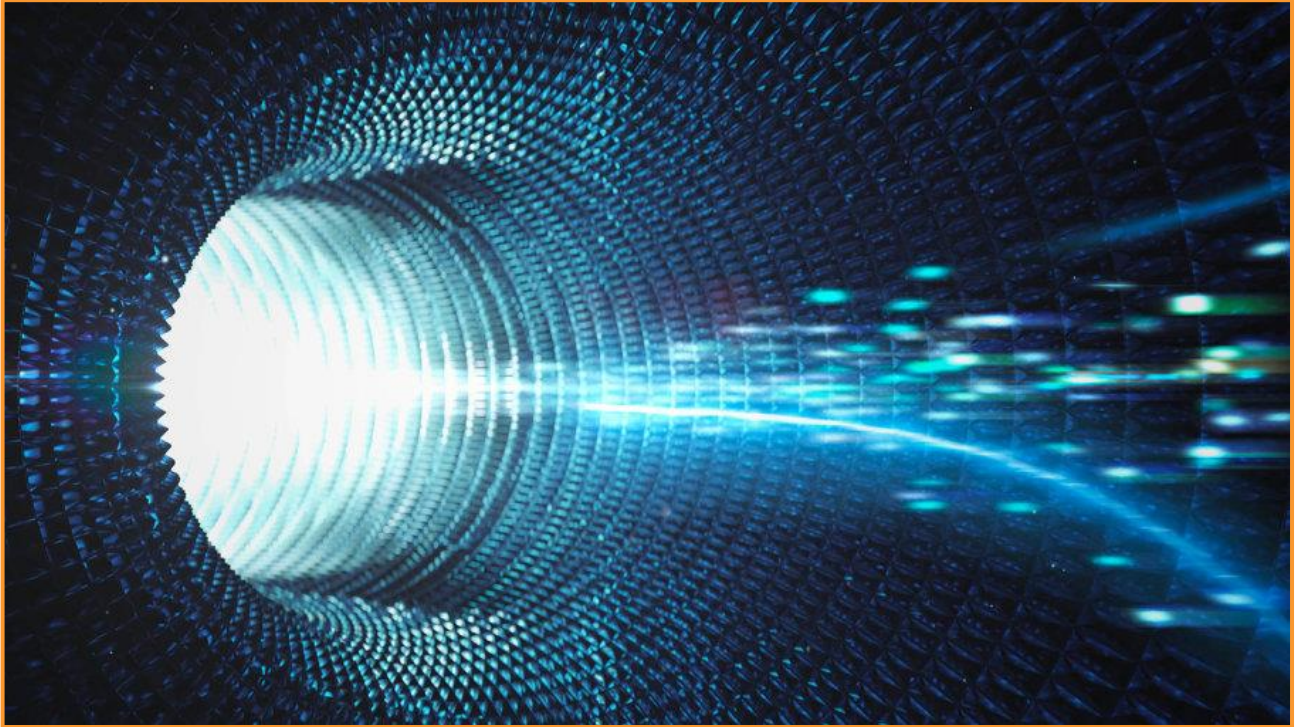




Het Nederlandse Quantum Ecosysteem



Analyse van de staat van het Nederlandse ondernemerschapsecosysteem omtrent quantum technologie

Auteurs: Erik Stam, Bas van der Starre, Elmar Cloosterman

In opdracht van: QuTech

Datum: 13-05-2020



1. Inleiding

Inzichten uit de quantum mechanica hebben geleid tot revolutionaire nieuwe technologie. Quantum technologie is een bron van nieuwe economische activiteiten. In de komende jaren zal worden bepaald welke toepassingen binnen quantum technologie de potentie gaan waarmaken en welke ecosystemen hier leidend in zullen zijn. Nederland kan hier een rol in spelen wanneer er effectief voorgesorteerd wordt op het goed werkend krijgen van het quantum ecosysteem. Nederland kan ervoor zorgen dat de ontwikkeling van quantum technologie maatschappelijk rendeert door bewust te zijn van de sterktes en zwaktes van het huidige ecosysteem en hierop te handelen. Hoe sterker het ecosysteem, hoe gemakkelijker de ontwikkeling van quantum kennis en talent wordt omgezet wordt in nieuwe waarde creatie door middel van ondernemerschap in start-ups, scale-ups en bij corporates.

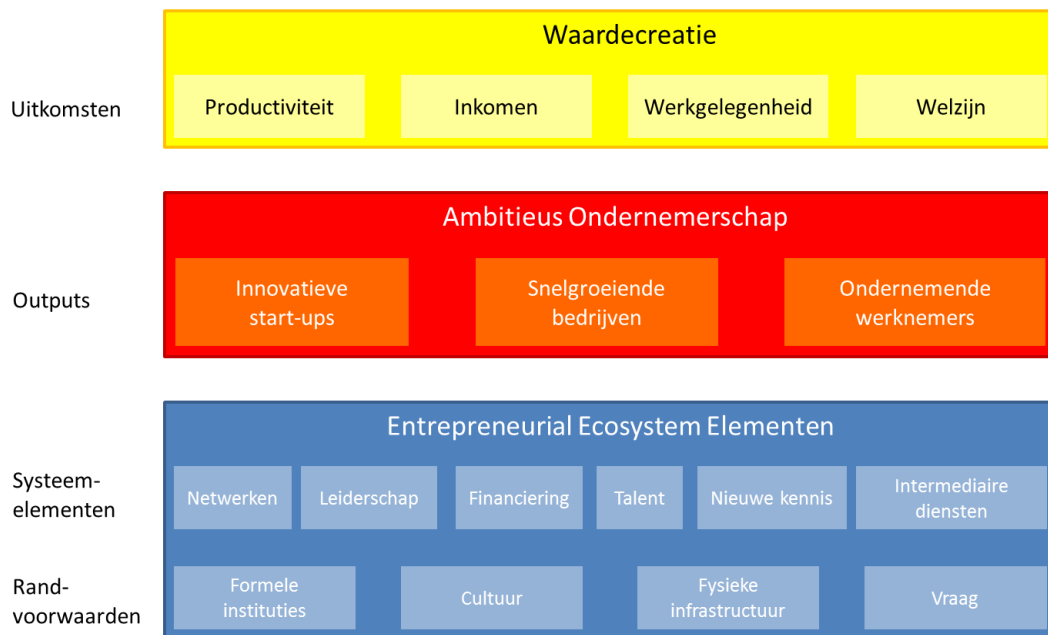
Door vanuit het perspectief van ecosystemen te kijken kan worden geconcludeerd dat Nederland momenteel wereldwijd een zeer sterke en centrale kennispositie op het gebied van quantum technologie kent. Daarbij zijn we uniek als het gaat om hoe het ecosysteem, met sterke samenwerkingen tussen publieke partijen, is georganiseerd. Het ecosysteem bevindt zich echter nog in een vroege ontwikkelfase: er zal blijvend aandacht moeten zijn voor het behouden van de kennispositie door te blijven investeren in onderzoek. Deze sterke kennispositie gecombineerd met een kritische massa van talent en ondernemerschap moet er voor zorgen dat het ecosysteem in een *virtuous cycle* komt: er is voldoende kans voor startups om te ontstaan, op te schalen en vervolgens een rolmodel te worden voor een nieuwe generatie ondernemers, en ook nieuw talent aan te trekken, waardoor het nog gemakkelijker wordt om te starten en/of door te groeien in de emerging quantum industries. Een succesvolle generatie ondernemers kan vervolgens weer bijdragen aan de financiering van een volgende generatie startups en aan het versterken van netwerkontwikkeling en leiderschap in het Nederlandse quantum ecosysteem.

Nederland kan deze kritische massa van talent en ondernemerschap bewerkstelligen door actief in te zetten op: a) aantrekken, behouden en zelf opleiden van talent, b) het stimuleren van de aanwezigheid van private partijen om de toekomstige vraag naar quantum technologie in te bedden in het ecosysteem, c) het op gang krijgen van voldoende financiering (voor de ontwikkeling van) quantum toepassingen, en d) het verbeteren van de aanwezige diensten voor onderzoekers en ondernemers om te kunnen experimenteren werken met quantum technologie.



2. Quantum ecosystemen

De sterktes en zwaktes van het quantum ecosysteem kunnen door middel van de ecosysteembenadering voor ondernemerschap in beeld worden gebracht. Binnen deze benadering wordt de economie gezien als een dynamisch netwerk van actoren en factoren en kan er in kaart worden gebracht hoe dat netwerk functioneert en wat er voor nodig is om het nog beter te laten functioneren. Hierbij wordt 'ondernemerschap' gezien als het proces waarbij individuen kansen identificeren en realiseren om nieuwe waarde te genereren. Het gaat hierbij dus over innovatie mogelijk te maken en dit laten renderen. Het ecosysteem is een concept dat de onderlinge afhankelijkheid van de actoren benadrukt. Het focust op de rol van de context in het (on)mogelijk maken van ondernemerschap, en uiteindelijk waardecreatie voor allen, in de vorm van productiviteit, inkomen, werkgelegenheid en/of welzijn.



Figuur 1: Schematische weergave van alle elementen, outputs en uitkomsten van een ecosysteem voor ondernemerschap

Ecosystemen voor ondernemerschap worden opgebouwd uit een verzameling randvoorwaarden en systeemelementen. Deze zijn weergegeven in

Figuur 1. Hierin zijn zowel sociale condities (formele instituties en cultuur), fysieke condities en marktvrage opgenomen die sociale interactie kunnen beïnvloeden. De systeemelementen worden gezien als het hart van het ecosysteem: netwerken van ondernemers, leiderschap, financiering, talent, nieuwe kennis en intermediaire diensten. Hierbij wordt de aanwezigheid en interactie tussen deze elementen als cruciaal gezien voor het succes van het ecosysteem. Een verdere beschrijving van deze elementen is gegeven in de bijlage.



Er wordt al geruime tijd onderzoek gedaan naar quantum technologie, maar veel onderzoek is nog zeer fundamenteel van aard. De ontwikkelingen van het omzetten van deze kennis in ondernemerschap zijn zeer recent. Het ecosysteem bevindt zich in vele opzichten daarom nog in de 'embryonale fase'. Het quantum ecosysteem zit ingebed in het bredere generieke ecosysteem voor ondernemerschap in Nederland. Dit is de basis waarop het voor Nederland mogelijk is om innovaties met technologieën zoals quantum plaats te laten vinden. Om een compleet beeld te kunnen schetsen van de potentie van quantum technologie voor Nederland wordt ook dit generieke ecosysteem voor ondernemerschap in kaart gebracht (zie bijlage).

Binnen dit rapport wordt de ecosysteembenadering dus op drie manieren gehanteerd:

1. Generiek: hoe staat Nederland ervoor in het mogelijk maken van innovaties.
2. Specifiek voor quantum onderzoek: hoe staat Nederland, in het bijzonder qua quantum kennisontwikkeling, ervoor.
3. Specifiek voor quantum ondernemerschap: hoe staat Nederland ervoor met het scheppen van de juiste condities voor quantum start-ups en scale-ups.

Deze drie wijzen worden geïntegreerd in een ecosysteem benadering voor emerging industries¹, in het bijzonder de emerging quantum industries.

Ten eerste analyseren we een aantal internationaal leidende quantum ecosystemen waar ondernemerschap al zichtbaar is ontwikkeld. Hierbij voegen we een overzicht van de ecosystemen van leidende corporates in het quantum domein aan toe. Vervolgens doen we een diepgaande analyse van het Nederlandse quantum ecosysteem, langs de lijnen van quantum onderzoek en quantum ondernemerschap en relateren de kwaliteit van het Nederlandse quantum ecosysteem aan de internationale benchmarks. We concluderen de diagnose met een ontwikkelingsperspectief op emerging quantum industries in Nederland. Als achtergrond geven we een algemene beschrijving van het Nederlandse ecosysteem voor ondernemerschap om inzicht te geven in hoe goed Nederland ervoor staat voor de ontwikkeling van innovaties in brede zin in vergelijking met andere landen die zich richten op quantum technologie (zie bijlage).

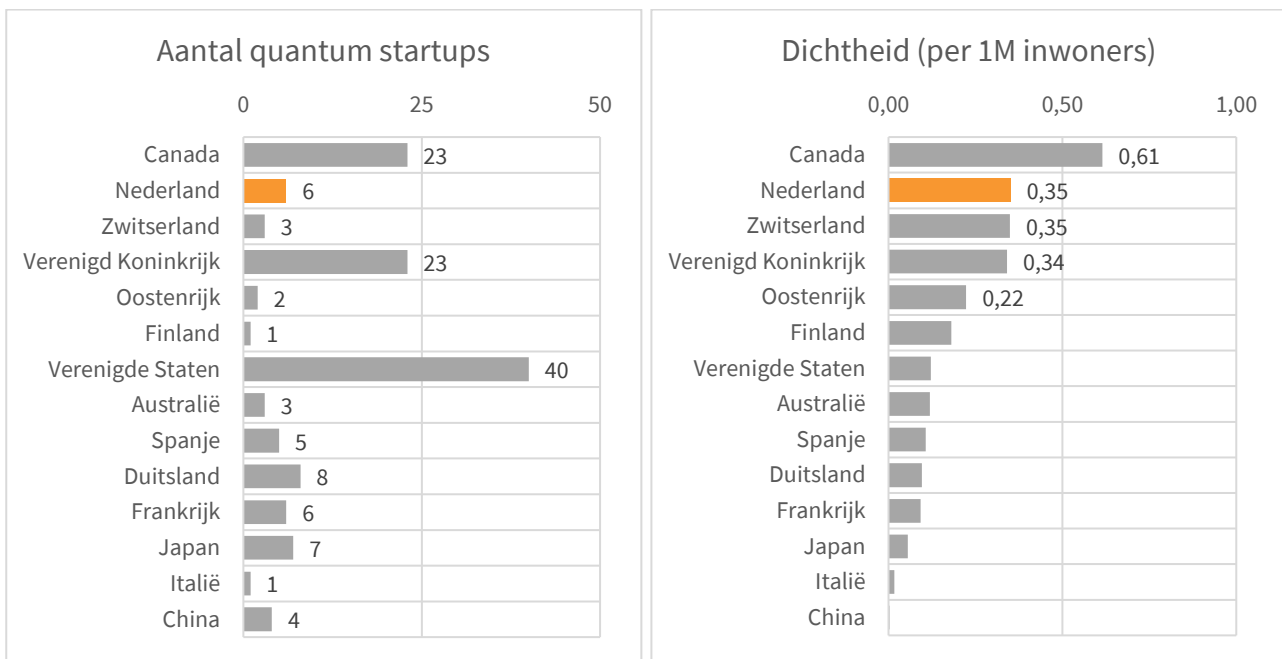
¹ Livesey, F. (2013). How should governments support the emergence of new industries in leading economies?. *International Journal of Public Policy*, 9(1-2), 108-130; Stam, E. (2018). Enabling Creative Destruction: An Entrepreneurial Ecosystem Approach to Industrial Policy. *USE Working Paper series*, 18(05).



3. Quantum ecosystemen internationaal

In deze sectie vergelijken we leidende quantum ecosystemen in het buitenland, als benchmark voor het Nederlandse quantum ecosysteem. Voor de selectie van buitenlandse quantum ecosystemen zijn twee criteria bepalend: er moet internationaal toonaangevend quantum onderzoek plaatsvinden (een belangrijke input van het ecosysteem) en het ecosysteem moet leidend zijn in de aanwezigheid van quantum startups (een belangrijke output van het ecosysteem).

De startup activiteit op het gebied van quantum technologie is mondiaal nog zeer beperkt. Bestaande grote technologiebedrijven investeren nu volop in onderzoek en demonstratieprojecten, maar door de relatief lage *technology readiness* zijn nog weinig nieuwe bedrijven wereldwijd bezig met het ontwikkelen van deze technologie. Er zijn wereldwijd nu ~150 startups en private bedrijven actief in quantum technologies, waarvan zes in Nederland (Figuur 2). Deze bedrijven ontwikkelen nieuwe toepassingen gebaseerd op quantum principes en leveren hun producten nu voornamelijk aan academische spelers. De meerderheid van de bedrijven is gericht op het ontwikkelen van hardware, software zal naar verwachting in het komende decennium een steeds belangrijker rol gaan spelen.



Figuur 2: Aantal Quantum startups en dichtheid (aantal startups per 1 miljoen inwoners). (bron: McKinsey (2020) & UNSD, bewerking: Birch)



Relatief gezien is Nederland tweede van de wereld qua quantum startups, net achter Canada, met Zwitserland en het Verenigd Koninkrijk in een vergelijkbare positie als Nederland. Opvallend is dat ondanks het grootste absolute aantal, de Verenigde Staten relatief achterblijft qua quantum startups. Quantum startups in de VS zijn geconcentreerd in de staten California en Massachusetts. Ook in Canada zijn twee sterke regionale concentraties: rondom Vancouver en Toronto-Waterloo. De concentratie van startups in deze regio's betekent dat de regio vaak een beter niveau van analyse is dan het landsniveau. Daarnaast onderschatten we waarschijnlijk het aantal quantum startups in China door minder goede data over dit ecosysteem.

Tabel 1 geeft een overzicht van de leidende academische onderzoekscentra, de leidende corporates en startups in quantum technologie. Aan de hand van drie rankings gebruiken we de prevalentie van deze actoren om te achterhalen waar geografisch gezien adolescentie (met tenminste 2 actoren) en embryonale ecosystemen (met 1 actor) zijn te lokaliseren. Voor de internationale benchmarks hebben we zowel meer adolescentie als embryonale ecosystemen gekozen. Deze overlappen met de internationale benchmark van de Qutech self-assessment 2015-2018 (VK – University of Oxford, Canada – University of Waterloo, Zwitserland – ETH Zürich).



Tabel 1: Classificatie Quantum Ecosystemen (groen = adolescent ; geel = embryonaal)

Country	Region	Top 12 research universities*	Top 16 companies**	Top 10 Start-ups***
CA	Ontario, Waterloo/Toronto	The Institute for Quantum Computing — University of Waterloo	Quantum Benchmark; Xanadu	Xanadu, ISARA
	British Columbia, Vancouver		1Qbit; D-Wave Quantum Computing	1Qbit
US	California, San Francisco Bay area	University of California Berkeley - The Berkeley Center for Quantum Information and Computation	Amazon Braket; AWS Center for Quantum Computing (Caltech); QC Ware (Palo Alto, Paris); Rigetti Computing; Google AI Quantum	QC Ware; Rigetti Computing
	Boston	Harvard University — Harvard Quantum Initiative; MIT — Center for Theoretical Physics	Zapata Computing (Boston, Toronto, Austin, London)	Zapata Computing
	Virginia/Washington DC	University of Maryland — Joint Quantum Institute (JQI)	IonQ	IonQ; QxBranh
	Washington, Redmond		Microsoft (Redmond, Santa Barbara, West Lafayette)	
	New York		IBM Quantum	
	Chicago	University of Chicago — Chicago Quantum Exchange (CQE)		
	Texas, Austin			Strangeworks
	Minnesota, Minneapolis		Honeywell Quantum Solutions	
UK	Cambridge		Riverlane, DeltaFlow	
	Greater London, Oxfordshire	University of Oxford		
Australia,	NSW, Sydney	University of Sydney	Q-CTRL (Sydney, Los Angeles)	Q-CTRL
NL	Zuid-Holland, Delft	TU Delft †	Qutech	
Germany	Bayern, Munich	Quantum Applications and Research Laboratory at LMU Munich (QAR-Lab)		
Austria	Tyrol, Innsbruck	University of Innsbruck – Quantum Information & Computation		
Singapore	Singapore	National University of Singapore and Nanyang Technological University — Centre for Quantum Technologies		
China	Anhui, Hefei	University of Science and Technology of China (USTC) – Division of Quantum Physics and Quantum Information		

*Quantum Daily November 18, 2019

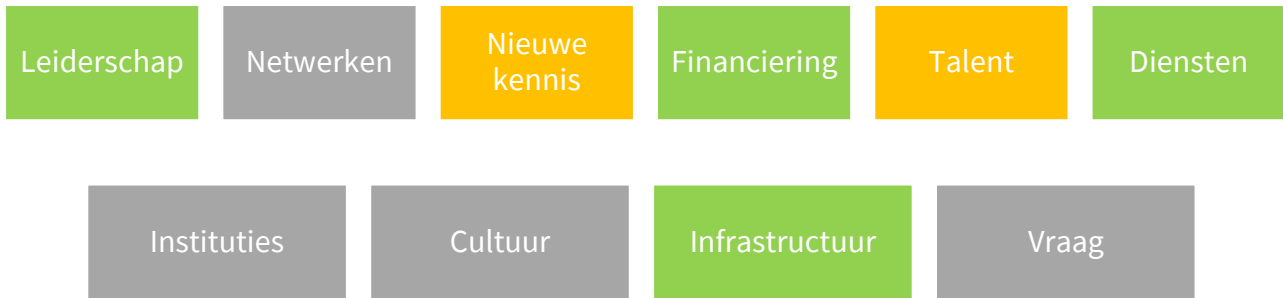
**<https://aimultiple.com/quantum-computing-companies/> (retrieved at 6 April 2020)

***<https://www.itworld.com/article/3489098/10-hot-quantum-computing-startups-to-watch.html> (2019, retrieved at 6 April 2020)

† TU Delft wordt niet genoemd als top12 research university; Qutech wel wordt genoemd als top 16 companies, omdat het als research center in grote mate is ingebed in de TU Delft hebben we ervoor gekozen om TU Delft ook te noemen als Top research university (zie ook onze analyses van de wetenschappelijke positie van de TU Delft in dit rapport).



Canada-Waterloo/Toronto



De Canadese economie wordt gezien als een van de meest competitieve en innovatieve economieën wereldwijd. Het regionale Toronto-Waterloo ecosysteem voor ondernemerschap is op zijn beurt het productiefste ecosysteem binnen Canada. Het ecosysteem bestaat in zijn geheel 15.000 bedrijven en 200.000 werknemers in hightechbedrijven.² Centraal in de ecosystemen staan de universiteiten van Toronto en Waterloo.

Rondom de Universiteit van Waterloo is het quantum ecosysteem genaamd 'quantum valley' ontstaan. Hierin zitten verschillende onderzoeksinstituten, labs en venture capital fondsen die zich specifiek richten op quantum computing, communicatie, security en sensing. Belangrijke instituten binnen het in het ecosysteem zijn:

- **Institute for Quantum Computing (IQC):** onderzoeksinstituut aan de Universiteit van Waterloo gericht op quantum computing, quantum communications, quantum sensing en quantum materialen. Heeft meer dan 30 onderzoeksgroepen.
- **Transformative Quantum Technologies (TQT):** een samenwerkingsverband geleid door de Universiteit van Waterloo en IQC wat zich richt op de valorisatie van quantumtechnologie.
- **Perimeter Institute:** Onafhankelijk onderzoeksinstituut op het gebied van theoretische natuurkunde.
- **Quantum Valley Investments:** Investeringsfonds gericht op het commercialiseren van doorbraaktechnologieën binnen quantum.
- **Quantum Nanofab:** Onderzoeksfaciliteit en lab waar onderzoekers kunnen werken aan de ontwikkeling van technologieën op het gebied an quantum informatie.
- **Quantum Valley Ideas Lab:** Incubator en onderzoeksfaciliteit die zich in samenwerking met private partijen richt op het overbruggen van het gat tussen fundamenteel onderzoek en praktische toepassingen binnen quantum.

² StartupGenome (2020). Gobar Startup Ecosystem Report 2019.



- **Lazaridis Institute for the Management of Technology Enterprises:** Instituut dat zich richt op het aanbieden van cursussen, trainingen en onderzoeksprogramma's gericht op het ontwikkelen van vaardigheden die nodig zijn om techbedrijven op te zetten en verder te ontwikkelen.

Leiderschap

Het quantum ecosysteem wordt gezien als geesteskind van Blackberry oprichter Mike Lazaridis die in 2000 aan de wieg stond van het *Perimeter Institute for Theoretical Physics* en door de jaren heen naar schatting \$400 miljoen heeft geïnvesteerd in de verschillende instituten binnen het ecosysteem. Ook beheert hij een venture capital fonds wat quantum startups ondersteunt en verschillende labs en testfaciliteiten heeft helpen opbouwen. Het ecosysteem is gebouwd rondom de Universiteit van Waterloo met de financiële hulp van Mike Lazaridis. Ook zet hij zich actief in het met het bestuur van en het aantrekken van publieke gelden voor het instituut. Hiermee lijkt de visie van Mike Lazaridis leidend te zijn voor de richting van het ecosysteem.

Kennis

Canada kent geen leidende positie wanneer het gaat om onderzoek output op het gebied van quantum, echter neemt de Universiteit van Waterloo wel een centrale rol in het wereldwijde onderzoeksnetwerk.³ Een groot deel van het quantum onderzoek in Canada centreert zich dus in het ecosysteem in Waterloo. IQC huist 32 *faculty members* en een community van ongeveer 300 onderzoekers die zich binnen 14 onderzoeksgroepen specifiek richting op quantum.

De Canadese overheid heeft in de afgelopen jaren relatief hoge investeringen gedaan in Quantum. Naar schatting wordt \$100 miljoen per jaar geïnvesteerd in onderzoek.⁴ Hiermee heeft Canada de hoogste per-capita investeringen van de alle G7 landen. Ook heeft Canada een sterke positie als het gaat om quantum patenten, mede door de aanwezigheid van D-wave. D-wave was een van de eerste bedrijven die quantum computing hardware systeem wist te commercialiseren.

Financiering

Na de VS kent Canada de grootste omvang in Venture Capital investeringen in quantumtechnologie. Van de \$3 miljard aan investeringen wereldwijd is \$683 miljoen in 71 investeringen toe te schrijven aan Canada. Het Waterloo ecosysteem heeft een relatief sterke

³ McKinsey (2020). Economic impact of Quantum in The Netherlands

⁴ Sussman et al. (2019). Quantum Canada.



positie qua financiering door de aanwezigheid van het op het ecosysteem gerichte investeringsfonds Quantum Valley Investment. Dit fonds en tevens incubator is door Mike Lazaridis en Doug Fregin opgericht en beheert \$100 miljoen om doorbraken binnen Quantum Information Science te stimuleren. Er zijn sinds 2013 vier bedrijven opgestart met behulp van hun funding. Een hiervan is ISARA Corporation, die een \$11.5 miljoen *seed fund* investering heeft ontvangen⁵. Daarnaast heeft het fonds geïnvesteerd in verschillende labs en benodigde infrastructuur voor quantum-onderzoek.

ISARA heeft ook een lening uit het Strategic Innovation Fund ontvangen van \$7.2 miljoen van de Canadese overheid. In totaal heeft de Canadese overheid \$41 miljoen in 2019 vrijgemaakt voor quantum projecten, waarvan \$20 miljoen naar het Quantum Valley Ideas Lab gaat. Daarnaast ontvingen Cognitive systems (\$7.3 miljoen) en High Q Technologies (\$6.5 miljoen) ook geld uit dit fonds.⁶ Hiermee lijkt een groot deel van de investeringen van de Canadese overheid in quantum technologie naar het quantum ecosysteem van Waterloo te gaan.

Talent

Canada heeft een relatief laag aantal quantum graduates per miljoen inwoners⁷. Echter richt binnen het ecosysteem ICQ zich op het specifiek opleiden van quantum-talent. Onderdeel van het instituut is een uitgebreid aanbod aan quantum specifieke opleidingen en worden er ook trainingsprogramma's voor professionals aangeboden. Binnen deze trainingsprogramma's wordt ook gefocust op ondernemerschap: hierin gaat het onder andere over IP-bescherming en commercialisatie van onderzoek en richt zich op graduate students en postdocs. Daarnaast wordt binnen het Lazaridis Institute for the Management of Technology Enterprises talent ontwikkeld met de focus op het starten en ontwikkelen van meer generieke hightechbedrijven. Hiermee is het ecosysteem sterk in het genereren van de vaardigheden die nodig zijn voor productief ondernemerschap gericht op quantum.

Diensten

Uniek aan het quantum ecosysteem in Waterloo is de aanwezigheid van verschillende organisaties die een incubator-achtige rol aannemen en zich richten op de valorisatie en verdere commercialisatie van quantum technologie. Dit zijn onder andere het Quantum Valley Ideas Lab, Transformative Quantum Technologies en de Quantum Exploration Space. Recent (2019) is bij de University of Toronto het Creative Destruction Lab van de University of Toronto een Quantum stream opgezet, waarbij in samenwerking met IBM Q ondersteuning wordt

⁵ Bron: Crunchbase.com

⁶ <https://business.financialpost.com/technology/new-funding-adds-fuel-to-waterloos-quantum-computing-dreams>

⁷ McKinsey (2020). Economic impact of Quantum in The Netherlands



verleend aan startups. Hierbij wordt expliciet ingezet op de ontwikkeling van het Quantum computing startup ecosysteem door ondernemers, investeerders, AI experts, leidende quantum information onderzoekers en quantum hardware bedrijven bij elkaar te brengen in het domein van quantum machine learning en quantum optimization.⁸

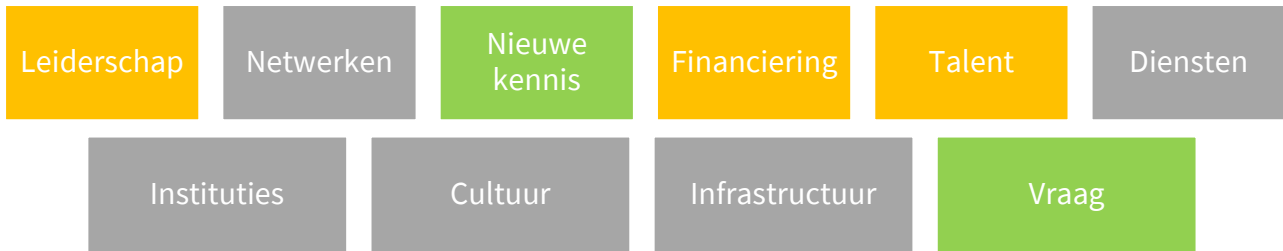
Infrastructuur

Mede gefinancierd door Mike Lazaridis is in 2020 het Mike & Ophelia Lazaridis Quantum-Nano Centre geopend. Dit 26.000 m² grote gebouw huist IQC en het Waterloo Institute for Nanotechnology en verschillende cleanrooms en onderzoekslaboratoria. Daarnaast zijn er verschillende ruimtes voor wetenschappers om elkaar te ontmoeten en samen te werken. Totale kosten voor de bouw van dit project was \$160 miljoen.

⁸ <https://www.creativedestructionlab.com/2019/09/creative-destruction-lab-collaborates-with-ibm-q-to-train-startups-in-quantum-computing/>



UK-Oxfordshire



Het ecosysteem rondom Oxfordshire in het Verenigd Koninkrijk staat in de top vier van de meest competitieve en innovatieve regio's in Europa.⁹ De regio staat bekend om de successen in het genereren van universiteit spinouts.¹⁰

Het VK was een van de first movers in Europa betreft quantum technologie. In 2013 lanceerde de Britse overheid een nationaal programma van £270 miljoen om de ontwikkeling van de technologie te stimuleren. In 2014 en 2019 kwam hier nog respectievelijk £120 miljoen en £94 miljoen bij, voornamelijk om een netwerk van Quantum Technology Hubs op te zetten. Deze hubs zijn gebouwd rondom 17 universiteiten en meer dan 130 bedrijven in het VK. De verschillende hubs richten zich op verschillende onderdelen binnen quantum. Zo wordt *quantum imaging* getrokken door de University of Glasgow, *quantum sensing* door de University of Birmingham, *quantum communications* door de University of York en *quantum computing* door University of Oxford. Doel is om een 'Quantum Valley' op te zetten wat de economie van het gehele VK moet stimuleren en binnen Oxfordshire meer dan 10.000 banen op moet gaan leveren.

Leiderschap

Het ecosysteem kent een bepaalde mate van leiderschap van de Universiteit van Oxford. De universiteit van Oxford leidt een consortium van 9 universiteiten en 25 partnerorganisaties om een quantum computing hub te vormen genaamd "Networked Quantum Information Technologies" (NQIT). Doel van dit consortium is om een quantum technologie *demonstrator* te bouwen voor 2020 en om de quantum economie te stimuleren.

Kennis

Het VK produceert na de VS de meeste onderzoekspublicaties op het gebied van quantum en is tevens leidend in Europa al het gaat om quantum gerelateerde patentaanvragen. Het

⁹ European Commission (2020). The EU Regional Competitiveness Index 2019.

¹⁰ Oxfordshire Transformative Technologies Alliance (2017). Science and Innovation Audit.



Oxford Quantum centre is gelieerd aan de Universiteit Oxford en is het grootste quantum onderzoekscentrum in het VK. Binnen Oxford Quantum werken 38 teams met in totaal ~200 onderzoekers binnen verschillende deelgebieden binnen quantum technologie. De universiteit van Oxford heeft meer dan £14,5M in RCUK onderzoeksfinancieringen voor quantum en meer dan £35M uit Europese onderzoeksfinanciering ontvangen in de laatste tien jaar. De Europese onderzoeksfinanciering kan problematisch worden na de Brexit.

Financiering

Recent heeft Oxford Sciences Innovation zich in de regio gevestigd. Dit is een privaat fonds wat £600 miljoen beheert om spinouts van Oxford Universiteit te stimuleren.¹¹ Er zijn geen specifieke fondsen voor de ontwikkeling en/of valorisatie quantum technologie. Betreft Venture Capital is het VK leidend in Europa. Tussen 1997 en 2020 zijn er 70 venture capital investeringen geweest voor in totaal \$149 miljoen. Ter vergelijking: in dezelfde periode zijn er in Duitsland 9 investeringen gedaan voor een totaal van \$19 miljoen.

Talent

Het VK staat in de top 3 van aantal afgestudeerden in relevante opleiding per miljoen inwoners en hoeft alleen Denemarken en Frankrijk voor zich te laten. Binnen Oxfordshire zijn er naar schatting ongeveer 4000 studenten binnen relevante quantum opleidingen.¹² De Universiteit van Oxford kent 29 onderzoekers op het gebied van quantum die als eerste auteur publiceren.

Vraag

Binnen het ecosysteem en het VK zijn verschillende bedrijven aangestipt die systemen of materialen produceren die kunnen worden gebruikt voor quantum computing. Daarnaast zijn er een aantal bedrijven waarvan verwacht wordt dat deze in de (nabije) toekomst afnemers zullen zijn van quantum technologieën. Hierbij gaat het om:

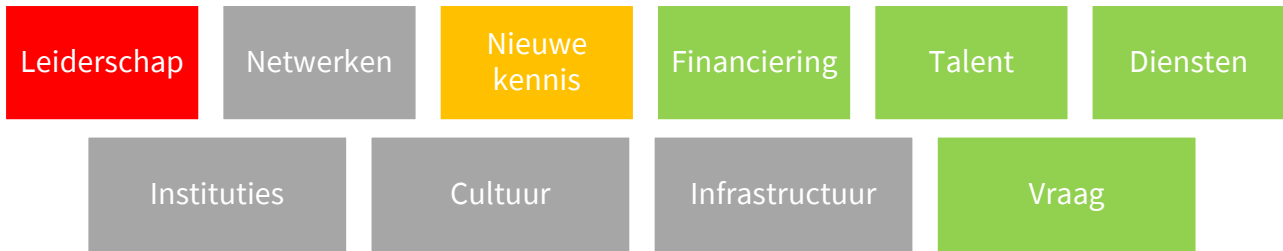
- **M-Squared Lasers:** Producent van lasers voor de medische sector en defensie.
- **Gooch and Housego:** Producent van fotonische technologie.
- **Oxford Instruments:** Producent van hightech tools voor onderzoek en producenten. Leverancier van cryogenische systemen aan de Universiteit van Oxford.

¹¹ <https://www.ft.com/content/009252f0-db13-4a7f-bdd8-4e1cebbd939f>

¹² Oxfordshire Transformative Technologies Alliance (2017). Science and Innovation Audit.



US-San Francisco Bay Area



Ecosysteem gebouwd rondom University of Berkeley en het daarbij behorende *Berkeley Quantum*. Binnen Berkeley wordt quantum onderzoek gedaan binnen voornamelijk het *Center for Quantum Coherent Science*, het *Berkeley Quantum Information & Computation Centre*, het *Simons Institute for the Theory of Computing*.

Binnen de regio zijn er verschillende tech bedrijven bezig met onderzoek en ontwikkeling van quantum technologie en toepassingen. In veel gevallen gebeurt dit in samenwerking met publieke- of kennisinstellingen. Zo werk Google samen met NASA en het *Oak Ridge National Laboratory* binnen NASA's Quantum Artificial Intelligence Laboratory (QuAIL) in hun route naar 'quantum supremacy'. Daarnaast werkt Amazon binnen het AWS Center for Quantum Computing samen met het California Institute of Technology (Caltech) en host het in de regio Amazon Braket. Hiermee kunnen onderzoekers en ontwikkelaars experimenteren met computers van quantum technologie leveranciers zoals D-Wave, Rigetti en IonQ. Daarnaast Amazon is ook bezig met het opzetten van consulting capaciteit waar quantum experts advies geven over het gebruik van quantum technologie. Dit gebeurt in het Amazon Quantum Solutions Lab. Partners in dit netwerk zijn 1Qbit, Rahko, Rigetti, QCWare, QSimulate, Xanadu en Zapata. In dit lab worden workshops gegeven over quantum en worden klanten geholpen om hun quantum-strategie te ontwikkelen.

Het ecosysteem rondom de San Francisco Bay area presenteert zich niet naar buiten toe als zijnde een 'quantum ecosysteem'. In tegenstelling tot de ecosystemen in Waterloo en Oxfordshire lijkt dit ecosysteem zich niet te centrereren rondom de aanwezige onderzoekscapaciteit op het gebied van quantum. De activiteiten ronden quantum technologie lijken in dit ecosysteem meer de positie in te nemen van één van de kansrijke technologische ontwikkelingen binnen het bredere 'hightech' ecosysteem. De aanwezigheid van grote tech bedrijven zoals Google, Amazon, Microsoft en Intel, de grote beschikbaarheid van venture capital en de ruime aanwezigheid van talent zorgen ervoor dat het brede ecosysteem goed fungeert en innovatieve startups gemakkelijk van de grond komen.



In de huidige staat lijkt het dus te prematuur om te spreken van een (georganiseerd) quantum ecosysteem. Echter vanwege de reeds opgezette initiatieven, de aanwezigheid van de onderzoekscapaciteit, talent en financiering in het bredere ecosysteem voor ondernemerschap kan de ontwikkeling van het quantum ecosysteem als kansrijk worden gezien, met name door de grote hoeveelheid private investeringen in quantum ondernemerschap.

Embryonale ecosystemen

Naast de drie leidende ecosystemen, analyseren we nog twee embryonale ecosystemen in Duitsland en Zwitserland, waar recent interessante ontwikkelingen op het gebied van quantum technologie hebben plaatsgevonden.

Beieren – Stuttgart/München

Sinds 2019 werken IBM en het Fraunhofer Instituut samen binnen een initiatief om quantum computing verder te stimuleren in Europa. Doel hierbij is om quantum computing toepasbaar te maken voor de industrie. IBM levert aan het instituut de “IBM Q System One”. Dit is voor IBM de eerste quantum computer buiten de VS. Onder de paraplu van het *Fraunhofer Center for Quantum Computing* zullen onderzoekers, ontwikkelaars, IT-experts en gebruikers uit het bedrijfsleven werken aan quantum toepassingen. Gezien het recente karakter van deze samenwerking kan hier nog niet worden gesproken over een ontwikkeld ecosysteem, maar is daartoe een eerste aanzet gedaan. In Duitsland staat quantum technologie wel al een aantal jaar op de beleidsagenda: Duitsland investeert meer dan €650 miljoen tussen 2018 en 2022 in de ontwikkeling van quantum technologie. De regio Beieren investeert ook ongeveer €72 miljoen in R&D omtrent quantum computing in de komende jaren. Dit is ook een van de redenen geweest voor IBM om zich in deze regio te vestigen.

Binnen de regio wordt er onderzoek naar quantum technologie gedaan binnen het Munich Center for Quantum Science en Technologie: een cluster wat is opgericht door de Technical University of München (TUM) en Ludwig Maximilians Universitat (LMU) in samenwerking met de Max Planck Society. Daarnaast ondersteunt de regio Bavaria de opzet van het *Institute for Topological Quantum Computing*.

Zürich

De Zwitserse overheid heeft sinds de opkomst van quantum technologie de ontwikkeling ervan gestimuleerd. In 2011 heeft het de Swiss National Science Foundation het *QSIT – Quantum Science en Technology* onderzoekscentrum opgezet. Hierbinnen werken de



universiteiten ETH Zurich en de Universiteit van Basel samen in 34 quantum onderzoeksgroepen. Binnen het instituut wordt ook aandacht besteed aan technology transfer in de vorm van IP-workshops en congressen. Daarnaast ken Zurich een IBM Research Lab. Binnen dit lab doen meer dan 200 onderzoekers onderzoek naar onder andere toepassingen op het gebied van artificial intelligence, blockchain en ook quantum.

Een van de belangrijkste spin-offs van ETH Zürich is Zurich Instruments. Dit bedrijf ontwikkelt en verkoopt verschillende test- en meetapparatuur met bijbehorende software op het gebied van quantum aan universiteiten, onderzoeksinstituten en private partijen. Hiermee is het een van de eerste bedrijven die een quantum computing controlesysteem heeft weten te commercialiseren.

Corporate Ecosystems

De ontwikkeling van de quantum technologie concentreert zich in een klein aantal regio's, waarin leidende onderzoeksinstituten, corporates en veelbelovende startups zich concentreren. Naast deze regionale ecosystemen, kan er ook naar corporate ecosystemen worden gekeken. Leidende corporates in quantum technologie, zoals Microsoft, Amazon en IBM, ontwikkelen hun eigen ecosystemen met een groot aantal partners, binnen en buiten de leidende regionale quantum ecosystems. De vestiging van onderdelen van deze corporate ecosystems kan een versterkende werking hebben op de ontwikkeling van het Nederlandse quantum ecosysteem, bijvoorbeeld door investeringen in kennis en talent, maar ook corporate venturing activiteiten en de verbinding met andere partners in deze corporate ecosystems.

In de bijlage hebben we de corporate ecosystems van Microsoft, Amazon en IBM in kaart gebracht. De TU Delft, TU Eindhoven en Hogeschool van Amsterdam maken deel uit van het Microsoft ecosystem. Er zijn nog geen Nederlandse spelers in de Amazon en IBM ecosystems.



4. Het Nederlandse Quantum Ecosysteem

Het Nederlandse quantum ecosysteem staat voorop in de wereld als het gaat om baanbrekende vindingen. De ontdekking van Majorana-deeltjes, de ontwikkeling van silicon qubits en een quantum processor, het gebruik van entanglement voor ontwikkelingen van een quantum internet en de lancering van Quantum Inspire, het eerste Europese platform voor quantum algoritmen, zijn allemaal tot stand gekomen door of met hulp van Nederlandse wetenschappers. Zoals we in hoofdstuk 3 hebben kunnen zien is de startup activiteit op het gebied van quantum technologie mondiaal nog zeer beperkt, maar is Nederland al wel één van de koplopers qua quantum startups. Er zijn wereldwijd nu zo'n 150 startups actief in quantum technologie, waarvan zeven in Nederland (Tabel 2).

Tabel 2: Quantum startups in Nederland (bron: Techleap & Crunchbase)

Naam	Type	Oprichting	Werknemers	Locatie
ApexQubit*	Software	2018	6	Amsterdam
Delft Circuits	Hardware	2016	13	Delft
Qblox	Hardware	2018	3	Delft; Rotterdam
Qu & Co	Software	2012	6	Amsterdam
Quix	Optical QC	2019	4	Enschede
Single Quantum	Hardware	2012	23	Delft
Orange Quantum Systems	Software/hardware	2020	5	Delft

* ApexQubit is gestart in Riga (Letland), en heeft inmiddels haar hoofdvestiging in Berkeley, Californië maar wordt gesteund door de Amsterdamse health tech accelerator HealthInc.

Deze startups zijn resultaat (output) van het quantum ecosysteem in Nederland, maar staan niet direct op zichzelf. Bestaande grote technologiebedrijven investeren al volop in onderzoek en demonstratieprojecten, maar door de relatief lage *technology readiness* zijn nog weinig nieuwe bedrijven wereldwijd bezig met het ontwikkelen van deze technologie. Bestaande grote en kleinere multinationale technologiebedrijven op het gebied van quantum zijn al wel actief in Nederland. Er zijn Nederlandse investeringen van de grote multinationals als Microsoft en Intel, Maar ook de kleinere multinationals zoals het Fins-Nederlandse BlueFors (opgericht in 2008, in Helsinki, door twee Nederlanders, met sinds 2018 een vestiging in Delft) en Leiden Cryogenics (opgericht in 1992), zijn belangrijke spelers in de waardeketen van quantum technologie die in Nederland actief zijn. Deze waardeketens kunnen alleen effectief waarde creëren wanneer het ecosysteem voor quantum goed functioneert. In dit hoofdstuk wordt hier meer inzicht in verschaft: we maken een diagnose van de huidige sterktes en



zwakten van het Nederlandse Quantum Ecosysteem. De sterktes en zwakten van het Nederlandse quantum ecosysteem worden samengevat in het onderstaande figuur, en verder toegelicht in dit hoofdstuk.



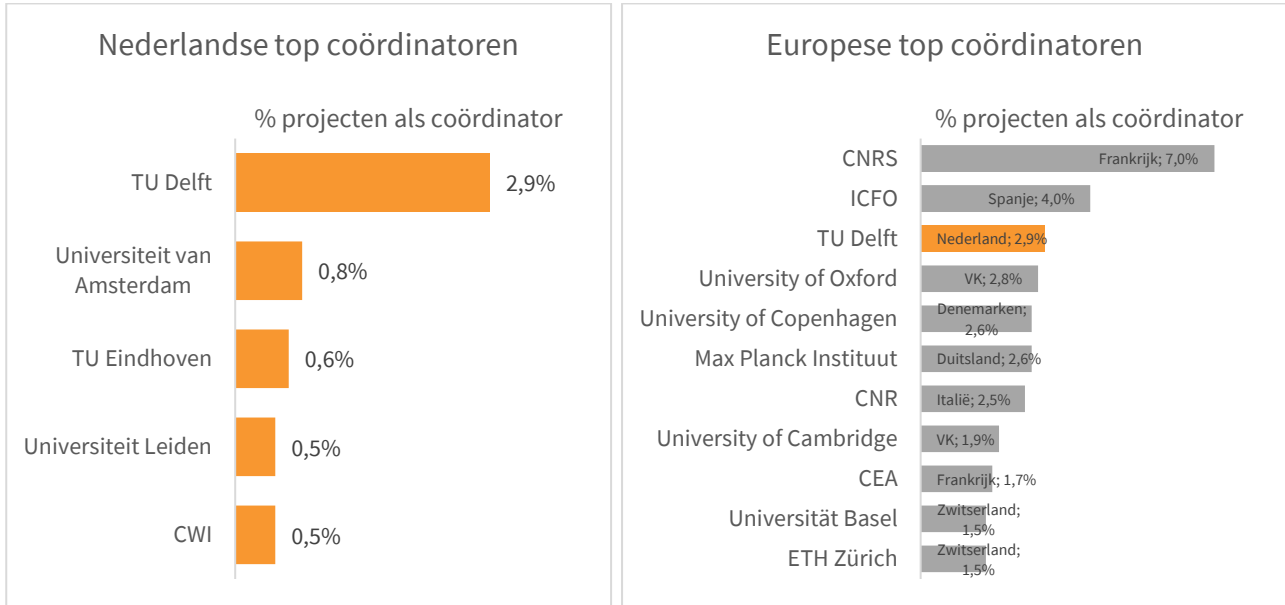
Leiderschap

Met de Nationale Quantum Agenda is de eerste substantiële stap gezet qua leiderschap in het Nederlandse quantum ecosysteem. Dit leiderschap wordt nu nog gedomineerd door publieke partijen, het is de uitdaging is om dit leiderschap vast te houden en tegelijkertijd een transitie te maken naar meer private sector gedreven leiderschap, door intensieve samenwerking tussen publieke en private partijen.

De TU Delft heeft sterke leiderschapspositie als katalysator voor quantum onderzoek.¹³ Ook in de Europese context blijkt dit als wordt gekeken naar Europese onderzoeksprojecten en de leidende organisaties hierin. Zo toont Nederland sterk leiderschap in het Europese onderzoeksveld in het Horizon 2020 programma. Nederlandse organisaties trekken relatief veel grote Europese quantum onderzoeksconsortia en tonen hierbij leiderschap: in totaal is bij 6,7% van de projecten een Nederlandse organisatie de coördinator. De TU Delft is de derde grootste coördinator van quantum onderzoeksprojecten, zie Figuur 3.¹⁴

¹³ McKinsey (2020). Economic impact of Quantum in The Netherlands

¹⁴ Dit baseren we op een selectie van 646 internationale onderzoeksprojecten in het H2020 programma, op data van CORDIS. Binnen deze database is gezocht naar projecten met Quantum X in de beschrijving (waarbij X = Computing OF Communication OF Internet OF Sensing OF Cryptography OF Key Distribution OF Clock OF Random Number Generator OF Information OF Dot OF Technology).



Figuur 3: Coördinatoren Europese Quantum Consortia onder Horizon 2020 (bron: CORDIS, bewerking: Birch).

In Nederland is leiderschap sterk wetenschappelijk gedreven. Binnen de Nationale Quantum Agenda is één van de actielijnen gericht op het verder ontwikkelen van het quantum ecosysteem. Hierbij wordt onder de noemer van Quantum Delta NL geïnvesteerd in samenwerkingsverbanden die verschillende elementen van het ecosysteem positief kunnen beïnvloeden. Zo wordt er gestreefd naar een sterkere netwerkstructuur om internationale samenwerking te bevorderen, worden er fieldlabs en clean rooms ingericht en regionale clusters gevormd. Nederland verwerft hiermee een sterke positie in het aantrekken en opbouwen van aanpalende activiteiten rondom een sterke wetenschappelijke basis die zich voornamelijk concentreert bij de TU Delft. Waar in andere ecosystemen in de wereld leiderschap voortkomt uit de aanwezigheid van een grote corporate of de inzet en financiële middelen van een individu, zorgt de samenwerking tussen overheden en onderzoeksinstituten, en een klein aantal private partijen voor sterk opkomend leiderschap in het Nederlandse ecosysteem.

Netwerken

Nederland is, zeker gezien de schaal, één van de sterkste spelers in zowel netwerken voor onderzoek als innovatie. De Nederlandse universiteiten werken veelvuldig samen in Europees en internationaal verband. In Europese consortia zijn de Nederlandse spelers in meerdere onderwerpen spelverdeler en actief in brede onderzoeksprojecten. De betrokkenheid van private partijen is hoog en gaat verder dan alleen directe kansen voor commercialisatie.

Nederland is niet alleen een top 3 speler als het gaat om wetenschappelijke output, maar Nederlandse wetenschappers hebben ook een centrale positie in het netwerk van quantum



onderzoekers. De openheid en verbondenheid van Nederlandse universiteiten is uniek voor de wereld. Niet alleen staat de TU Delft in de meest centrale positie van het wetenschappelijk netwerk, ook andere universiteiten (waaronder de Radboud Universiteit en de UvA/VU) hebben een belangrijke rol in het publicatienetwerk.¹⁵

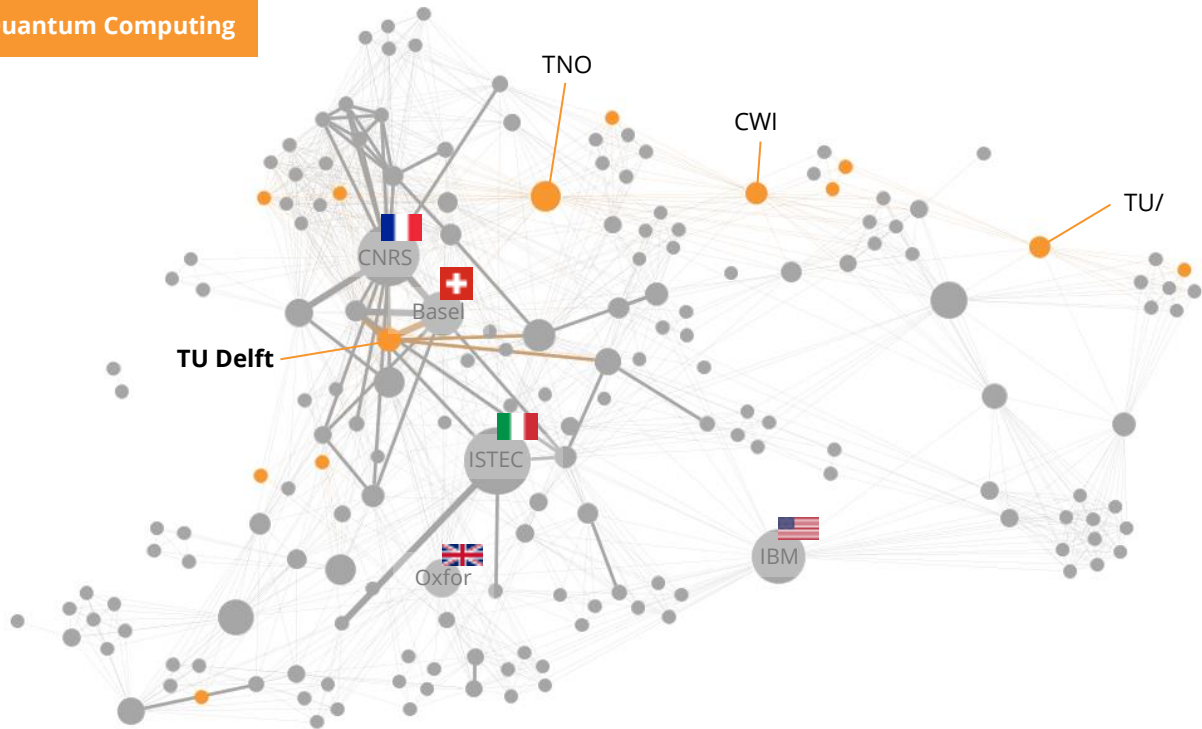
Dit kan meer specifiek in beeld worden gebracht door de netwerkstructuren te analyseren van Europese onderzoeksconsortia. Deze consortia zijn een goede graadmeter van onderzoeksactiviteit die in veel gevallen ook een valoriserende component heeft. Centrale spelers in deze consortia hebben niet alleen goede verbindingen met andere onderzoekers, maar werken vaak ook met overheden en bedrijven.

In netwerken rond thema's quantum *computing*, *communications* en *sensing* hebben Nederlandse spelers een belangrijke positie en zijn ze verbinder van meerdere consortia. Daarbij is de Nederlandse kennis genetwerkt over meerdere partijen, waar die in andere landen gecentraliseerd is. Daardoor zijn Nederlandse spelers niet altijd de *meest* centrale actoren, maar gezamenlijk hebben deze organisaties evenveel of meer massa dan andere landen en zijn ze spelverdeler op meer knooppunten in het netwerk. Dat is te zien in de volgende visualisaties (Figuur 4, Figuur 5 en Figuur 6). Grotere bollen zijn organisaties met hogere 'centraliteit' door veel en herhaalde deelname in consortia, waardoor ze beter in staat zijn de netwerken te gebruiken. In elke figuur zijn de best gepositioneerde Nederlandse spelers weergegeven en de top uit andere landen.

¹⁵ McKinsey (2020), *Economic impact of Quantum in The Netherlands*.

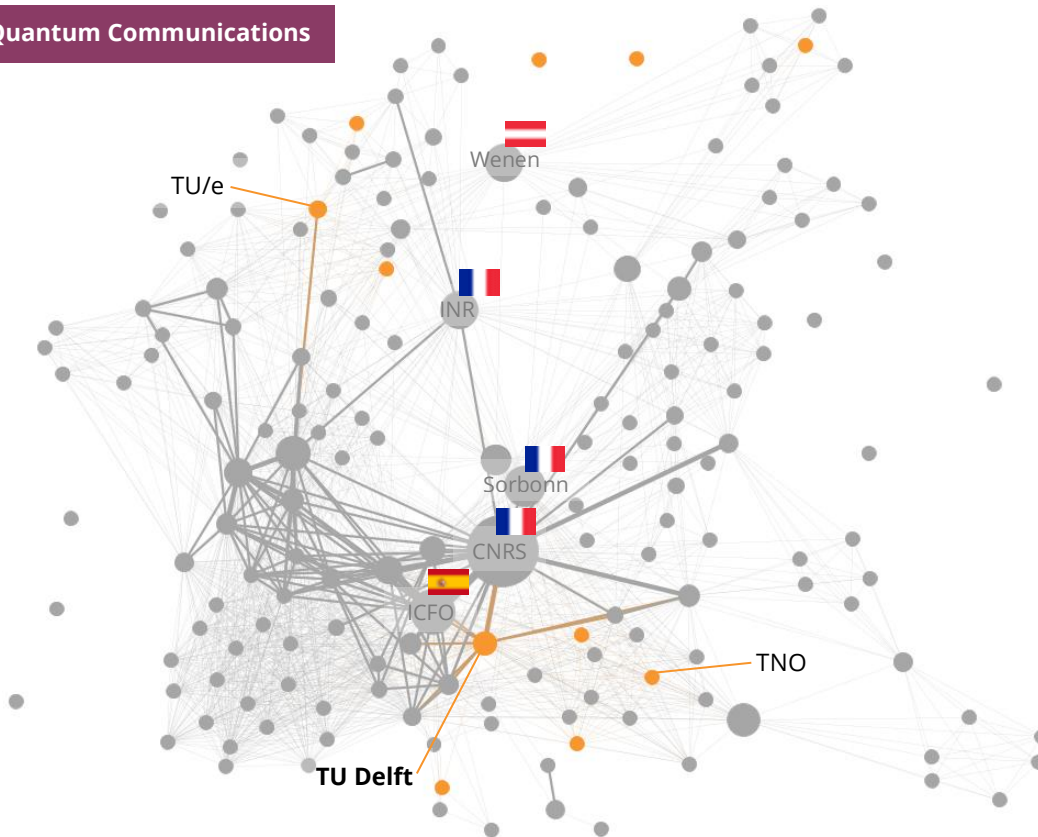


Quantum Computing



Figuur 4: Netwerk samenwerkingen binnen Horizon 2020 op thema Quantum Computing (182 projecten met 178 unieke organisaties)

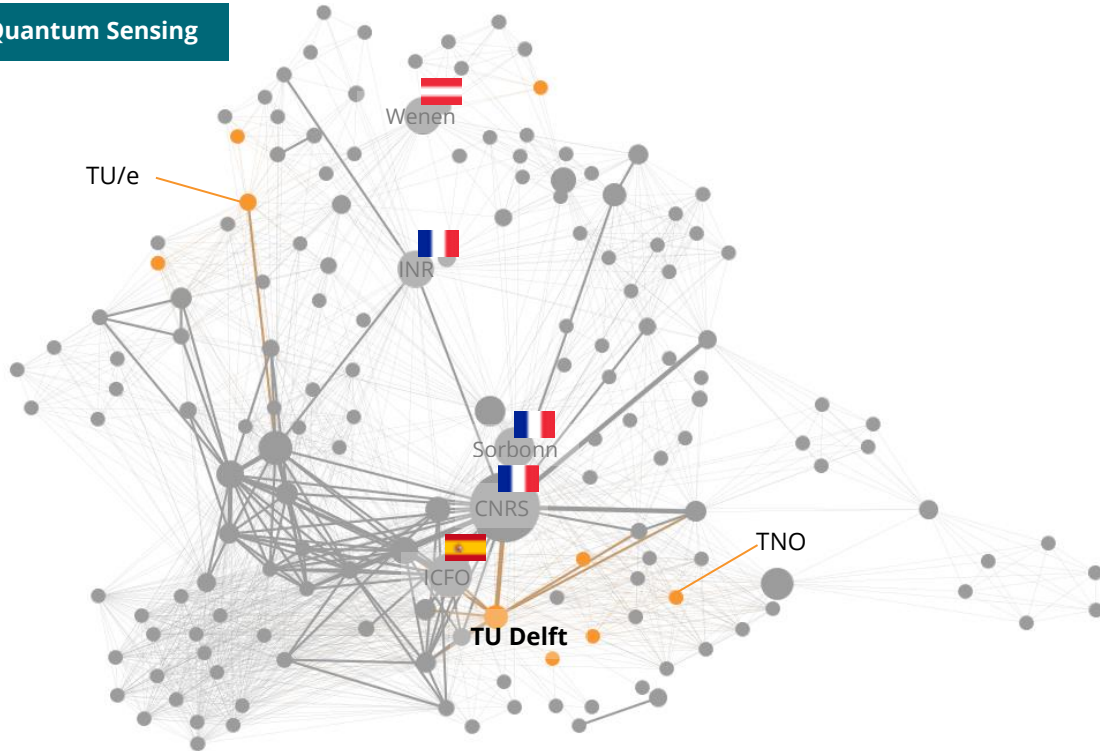
Quantum Communications



Figuur 5: Netwerk samenwerkingen binnen Horizon 2020 op thema Quantum Communications (71 projecten met 173 unieke organisaties)



Quantum Sensing

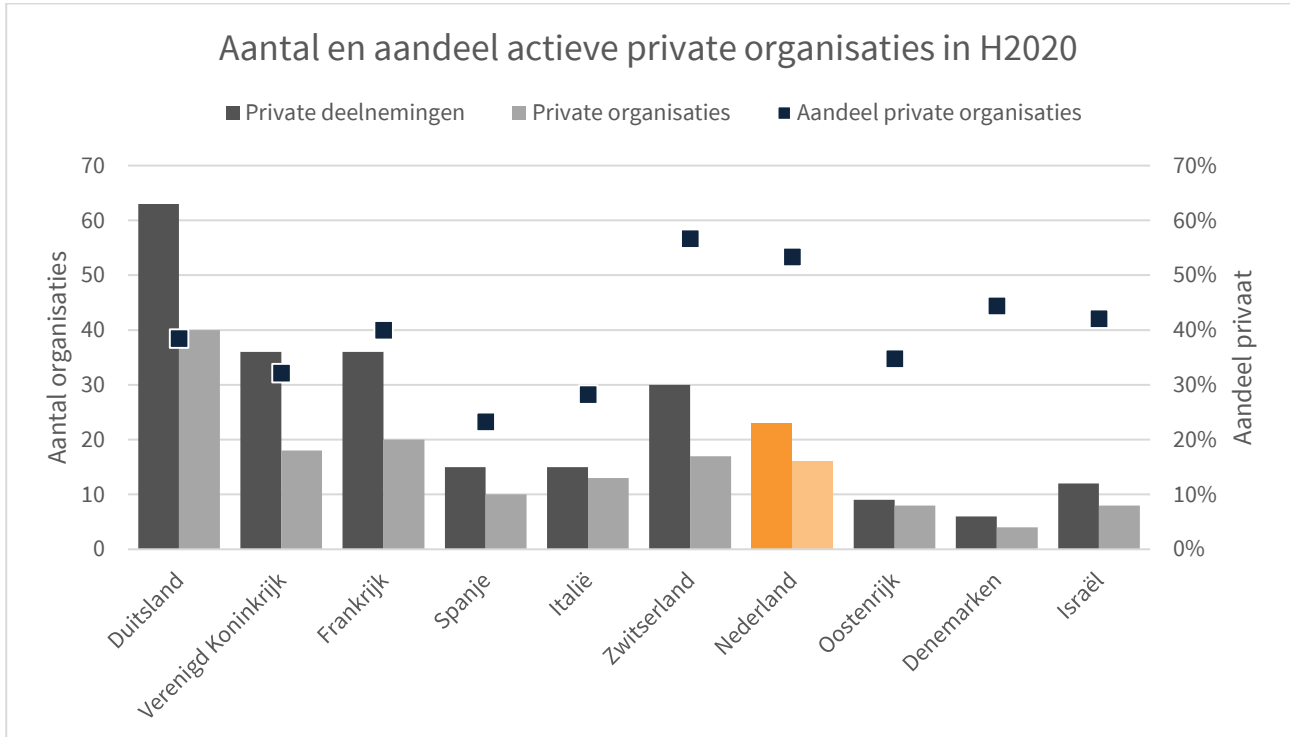


Figuur 6: Netwerk samenwerkingen binnen Horizon 2020 op thema Quantum Sensing (130 projecten met 162 unieke organisaties)

Nederland kent een sterke samenwerking op het gebied van quantum met bedrijven. De TU Delft heeft meerdere gezamenlijke onderzoeksprogramma's met onder andere Microsoft, Intel, ABN Amro en KPN. Uniek hieraan is dat deze bedrijven niet alleen medingen en financieren in projecten met een hoge TRL-indicatie, maar ook partner zijn in meer fundamenteel onderzoek.¹⁶ Daarnaast zijn er binnen de Nationale Quantum Agenda meerdere initiatieven om door middel van samenwerking quantum ondernemerschap te stimuleren. De bestaande samenwerkingen worden over het algemeen als nuttig, open en vruchtbaar ervaren. Wel worden soms zorgen geuit in hoeverre samenwerking met grote partijen als Microsoft en Intel duurzaam is en in hoeverre deze ingebed zitten in het ecosysteem. Bij onvoldoende inbedding kan het zijn dat deze partijen het ecosysteem verlaten wanneer de gezamenlijke onderzoeksinzet voltooid is of zich elders in de wereld betere kansen voordoen.

Ook in Europese samenwerkingen binnen het H2020 programma zijn relatief veel Nederlandse private spelers actief in quantum. Ongeveer de helft van de Nederlandse deelnemers is een private R&D partij, alleen Zwitserland heeft een hoger aandeel. In absolute zin komen de meeste deelnemende private partijen in quantum uit Duitsland, zie Figuur 7.

¹⁶ QdeltaNL (2019). Nationale Agenda Quantum Technologie



Figuur 7: Aantal en aandeel actieve private organisaties in quantum onderzoek gefinancierd door H2020 (bron: CORDIS, bewerking: Birch)

Nieuwe kennis

Aan onderzoeksoutput is in Nederland geen gebrek. Het ecosysteem heeft nog weinig private spelers die onafhankelijk van publieke instellingen eigen onderzoek doen, vrijwel alle ontwikkelingen worden tot nu toe nog gedaan in samenwerking met de universiteiten. Wel worden door partijen als Microsoft de eerste aanzetten gedaan om onafhankelijk van universiteiten centra te ontwikkelen waar private R&D op het gebied van quantum kan plaatsvinden.

De TU Delft is in absolute zin derde wereldwijd in de productie van nieuwe hoogwaardige kennis op het gebied van quantum, na MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) in de VS en de *University of Science and Technology of China*. Naar schatting worden er jaarlijks aan de TU Delft ongeveer 110 wetenschappelijke artikelen op het gebied van quantum gepubliceerd in vooraanstaande wetenschappelijke tijdschriften. Over de afgelopen drie jaar is deze onderzoeksoutput met 51% gegroeid. Hiermee loopt de TU Delft in op de universiteiten in VS en China, aangezien in aan deze universiteiten de onderzoeksoutput met respectievelijk 40% en 48% gegroeid is.¹⁷ Eenzelfde beeld is te zien wanneer het aantal absolute aantal citaties bekeken wordt: het aantal citaties is aan de TU Delft harder gegroeid dan bij de koplopers Harvard University en bovengenoemde universiteiten.

¹⁷ McKinsey (2020), *Economic impact of Quantum in The Netherlands*.



Quantum onderzoek in Nederland centreert zich rondom verschillende onderzoeksinstituten in Nederland en er zijn in totaal er zeven universiteiten actief in quantum technologie. In vergelijking met andere Europese landen heeft Nederland een relatief groot aantal onderzoeksinstituten. Gezien de geografische omvang van Nederland in vergelijking met landen die meer onderzoeksinstituten kennen zoals Frankrijk en Spanje is bijkomend voordeel voor het Nederlandse ecosysteem de geografische nabijheid van deze instituten. Daarnaast zijn vrijwel alle deelgebieden binnen quantum technologie gedekt binnen een of meerdere van deze instituten.

Tabel 3: overzicht van quantum onderzoeksinstituten

Quantum onderzoeksinstituten	Staf
QuSoft (UvA, CWI en VU), Quantum Matter & Quantum Information (UvA) en Theoretical Chemistry (VU)	31 PI's, 16 postdocs, 60 PhD-studenten
QuTech (TU Delft en TNO)	250 FTE aan onderzoekers, technisch personeel en ondersteuning
QT/e (Universiteit Eindhoven)	~40 onderzoekers
QUANT (Twente University)	~22 onderzoekers
Quantum Matter & Quantum Information (Universiteit van Amsterdam)	~18 PI's
Quantum Devices Team (Rijksuniversiteit Groningen)	1 PI, 4 PhD-studenten
Instituut-Lorentz (Universiteit Leiden)	7 onderzoekers
Applied Quantum Algorithms (Universiteit Leiden)	7 onderzoekers, 3 postdocs, 8 PhD-studenten

Er vindt in Nederland nog weinig R&D plaats op het gebied van quantum bij private partijen. Als dit plaatsvindt is dit vrijwel altijd in samenwerking met publieke instellingen. Zo werken onder andere ABN-AMRO en Bosch samen met QuSoft en hebben Shell en de Universiteit Leiden een gezamenlijk project opgezet dat zich richt op het oplossen van vraagstukken uit de quantum chemie en fotosynthese. Daarnaast investering Microsoft en Intel in 2020 significant in de ontwikkeling van quantum technologie.

De geringe omvang van private R&D in Nederland is ook te zien in het aantal patentaanvragen in Nederland en Europa. Waar in China en de VS een groot aantal actieve quantum patenten zijn aangevraagd (respectievelijk 1.192 en 680 stuks), zijn er bij het European Patent Office (EPO) slechts 115 patenten aangevraagd. Hierbij is echter niet te herleiden hoeveel van deze



patenten toe te schrijven is aan Nederland en in hoeverre internationale organisaties die onderzoek doen binnen Europa patenten aanvragen in bijvoorbeeld de VS.

Financiering

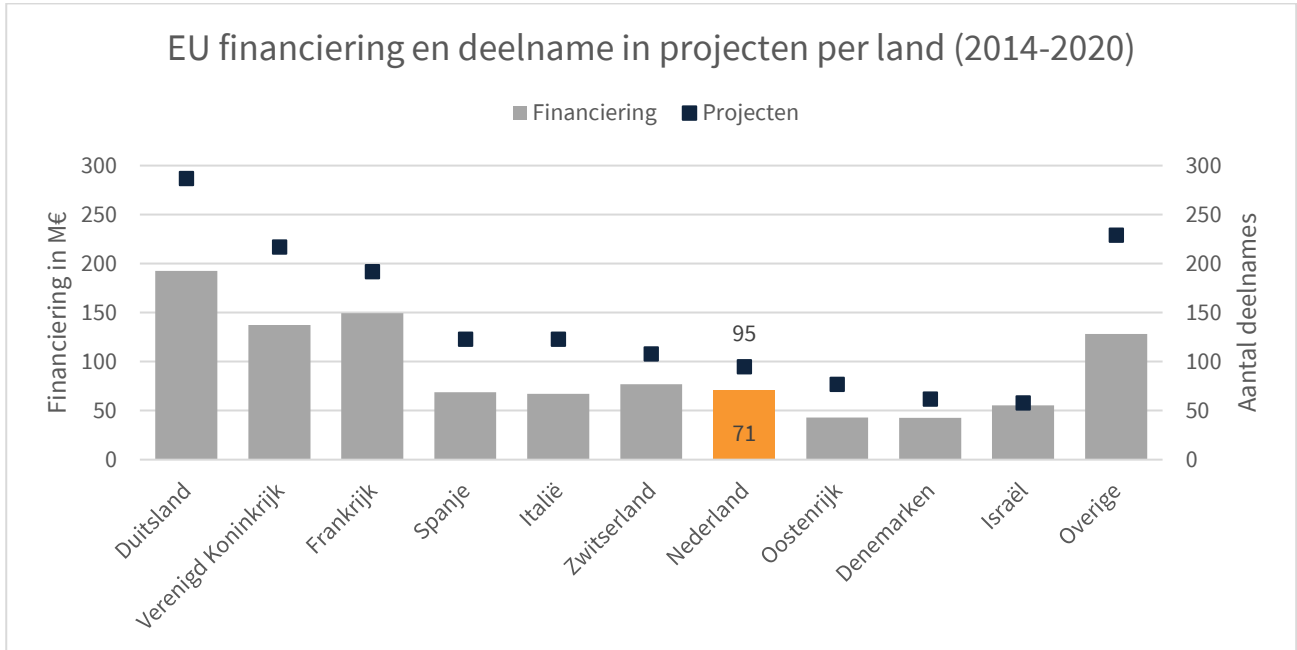
Nederland is bedreven in het binnenhalen van onderzoeksgeld uit internationale bronnen, waardoor de massa van het onderzoek ecosysteem groter wordt, gesteund door een aantal nationale regelingen. Er zijn nog vrijwel geen private investeringen in startups en scaleups.

Er zijn wel veel publieke investeringen die mogelijk kunnen leiden tot startups en scaleups. Zo heeft NWO in 2019 binnen de route quantum/nano-revolutie van de NWA op het gebied van quantum microscopie €1,3 miljoen toegekend aan een consortium onder leiding van de TU Delft.¹⁸ Ook in 2017 is er binnen het Zwaartekrachtprogramma bijna €20 miljoen toegekend aan het Quantum Software Consortium.

Binnen de brede Nationale Agenda Quantumtechnologie zijn vier actielijnen gedefinieerd die betrekking hebben op het brede ecosysteem: onderzoek en innovatie, Ecosysteemontwikkeling, human capital en het starten van een maatschappelijke dialoog rondom quantum. De totale omvang van deze programma's in circa €102 miljoen per jaar, welke grotendeels reeds is opgebracht door de aangehaakte partijen. Het kabinet investeert de komende vijf jaar €23,5 miljoen in quantum technologie en zorgt daarmee voor het startschot voor de uitvoering van de agenda. In zijn geheel zijn publieke investeringen naar rato vergelijkbaar met de investeringen die gedaan zijn in landen zoals het VK en Canada.

Nederland presteert goed in het ophalen van Europese financiering voor quantum onderzoek. Met bijna honderd deelnames in internationale quantum onderzoeksprojecten en een significant budget staat Nederland in de top 10 van Europese onderzoekslanden. Gecorrigeerd voor aantal inwoners staat Nederland 5^e, met een goede verhouding van massa en concentratie van financiering (Figuur 8).

¹⁸ Kamerbrief Nationale Agenda Quantum Technologie, 17 feb. 2020



Figuur 8: EU financiering en deelname in projecten per land, landen met meer dan 50 deelnames (bron: CORDIS, bewerking: Birch)

Private investeringen blijven achter bij de publieke investeringen. QuTech heeft in 2018 een omzet van 15 M€ via contractonderzoek¹⁹, maar op andere vlakken gebeurt minder dan in andere landen. Ondanks dat grote corporates als Microsoft en Intel investeren in R&D bij QuTech zijn er weinig andere spelers die praktijkonderzoek of startups financieren. Er is nog vrijwel geen durfkapitaal in Nederland geland bij nieuwe bedrijven.²⁰ In vergelijking met landen zoals de VS, het VK en Canada is de aanwezigheid van durfkapitaal in Nederland vrijwel non-existent. Binnen Europa loopt Nederland, gezien de onderzoeksinzet en beleidsfocus op het gebied van quantum, achter op landen zoals Duitsland, Zwitserland en Duitsland betreft private investeringen. Daarnaast stellen stakeholders in het ecosysteem dat er momenteel relatief veel wordt geïnvesteerd in fundamenteel onderzoek, terwijl de vraag naar investeringen in meer toegepast onderzoek en valorisatie van onderzoek toeneemt.

Talent

Nederland heeft een grote concentratie quantum onderzoekers, maar moet zich blijven richten op de ontwikkeling en retentie van talent om een kritische massa te bereiken. Relatief veel studenten die nu opgeleid krijgen te maken met iets van quantum technologie in hun studie en deze kennis kunnen gebruiken bij onderzoeksinstituten en bedrijven.

¹⁹ QANU (2019), Research Review QuTech.

²⁰ McKinsey (2020), Economic impact of Quantum in The Netherlands.



Het opleiden, aantrekken en behouden van talentvolle onderzoekers op het gebied van quantum is cruciaal voor de omvang en kwaliteit van quantum onderzoek. Nederland heeft, ondanks zijn beperkte omvangen, een relatief groot aantal quantum onderzoekers. Zo zijn er binnen de TU Delft alleen al 64 onderzoekers op het gebied van quantum technologie die gepubliceerd hebben als eerste auteur. Enkel de University of Science en Technology China kent meer eerste auteurs. Ook op universiteiten als MIT, Harvard en UC Berkeley kennen ze minder quantum onderzoekers. Dit bevestigt het beeld van de sterke positie van Nederland en in het bijzonder de TU Delft in het wereldwijde quantum-landschap. Door stakeholders wordt echter gesteld dat er een relatief snelle doorloop is van het aanwezige onderzoekstalent: voor veel onderzoekers is het gebruikelijk om na een aantal jaar zich te verbinden aan een andere (buitenlandse) onderzoeksinstelling. Hierdoor blijft het van belang om te investeren in het aantrekken en behouden van voldoende talent.

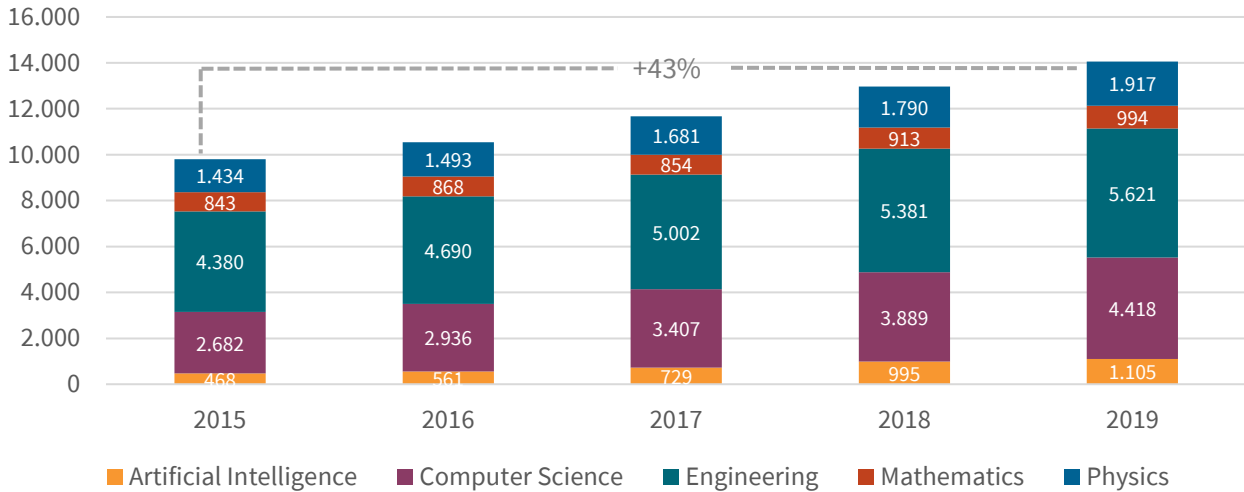
Nederland heeft een relatief sterke positie betreft het opleiden van talent met kennis die relevant is voor quantum technologie. Jaarlijks studeren er meer dan 4.500 personen af in een afstudeerrichting gelieerd aan quantum technologie. Wanneer dit afgezet wordt tegen het aantal inwoners in Nederland en vergeleken wordt met andere landen neemt Nederland de 7^e plek wereldwijd in. In onder andere Denemarken, Frankrijk, het VK en Duitsland kennen ze meer quantum-afstudeerders per hoofd van de bevolking.²¹

Nederland kent een steeds groter wordende groep van studenten met een voor quantum technologie relevante opleidingsachtergrond. Waar er in 2015 ongeveer 9.800 masterstudenten waren binnen een relevante opleiding is dit in 2019 toegenomen naar meer dan 14.000 (43%). Het grootste deel van deze studenten volgt een opleiding binnen de domeinen Engineering (bijv. Mechanical Engineering en Aerospace Engineering) en Computer Science (bijv. Data Science en Informatica). Masteropleidingen die zich direct focussen op quantum technologie zijn er niet in Nederland. Echter zijn er wel verschillende opleidingen die verschillende tracks en specialisaties aanbieden op dit terrein. Voorbeeld hiervan is de track *physics for Quantum Devices and Quantum computing* binnen de master toegepaste natuurkunde aan de TU Delft. Studenten die deelnemen aan deze track kunnen hun thesis onderzoek uitvoeren binnen QuTech. Daarnaast biedt QuTech binnen de QuTech Academy ook vakken aan die studenten binnen masterprogramma's zoals toegepaste natuurkunde, wiskunde of computer science kunnen volgen om zich te verdiepen in quantum technologie. QuSoft biedt binnen verschillende masterprogramma's aan de UvA ook reeks vakken aan op het gebied van quantum technologie.

²¹ McKinsey (2020), *Economic impact of Quantum in The Netherlands*.

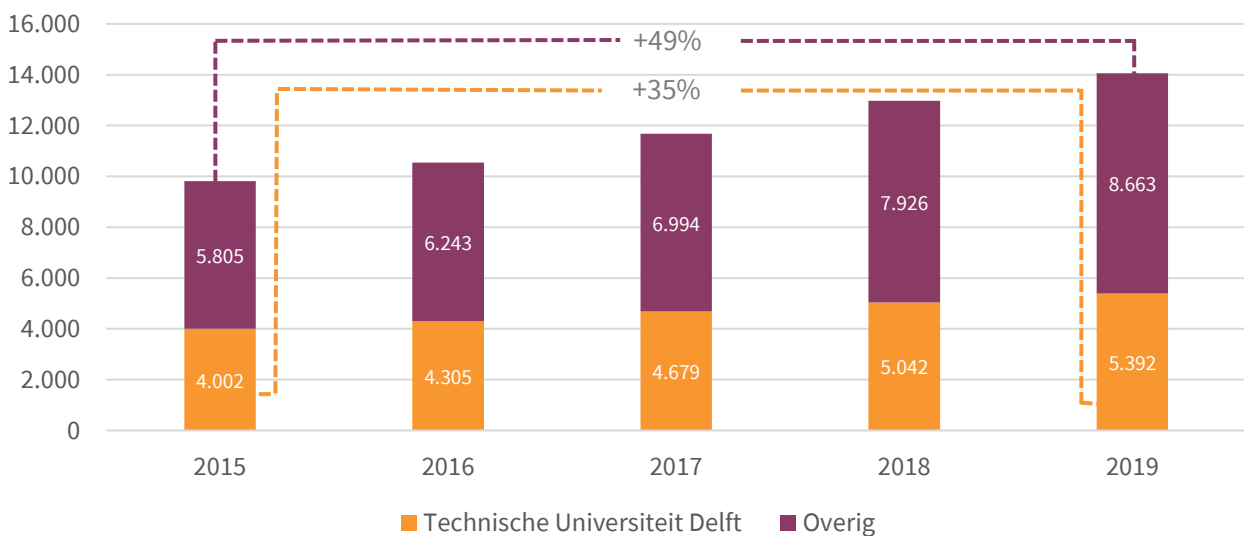


Aantal masterstudenten met relevante onderwijsachtergrond in Nederland
2015 - 2019



Ongeveer 40% van de studenten in binnen de relevante masteropleidingen volgt deze aan de TU Delft en hiermee is de TU Delft de belangrijkste leverancier van talent voor het quantum ecosysteem. Het aantal 'quantum studenten' is afgelopen vier jaar toegenomen van 4000 naar 5400 studenten (+35%). Bij de overige instellingen is dit aantal iets meer toegenomen: van 5800 naar 8700 (49%). Hierbij kennen de TU/e, UT, UvA en UU elk tussen de 1.000 en 1.500 masterstudenten binnen relevante opleidingen. Voor alle overige instellingen gaat het om aantallen rond de 500 studenten.

Aantal masterstudenten met relevante onderwijsachtergrond 2015 - 2019





Diensten

Diensten voor quantum ondernemerschap staan nog in de kinderschoenen, er wordt voornamelijk gebruik gemaakt van generieke instrumenten om ondernemers te ondersteunen. Voor quantum onderzoek worden de eerste initiatieven opgezet om onderzoekers de mogelijkheid te geven om, zo laagdrempelig mogelijk, met de technologie te experimenteren.

Om onderzoek te laten slagen is het voor onderzoekers van belang dat er voldoende mogelijkheid is om te kunnen experimenteren met nieuwe technologieën, advies in te winnen of informatie uit te kunnen wisselen met andere onderzoekers en private partijen. Aangezien onderzoek naar quantum technologie zich in relatief vroeg stadium bevindt is veel onderzoek nog fundamenteel van aard. Hierdoor zijn deze 'diensten' nog minder ver ontwikkeld. Wel worden binnen het Nederlandse ecosysteem hier de eerste aanzetten voor gedaan. Bijvoorbeeld met de ontwikkeling van *Quantum Inspire* door Qutech, wat ontwikkelaars in staat stelt om hun eigen quantum algoritmes testen binnen een gesimuleerde omgeving. Dit maakt ontwikkelaars bekend met de technologie en aan haar mogelijkheden, zodat de technologie snel geïntroduceerd kan worden wanneer deze breder beschikbaar is. Hiermee stimuleert dit platform open innovatie.

Om onderzoek gemakkelijker te valoriseren zijn faciliteiten nodig waar in samenwerking met private partijen gewerkt kan worden aan applicatiegerichte activiteiten. Daarnaast dienen opzette startups voldoende te worden geadviseerd en te worden verbonden met de juiste partijen om goed tot wasdom te laten komen. Nederland kent een sterk incubator landschap met onder andere de aanwezigheid van toonaangevende incubators zoals Yes!Delft en UtrechtInc. Yes!Delft heeft onder andere de quantum startups Single Quantum, QBlox en Delft Circuits geholpen in hun ontwikkeling. Er zijn in Nederland nog geen specialistische incubatorfaciliteiten die quantum als focus hebben (zoals bijvoorbeeld bij de University of Waterloo en de University of Toronto). Wel wordt er op regionaal niveau gewerkt aan het opzetten van verschillende fieldlabs en hubs om verschillende partijen samen te brengen en te laten aan werken doelgerichte quantum oplossingen voor verschillende sectoren.

Instituties

De rol van een goed functionerende overheid in het stimuleren van de ontwikkeling van een technologie zoals quantum is cruciaal. Gezien de complexiteit van het kunnen innoveren en toepasbaar maken van quantum technologie, en de bijhorende tijdshorizon, dienen er vanuit de (nationale) overheid genoeg (beleids)aandacht en middelen uit te gaan naar het stimuleren



hiervan. Binnen Nederland is er sterke beleidsaandacht voor quantum technologie, echter lijkt er op het gebied van IP-rechten nog terrein te winnen.

Nederland kent een hoge mate van beleidsaandacht en institutionele inbedding van (organisaties die zich bezighouden met) quantum technologie. Recent is quantum bestempeld als sleuteltechnologie in het missie gedreven innovatiebeleid. Hiermee onderstreept het Rijk de economische kansen en de oplossingen voor maatschappelijke uitdagingen die de technologie kan bieden. Deze aandacht is niet nieuw: de Nederlandse overheid was internationaal gezien een van de *first movers* in het stimuleren van quantum onderzoek. Exemplarisch hiervoor is de oprichting van publiek-private samenwerking QuTech in 2014 en de erkenning van dit instituut als 'Nationaal Icoon'.

Voor (quantum) startups is unieke technologie vaak het enige waardevolle bezit. Voor onderzoekers is het daarom essentieel dat wanneer deze een startup willen beginnen, het gebruik van deze technologie beschermd is en vastgelegd in een octrooi. Het beschermen van kennis is wettelijk vastgelegd op Europees niveau, maar er wordt gesteld dat Europa hiermee achter loopt op bijvoorbeeld de VS en China.²² Binnen de Nationale Quantum Agenda wordt het belang van bescherming van intellectueel eigendom onderstreept en behoort het opstellen van verschillende IP-raamwerken tot een van de actielijnen.

Cultuur

De onderzoeks- en ondernemerscultuur binnen het quantum ecosysteem laat zich van alle elementen het moeilijkst vatten in cijfers. Er kan binnen het ecosysteem nog niet gesproken worden over een ondernemerscultuur. De activiteit concentreert zich nog vrijwel exclusief in de wetenschappelijke wereld en slechts weinig wetenschappers hebben de overstap gemaakt naar het opzetten van een onderneming. Daarmee loopt Nederland achter op landen als de VS en het VK, waar meerdere wetenschappers de eerste quantum startups hebben opgezet. Er lijkt binnen de quantum onderzoekswereld een cultuur te heersen die de ontwikkeling van het ecosysteem niet direct bevordert. Zo wordt er gesproken over een tekort aan diversiteit, voornamelijk in de verdeling tussen mannen en vrouwen, en een neiging tot competitie die niet altijd positief is als er meer samenwerking die nodig is voor de ontwikkeling van en toepassing van kennis.

²² Technisch Weekblad (2020). Lange Race naar quantum patenten.



Infrastructuur

De ontwikkeling van quantum technologie kent een specifieke benodigde infrastructuur, waarin onder zeer gecontroleerde omgevingsfactoren gewerkt dient te worden. De aanwezigheid van cleanrooms en andersoortige onderzoeks- en ontwikkelingsinfrastructuur is geeft daarom inzicht in dit element betreft onderzoek. Voor ondernemerschap is een goede (digitale) infrastructuur nodig om efficiënt informatie uit te wisselen en dienen partijen in de waardeketen goed (fysiek) bereikbaar te zijn. Nederland heeft relatief veel onderzoekscentra en labs, maar de kwaliteit van deze faciliteiten in vergelijking met andere ecosystemen is nog niet gestructureerd in beeld gebracht.

Nederland en in het bijzonder Delft heeft een grootschalige onderzoeksinfrastructuur om quantum technologie verder te ontwikkelen. De TU Delft heeft een aantal cleanrooms en laboratoria die gebruikt worden in quantum onderzoek. Het nationale programma NanoLabNL biedt op verschillende locaties infrastructuur voor onderzoek, zie Tabel 4. Ondernemers die bezig zijn met quantum technologie maken nu vooral gebruik van deze bestaande wetenschappelijke infrastructuur, die vaak ook verhuurd wordt aan derde partijen. Deze ondernemers hebben nog geen eigen laboratoria en ontwikkelingsruimten opgezet, hierdoor valt er niet direct te spreken van opzichzelfstaande infrastructuur voor het quantum ondernemerschap.

Tabel 4: Overzicht onderzoeksfaciliteiten geschikt voor quantum onderzoek (bron: NWO)

Naam	Grootte	Onderzoek
TU Delft QuTech Lab	1.800 m ² labruimte met o.a. Helium condensor en 10+ vriezers & Helium-4 cryostatens.	Nieuwe nanostructuren; quantum dots
TNO VLL - Van Leeuwenhoek Laboratorium (NanoLabNL - Delft)	3.000 m ² modulair cleanroom (ISO 5 of hoger) met trillingvrije en straling werende ruimtes.	Nanofabricatie voor onderdelen van quantum computers; optica nanomaterialen; sensoren
Kavli NanoLab (NanoLabNL - Delft)	Maakt gebruik van de VLL laboratoria.	Quantum apparaten, bionano imaging
Else Kool Laboratory (NanoLabNL - Delft)	1.500 m ² cleanroom.	Nanotechnologie en sensoren; quantum apparaten op basis van siliconen
Zernike NanoLab (NanoLabNL - Groningen)	Cleanroom met cryogene en laser opstellingen	Quantum elektronica materialen; nanofabricatie
MESA+ (NanoLabNL - Twente)	Cleanroom	Nanofabricatie; optica
NanoLab@TU/e (Technische Universiteit Eindhoven)	Cleanroom	Nano-engineering van materialen en apparaten, Photonic Integrated Circuits.
AMOLF NanoLab Amsterdam	Cleanroom	Fabricatie van nanofotonische materialen en apparaten. Geavanceerde microscopie/spectroscopie.



Vraag

Werkbare toepassingen van quantum technologie die vermarkt kunnen worden staan nog in de kinderschoenen. Van belang voor het ecosysteem is de aanwezigheid van potentiële afnemers, uitzicht op use-cases en positieve prognoses van de ontwikkeling van de markt van quantum technologie. Dit zal zorgen voor meer 'market-pull', wat op zijn beurt weer zorgt voor meer investeringen in de ontwikkeling van de technologie en meer interesse van private partijen in het deelnemen in onderzoeksprojecten. Nederland loopt wat dit betreft achter ten aanzien van onder andere de VS en Canada, maar lijkt wel goed opgelijnd voor het innemen van een belangrijke positie in de waardeketen van voornamelijk quantum computing.

Er wordt verwacht dat significante commerciële waarde voor quantum niet binnen tien jaar gegenereerd gaat worden.²³ Daarbij wordt verwacht dat met name de waarde van quantum computing nog lang zal duren. Op de kortere termijn komen wel meer applicaties voor quantum sensing en quantum communications beschikbaar. Wel wordt gesteld dat Nederland een goede positie heeft in de waardeketens voor toepassingen van quantum technologie in onder andere de financiële sector (e.g. Quantum Key Distribution voor beveiliging), de farmaceutische industrie (e.g. Quantum simulatie/annealment) en telecom (e.g. toepassingen van quantum internet). Echter, wanneer dit vergeleken wordt met de andere internationale ecosystemen waar directe afnemers in de vorm van grote technologiebedrijven sterker in het ecosysteem zitten ingebed (zoals in de VS en Canada) is Nederland niet toonaangevend op dit element. Hierbij mist Nederland een 'Quantum Champion'.

²³ McKinsey (2020). Economic impact of Quantum in The Netherlands



5. Conclusies

In de laatste decennia is het onderzoek naar quantum technologie in een stroomversnelling geraakt, mede door enorme investeringen van overheden en grote technologiebedrijven. De laatste jaren zien we ook de opkomst van de eerste generatie startups. Quantum onderzoek begint haar vruchten af te werpen in bruikbare technologieën en we zien ook nieuwe bedrijfstakken ontstaan en bestaande bedrijfstakken vernieuwd worden. Op verschillende plekken in de wereld beginnen de contouren zichtbaar te worden van ecosystemen die zich richten op quantum technologieën. Wat is en kan de rol zijn van Nederland in deze emergent quantum industries?

Afgaande op de ecosystemeanalyse kunnen de volgende sterke aspecten van het ecosysteem worden aangeduid:

- Zowel qua omvang en kwaliteit van de wetenschappelijke kennisontwikkeling behoort Nederland met instituten als de TU Delft tot de belangrijkste producenten van kennis op het gebied van quantum technologie in de wereld.
- Nederland is goed ingebed in internationale kennisnetwerken. Met name de TU Delft neemt een zeer centrale rol in binnen deze kennisnetwerken en er vinden relatief veel samenwerkingen plaats met andere (buitenlandse) onderzoeksinstituten en private partijen.
- Nederland is uniek in de manier waarop deze kennispositie is ingezet om activiteiten op te zetten die de kennisontwikkeling verder versterken en het bredere ecosysteem ontwikkelen, met sterke samenwerking tussen overheden en publieke kennisinstellingen.
- Ondanks het fundamentele niveau waarop veel onderzoeksprojecten plaatsvinden lukt het Nederland om private partijen in toenemende mate hierop aan te laten haken.

Echter, om een leidende rol te spelen in emergent quantum industries zal er op grote schaal (vanuit de publieke en private sector) in kennis moeten blijven geïnvesteerd worden, zowel om aan de 'knowledge frontier' te blijven alsook om voldoende absorptiecapaciteit te hebben om quantum (gerelateerde) kennis van elders te blijven herkennen en gebruiken. Ook zal stap-voor-stap het ecosysteem ontwikkeld worden, zodat er meer startups en corporate betrokkenheid ontstaat, startups kunnen doorgroeien naar scale-ups, en succesvolle scale-ups een rolmodel voor een nieuwe generatie ondernemers kunnen worden, zelf investeerder kunnen worden in startups en kunnen bijdragen aan netwerkontwikkeling en publiek-privaat leiderschap in het Nederlandse quantum ecosysteem. Dit kan ingezet worden door:



-
- het verder ontwikkelen van ondersteunende diensten in de vorm van bijvoorbeeld incubators en experimenteerruimtes voor publieke en private partijen om (in samenwerking) te werken aan quantum toepassingen;
 - het stimuleren van de aanwezigheid van (toekomstige) vraag naar quantum technologie;
 - het faciliteren van een community van investeerders die bereid is nieuwe ontwikkelingen financieel te ondersteunen;
 - Het behouden en ontwikkelen van talent. Er zal blijven moeten worden ingezet om het menselijk kapitaal in de vorm van onderzoekers en studenten te behouden en inzetbaar te maken om te werken met quantum technologie.



Bijlage 1: Het Nederlandse Ecosysteem voor ondernemerschap

Om het quantum ecosysteem in Nederland in beeld gebracht kan worden dient men eerst te kijken naar het generieke ecosysteem voor ondernemerschap in Nederland. Dit dient als indicatie van de basis waarop innovatief ondernemerschap in brede zin in Nederland tot stand kan komen. Hoe sterker deze basis, hoe beter Nederland in staat is om innovaties rondom een technologiegebied zoals quantum mogelijk te maken. Nederland heeft op nationaal niveau een sterk generiek ecosysteem voor ondernemerschap. Sommige regio's binnen Nederland behoren zelfs tot de best presterende regio's in Europa.²⁴ Binnen het Nederlandse ecosysteem spelen technologische innovaties en het oplossen van maatschappelijke uitdagingen daarnaast een belangrijke rol.

Het in kaart brengen van het ecosysteem gebeurt via de tien hieronder beschreven elementen. Voor elk element zijn er verschillende methoden om deze kwantitatief of kwalitatief in beeld te brengen, afhankelijk van de regionale afbakening en beschikbare databronnen.^{25,26} Voor elk van de elementen is hieronder een kwantificering gegeven gebaseerd op verschillende reeds bestaande indexen. Hiermee kan een beeld worden geschetst van de kwaliteit van het ecosysteem voor ondernemerschap in Nederland. Daarnaast is kort beschreven waarom deze elementen van belang zijn voor het ecosysteem. Voor de kwantificering zijn databronnen gebruikt die vergelijking met andere internationale (niet-Europese) ecosystemen voor ondernemerschap mogelijk maakt. Deze inzichten voor het brede ecosysteem voor ondernemerschap dienen als startpunt voor de analyse van het quantum ecosysteem. In sommige gevallen is er bij het toespitsen van een ecosysteem analyse op een technologie- of onderzoeksgebied een verschil waarop bepaalde elementen in kaart worden gebracht. Wanneer dit het geval is wordt dit beschreven bij de analyse van het desbetreffende element.

²⁴ European Commission (2020). The EU Regional Competitiveness Index 2019.

²⁵ Leendertse, J., Schrijvers, M. T., & Stam, F. C. (2020). Measure twice, cut once: entrepreneurial ecosystem metrics. USE Working Paper series, 20(01).

²⁶ Cloosterman, Stam & Van der Starre (2018), De Kwaliteit van Ecosystemen voor Ondernemerschap in Nederlandse regio's. Utrecht School of Economics, Utrecht Centre for Entrepreneurship & Birch.



Tabel 5: Overzicht Nederlands Ecosysteem voor ondernemerschap. Data gebaseerd op Global Entrepreneurship Monitor (GEM) en de WEF Global Competitiveness Index (GCI)

Variabele	Beschrijving
Leiderschap	Het nationale missie gedreven topsectoren en innovatiebeleid zorgt met concrete doelen en door middel van ontwikkeling door sleuteltechnologieën een bijdrage aan maatschappelijke uitdagingen en het toekomstig verdienvermogen van Nederland.
Netwerken	Nederlandse kennisinstellingen hebben een sterke historie van samenwerking met het bedrijfsleven. 5,43/10 voor R&D Transfer (+1½ boven GEM gemiddelde).
Nieuwe kennis	R&D uitgaven zijn 2% van BBP en Nederland is 13^{de} in de R&D groep van de GCI.
Financiering	6,25/10 voor financiering nieuwe ondernemingen (+1¾ boven GEM gemiddelde).
Talent	Gemiddeld per persoon 12,2 jaar scholing, Nederland is 4^{de} in de Skills pilaar van de GCI.
Diensten	6,34/10 voor <i>commercial & legal</i> infrastructuur (+1¼ boven GEM gemiddelde).
Instituties	Nederland is 4^{de} in de instituties pilaar van de GCI.
Cultuur	6,54/10 voor ondernemende cultuur (+1½ boven GEM gemiddelde).
Infrastructuur	7,94/10 voor fysieke infrastructuur (+1½ boven GEM gemiddelde) en 2^{de} in de infrastructuur pilaar van de GCI (fysieke en digitale infrastructuur).
Vraag	\$ 56.490 BBP per capita (Wereldbank) en overall 4^{de} plaats in de GCI.

Binnen ecosystemen voor ondernemerschap wordt **leiderschap** gezien als noodzakelijk om de verschillende actoren binnen het ecosysteem richting te geven en daarmee het ecosysteem efficiënter te laten functioneren. Dit leiderschap kan voortkomen uit de aanwezigheid van een grote corporate, richtinggevende publieke instelling of een samenwerkingsverband dat zich gezamenlijk inzet voor het ecosysteem. Leiderschap is binnen deze benadering een relatief ontastbaar concept en is daarom in veel gevallen moeilijk te kwantificeren. In (regionale) ecosysteemanalyses worden samenwerkingen en/of penvoerderschap binnen innovatieprojecten geanalyseerd om dit element in beeld te brengen.

Netwerken staan centraal in een goed functionerend ecosysteem. Wanneer actoren in een ecosysteem goed met elkaar in verbinding staan zorgt dit voor een effectieve uitwisseling van kennis, talent en informatie. De verbinding tussen actoren in een ecosysteem kan gemeten worden door te kijken naar de mate van samenwerking in (innovatie)projecten. Dit biedt inzicht in sterkte van een netwerk en in de structuur.

Het ontwikkelen van **kennis** door publieke of private instellingen zorgt voor nieuwe kansen betreft innovatie en productontwikkeling en is daarom een belangrijke bron voor ondernemerschap. Kennis kan ontwikkeld worden binnen (publiek gefinancierd)



fundamenteel onderzoek, toegepast onderzoek en/of R&D binnen de private sector. Binnen ecosysteemanalyses voor ondernemerschap wordt vaak gekeken naar de uitgaven in R&D van zowel publieke als private partijen.

Nieuwe bedrijvigheid en kennisontwikkeling kan alleen worden opgezet wanneer er voldoende kapitaal beschikbaar is om dit te financieren. De beschikbaarheid van **financiering** speelt daarom een belangrijke rol binnen een ecosysteem. Hierbij wordt er gekeken naar de beschikbaarheid van venture capital binnen een ecosysteem in totale investeringen en de hoeveelheid *investment rounds*.

Talent bestaat uit de skills, kennis en ervaring die personen hebben en is daarmee een belangrijke input en resultaat van onderzoek en innovatie. Een goed werkend ecosysteem heeft baat bij goed opgeleide individuen met voldoende vakspecifieke kennis die de mogelijkheid hebben om nieuwe vaardigheden te leren en om deze kennis om te zetten in innovatief gedrag. Daarom wordt er zowel gekeken naar de omvang en ontwikkeling van gediplomeerden met vakspecifieke kennis en de mogelijkheid van professionals om nieuwe kennis en vaardigheden te ontwikkelen.

Voldoende aanwezigheid van **diensten** in de vorm van advies, ondersteuning en valorisatiefaciliteiten helpen in het wegnemen van belemmeringen in het opzetten van nieuwe ondernemingen en het versnellen van de introductie van nieuwe innovaties. Hieronder vallen onder andere de aanwezigheid van incubators, vakspecifieke (consulting) services en de mogelijkheid voor onderzoekers en ontwikkelaars om te experimenteren met bepaalde technologieën. In ecosysteemanalyses voor ondernemerschap wordt de mate van aanwezigheid van een gespecialiseerde dienstensector en de aanwezigheid en kwaliteit van incubators en accelerators gebruikt om dit element in kaart te brengen.

Goed functionerende **instituties** zijn essentieel voor de ontwikkeling van ondernemerschap. Hierbij gaat het onder andere om de aanwezigheid en kwaliteit van verschillend eigendomsrechten en in hoeverre de overheid de mogelijkheid heeft om ondernemerschap te ondersteunen en te stimuleren. Een overheid kan dit alleen effectief doen wanneer men deze vertrouwt en verantwoordelijk kan houden voor haar acties.

Een goede **infrastructuur** is essentieel voor de interactie tussen actoren in het ecosysteem en daarom voor ondernemerschap. Hierbij gaat het in het brede ecosysteem voor ondernemerschap niet alleen om fysieke infrastructuur zoals snelweg- en treinverbindingen, maar ook om een goed werkende digitale infrastructuur om effectief informatie uit te kunnen



wisselen. Bij ecosystemen omtrent technologiegebieden gaat het bij infrastructuur meer om de aanwezigheid van benodigde faciliteiten om de technologie te ontwikkelen of werkend te houden.

Challengers zoals innovatieve mkb'ers, startups en scale-ups zorgen voor dynamiek in een ecosysteem en daarmee meer kans op nieuwe bedrijvigheid en innovaties. Om deze te laten ontstaan is een bepaalde **cultuur** van ondernemerschap binnen het ecosysteem noodzakelijk. Dit element geeft weer of ondernemerschap binnen de samenleving/ecosysteem wordt gewaardeerd en gestimuleerd. Deze context kan effect hebben op de aspiraties van potentiële ondernemers en of personen de wens hebben om zelf te ondernemen.

De **vraag** en koopkracht van potentiële afnemers is van belang voor ondernemers, aangezien het tot op zekere hoogte alleen rendabel is om nieuwe producten of diensten in de markt te zetten als er voldoende vraag naar is. Marktgroei en -ontwikkeling wordt daarom gezien als goede indicator voor de mate waarin nieuwe bedrijvigheid wordt opgestart.

Op basis van deze initiële vergelijking bestuderen we drie leidende quantum startup ecosystemen buiten Nederland: Waterloo-Toronto, San Francisco Bay Area, en Oxfordshire. Daarnaast beschrijven we de ontwikkeling in twee kansrijke embryonale ecosystemen in Europa. Namelijk de ecosystemen rondom Munchen en Zurich. Als basis voor de vergelijking kijken we ook naar het generieke ecosysteem voor ondernemerschap van deze regio's zoals gedaan in Tabel 5 in het geval van Nederland. Resultaten hiervan zijn te zien in Tabel 6.



Tabel 6: Vergelijking van internationale ecosystemen voor ondernemerschap. Data gebaseerd op Global Entrepreneurship Monitor (GEM) en de WEF Global Competitiveness Index (GCI)

Variabele	Beschrijving	Nederland	Canada	VK	VS
Leiderschap	-	-	-	-	-
Netwerken	GEM-score voor R&D-transfer	5,43/10	4,23/10	3,77/10	4,48/10
Nieuwe kennis	R&D uitgaven van BBP	2%	1,5%	1,7%	2,7%
Financiering	GEM-score voor financiering nieuwe ondernemingen	6,25/10	5,27/10	5,33/10	6,04/10
Talent	Gemiddeld aantal jaar scholing per persoon	12,2	13,8	13,2	13,4
Diensten	GEM-Score voor <i>commercial & legal</i> infrastructuur	6,34/10	5,51/10	5,12/10	5,79/10
Instituties	Ranking GCI instituties pilaar	4/141	13/141	11/141	20/141
Cultuur	GEM-Score voor ondernemende cultuur	6,54/10	6,29/10	5,72/10	7,68/10
Infrastructuur	GEM-Score voor fysieke infrastructuur	7,94/10	7,03/10	6,54/10	7,50/10
Vraag	BBP per capita	\$56.490	\$49.690	\$45.740	\$62.870

Hieruit blijkt dat Nederland in vergelijking met de andere landen een sterk ecosysteem voor ondernemerschap heeft, en dus een solide basis heeft om de ontwikkeling van een technologie zoals quantum te ontwikkelen en om te zetten in productief en innovatief ondernemerschap. Op vijf van de elementen scoort Nederland hoger dan de landen waartegen gebenchmarkt wordt. Alleen de VS hebben hogere uitgaven in R&D en een hoger BBP per capita en scoren daarmee hoger op de elementen kennis en vraag. Daarnaast lijkt de ontwikkeling van talent in Nederland achter te lopen op de andere landen: gemiddeld gezien volgen inwoners hier minder jaren school per persoon.



Bijlage 2: overzicht corporate ecosystemen

Microsoft Quantum Network			
Solution Partners	Customers & affiliates	University research & curriculum partners	Quantum labs
1qbit Cambridge Quantum Computing Entropica Labs GTN Ltd Honeywell HQS Quantum Simulations IONQ Jij Multiverse Computing OTI Pacific Northwest National Laboratory ProteinQure QCWare Qu&Co Qubit Engineering QCI QULAB QunaSys Rahko Riverlane SolidStateAI Strange Works Xanadu Zapata	Case Western Reserve University DOW Dubai Electric and Water Authority NatWest Willis Towers Watson Ford	Purdue University TU Delft UC Santa Barbara University of Copenhagen Danish Technical University University of Sydney University of Washington Washington State University Brilliant TU Eindhoven Hogeschool van Amsterdam Catalan Institute of Nanoscience and Nanotechnology International Institute of Information Technology Hyderabad Indian Institute of Technology Roorkee University of KwaZulu-Natal UC Los Angeles Northwest Quantum Nexus Paul Scherrer Institut	West-Lafayette (Indiana, USA) Delft (Netherlands) Santa Barbara (California, USA) Copenhagen (Denmark) Lyngby (Denmark) Sydney (Australia) Redmond (Washington, USA) Espoo (Finland)

Amazon: Quantum Solutions Lab/Center for Quantum Computing/Braket		
Solution Partners	Customers & affiliates	University research & curriculum partners
1qbit Rahko Rigetti QCWare Qsimulate Xanadu Zapata	D-Wave IonQ Rigetti	CalTech



IBM Q Network		
Solution Partners	Members	IBM Quantum Hubs
Daimler ExxonMobil JPMorgan Chase Samsung Goldman Sachs Accenture JSR	Barclays Mitsubishi Chemical Florida State University MIT Cern Openlab University of Notre Dame Stony Brook University 1qbit Berkeley Lab Boxcat Cambridge Quantum Computing Entropica Labs Anthem be it Wells Fargo JoS Quantum Labber Quantum Delta Airlines Quemix Max Kelsen MDR MUFG Universidade do Minho Netramark ProteinQure Department of Physics and Astronomy - University of Georgia Multiverse Computing Agnostiq Université de Montpellier AiQ Tradeteq Quantum Machines Argonne National Laboratory QuantFi Universidad Autonoma de Madrid Rahko Zurich Instruments Quantum Benchmark Q-Ctrl QCWare Qu&Co SolidStateAI QunaSys Strange Works Zapata Mizuho GRID	Keio University Universitat der Bundeswehr Munchen CSIC Fraunhofer Oak Ridge National Laboratory University of Oxford International Iberian Nanotechnology Laboratory Los Alamos National Laboratory NC State University National Taiwan University

Honeywell Quantum Solutions		
Partners		Investments in
JPMorgan Chase Microsoft		CQC Zapata Computing,