonge onderzoekers. Je moet vaak jaren naar het buitenland. Dat kan botsen met je privéleven, bijvoorbeeld als je een wens hebt om een gezin te stichten. Dat geldt natuurlijk niet alleen voor vrouwen. Zulke vereisten zorgen ervoor dat mensen de wetenschap verlaten. Zonde, want zo lopen we talent mis. Ik denk daarom dat we flexibeler moeten zijn. We moeten mensen er niet op afrekenen als zij andere keuzes hebben gemaakt dan het gebruikelijke pad. Er moet meer diversiteit komen in hoe je je loopbaan kan inrichten.’

SH: ‘Ik denk dat een kinderwens niet het enige knelpunt is. Het probleem dat Monique schetst herken ik. Ik ken veel postdoc-onderzoekers die elk jaar in een ander land zitten en maar weinig die daar gelukkig van worden. Zelf woon ik graag in Nederland. Ik weet niet of ik bijvoorbeeld een jaar in de Verenigde Staten zou willen wonen. Dat kan een reden zijn om niet door te gaan in het vakgebied.’

Hebt u tijdens uw loopbaan obstakels ervaren vanwege uw vrouw-zijn?

SH: ‘Ik probeerde op een conferentie met een onderzoeker te praten die heel kortaf deed. Daarna zag ik diezelfde wetenschapper wel uitgebreid kletsen met een andere junior onderzoeker. Raar, vond ik, totdat ik via het roddelnetwerk hoorde dat deze persoon een hekel heeft aan vrouwen. Zoiets heb je als jonge onderzoeker niet eens door. Je moet het van anderen horen.’

ML: ‘Zelf heb ik geen obstakels ondervonden. Wel is het soms lastig dat je als vrouwelijke wetenschapper extra taken krijgt. Het is belangrijk dat commissies die gaan over het uitreiken van prijzen of onderzoekposities niet uit alleen mannen bestaan. Maar dat betekent wel dat de weinige vrouwen in het vakgebied steeds voor zulke commissies worden gevraagd. Daardoor neemt je werkdruk toe. Wat ik dan ook belangrijk vind, is dat we beseffen dat het diversiteitsprobleem geen vrouwenprobleem is. Ook, of vooral, mannen moeten er werk van maken!’

Veel diversiteitsstrategieën zijn gericht op cisgender vrouwen. Sophie Huiberts, vindt u als transgender vrouw dat de wetenschap een te nauwe focus heeft wat betreft diversiteit?

SH: ‘Ik denk zeker dat veel diversiteitsinspanningen te beperkt zijn. Of dat specifiek voor de cis-/transdynamiek geldt, vind ik moeilijk te beoordelen. We zijn natuurlijk met minder, dus ik weet niet of we ondervertegenwoordigd zijn. Wat me meer opvalt, is dat ons instituut voornamelijk uit witte wetenschappers bestaat. Dat is niet oké. Nederland kent veel mensen met een migratieachtergrond, maar dat zien we niet terug op het CWI.’

ML: ‘Ik onderschrijf dat. Hetzelfde geldt voor andere kennisinstellingen. Ik denk dat het probleem al begint op basisscholen. Mensen hebben vooroordelen over kinderen met een migratieachtergrond, net zoals ze vooroordelen hebben over meisjes. Daarmee stuur je die kinderen, ook al gebeurt dat veelal onbewust.’

Zal dat ooit veranderen?

ML: ‘Ik hoop het. Op dit moment zijn er gelukkig veel kansen voor talentvolle vrouwen. En het mooie aan wiskunde is: het kent geen grenzen, geen kleur, geen gender.’

SH: ‘Ik ben het daar niet helemaal mee eens. Als abstract ding, los van menselijke context, kent wiskunde inderdaad geen kleur en gender. Maar wiskunde wordt gedaan door mensen. Wij beslissen welk onderzoek



CV

SOPHIE HUIBERTS

Huiberts is promovendus bij het CWI en lid van de ondernemingsraad. In 2019 werd ze uitgenodigd als een van de *200 most qualified young researchers worldwide* voor het Heidelberg Laureate Forum, waar jonge talenten netwerken met de absolute top van de wiskunde en informatica. Ze is het Nederlandse contactpunt van de European Women in Mathematics-netwerk. Ook werkt Huiberts aan optimalisering. Fabrieken en bedrijven gebruiken optimalisatie-software om hun schema's te bepalen. Waarom deze software zelfs bij complexe problemen goed werkt, weten we niet. Huiberts hoopt dit te achterhalen.

belangrijk is en hoe het moet gebeuren. En door die beslissingen krijgt wiskunde in de praktijk wel degelijk kleur en vorm. Denk bijvoorbeeld aan algoritmes die bepalen wie door de politie gecontroleerd wordt. Doordat we die algoritmes baseren op databanken die door mensen zijn gemaakt, komen daar menselijke vooroordelen in terug. Een algoritme kan alsnog bepaalde groepen benadelen. Als je zegt dat wiskunde gender- en kleurenblind is, ga je hieraan voorbij.’

ML: ‘Daar heb je gelijk in. Met pure algebraïsche meetkunde of combinatoriek kun je weinig kwaad doen. Maar als het gaat om toepassingen, is dat anders.’ ■

De **SPIN** in het quantumcomputerweb

Het CWI verricht al tientallen jaren vooraanstaand onderzoek op het gebied van quantum computing. Vijf jaar geleden werd het tijd om de horizon te verbreden en werd QuSoft opgericht. Inmiddels heeft dit instituut een prominente rol in de wetenschap, het bedrijfsleven en de maatschappij.

Tekst: Yannick Fritschy
Portretten: Bob Bronshoff en Ivar Pel

Google, IBM, Microsoft en andere techreuzen zijn er volop mee bezig: de quantumcomputer. Deze computer maakt bij berekeningen gebruik van vreemde verschijnselen uit de quantummechanica; bijvoorbeeld dat deeltjes op twee plekken tegelijk kunnen zijn en elkaar op afstand beïnvloeden. Dankzij die andere manier van rekenen belooft een quantumcomputer op sommige vlakken veel sneller te zijn dan een klassieke computer, zodat je dingen kunt uitrekenen die voorheen onmogelijk waren.

Maar, let wel: hij *belooft* sneller te zijn. Want hoewel de techreuzen het ene na het andere prototype ontwikkelen, is er nog geen echte quantumcomputer.

Voor buitenstaanders klonk het vijf jaar geleden dan ook gek dat er een instituut werd opgezet voor de ontwikkeling van software voor de quantumcomputer. Wat heb je aan software zonder hardware? Maar eigenlijk moet je juist met software beginnen, stelt QuSoft-directeur Harry Buhrman, hoogleraar aan de Universiteit van Amster-

dam en leider van de CWI-onderzoeksgroep Algorithms & Complexity. 'Je moet eerst algoritmes ontwikkelen die laten zien dat een quantumcomputer bepaalde problemen efficiënter kan oplossen, voordat je die computer gaat bouwen,' zegt hij.

Het is namelijk een misverstand dat een quantumcomputer elk probleem sneller kan oplossen dan een klassieke computer. Sterker nog: het is onduidelijk wat een quantumcomputer precies kan, en wat niet. Buhrman: 'Van sommige dingen weten we dat de quantumcomputer ze sneller kan uitrekenen, en van sommige dingen hebben we bewezen dat die dat niet kan. Maar daartussenin zit een heel groot grijs gebied met onderzoeksvragen.'

Met dat soort vraagstukken houden de onderzoekers op QuSoft, een samenwerkingsverband van de UvA en het CWI, zich bezig. Een van hen is de Canadese Stacey Jeffery, onderzoeker in de groep Algorithms & Complexity. 'Ik ben in 2017 hierheen gekomen, omdat dit een van de eerste groepen ter wereld was die theoretisch onderzoek deed naar de quantumcomputer,' zegt ze.

Dronkemanswandeling

Jeffery helpt mee met de ontwikkeling van algoritmes die later in quantumsoftware kunnen worden gebruikt. Dat zijn bijvoorbeeld zogeheten *quantum walk*-algoritmes. Die zijn toegespitst op de quantumvariant van de 'dronkemanswandeling', de term waarmee wetenschappers willekeurige beweging aanduiden.

Omdat een quantumcomputer op quantumdeeltjes werkt, verwacht je dat die de willekeurige beweging van zulke quantumdeeltjes sneller kan simuleren dan een klassieke computer. Jeffery onderzoekt voor specifieke problemen of dat inderdaad zo is, en zo ja, hoeveel sneller. 'We hebben onlangs aangetoond dat een quantumcomputer met zo'n quantum walk-algoritme sommige zoekproblemen kwadratisch sneller kan oplossen. In de tijd waarin een klassieke computer een bepaald aantal stappen uitrekent, kan een quantumcomputer het kwadraat van dat aantal stappen uitrekenen. Bij een probleem met veel stappen is dat dus een enorme tijdswinst.'

Het lastige van software ontwikkelen zonder hardware, is dat je die software niet goed kunt testen. Maar volgens Jeffery is dat

Harry Buhrman



Stacey Jeffery



nu ook nog niet nodig. 'We nemen aan dat we ooit een goed werkende quantumcomputer hebben, en daar ontwikkelen we algoritmes voor. Later stemmen we die dan beter af,' zegt ze.

Urgenter en relevanter

Wel verwacht Jeffery zich de komende tijd meer te zullen richten op de quantumcomputers die er daadwerkelijk aan zitten te komen. Want er gebeurt van alles op hardwaregebied. 'Het gaat sneller dan ik had durven hopen,' zegt Buhrman. 'Er wordt internationaal zoveel geld in gestoken, dat ik wel verwacht dat de groei zich doorzet. De vraag wat we met een quantumcomputer kunnen doen, wordt daarmee alleen maar urgenter en relevanter.'

De quantumcomputer heeft namelijk tal van mogelijke toepassingen. Binnen de wetenschap: je zou er bijvoorbeeld de beweging van moleculen in chemische reacties mee kunnen simuleren. Maar ook buiten de wetenschap, bijvoorbeeld in de logistiek. Wanneer je de optimale route voor een pakketbezorger wilt bepalen, moet je een heleboel mogelijke routes simuleren. Als een quantumcomputer dat sneller kan doen, dan scheelt dat een hoop tijd en geld.

Daarom kloppen nu ook steeds vaker bedrijven aan bij QuSoft. 'We hebben bijvoorbeeld projecten lopen met Bosch en ABN om te kijken of de quantumcomputer iets voor hen kan betekenen,' zegt Buhrman. De stormachtige ontwikkelingen rond de quantumcomputer leidden ertoe dat QuSoft de afgelopen vijf jaar enorm is gegroeid. 'We begonnen met zo'n twintig mensen, nu hebben we er zeventig,' zegt Buhrman. 'We hebben vaste onderzoekers, postdocs en promovendi. Het onderzoek varieert van theoretisch tot toegepast.'

Buiten de landsgrenzen

Bovendien lopen er nu een heleboel niet-onderzoekers rond. Want QuSoft is niet alleen gegroeid, maar vooral ook verbreed. Buhrman: 'Behalve met het CWI en de UvA werken we nu ook samen met de Hogeschool van Amsterdam. En in 2017 kregen we een grote beurs om samen met de universiteiten van Delft, Leiden, Eindhoven en Twente het Quantum Software Consortium op te zetten. Daar is nu een nog grotere landelijke agenda uit voortgekomen, Quantum Delta NL.' En QuSoft kijkt nu ook voorbij de landsgrenzen. 'We proberen quantumsoftware bij bedrijven in heel Europa onder de aandacht te brengen. En met de onlangs ingestelde Turing Chair halen we internationale *high profile* hoogleraren naar Amsterdam,' zegt Buhrman.

'QuSoft is een echte gemeenschap, een fijne plek voor iedereen die er werkt'

Daarnaast is er een educatieprogramma op touw gezet, voor zowel studenten als middelbare scholieren. En een verrassende nieuwe toevoeging is de *legal and ethical board*, opgezet samen met de rechten-

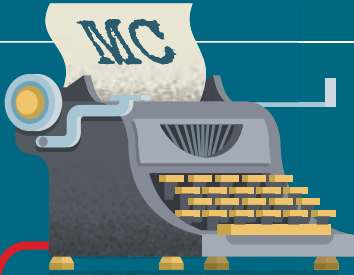
faculteit van de UvA. Daarin worden ethische vraagstukken behandeld die straks een rol kunnen gaan spelen. Buhrman: 'Stel bijvoorbeeld dat één bedrijf straks een monopolie heeft op de quantumcomputer en zich allemaal chemische patenten toe-eigent. Moet je daar dan iets tegen doen?'

Vrouwenvereniging

Jeffery heeft eveneens naast haar onderzoek aandacht voor de maatschappij. Samen met onderzoeker Julia Cramer van de Universiteit Leiden startte ze de vereniging Women in Quantum Development. 'Er zitten weinig vrouwen in quantumonderzoek en informatica, en de onderzoeksgroepen zijn klein. Daardoor is de kans groot dat je de enige vrouw in je groep bent. Dat kan voor vrouwen een belemmering zijn om dit veld in te gaan. Terwijl iedereen die dat wil, het gewoon zou moeten doen,' zegt ze. 'We hebben WIQD voornamelijk opgericht om vrouwen elkaar te laten ontmoeten. Ons eerste evenement, dat in maart 2020 zou plaatsvinden, ging helaas niet door vanwege de corona-uitbraak. Nu proberen we een online community op te zetten.'

Verder is Jeffery vaak te vinden op de sociale events die QuSoft organiseert. 'Het is een echte gemeenschap, een fijne plek voor iedereen die er werkt,' zegt ze.

Voor de nabije toekomst verwacht Buhrman dat QuSoft zijn vergroting en verbreding doorzet. 'Over vijf jaar hoop ik dat we 150 mensen hebben. En dat we met Quantum Amsterdam echt een hub hebben gecreëerd, die nieuwe kennis over de quantumcomputer opdoet en naar bedrijven en de maatschappij brengt.' En Buhrmans persoonlijke rol daarin? 'Ik wil vooral fundamenteel onderzoek blijven doen, dat vind ik het allerleukste. Ik ben heel blij dat ik het onderzoek samen met jonge mensen een stap verder kan brengen. Ik ben het CWI en de UvA dan ook dankbaar dat ze altijd achter ons hebben gestaan en hebben meegeholpen. Het is niet vanzelfsprekend dat zoveel mensen in verschillende vakgroepen de neuzen dezelfde kant op hebben staan. Maar iedereen ziet de meerwaarde van ons onderzoek. Dat is best bijzonder.' ■



BAANBREKEND

75 jaar CWI

1946

Oprichting van het Mathematisch Centrum (MC) om Nederland te helpen met de wederopbouw na WO II.



1952

Het MC ontwikkelt de eerste Nederlandse computer, de Automatische Relais Rekenmachine Amsterdam (ARRA) en zijn opvolgers.

Het MC doet berekeningen aan en modelleert de Deltawerken, die Nederland na de grote watersnoodramp tegen hoogwater beschermen.

JAREN '50

Het MC voert berekeningen uit voor het ontwerp van de vleugels van passagiersvliegtuig Fokker F27 Friendship.

1954



foto: Stichting Electrológica

1956

Oprichting van Electrologica, computerproducent en de eerste spin-off van het instituut.

1959

Edsger Dijkstra, de latere Turing Award-winnaar, ontwikkelt het kortste-pad-algoritme, dat nu gebruikt wordt voor routenavigatie, verkeersmodellen en telecommunicatie.

1960

Dijkstra en anderen maken de eerste compiler voor programmeertaal ALGOL 60.



1983

In het licht van het groeiende belang van de informatica, wordt het Mathematisch Centrum omgedoopt tot Centrum Wiskunde & Informatica (CWI).

CWI registreert '.nl' op 25 april, als een van de eerste landdomeinen wereldwijd. Op 1 mei volgt de eerste domeinnaam: cwi.nl.

1986

MC-directeur Aad van Wijngaarden ontwikkelt met anderen programmeertaal ALGOL 68.

Lancering van het eerste UNIX-netwerk in Europa, de voorloper van het internet. Het centrum van dit netwerk lag bij het MC.

1968

1982

V.l.n.r. internetpioniers Jaap Akkerhuis, Daniel Karrenberg, Teus Hagen en Piet Beertema.



1988

Op 17 november sluit CWI Nederland als eerste land in Europa aan op het open internet.

1989

CWI sticht ERCIM, het Europese onderzoeksconsortium voor informatica en wiskunde, samen met het Duitse GMD en het Franse Inria.



1989

Guido van Rossum ontwikkelt en ontwerpt programmeertaal Python.

JAREN '90

CWI werkt mee aan de ontwikkeling van webstandaarden CSS, HTML4, XHTML, XForms en SMIL, evenals RDF, RDFa en meer.

1993

www.cwi.nl was in 1993 een van de eerste 500 websites wereldwijd. Nu zijn er meer dan een miljard.

1999

CWI coördineert het breken van de op het internet gebruikte veiligheidsstandaard RSA-512, wat lukt door grote getallen in priemfactoren te ontbinden.

2008

CWI breekt de op het internet gebruikte veiligheidsstandaard MD5: de zogeheten 'https-crunch'.

2007

Spinozawinnaar Lex Schrijver en anderen maken een algoritme dat de dienstregeling van de Nederlandse Spoorwegen optimaliseert.

2004

Lancering van open source databasesysteem MonetDB, dat werkt met kolommen.

2015

QuSoft

Lancering van QuSoft, het onderzoekscentrum voor quantumsoftware.

2017

CWI breekt de op het internet gebruikte veiligheidsstandaard SHA-1, die wordt gebruikt voor onder meer creditcardtransacties en digitale handtekeningen.



2017

Opening van het FleX-ray Lab, een ongeëvenaarde 3D-röntgenscanner die realtime beelden maakt.

2020

CWI en anderen ontwikkelen kunstmatige intelligentie om betere bestraalingsplannen voor kankerbehandelingen te realiseren.



Onvermijdelijke ONZEKERHEID

Voorspellen is moeilijk, vooral als de werkelijkheid te complex is om exact in regels te vangen. De onzekerheid die daardoor vaak in modellen zit, probeert de CWI-onderzoeksgroep Scientific Computing zo klein mogelijk te maken.

Tekst: Fenna van der Grient

Je kent het wel: hou je hoopvol Buienrader in de gaten om te bepalen wanneer je het beste op de fiets kan stappen, eindig je toch met een nat pak. Misschien vervloek je de app dan, maar helemaal terecht is dat niet. Er zit nou eenmaal altijd een mate van onzekerheid in een weersvoorspelling. Ook voorspellingen over allerlei andere zaken brengen onzekerheid met zich mee: of dit nou het verloop van de coronapandemie is, de kans op een stroomstoring of hoe goed een windmolen bestand is tegen wisselende omstandigheden.

Het voorspellen van al deze zaken is een dusdanig complexe aangelegenheid, dat je de situatie moet vereenvoudigen. Dat doen wiskundigen met modellen. En hoe goed die modellen ook zijn, ze zijn nooit even precies als de werkelijkheid zelf. Dat betekent dat er in de voorspellingen die een model doet, altijd een bepaalde mate van onzekerheid zit.

Je kunt er natuurlijk wel naar streven om die onzekerheid zo klein mogelijk te maken. En, minstens zo belangrijk, uitrekenen hoe groot die onzekerheid precies is. Met dit soort vraagstukken houdt de CWI-onder-

zoeksgroep Scientific Computing, onder leiding van Daan Crommelin, zich bezig.

Bronnen van onzekerheid

Om een model te maken, bijvoorbeeld om het weer te voorspellen, heb je verschillende dingen nodig. Je moet er allereerst verschillende elementen in stoppen die relevant zijn voor het systeem dat je probeert te beschrijven. In het geval van een weer- of klimaatmodel kun je hierbij denken aan de viscositeit (strokerigheid) van het water in de oceaan, of de wrijving van de atmosfeer over het aardoppervlak. 'De elementen die je in het model stopt, zijn niet altijd heel goed bekend of gemeten,' vertelt Crommelin. Daarmee introduceer je dus al een mate van onzekerheid.

Vervolgens heb je beginwaarden nodig. Om het weer een week vooruit te kunnen voorspellen, moet je eerst heel precies aan het model vertellen wat de situatie van vandaag is: wat is op dit moment de tempe-

'Je kunt niet alle processen die een rol spelen, meenemen in een model'

ratuur, druk, luchtvochtigheid, enzovoort? Ook die beginwaarden kun je nooit met oneindige precisie meten; nog meer onzekerheid dus.

Beperkt aantal pixels

Dan heb je ten slotte te maken met het feit dat je altijd keuzes moet maken over wat je wel en niet meeneemt in je model. 'Je kunt niet alle processen die een rol spelen in je model meenemen, want dat zou veel te duur worden en te veel tijd kosten,' legt Crommelin uit. 'Computers zijn bij lange na niet krachtig genoeg om zoveel details te kunnen behappen.' Daarom wordt er altijd een simplificatie gemaakt. Als je niet weet wat de bijdrage is van de weggelaten factoren, geeft dat een derde vorm van onzekerheid.

Deze vorm van onzekerheid speelt een belangrijke rol bij het maken van computersimulaties van de atmosfeer. Om zo'n simplificatie te maken, delen onderzoekers de atmosfeer op in behapbare stukjes. Dat zijn bijvoorbeeld rechthoekige blokken, die verticaal gestapeld worden in kolommen die helemaal van de bodem tot de top van de atmosfeer lopen, en bijvoorbeeld 50 bij 50 kilometer breed zijn. Van elk blok beschrijf je dan alleen de gemiddelde temperatuur, luchtvochtigheid, druk, et cetera. Dit stop je in het model, en je kijkt hoe dit





Je hoeft niet precies alle details van de fluctuaties te weten, als je maar meeneemt dát het fluctueert

een grote onzekerheid in de uitkomst? Zijn er onzekerheden die elkaar versterken?

Crommelin en collega's zetten hun technieken in voor verschillende vakgebieden. Bij de coronapandemie bijvoorbeeld. Wanneer je het effect van nieuwe maatregelen wilt voorspellen, is de onzekerheid in de input erg groot, mede doordat de onvoorspelbare menselijke factor een grote rol speelt. En dus kan de onzekerheid in de uitkomst ook groot zijn.

Ook bij het ontwerpen van windmolens is het belangrijk om te bepalen hoe onzekerheden zich ontwikkelen in een model. Windmolens moeten namelijk onder allerlei wisselende omstandigheden optimaal kunnen functioneren. Een van de uitdagingen bij deze toepassing is dat de standaardmethoden om de ontwikkeling van onzekerheid te bepalen ervan uitgaan dat die omstandigheden elkaar niet beïnvloeden. In de praktijk is dat vaak wel zo: een windmolen op zee zal wanneer het hard waait tevens belast worden door een sterke golfslag.

Bij het elektriciteitsnetwerk speelt onzekerheid ook een steeds grotere rol, doordat er meer en meer fluctuerende bronnen zoals windmolens en zonnecellen op aan worden gesloten. Crommelin: 'Een vraag waar wij naar kijken is wat de kans is dat je, door een hele ongelukkige combinatie van energie-injectie op bepaalde plekken en consumptie op andere plekken, hogere stromen krijgt dan het netwerk aankan.' Met die informatie kun je het netwerk aanpassen om de kans op een stroomstoring zo klein mogelijk te maken.

In al deze situaties zul je waarschijnlijk nooit honderd procent zekerheid bereiken. Ook in de toekomst zul je nog wel eens een nat pak halen en is er altijd een kleine kans op een stroomstoring. Maar door steeds beter te weten waar 'm de onzekerheid in schuilt, kun je steeds zekerder van je zaak worden. ■

zich ontwikkelt. Dat lijkt misschien een betrouwbare methode, maar omdat je van alle variabelen het gemiddelde neemt, zie je allerlei kleinschalige processen die zich binnen zo'n blok afspelen over het hoofd. Je kunt het vergelijken met een foto die je met een primitieve digitale camera maakt, met een beperkt aantal pixels. Zo'n camera is prima geschikt om een grof beeld te geven van een mooi strand of bos. Maar de details die kleiner zijn dan de afmetingen van een individuele pixel zie je niet.

Belangrijke fluctuaties

Bij een foto is het misschien niet zo erg als je wat details mist, maar bij een simulatie van de atmosfeer zijn die details wel heel belangrijk. 'Je kunt niet zomaar het gemiddelde nemen van de hele kolom,' vertelt Crommelin. 'Denk bijvoorbeeld aan regenval in de atmosfeer. Dat zou betekenen dat het in iedere kolom altijd een beetje miezert. Dat is natuurlijk niet zo, want het is ook wel eens een hele tijd droog, en op andere momenten heb je enorme hoosbuien.' Zulke hoosbuien zijn vervelend als je net op de fiets wil stappen en Buienradar zegt dat het miezert. Maar nog belangrijker is dat ze ook het weer op lange termijn beïnvloeden. Bovendien beïnvloeden ze het weer niet alleen binnen de kolom,

maar ook erbuiten. Je moet dus de details binnen de kolom op een of andere manier meenemen om de atmosfeer voor een groot gebied op lange termijn te simuleren, bijvoorbeeld als onderdeel van een klimaatsimulatie.

Omdat het daadwerkelijk simuleren van alle wolkvorming en regen binnen zo'n kolom veel te veel rekenkracht kost, lossen onderzoekers dit op een andere manier op: door ruis te introduceren. Je hoeft niet precies alle details van de fluctuaties te weten, als je maar meeneemt dát het fluctueert. En die aanpak blijkt in de praktijk heel goed te werken. Je hoeft dan maar één keer een hele precieze meting te doen van wat er binnen zo'n kolom gebeurt. Die informatie kun je vervolgens gebruiken om de fluctuaties in het hele model te simuleren.

Mate van onzekerheid

Op die manier neem je de onzekerheid mee die voortkomt uit simplificaties die je aan het begin doet. Vervolgens is het belangrijk om te weten hoe groot de onzekerheid is die overblijft in de uiteindelijke voorspellingen. Crommelin en collega's ontwikkelen daarom technieken om ook dit efficiënt te bepalen. Hierbij kijken ze hoe onzekerheden zich ontwikkelen in een model: welke onzekerheden in de input zorgen voor

Van onderzoek tot bedrijf

Al bij de oprichting was het CWI niet alleen maar gefocust op wetenschap zelf, maar ook op het overbrengen van kennis naar de maatschappij. Dit staat namelijk in de statuten beschreven. Een hoop onderzoeksprojecten groeien dan ook uit tot bedrijven: spin-offs. Hier een greep uit het aanbod.

Tekst: Marleen Hoebe

MonetDB Solutions

Opgericht: 2013

Martin Kersten



Bijna elk bedrijf heeft een database, een systeem waarin alle essentiële bedrijfsgegevens liggen opgeslagen. Zo'n systeem moet betrouw-

baar, snel en flexibel zijn – het liefst inclusief professionele ondersteuning. Dat realiseerde computerwetenschapper Martin Kersten zich ook.

Hij is al vanaf de jaren zeventig bezig met database-technologie. In 1993 heeft hij samen met collega's van het CWI een databasesysteem opgezet: MonetDB.

'MonetDB was het eerste volwaardige databasesysteem met een kolomgebaseerde dataopslag. Dat is onder andere essentieel voor data-analyses.'

'Dit systeem is *open source*. Het is dus gratis en iedereen kan het gebruiken. De reden hiervoor is dat we het hebben gebouwd in een onderzoeksinstituut, met publiek geld. Het was een bijproduct van wetenschappelijk onderzoek. Ik vind dat iedereen dit moet kunnen oppakken.'

In 2013 richtten Kersten en collega's spin-off MonetDB Solutions op, om bedrijven te ondersteunen bij het gebruik van MonetDB. 'We zorgen voor onderhoud en verbeteringen', vertelt Kersten. 'Dat doen we niet alleen voor bedrijven in Nederland, maar van Chili tot Catalonië, en van Californië tot China. Alles wat we aan de software verbeteren – maakt niet uit voor welk bedrijf – verwerken we weer in het MonetDB-systeem. Het blijft nog steeds open source. Niemand kan het systeem rechtens opeisen.'

MonetDB is baanbrekend en populair, vindt ook de vakvereniging SIGMOD, de Special Interest Group on Management of Data. Deze groep kent elk jaar een award toe aan een onderzoeker waarvan de technische bijdrage een aanzienlijke invloed heeft gehad op datamanagementsystemen. In 2016 ontving Kersten zo'n award.

Hoe gaat MonetDB Solutions de komende jaren verder? 'We moeten blijven innoveren voor de klant. Er is nog veel werk aan de winkel, zowel aan onderhoud als wetenschappelijke uitdagingen.'

'Alles wat we aan de software verbeteren, verwerken we weer in het MonetDB-systeem'

Seita

Opgericht: 2016

Nicolas Höning



Soms is het verstandiger om op een later moment een elektrische auto op te laden of een grote schoonmaak met veel water te houden.

Want het kan duurzamer zijn om op de voordeligste beschikbaarheid te wachten en het kan goedkoper zijn. Maar hoe weet een energie-coöperatie of waterleverancier wanneer het juiste moment is om veel energie of water te verbruiken?

Machine learning engineer Nicolas Höning weet het antwoord daarop: met behulp van algoritmen. Samen met medeoprichter Felix Claessen gebruikt hij die in de spin-off Seita, om als het ware in

de tijd vooruit te kijken. Aan de hand van die algoritmen kan Seita een software-platform opzetten dat bijvoorbeeld een laaddienst voor elektrische auto's adviseert wanneer hun klanten het beste auto's kunnen opladen, vertelt Höning. 'Onze software houdt in de adviezen ook rekening met allerlei voorspellingen, zoals weers- of prijsvoorspellingen.'

'Grootgebruikers kunnen met behulp van de software duizenden euro's per jaar besparen. Bij huishoudens met een elektrische auto en zonnepanelen moet je denken aan een besparing die richting de driehonderd euro per jaar gaat. Ook helpt de software die Seita ontwikkelt bij het voorkomen van verbruikspieken. Dit soort software zal daarom uiteindelijk een belangrijke rol kunnen spelen in het behalen van de CO₂-besparingsdoelen waar Nederland naar streeft.'

Höning en Claessen willen verder aan de slag met metadata-analyses. Seita ontvangt veel verbruiksdata en kan aan de hand van analyses niet alleen opmerken wanneer er veel energie tegelijk wordt verbruikt, maar ook wanneer een waterleverancier ergens

toch fors wat water verliest, bijvoorbeeld door een onopgemerkte lekkage. 'Zonder data-analyse is het mogelijk dat een leverancier pas heel laat een lek opmerkt, omdat het water bijvoorbeeld toch ergens rechtstreeks het riool in loopt', legt Höning uit. 'Met onze software kunnen we lekdetectie verbeteren en waterverlies voorkomen.'

swat.engineering

Opgericht: 2017

Davy Landman



Er bestaan een hoop programmeertalen om bijvoorbeeld op te schrijven hoe een webshop of bankrekening werkt. Die

bevatten vaak lange beschrijvingen om een computer aan het werk te zetten. Zelf begrijp je die uitleg meestal niet, omdat die nogal complex kan zijn. Dat is niet altijd handig, onder meer als je software wilt aanpassen.

In 2009 ontwierpen Jurgen Vinju, Paul Klint en Tijs van der Storm aan het CWI de metaprogrammeertaal Rascal. 'Met een metaprogrammeertaal kun je onder andere programmeertalen ontwikkelen, waardoor je sneller *domain specific language*, ofwel DSL, kunt genereren', legt software-engineer Davy Landman uit. Hij was promovendus in dezelfde onderzoeksgroep van de Rascal-ontwerpers.

'DSL is een overzichtelijkere taal; het is weergegeven in het vocabulaire dat de mensen waarvoor de taal is ontworpen kennen. Het is speciaal zo gemaakt dat het hun concepten makkelijk uitdrukt. Niet iedereen van een bedrijf kan DSL zelf opschrijven, maar in ieder geval wel lezen.



De software die Seita ontwikkelt helpt bij het voorkomen van pieken in het verbruik van bijvoorbeeld water.

ISTOCK

Wat wel zo handig is als je ermee moet werken. Het is hetzelfde als dat veel mensen een recept kunnen lezen, maar niet iedereen er eentje kan schrijven.'

Landman werkte na de ontwikkeling van Rascal samen met anderen om de implementatie ervan te verbeteren. Hij, Vinju en Klint zagen dat bedrijven Rascal – een open source programmeertaal, dus voor iedereen beschikbaar – willen gebruiken voor het onderhouden van DSL. Daar hebben die bedrijven dan wel ondersteuning bij nodig. De mannen wilden hun kennis delen en richtten swat.engineering op. Landman werd benoemd als CEO.

Zo heeft de spin-off het Nederlands Forensisch Instituut geholpen om makkelijker bewijsmateriaal te vinden in de gegevens van telefoons, tablets, laptops et cetera. 'Al die apparaten hebben verschillende apps die allemaal op een eigen manier data opslaan', vertelt Landman. 'Het komt niet allemaal mooi samen in één database. Je hebt al gauw een aantal terabyte aan data als je iemands apparaten inneemt. Het is dus een soort vechten tegen de bierkaai. Wij hebben een DSL gemaakt waardoor het extraheren van al die data makkelijker wordt.'

Landman wil bedrijven op een directe manier helpen bij de ontwikkeling van DSL, maar ook bedrijven ondersteunen die Rascal al gebruiken, zodat ze zelf DSL kunnen ontwikkelen.

Photosynthetic

Opgericht: 2018

Alexander Kostenko

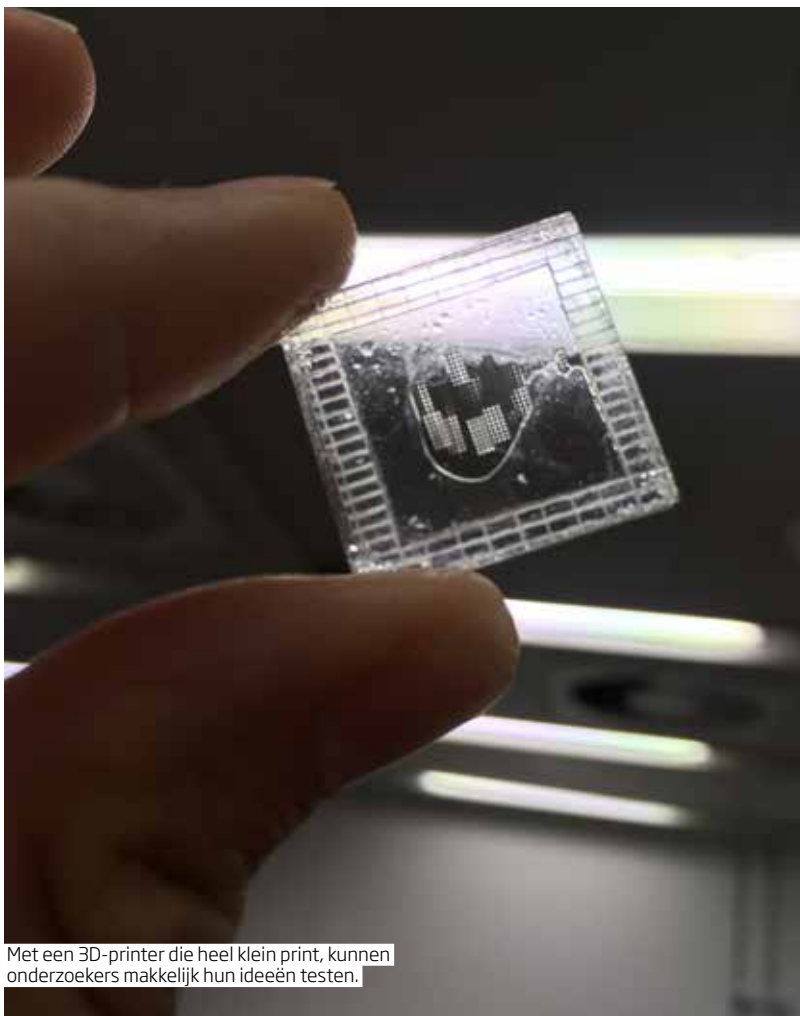


Minuscule prototypes, objecten van minder dan een millimeter, maak je niet zomaar. Maar biomedici en scheikundigen kunnen proto-

types van minder dan een millimeter wel heel goed gebruiken voor hun onderzoek, bijvoorbeeld om objecten te fabriceren voor de analyse van kleine hoeveelheden vloeistof.

Natuurkundige Alexander Kostenko beseft hoe belangrijk het voor deze wetenschappers binnen de microfluidica is om een instrument te hebben dat hen snel kan helpen bij het ontwerpen van zeer kleine prototypes. Hij was als postdoc aan het CWI bezig met het maken van driedimensionale modellen voor musea toen hij zag dat hij de algoritmen die hij daarvoor gebruikte ook kon toepassen in een 3D-printer. 'Met een 3D-printer die heel klein print, kunnen onderzoekers direct en makkelijk hun ideeën testen en in 3D bekijken in plaats van dat ze complexe prototypen moeten maken.'

Het idee voor Photosynthetic, een spin-off die technologie ontwikkelt voor het maken van micro-prototypes, was geboren. Kostenko vroeg een patent aan. 'Eigenlijk is Photosynthetic anders dan andere spin-offs van het CWI. Die gaan meestal vooral



Met een 3D-printer die heel klein print, kunnen onderzoekers makkelijk hun ideeën testen.

'Printen met een resolutie van een micrometer kan sneller dankzij onze algoritmen'

over algoritmen en software. Dan heb je geen patent en laboratoriumopstelling nodig. Wij moeten een eindproduct maken dat we uiteindelijk – ergens eind 2021 – op de markt willen brengen. De ontwikkeling daarvan kost behoorlijk wat tijd.'

Photosynthetic heeft al wel interessante onderzoeksresultaten. 'De resultaten laten zien dat het printen van objecten met een resolutie van een micrometer, een duizendste van een millimeter, mogelijk is bij hogere snelheden dan bij andere technologieën die op microschaal werken. Als ons instrument snel genoeg is, is er een kans dat zowel onderzoekers als de industrie het zullen gaan gebruiken.' ■



vectorwise

UITGELICHT

Data doorspitten in een hogere versnelling

Efficiëntere pakketbezorging, betere verkeersdoorstroming en het monitoren van de verspreiding van covid-19. De samenleving wordt steeds verder geoptimaliseerd door te leren van data. Datawetenschappers maken daarvoor gebruik van systemen voor data-opslag en -analyse. 'Dit zijn complexe en belangrijke systemen', zegt Peter Boncz, verbonden aan onderzoeksgroep Database Architectures van het CWI. 'Onze onderzoeksgroep kijkt hoe we deze systemen sneller en efficiënter kunnen maken.'

De groep ontwikkelde fundamentele databasetechnieken, zoals de *column-store* opslagmethode, die in veel moderne data-systemen terug te vinden zijn. Ze ontwikkelden bijvoorbeeld het open source data-basesysteem MonetDB en de spin-off VectorWise. Beide zijn geoptimaliseerd om complexe (zoek)opdrachten in grote data-bases uit te voeren door de data op een slimme manier op te slaan en door te spitten. Boncz: 'Momenteel werken CWI-onderzoekers Hannes Muehleisen en Mark Raasveldt bijvoorbeeld aan DuckDB. Dat is een data-basesysteem om wetenschappers te ondersteunen wanneer ze data prepareren voor machine learning.'

Hoe belangrijk databases en de internationaal toonaangevende rol van de CWI-groep zijn, blijkt onder meer uit de succesvolle spinoff-bedrijven die de groep oplevert. Zo ging onlangs het cloud database-bedrijf Snowflake, mede-opgericht door Marcin Żukowski die bij Boncz promoveerde, naar de Amerikaanse beurs met een waarde van 70 miljard dollar.

Ook speelt de groep een belangrijke rol in het koppelen van onderzoekers en bedrijven. Dat is terug te zien in de komst van het vooraanstaande Amerikaanse databedrijf Databricks naar Amsterdam. Boncz: 'Ik ben er trots op dat veel van mijn oud-studenten daar werken. Ik hoop dat Amsterdam een hightech stad op het gebied van data wordt, waar nog meer getalenteerde mensen willen werken.' -DS

'Laat een computer onderhandelen over je salaris'

Bij complexe onderhandelingen – van de verkoop van een huis tot het formeren van een kabinet – is het voor mensen vaak onmogelijk om alle aspecten te overzien. **Tim Baarslag** ontwikkelt algoritmen die daar wel toe in staat zijn en mensen kunnen helpen om tot een beter onderhandelingsresultaat te komen.

Tekst: Wim de Jong
Fotografie: Bram Belloni

Tijdens de tijdrovende formatie van het kabinet-Rutte III hebt u geopperd om een computer op tafel te zetten om de onderhandelingen te bespoedigen. Misschien een idee voor komende formaties?

'Dat geloof ik nog steeds inderdaad. Een regeerakkoord kun je zien als een verzameling afspraken over allerlei sociale vraagstukken. De 'ruimte' van alle mogelijke oplossingen hierin is gigantisch. De menselijke manier om hierdoorheen te zoeken is ze stukje voor stukje te behandelen. 'Laten we het eerst eens worden over het ene onderwerp, dan gaan we daarna door met het volgende onderwerp.' Maar het leidt tot betere uitkomsten als je meerdere onderwerpen tegelijkertijd bespreekt, zodat je trade-offs kunt maken. Dat 'multitasken' is voor mensen heel moeilijk.

De complexiteit groeit enorm zodra je ook maar een paar onderwerpen tegelijkertijd bespreekt. Alle facetten van de verschillende onderwerpen werken op elkaar in, en zo krijg je een explosie aan mogelijkheden. Een computer zou die combinaties van mogelijke oplossingen kunnen doorrekenen en tot

voorstellen voor uitkomsten kunnen komen die voor iedereen interessant zijn. Natuurlijk gaat het hier soms om fundamentele sociale en ethische vraagstukken, waarbij de computer niet meer kan zijn dan een adviseur en de menselijke maat de doorslag moet geven.'

Dus volgende formaties moeten een fluitje van een cent zijn?

'Nee helaas, het is op dit moment nog niet mogelijk om de computer hiervoor in te zetten. Eén van de problemen hier is dat de meeste theorieën over onderhandelen waar de algoritmen op gebaseerd zijn nu gaan over één-op-één onderhandelingen. Voor bijvoorbeeld het uitbrengen van een bod op een huis (zie kader) is het wel goed mogelijk een algoritme toe te passen. Maar in de Nederlandse politiek gaat het vrijwel altijd over meer dan twee partijen die samen een coalitie moeten smeden. Dat is veel moeilijker, dat kunnen de huidige algoritmen nog niet aan. Er wordt wel aan gewerkt. Dat vind ik ook zo leuk aan mijn vakgebied: het is zo nieuw, er is zoveel werk in te doen.

Nog los van de theorie over onderhandelen moet een onderhandelingscomputer natuurlijk wel weten wat jij wil. Met mijn

Veni-beurs onderzoek ik hoe een computer dat kan achterhalen. Een computer moet data hebben om te begrijpen wat we belangrijk vinden in onderhandelingen. In het voorbeeld van de kabinetsformatie: geef je meer om defensie of om onderwijs? En hoe liggen voor jou de gewichten tussen die verschillende vraagstukken? Wij hebben een methode ontwikkeld waarbij je met een beperkt aantal vragen, soms minder dan twintig, toch een ontzettend goed idee kunt krijgen over wat belangrijk is voor de gebruiker en om tot een goed resultaat te komen.

Algoritmen kunnen mensen zo steeds beter helpen met onderhandelingen en ze uiteindelijk zelfs autonoom voor je afhandelen. Stel, je bent in gesprek over een nieuwe baan. Je zou dan de computer aan het werk kunnen zetten met je wensen voor salaris, vrije dagen en andere arbeidsvoorwaarden. De computer zou dan in onderhandeling kunnen gaan met je mogelijke nieuwe werkgever en terugkomen met het best mogelijke resultaat voor jou, zonder dat je er zelf nog iets voor hoeft te doen. En zo zijn er nog talloze gebieden waar onderhandelingsalgoritmen een rol kunnen spelen, van de verdeling van erfenissen tot zelfrijdende auto's die elkaar voorrang moeten verlenen.'



het mijn droom was om wiskundeprofessor te worden, al wist ik toen natuurlijk nog niet wat dat inhield. Ik ben volgens plan wiskunde gaan studeren, maar als ik ooit hoogleraar word, zal dat in AI zijn.

Ik zou heel graag mijn eigen onderzoeksgroep hebben. Gelukkig is dit onderwerp vers, en is er veel in te doen. Nieuwe ideeën vinden om te onderzoeken is dan ook niet het probleem. Het is vooral een kwestie van mankracht vinden om de ideeën die ik heb en de mogelijkheden die ik zie verder uit te werken. Naast mijn vierdaagse aanstelling bij het CWI werk ik een dag in de week aan de Universiteit Utrecht als assistent professor, dus wie weet wat de toekomst brengt.

Voor het bedrijfsleven is iemand met uw kennis en vaardigheden ook heel interessant. Weten zij u ook te vinden?

'Ik werk op dit moment samen met Acumex, een Deens bedrijf dat onderhandelingsalgoritmen wil gebruiken bij het handelen in producten. Als een constructiebedrijf bijvoorbeeld een grote tender gewonnen heeft om een woonwijk neer te zetten, wordt er met allerlei leveranciers onderhandeld over de inkoop van steen, cement, staal, tot de wasbakken aan toe. Dat doen mensen nu achter een bureau, per telefoon en met Excel-sheets. Met dat bedrijf kijk ik of dit online kan met behulp van onderhandelingsalgoritmen.

Zij maken gebruik van mijn expertise en gezamenlijk doen we onderzoek om het naar een hoger plan te tillen. Het is dus niet zozeer dat het bedrijfsleven mij trekt als mogelijke werkgever – daarvoor vind ik de wetenschap veel te leuk – maar ik vind het wel ontzettend leuk om toepassingen te zien in het bedrijfsleven. Als wetenschapper wil je graag de basis leggen waar vervolgens anderen weer op voort kunnen bouwen.' ■

Tims huizenbodalgoritme

Sta je op het punt een bod op een huis uit te brengen en ben je benieuwd hoe een algoritme je daarbij kan helpen? Tim Baarslag heeft er één ontworpen dat je kunt uitproberen op www.ntr.nl/html/focus/huizenbodalgoritme

'Wetenschappers hebben vaak onvoldoende antwoord op vragen over negatieve gevolgen van hun werk' ↗

Dit jaar bent u toegetreden tot de Jonge Akademie, een platform van jonge wetenschappelijke talenten. Wat gaat u daarvoor doen?

'Ik wil verandering brengen in hoe wij wetenschappers communiceren over de maatschappelijke gevolgen van innovaties, zeker in mijn vakgebied AI. Denk aan alle zorgen over social media bubbles, discriminatie door algoritmen, banenverlies door automatisering, fake news, invloed op de politiek – dat is nogal wat. Maar het geldt net zo goed voor andere vakgebieden, zoals biologie met designerbaby's en fysica met kernenergie. Dat zijn echt innovaties met grote maatschappelijke gevolgen.

Wetenschappers beschrijven vaak op een heel rooskleurige manier wat een nieuwe technologie inhoudt. Logisch, want ze willen vooral de positieve aspecten van hun werk naar voren brengen. Maar als er kritische vra-

gen over negatieve gevolgen komen van de media, burgers of de overheid, dan hebben ze daar vaak onvoldoende antwoord op.

Dat is waar ik over wil nadenken: hoe we ervoor kunnen zorgen dat het normaal wordt voor ons wetenschappers om proactief over deze potentiële negatieve gevolgen na te denken en daar oplossingen bij aan te dragen.

Heb je bijvoorbeeld een nieuw onderhandelingsalgoritme gemaakt? Super, maar denk dan ook meteen na: wat betekent dat voor mensen die geen toegang hebben tot dit onderhandelingsalgoritme? Of wat gebeurt er als juist iedereen het gebruikt?'

In 2019 selecteerde *Het Financieele Dagblad* u als een van vijftig ondernemende talenten onder de 35 jaar. In de bijbehorende special las ik dat u graag hoogleraar wilt worden.

'Haha, toen ik vier was riep ik inderdaad dat



Klaar voor het postquantum tijdperk

Hoe meer ons leven zich in de digitale wereld afspeelt, hoe groter het belang van digitale veiligheid wordt. Bij het CWI werken **Marten van Dijk** en **Ronald Cramer** samen met hun onderzoeksgroepen hard om te zorgen dat onze bankrekeningen niet worden leeggehaald, we veilig op een virtuele desktop kunnen werken en staatsgeheimen niet op straat belanden.

Tekst: Fenna van der Grient

Alle gevoelige digitale communicatie wordt versleuteld verstuurd. Zo kunnen kwaadwillenden geen informatie onderscheppen of aanpassen. Op die manier kunnen we veilig online bankieren en kunnen burgers, bedrijven en inlichtingendiensten veilig communiceren over internet. De huidige versleu-

telmethode zijn zelfs voor de allersnelste supercomputers onkraakbaar. Maar de ontwikkeling van de quantumcomputer vormt een groot gevaar voor deze versleutelmethode. Zo'n quantumcomputer rekent op een compleet andere manier, waardoor hij de versleutelingen wel kan kraken. Mocht er dus over een tijdje een quantumcomputer zijn met voldoende rekenkracht, dan zijn opeens alle huidige versleutelmethode onveilig.

Daarom bereidt Ronald Cramer, hoofd van de Cryptology-onderzoeksgroep, ons voor op dit zogeheten postquantumtijdperk. De meningen zijn nogal verdeeld over op welke termijn dit een bedreiging gaat zijn. Volgens de één is er over twee jaar een quantumcomputer die onze huidige versleutelmethode kan kraken, volgens de ander speelt dit pas over honderd jaar.

Staatsgeheimen

Toch is het zaak om er in alle gevallen op tijd bij te zijn. Ten eerste omdat het een hoop tijd kost om nieuwe versleutelmethode volledig door te ontwikkelen, zodat je zeker weet dat ze in alle situaties veilig zijn. Vervolgens moet je ze ook nog implementeren. Maar er speelt ook nog iets anders. Bij de meeste communicatie is vooral veiligheid op korte termijn vereist: je moet bijvoorbeeld op dit moment een veilige verbinding met je bank kunnen aangaan om geld over te maken. Als blijkt dat die verbinding over een paar jaar niet meer veilig zal zijn, dan kun je tegen die tijd overstappen op een ander systeem. Vanaf dat moment worden nieuwe banktrans-

Een berekening die in een virtuele omgeving plaatsvindt, is een stuk gevoeliger voor aanvallen

acties op een andere manier versleuteld. Een mogelijke aanvaller kan dan niks meer met een bankverbinding die een jaar geleden tot stand is gebracht.

Voor zaken die voor langere tijd geheim moeten blijven, zoals staatsgeheimen of gezondheidsgegevens, is het een ander verhaal. Cramer: 'Zelfs als je denkt dat er pas over vijftig of honderd jaar een quantumcomputer is, dan is het goed dat je er nu mee bezig bent. Alles wat je in de komende decennia versleutelt moet namelijk nog lang daarna veilig zijn.' Als een kwaadwillende nu een versleuteld staatsgeheim op zijn harde schijf heeft staan, kan hij dat gewoon bewaren en over vijftig jaar, als er een quantumcomputer is, met gemak ontcijferen. Als die informatie op dat moment nog steeds gevoelig is, hebben we een probleem. Informatie die voor langere tijd gevoelig blijft, moet dus eigenlijk nú al op zo'n manier versleuteld worden, dat die zelfs over tientallen jaren nog niet te kraken is. Daarom ontwikkelt Cramer met zijn onderzoeksgroep nieuwe standaardmethoden voor versleuteling die bestand zijn tegen aanvallen van quantumcomputers.

Virtuele omgevingen

Als je al je gegevens goed kunt versleutelen en dus veilig kunt communiceren ben je al een heel eind, maar je bent er nog niet. Meestal wil je namelijk ook nog iets doen met die gegevens: berekeningen uitvoeren of de gegevens verwerken met een programma bijvoorbeeld. Tegenwoordig gebeurt dat lang niet meer altijd op een computer of server die in je werkkamer of in het bedrijfspand staat. Berekeningen,

programma's en applicaties worden steeds vaker in de cloud uitgevoerd. Daar zitten voordelen aan: in plaats van dat elk bedrijf zelf een heleboel servers moet hebben staan, delen we alle servers uit datacenters met z'n allen. Heel efficiënt, maar een berekening die in een virtuele omgeving plaatsvindt, is een stuk gevoeliger voor aanvallen dan een berekening die op je eigen afgesloten computer plaatsvindt.

Veilige eilandjes

De onderzoeksgroep Computer Security onder leiding van Marten van Dijk houdt zich bezig met de vraag hoe je in zo'n virtuele omgeving toch veilig berekeningen uit kunt voeren. 'De kans is groot dat iedereen in de toekomst een virtuele desktop heeft', aldus Van Dijk. 'Als daar privacygevoelige informatie of concurrentiegevoelige software op staat, wil je niet dat die gaat lekken.' Wat het ingewikkeld maakt, is dat als je in zo'n omgeving gaat rekenen, je allemaal tussenliggende resultaten krijgt. Die moet je binnen die virtuele omgeving opslaan, en daarmee zijn ze kwetsbaar voor aanvallen van buitenaf. Van Dijk: 'We kijken bijvoorbeeld hoe we binnen zo'n omgeving kleine stukjes van de berekeningen geïsoleerd van alle andere kunnen uitvoeren. Je creëert dan een soort veilige eilandjes. Zelfs als een aanvaller toegang heeft gekregen tot je hele virtuele omgeving, dan zijn die eilandjes nog steeds veilig.'

Met een slimme combinatie van hardware en software kun je dat voor elkaar krijgen.'

Gesimuleerde Zeus

Een andere uitdaging is een situatie waarin je met meerdere partijen samen een berekening wilt uitvoeren. Stel bijvoorbeeld dat je met verschillende partijen, die elkaar niet vertrouwen, gevoelige informatie wilt verwerken, zonder dat de andere partijen die informatie te zien krijgen. Je kunt bijvoorbeeld denken aan een digitale verkiezing. Hierbij stemt iedere partij, en levert zo dus een brokje informatie in. Al die stemmen samen moeten op een of andere manier verwerkt worden in een gezamenlijke uitslag: wie heeft de meeste stemmen, en hoeveel zijn dat er?

Cramer en collega's ontwikkelen systemen om dit soort berekeningen tussen meerdere partijen mogelijk te maken. Hierbij streven ze een fictief ideaalbeeld na: 'In het ideale geval geven alle betrokken partijen hun informatie aan een bemiddelaar die volledig te vertrouwen is, laten we die Zeus noemen', zegt Cramer. 'Nou waren de Griekse goden ook niet altijd te vertrouwen, maar laten we even aannemen dat dat wel zo is', lacht hij. Zeus doet daar een berekening mee, en deelt de uitkomst met alle partijen: de uitslag van de verkiezingen.'

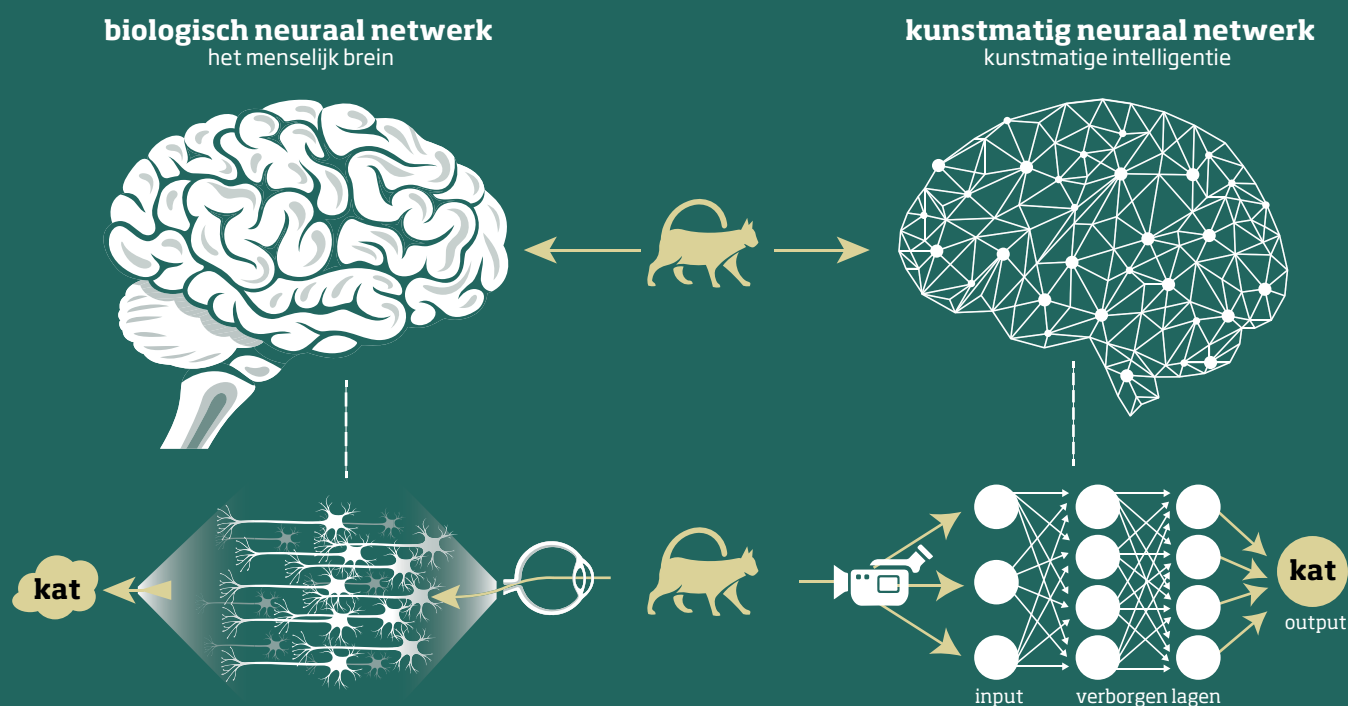
In de praktijk beschik je niet over zo'n bemiddelaar, dus moet je Zeus simuleren. Dit kun je doen door een netwerk te creëren tussen alle partijen, dat als geheel fungeert als een soort Zeus. Iedere partij doet een deel van de berekeningen, communiceert met de andere partijen en voert tests uit. Dat alles samen zorgt voor de gevraagde uitkomst, zonder dat partijen vertrouwelijke informatie van de andere partijen onder ogen krijgen. 'Er zit een hoop wiskunde achter, maar eigenlijk is het ook een beetje magie, dat dat op deze manier kan', lacht Cramer. 'Het mooie is dat bij een netwerk van ten minste drie partijen, zelfs een oneindig krachtige computer dit systeem niet kan breken.' ■

Fysieke systemen

Het belang van digitale veiligheid speelt ook een grote rol bij fysieke systemen. Zo worden de Deltawerken en het elektriciteitsnetwerk bijvoorbeeld met digitale systemen bestuurd. Als kwaadwillenden daar op kunnen inbreken, zijn de gevolgen desastreus. Daarnaast halen we allemaal steeds meer intelligente systemen in huis, waarvan we ook niet willen dat iemand die kan kraken. Van Dijk ontwikkelt met zijn onderzoeksgroep methoden om dit soort systemen zo goed mogelijk te beveiligen.

Neurale netwerken

Onze hersenen bestaan uit een zeer uitgebreid netwerk van tientallen miljarden onderling verbonden neuronen. Elke neuron is een spil in het grotere geheel: hij is in staat om signalen te verwerken en deze informatie door te geven aan andere neuronen. Zo ontstaan er circuits van neuronen die gezamenlijk allerlei lichaamsfuncties regelen, zoals ons denkvermogen. Kunstmatige neurale netwerken zijn geïnspireerd op de werking van ons brein. Zij worden onder andere toegepast in kunstmatige intelligentie (AI), die elementen van zelfstandige denkprocessen kan nabootsen.



Zenuwcellen	Wat zijn de neuronen?	Processors (of soms door software gesimuleerd)
Via elektrische pulsen, die verzonden worden bij overschrijding van een drempelwaarde in het neuron. De cellen staan in verbinding via synapsen.	Hoe communiceren neuronen met elkaar?	Via simpele, getalsmatige berichten
In elk hersengebied ontvangen sensorische zenuwcellen impulsen van de zintuigcellen uit het hele lichaam. Deze worden doorgegeven aan de schakelcellen, die niet in directe verbinding staan met gebieden buiten de hersenen, maar zorgen voor de lokale verwerking van de signalen. De motorische zenuwcellen vormen het eindstation waar de verwerkte informatie teruggekoppeld wordt naar het lichaam, bijvoorbeeld door een signaal te verzenden naar een spier.	Hoe is het netwerk opgebouwd?	Voor elke verschillende soort informatie die door het systeem verwerkt moet worden, is er een ingangsneuron. Het aantal uitgangsneuronen hangt af van de gewenste uitkomst. Hiertussen bevinden zich enkele tussenlagen van neuronen, die de informatie verder verwerken. De neuronen zijn op grote schaal met elkaar verbonden. Door het netwerk te 'trainen' kunnen onderlinge connecties versterkt of verzwakt worden, zodat er net als in de hersenen bepaalde circuits ontstaan.
Opslag van kennis en informatie, denkprocessen, regelen van lichaamsfuncties, coördineren van zintuigen, (dag)dromen, aansturen van beweging, etc.	Waarvoor kan het netwerk gebruikt worden?	Zelfsturende auto's, beeldherkenning, het voorspellen van beurskoersen, en nog veel meer.

Hoe hersenen en kunstmatige neurale netwerken elkaar inspireren

Het menselijk brein werkt nog steeds veel efficiënter dan AI. Door zich te laten inspireren door de werking van onze hersenen kunnen onderzoekers kunstmatige neurale netwerken optimaliseren. Aan de andere kant kan het functioneren van kunstmatige netwerken ons ook veel leren over onbegrepen processen in de hersenen.

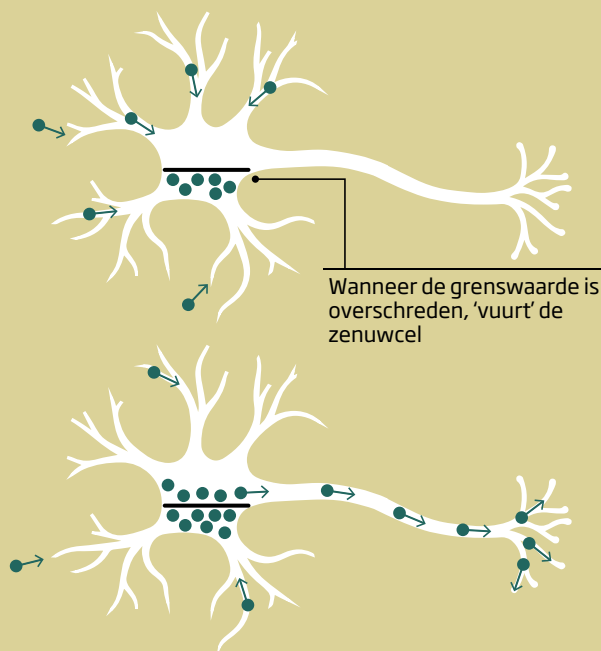
Onderzoekers van het CWI werken op dit snijvlak. Zo lukte het Sander Bohté onlangs om met zijn team energiezuinigere en privacyvriendelijkere AI-systemen te ontwikkelen door de werking van ons brein beter na te bootsen (zie kader 'Vurende neuronen').

Vurende neuronen

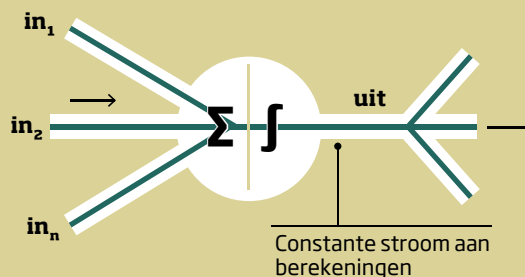
Zenuwcellen in de hersenen bouwen een potentiaal op, en 'vuren' pas wanneer ze een bepaalde grens hebben bereikt. De meeste normale kunstmatige neurale netwerken staan echter continu met elkaar in verbinding, wat minder efficiënt is en veel energie kost. De hersenen werken zeker een miljoen keer energiezuiniger.

AI-toepassingen zouden dus efficiënter kunnen werken door hun neuronen ook te laten 'vuren'. Dit maakt het netwerk echter wiskundig complexer, waardoor er lastig mee te werken valt en het lastig te trainen is. Door slimme wiskunde hebben CWI-onderzoekers echter een nieuw algoritme voor *spiking* (vurende) neurale netwerken ontwikkeld dat even krachtig is als veelgebruikte neurale netwerken, maar wel veel zuiniger.

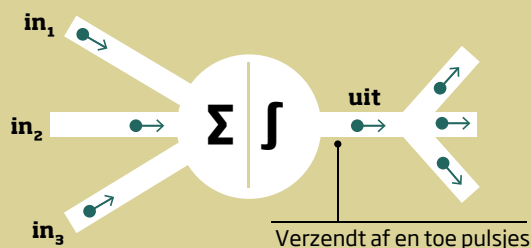
Zenuwcellen



Normaal neurale netwerk



Spiking neurale netwerk



Lokale toepassingen

De spiking neurale netwerken zijn honderd tot duizend keer energiezuiniger dan normale neurale netwerken. Door de lage energiekosten kunnen ze ook in een chip gestopt worden, waardoor ze lokaal (bijvoorbeeld in je telefoon) kunnen draaien. Hierdoor hoeven de gegevens niet voor verwerking naar een krachtig datacentrum, wat AI-toepassingen privacyvriendelijker maakt.



Spraakherkenning



Classificatie van ECG-signalen



Herkenning van gebaren

'Python is mijn halve leven'

Iets meer dan 25 jaar geleden legde CWI-informaticus **Guido van Rossum** de basis voor Python, tot op de dag van vandaag één van de belangrijkste programmeertalen ter wereld.

Tekst: Ans Hekkenberg en Ed Croonenberg
Fotografie: Inge Hoogland

De programmeertaal Python staat in de top drie van meest gebruikte computertalen wereldwijd. Miljoenen softwareschrijvers gebruiken hem, voor het maken van games tot het programmeren van kunstmatige intelligentie. Nu Python zo groot is, is het moeilijk voor te stellen hoe klein de taal begon: als een hobbyproject waarmee Guido van Rossum, toen werkzaam bij het CWI, zijn kerstvakantie vulde.

U startte Python in 1989. Waarom vond u het tijd voor een nieuwe programmeertaal?

'Ik begon bij het CWI bij een groep die een toegankelijke programmeertaal wilde ontwikkelen, zodat mensen zonder programmeerervaring – zoals wetenschappers – vrij snel met een computer aan de slag konden. Het was in de tijd dat de programmeertaal Basic aan een opmars bezig was. Iemand als Lambert Meertens (voormalig CWI-onderzoeker, red.) zag de opmars van deze bepaald niet krachtige taal met lede ogen aan. 'Stamp out Basic!' was zijn motto. Uiteindelijk zou ABC, zoals onze taal heette, niet aanslaan.

Ik was teleurgesteld dat ABC niet geslaagd was. Ik had ook ideeën over waarom dat zo was. Zo vond ik dat de grammatica van programmeertalen gemakkelijker moest

– door meer gewone woorden te gebruiken en minder cryptische symbolen. Ik heb in mijn kerstvakantie twee weken lang achter de computer gezeten. Daarna werkte ik door in mijn weekenden en 's avonds. Na drie maanden had ik een werkend prototype.'

In hoeverre was het CWI een stimulerende omgeving?

'De collega's waren natuurlijk stimulerend, maar ook de enorme vrijheid om van alles en nog wat te leren. Dat leren gebeurde vaak door projecten te ondernemen zonder precies te weten wat de uitkomst zou zijn. De vrijheid om dat te doen was geweldig.'

Wat maakte Python succesvol?

'Het is gemakkelijk te gebruiken. Daarbij had ik het tij mee. In de tijd van ABC moest je, als je een stuk code naar Amerika wilde versturen, het vliegtuig nemen om ergens persoonlijk een magneetband af te leveren. Nu was er een beginnend internet. Python kon zich dus veel sneller verspreiden. Bovendien had ik geluk dat Python gebruikt werd door invloedrijke mensen in de wetenschap en industrie. Het eerst prototype van Google is geschreven in Python.'

Er is een bijzondere gemeenschap rondom Python ontstaan: honderden vrijwilligers werken samen om de taal door te ontwikkelen. Hoe kwam die gemeenschap tot stand?

'In het begin was er een kleine groep men-

sen die enthousiast was over Python en die erover wilde praten. Dat leidde tot een mailinglist. In 1994 volgde de eerste Python-workshop, in Maryland in de Verenigde Staten. Daar kwamen zo'n twintig mensen bij elkaar. Het instituut dat de workshop organiseerde, nodigde mij uit om twee maanden te komen logeren. Vervolgens kreeg ik er een baan aangeboden. In april 1995 vertrok ik met vier koffers en een kat naar Amerika. Sindsdien woon ik daar. Ik heb er gewerkt voor kleine start-ups – die overigens geen van alle een succes werden. Daarna sloot ik me aan bij Google, en later Dropbox. Sinds kort ben ik een nieuwe parttime baan bij Microsoft begonnen.'

Jarenlang stond u aan het hoofd van de groep Python-vrijwilligers. U droeg de titel *benevolent dictator for life* ('welwillende despoot voor het leven').

'Ja. Iedereen kan suggesties doen voor Python, maar niet alle bijdragen worden geaccepteerd. Als iemand iets voorstelde wat ik een slecht idee vond, kwam het er heus niet in. Het was geen democratie.'

U waakte over welke nieuwe functies in de taal werden geïntroduceerd. Tot juli 2018; toen trok u de handen ervan af.

'Ik kreeg erg vervelende reacties op een beslissing die ik had genomen over een nieuwe feature in de taal. Het ging om een zogeheten *operator* – maar eigenlijk is het niet eens belangrijk wat het was. Ik had lang nagedacht over mijn besluit en uiteindelijk



interview

Guido van Rossum



de feature doorgevoerd. Toen kreeg ik op Twitter de wind van voren. Ik had het idee dat ik dat niet verdiend had. Als ze het zoveel beter wisten, mochten ze het zelf uitzoeken, besloot ik. Achteraf gezien stond toen een burn-out om de hoek. Dit was de druppel die de emmer deed overlopen. Als ik niet op de rand van burn-out had gestaan, had ik het misschien anders gedaan.'

Wie is nu de *benevolent dictator*?

'Niemand. Er is nu een bestuur van vijf mensen, die elk jaar verkozen worden door 150 Pythonontwikkelaars in de kern van de gemeenschap. Ik zat in het eerste bestuur, maar sindsdien niet meer. Nu werk ik aan het ontwerp van nieuwe features.'

Het klinkt alsof u het moeilijk vindt om Python los te laten.

'Nou ja... Ja. Ik kan het niet zo gemakkelijk zijn gang laten gaan. Af en toe zouden mijn vrouw en zoon willen dat ik er minder tijd aan besteed. Ze maken zich zorgen dat ik het me allemaal zo aantrek. Maar ik ben al dertig jaar emotioneel betrokken bij dit project. Python is mijn halve leven.'

Op 21 november 2019 gaf het CWI u erkenning voor uw werk met een Dijkstra Fellowship - een titel voor wie bijzondere prestaties heeft verricht op het gebied van wiskunde en informatica. Hoe vond u dat?

'Ik ben natuurlijk heel trots; ik vind het prachtig dat ik die erkenning kreeg van het CWI. En ik dacht ook wel, diep in mijn hart: eindelijk gerechtigheid. Toen ik Python ontwikkelde, was het management niet zo enthousiast als ik had gehoopt. Er hadden kort daarvoor verschillende programmeertaalprojecten plaatsgevonden en geen enkele was succesvol geweest. Dus ze zaten niet te wachten op een nieuwe programmeertaal. Pas achteraf werd het belang van Python duidelijk.' ■

'Het eerste prototype van Google is geschreven in Python' ↗

Sneller **slimmer** duurzamer

Wanneer je aan wiskunde en informatica denkt, zijn de dingen die in eerste instantie in je opkomen waarschijnlijk niet kankerbehandelingen, ProRail, afval in de stad en duurzame woonwijken. Toch kun je wiskunde en informatica daar heel goed voor gebruiken. Onderzoek van het CWI wordt al jaren toegepast in de praktijk.

Tekst: Marleen Hoebe

Betere behandelplannen

Informaticus Peter Bosman



Een van de voorbeelden van CWI-onderzoek in de praktijk is het onderzoek van informaticus Peter Bosman. Artsen in het Amsterdam UMC gebrui-

ken bij een bepaalde behandeling van prostaatkanker nu de resultaten van zijn onderzoek.

Bekende therapieën bij kanker zijn chemo of chirurgie, maar ook radiotherapie is een belangrijke behandeling. Zo kun je bij prostaatkanker brachytherapie, een inwendige vorm van radiotherapie, toepassen. Artsen plaatsen dan holle naalden – kathe-

ters – in de prostaat van de patiënt. Vanuit die katheters bestralen artsen met behulp van een radioactieve bron de tumor.

De uitdaging bij radiotherapie is dat de tumor genoeg straling ontvangt en dat andere plekken zo min mogelijk met de straling te maken krijgen. Maar de therapie moet daarbij weer niet te veel inleveren op de hoeveelheid straling, want er moet sprake zijn van een goede tumordekking. Artsen maken normaal gesproken zelf bestralingsplannen. 'Maar het is lastig om zelf te bepalen hoeveel straling nodig is', vertelt Bosman.

Hij ontwikkelde daarom samen met zijn team intelligente algoritmen die zelf leren hoe ze de beste eigenschappen van verschillende plannen kunnen combineren, zonder dat die daarvoor een hele stapel data nodig hebben. 'Je kunt het zien als een vorm van natuurlijke evolutie in de computer. Daarvoor gebruiken wij een vrij wiskundige aanpak waarbij je steeds de kans schat dat een deel van een plan goed is.' Met de

feedback van de uiteindelijke gebruikers – de artsen, 'want als die de techniek niet willen gebruiken, gaat het niet werken' – maakten Bosman en zijn collega's algoritmen die ze in een blinde studie onderzochten.

'Bij 98 procent van de testen waarbij artsen een bestralingsplan moesten kiezen, kozen ze voor de plannen van ons algoritme in plaats van een plan dat ze zelf hadden gemaakt. We hebben daarna software gemaakt om het klinisch te kunnen inzetten. Ik ben heel trots dat dit gelukt is. Er is namelijk een enorme verzameling literatuur over wat we kunnen doen met intelligente algoritmen in de medische wereld, maar voorheen kwam weinig daarvan echt in een ziekenhuis terecht.'

'Voortbordurend op dit succes ga ik met collega's van Amsterdam UMC en Leiden UMC deze techniek ook gereedmaken voor behandeling van baarmoederhalskanker. Het gebruik hiervan zal ook landelijk getest worden.'

Minder vertraging voor treinreizigers

Promovendus Dylan Huizing



Vertragingen door incidenten op het spoor moeten met behulp van nieuwe wiskundige algoritmen van promovendus Dylan Huizing minder vaak

voorkomen. Hij helpt ProRail bij het maken van een planning waarbij incidentenbestrijders – medewerkers die op calamiteiten afgaan en die proberen op te lossen – optimaal verspreid zijn over verschillende regio's en zo snel mogelijk op een bepaalde plek kunnen zijn als dat nodig is.

'Een groot deel van de dag zijn er geen incidenten bij ProRail. Het is niet zo dat incidentenbestrijders dan zitten te wachten. Ze doen preventief inspecties; ze wandelen onder andere langs het spoor om te kijken of daar geen spoorlopers, zoals bramenplukkers of mensen met hun hond lopen. En ze checken of er niets kapot is. Ook doen ze wekelijks inspecties op opstelplaatsen voor goederen. In mijn onderzoek bekijk ik of we die preventieve taken zo kunnen plannen dat iedereen altijd goed verspreid blijft over de regio's. Bij een incident moeten de incidentenbestrijders namelijk zo snel mogelijk ter plaatse zijn. Momenteel doet ProRail deze

'Bij de planning van incidentenbestrijding kan ProRail een boel winnen met wiskundige optimalisering'



Bij een incident moeten incidentenbestrijders snel ter plaatse zijn. Nu doet ProRail deze planning nog naar eigen inzicht.

PRORAIL

planning nog naar eigen inzicht. Dat gaat nog wel, maar er valt een boel te winnen met de inzet van wiskundige optimalisering.'

Wetenschappelijk gezien is het maken van deze planning een interessant vraagstuk, volgens Huizing. 'Het ligt namelijk tussen twee bekende wiskundige problemen in: het *vehicle routing problem* en het *facility location problem*. Bij het *vehicle routing problem* moet je denken aan de thuisbezorgdienst van de Albert Heijn. De bezorgvoertuigen moeten steeds de routes met de kortste afstanden nemen. Het *facility location problem* gaat over een zo goed mogelijke dekking hebben over een netwerk. Bijvoorbeeld waar je het beste distributiecentra kunt bouwen om dat te realiseren.'

De elementen van deze twee wiskundige problemen verwerkte Huizing samen met andere onderzoekers in een algoritme. Toen dat bleek te werken, gingen ze in gesprek met de medewerkers van ProRail. Huizing: 'We kwamen er daardoor achter dat er meer zaken zijn waarmee we rekening moeten houden, zoals dat incidentenbestrijders sommige taken altijd in groepsverband moeten uitvoeren, voor bepaalde taken bevoegdheden nodig hebben en een aantal dingen bijvoorbeeld rond de spits moeten doen.'

Huizing denkt dat ze nu wel op een punt zitten dat bijna alle zaken die je voor deze planning kunt bedenken in het algoritme

zitten. 'ProRail heeft daarop stappen ondernomen om het algoritme te kunnen integreren. In samenwerking met softwarebouwers hebben we een mooie applicatie gebouwd die incidentenbestrijders onder meer op hun smartphone kunnen gebruiken. Daarmee kunnen planners al binnen een paar seconden een planning maken die hooguit 3 of 4 procent van de optimale oplossing af zit.' De applicatie gaat nu de testfase in, wat Huizing best spannend vindt. 'Ik hoop dat onze wiskunde kan bijdragen aan minder vertraging voor treinreizigers.'

Efficiëntere afvalverwerking

Wiskundige Nanda Piersma



Hoe kun je het beste een dynamische route voor vuilniswagens opstellen? Wiskundige Nanda Piersma zoekt dat uit. 'Vuilniswagens

kunnen zich bijvoorbeeld niet allemaal tegelijk in de spits begeven. Daarnaast



De gemeente kan als inzamelaar van afval veel efficiënter te werk gaan.
ISTOCK

mogen de wagens niet meer over alle Amsterdamse bruggen rijden en zijn niet alle Amsterdamse straten toegankelijk. En dan moet je nog rekening houden met de wensen van de vuilnismannen; die willen op een bepaald moment koffiepauze. De beste route bepalen is dus een complexe puzzel. Ik bekijk samen met collega's hoe we daarvoor wiskundige modellen kunnen inzetten.'

Daarvoor krijgen ze van gemeente Amsterdam allerlei data over afval. In de wiskundige modellen moeten ze namelijk ook meenemen hoeveel afval de stad produceert, waar dat afval voorkomt en op welke tijden er meer afval is. Piersma: 'Nu zien we daar een enorme verschuiving in, omdat iedereen thuiswerkt. De gemeente heeft het als inzamelaar van huishoudelijk afval nu veel drukker.'

Die wiskundige modellen – zogeheten *digital twins* – maken ook verdere berekeningen. Ze schetsen toekomstscenario's. 'Aan de hand daarvan bekijken we of het afval van de stad kunnen hergebruiken,' legt Piersma uit.

Het is alleen wel belangrijk dat die wiskundige modellen zoveel mogelijk rekening houden met burgers, en in de pas blijven lopen met de realiteit. 'Sommige systemen lijken op het eerste gezicht neutraal, maar benadelen sommigen toch. Als je een systeem fout programmeert, kan een systeem crue keuzes maken.'

Een voorbeeld van zo'n crue keuze maakte Piersma mee bij een model voor slimmere laadpalen die elektrische auto's alleen op bepaalde momenten opladen, wanneer er meer stroom beschikbaar is. 'We kwamen erachter dat niet alle auto's daarmee overweg konden, met name de goedkopere varianten niet. We bekijken hoe je dit soort situaties kunt voorkomen in wiskundige modellen.'

Energie eerlijk verdelen

Informaticus Michael Kaisers



Buren die samen groene energie opwekken via zonnepanelen willen die energie met elkaar delen. Maar hoe doe je dat eerlijk? Een systeem dat automatisch energie slim verdeelt kan uitkomst bieden. Michael Kaisers houdt zich bezig met zulke systemen die gebruikers vertegenwoordigen. Dat is handig voor coöperaties zoals Schoonschip in Amsterdam-Noord: een gemeenschap van 46 huishou-

dens die onder andere met behulp van zonnepanelen op hun daken aan hun energie komen. Vaak kunnen die huishoudens hun zonne-energie niet meteen gebruiken en willen ze het voor later opslaan of delen met een ander huishouden van de gemeenschap dat op dat moment zelf niet genoeg energie heeft.

'Dat moet je coördineren,' vertelt Kaisers, 'maar mensen willen hier niet de hele tijd zelf mee bezig zijn, dus moet je het automatiseren. Ik probeer met andere wetenschappers algoritmen te vinden die steeds al die beslissingen kunnen nemen, die zelf leren en plannen. Deze algoritmen beseffen op een gegeven moment dat het bijvoorbeeld niet handig is als alle huishoudens tegelijkertijd gaan opladen; ze leren door de effecten van hun eerdere besluiten. We hoeven geen instructies mee te geven.'

Het systeem moet wel in gedachten houden wat de wensen van de gebruikers zijn. 'Mensen kunnen volledig voor groene energie gaan, maar dat is niet altijd de goedkoopste optie. Nu vragen wij nog wat zij belangrijker vinden: groene energie of geld. Uiteindelijk is het de bedoeling dat



'Mensen willen niet de hele tijd bezig zijn met de verdeling van energie, dus moet je het automatiseren'

algoritmen dit zelf gaan vragen, een beetje zoals Siri dat bij Apple-producten doet. Dan leren de algoritmen ook van de interactie met gebruikers.'

Kaisers denkt wel dat misschien niet iedereen in zulke gemeenschappen evenveel profiteert van duurzame energie. 'Er is sprake van competitie. In de werkelijkheid hebben sommige mensen een groter dak met zonnepanelen dan anderen. En is de één meer duurzaam georiënteerd dan de ander. Maar als je geen intelligente systemen zou gebruiken om het opslaan en verdelen van energie te coördineren, zou het verschil tussen huishoudens nog groter zijn. Deze systemen proberen wel echt de beste oplossing te vinden.' ■



Buren die samen energie opwekken met zonnepanelen willen die energie met elkaar delen, zoals bij coöperatie Schoonschip in Amsterdam-Noord. Maar hoe doe je dat eerlijk? SHUTTERSTOCK

Jurgen Vinju



Tijs van der Storm



column

Software als taal

Veel succesvolle softwareproducten gaan jarenlang mee. Tijdens hun leven worden ze gaandeweg aangepast en uitgebreid. Daardoor groeien deze stukken software (van slimme software van een kleine start-up, tot aan producten van online banken en zelfs de Belastingdienst) vaak uit tot ondoorgroendelijke en onbetaalbare draken. Hoe voorkomen we dat? En hoe repareren we het? Dit zijn de vragen die het onderzoeksgebied *software engineering* kenmerken: het wat, waarom en hoe van software.

Bij het CWI is het perspectief 'software is taal' van oudsher leidend. Met andere woorden: software is een communicatiemiddel tussen de ontwerper en de computer, maar ook tussen ontwerpers onderling. Dit perspectief heeft twee kanten. Betere talen kunnen tot betere communicatie (dus betere software) leiden. Daarnaast kunnen we bestaande software bestuderen als een soort tekst.

De ene kant betekent dat je het ontwerp van een programmeertaal kunt zien als de software-engineering-variant van het credo *form follows function* uit de industriële vormgeving. Domeinspecifieke programmeertalen – kleine talen waar je niet alles mee kan, maar wát je er mee kan, kan heel efficiënt – zijn de logische invulling van deze gedachtegang. Het CWI heeft vanaf het prille begin bijgedragen aan het wat, hoe en waarom van deze 'kleine talen'. Zo heeft het de programmeertaal Rascal ontworpen: een meta-programmeertaal die dit soort talen voor de gebruiker kan lezen, doorgronden en aanpassen. Wie de 'basistaal' Rascal machtig is, kan effectief en goedkoop gereedschappen voor legio kleine programmeertalen ontwerpen.

De andere kant betreft de miljarden regels broncode die intussen de wereld draaiend houden. De realiteit is dat er heel veel software is, hoe houden we die beheersbaar? Terwijl de wetenschap het antwoord op die vraag zoekt, moeten we ook andere prangende vragen beantwoorden. Bijvoorbeeld: hoe goed is mijn privacy gewaarborgd door bestaande softwaresystemen? Hoe kunnen we een onderdeel van een groots programma vervangen, zonder dat het systeem omvalt? Zulke vragen beantwoorden vraagt om geautomatiseerde gereedschappen. Software is vaak te groot en complex om het met de hand te doen. Door software als taal te zien, kan broncode automatisch ontleed, uitgeplozen en bevraagd worden. Ook met dit doel hebben we Rascal ontworpen. De computer kan ons zo helpen software beter te begrijpen en te onderhouden.

Software is onmisbaar in de huidige samenleving. Daarmee is software engineering ook een cruciaal vakgebied geworden. De grote moeilijkheid is dat in dit vakgebied korte- en langetermijnuitdagingen vechten om voorrang: de kwantiteit van ongebreidelde groei versus de bezinning op kwaliteit. Om uitdagingen het hoofd te bieden, én om te kiezen welke uitdagingen de hoogste prioriteit hebben, moeten verschillende disciplines samenwerken. Software is taal, en meer dan ooit moeten wetenschappers, industrie en beleidsmakers elkaars taal leren spreken om de kwaliteit van software te waarborgen.

Jurgen Vinju en Tijs van der Storm



75 YEARS
1946 - 2021
CWI