

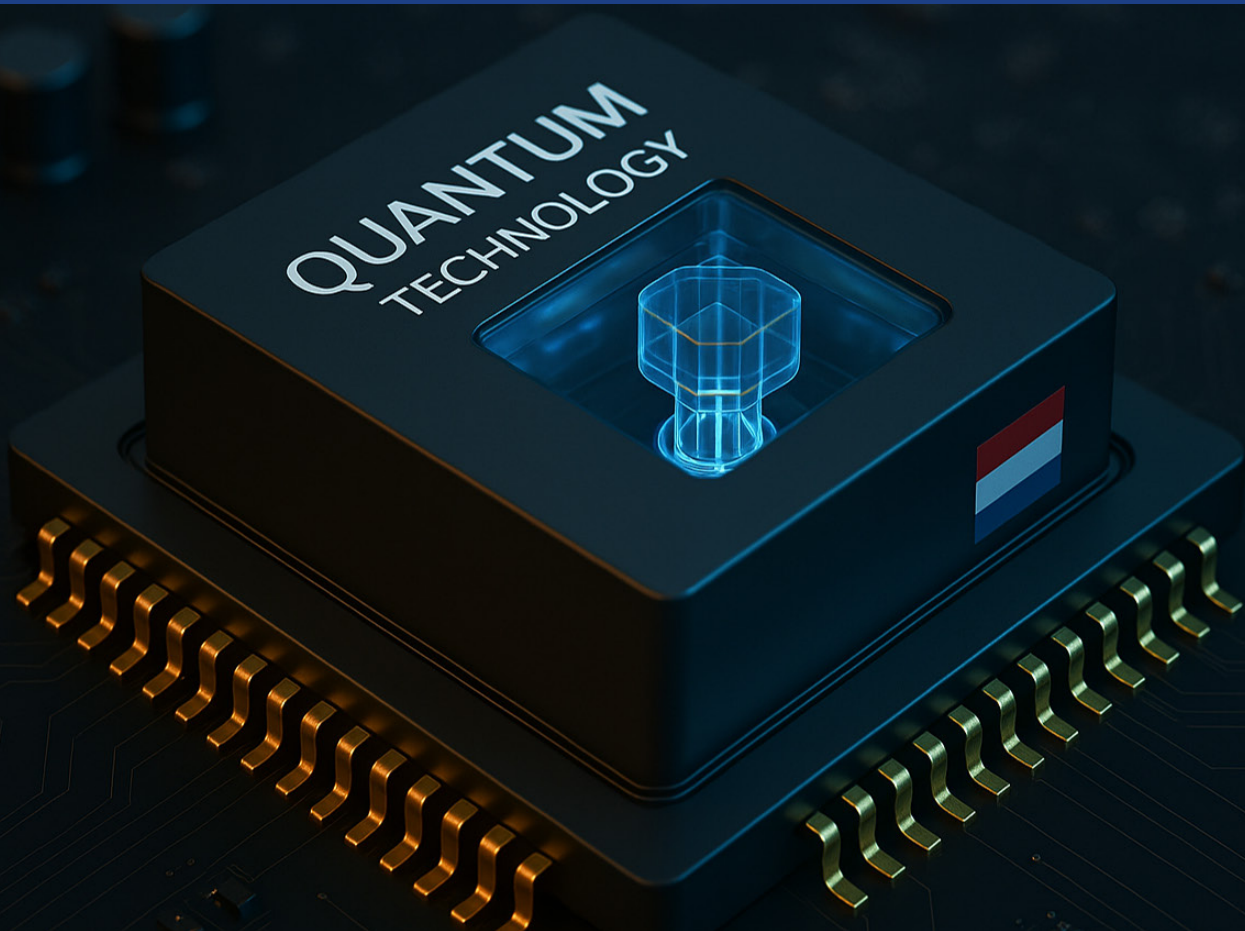


Actieagenda

Quantum Technologies

2026

Versie 1.0 | 26 januari 2026





Kennis- en Innovatie Agenda
Sleuteltechnologieën

Bezoekadres

Winthontlaan 2
3526 KV Utrecht
+31 (0)30 - 6001 328

Postadres

Postbus 3021
3502 GA Utrecht
The Netherlands

Actieagenda

Quantum Technologies

2026

Versie 1.0 | 26 januari 2026



Inhoudsopgave

Samenvatting	5
1. Inleiding	6
2. Analyse: de kansen van quantumtechnologie	8
2.1. Kracht van het Nederlandse quantumecosysteem	8
2.2. Kansen en uitdagingen	8
2.3. Internationale positionering	10
2.4. Conclusie: kansen voor de toekomst	11
3. Ambitie en opgaves	12
3.1. Ambitie van de NTS	12
3.2. Economische en maatschappelijke opgave	12
3.3. Innovatieopgave	14
3.4. Kennis- en technologieopgave	14
3.5. Ecosysteemopgave	15
3.6. Inhoudelijke focus en samenhang van het programma	16
4. Innovatieprogramma's	17
4.1. Innovatieprogramma 1: Een 'grand challenge' voor een geïntegreerde quantumcomputer	18
4.2. Innovatieprogramma 2: Het bouwen van quantumcommunicatienetwerken voor sociaaleconomische waarde	21
4.3. Innovatieprogramma 3: Quantsensoren ontwikkelen voor kritieke toepassingen	28
4.4. Innovatieprogramma 4: Industriële maakcompetenties, componenten en (sub)systemen voor quantumtechnologie	33
4.5. Innovatieprogramma 5: Fast track naar waardevolle toepassingen van quantumcomputing	38
4.6. Totale financieringsbehoefte	43
4.7. KPI's	44
4.8. Bestaande activiteiten om op voort te bouwen	45
5. Ecosysteemactiviteiten	47
6. Vervolgstappen en uitvoering	48



Samenvatting

Quantumtechnologie zal essentieel worden voor het toekomstige verdienvermogen en de nationale veiligheid van Nederland. Het Nederlandse quantumecosysteem is snel uitgegroeid tot een innovatiecentrum van wereldklasse, met toonaangevende onderzoeksinstellingen en een dynamische basis van innovatieve bedrijven. Toch versnelt de internationale race en moeten we onze innovatie-inspanningen opvoeren om ons concurrentievoordeel en strategische autonomie te behouden. Quantumtechnologie biedt het potentieel om biljoenen aan wereldwijde waarde te ontsluiten en we zijn goed gepositioneerd om een aanzienlijk marktaandeel te veroveren, mits we ons innovatieve en geïntegreerde ecosysteem kunnen behouden en versnellen.

Deze actieagenda, opgesteld door en voor de Nederlandse quantumindustrie, beschrijft een gedurfde reeks industriegerichte innovatieprogramma's voor de komende tien jaar. Door te focussen op het creëren van full-stack quantumcomputingsystemen, het bouwen van quantumcommunicatienetwerken, het ontwikkelen van quantumsensoren voor kritieke toepassingen, het benutten van onze hightech-maakindustrie en het ontwikkelen van software en algoritmen voor huidige en toekomstige toepassingen, werken we gezamenlijk aan een wereldwijd concurrerende quantumindustrie. In totaal vereist dit de mobilisatie van meer dan €2 miljard aan publieke en private financiering, wat het ambitieniveau van de doelstellingen die we willen bereiken benadrukt.

Door deze langetermijnvisie te combineren met coherente en effectieve beleidsinstrumenten en voortdurende investeringen in infrastructuur, talent en ecosysteemontwikkeling, zal onze sector in staat zijn control points te creëren in wereldwijde waardeketens van quantumtechnologie. Deze actieagenda moet snel worden omgezet in concrete acties als Nederland zijn wereldwijde leiderschapspositie op het gebied van quantumtechnologie wil behouden en uitbreiden. De komende tien jaar zullen beslissend zijn, en de innovatieprogramma's in dit document laten zien wat nodig is om voorop te blijven lopen in deze strategische technologie.

1. Inleiding

Quantumtechnologie zal een fundamentele bouwsteen worden van ons toekomstige verdienvermogen en onze nationale veiligheid. Door gebruik te maken van de unieke eigenschappen van de quantummechanica – de wetten die beschrijven hoe de natuur op haar meest fundamentele niveau werkt – ontstaan disruptieve technologieën voor computers, communicatie en sensoren. Nederland heeft een wetenschappelijke positie van wereldklasse op dit gebied en in de afgelopen jaren zijn tientallen Nederlandse bedrijven ontstaan en hebben ze een indrukwekkende groei doorgemaakt. Deze bedrijven verkopen momenteel producten en diensten die essentieel zijn in wereldwijde waardeketens en zijn daardoor uitstekend gepositioneerd om in het komende decennium control points te creëren.¹ Tegelijkertijd is er een groeiende internationale eindgebruikersmarkt voor quantumtechnologie die deze oplossingen zullen gebruiken om waarde te ontgrendelen, wat de groei van de wereldwijde quantumindustrie nog verder zal stimuleren.

Hoewel Nederland beschikt over sterke wetenschappelijke fundamenteën en toonaangevende bedrijven, is de internationale concurrentie groot en moeten nog belangrijke uitdagingen worden overwonnen om de kansen te verzilveren. Naast durfkapitaal, talent en infrastructuur zijn een aanzienlijk deel van deze uitdagingen gerelateerd aan innovatie, en specifiek met industrie-gerichte innovatie voor de Nederlandse quantumindustrie. Dit wordt ook benadrukt in de Kamerbrieven over industriebeleid en start-up- en scale-upbeleid die eind 2025 zijn gepubliceerd.^{2,3}

Deze actieagenda beschrijft wat nodig is op het gebied van R&D- en engineeringinspanningen voor de Nederlandse quantumindustrie om bestaande technologische knelpunten te overwinnen en schaalbare en concurrerende quantumtechnologie-componenten, -apparaten en -systemen te bouwen. In het bijzonder pakt het de belangrijkste uitdagingen aan op vijf complementaire focusgebieden die essentieel zullen zijn om economische waarde te ontsluiten in de komende tien jaar: quantumcomputing, quantumcommunicatie, quantumsensoren, het maken van quantumtechnologie en quantumsoftware.

Als deze actieagenda niet wordt uitgevoerd, loopt Nederland het risico zijn concurrentievoordeel op een strategisch technologisch gebied te verliezen. De toppositie die in het afgelopen decennium is opgebouwd, kan verzwakken, waardoor Nederlandse bedrijven kwetsbaar worden en geen control points meer kunnen verkrijgen in wereldwijde waardeketens. Dit zou zowel het economische potentieel als de nationale veiligheidsbelangen ondermijnen.

De komende vijf tot tien jaar zullen cruciaal zijn, vooral omdat de financiering van het Nationaal Groeifonds (NGF) voor Quantum Delta NL (QDNL) in 2028 zal stoppen. Hoewel de tijdlijn voor

1 [*Grip op control points om gericht te kunnen innoveren - TNO Vector*](#)

2 [*Kamerbrief over industriebeleid met focus | Kamerstuk | Rijksoverheid.nl*](#)

3 [*Kamerbrief over bouwen aan de tech kampioenen van morgen: Actieagenda startup en scaleupbeleid | Kamerstuk | Rijksoverheid.nl*](#)



brede adoptie van quantumtechnologie door eindgebruikers onzeker blijft, ontstaan nu al de eerste commerciële toepassingen. Om van dit venster te profiteren, moeten Nederland inzetten op industriegerichte innovatieprogramma's die technologische knelpunten aanpakken en Nederlandse bedrijven in staat stellen op te schalen, in lijn met de doelstellingen van de Nationale Technologiestrategie (NTS).

De rest van dit document is als volgt opgebouwd:

- Hoofdstuk 2 bevat een korte analyse van het Nederlandse quantumecosysteem en de kansen die quantumtechnologie voor Nederland kan bieden.
- Hierop voortbouwend beschrijft hoofdstuk 3 hoe de actieagenda vanuit verschillende perspectieven kan benutten en voortbouwen op deze basis.
- Hoofdstuk 4 bevat het kernonderdeel van de actieagenda: de vijf industriegerichte innovatieprogramma's.
- Vervolgens beschrijft hoofdstuk 5 de ecosysteemactiviteiten die nodig zijn om de ambities van de innovatieprogramma's te realiseren.
- Tot slot bevat hoofdstuk 6 de conclusies en vervolgacties.

2. Analyse: de kansen van quantumtechnologie

Door zijn compactheid, open economie en lange geschiedenis van quantumonderzoek is Nederland intern goed verbonden en zeer zichtbaar op het internationale speelveld. Dit geeft ons een uitstekende positie om te profiteren van de kansen die voor ons liggen, mits we erin slagen dit innovatieve en geïntegreerde ecosysteem in de toekomst te behouden.

2.1. Kracht van het Nederlandse quantumecosysteem

Nederland heeft zich in het afgelopen decennium gevestigd als een van Europa's toonaangevende centra voor quantuminnovatie, ondersteund door een sterke industriële basis en onderzoeksinstellingen van wereldklasse. De quantumindustrie in Nederland heeft mede daardoor de afgelopen jaren een uitzonderlijke groei doorgemaakt. De particuliere investeringen stegen van €10 miljoen in 2019 naar €106 miljoen in 2025,⁴ met momenteel bijna dertig start-ups die meer dan 700 hightech banen creëren. Bedrijven zoals QuantWare, Q*Bird, Qblox, QuiX Quantum, Fermioniq, Single Quantum, Orange Quantum Systems en Onnes Technology zijn enkele toonaangevende voorbeelden. Hun innovaties omvatten supergeleidende quantumprocessors, quantumnetwerkapparaten, modulaire control stacks, fotonische quantumcomputers, quantum-geïnspireerde algoritmen, single-photon detectors, geautomatiseerde chiptesten en cryogene nano-positioners. Deze bedrijven hebben aanzienlijke financieringsrondes aangetrokken en wereldprimeurs bereikt op het gebied van quantum computing, netwerken en sensoren, waarmee ze de reputatie van Nederland als quantumtechnologie-hub versterken.

Deze groei wordt ondersteund door aanzienlijke publieke investeringen van meer dan €600 miljoen vanuit het NGF, voornamelijk gericht op onderzoek in lage en midden TRL, ecosysteemontwikkeling en start-upondersteuning⁵. Via het QDNL-programma zijn er levendige quantuminnovatiecentra opgericht rond belangrijke kennisinstituten in Delft, Eindhoven, Leiden, Twente en Amsterdam. Deze hubs maken nauwe samenwerking mogelijk, richten zich op specifieke innovatiegebieden en stimuleren baanbrekend onderzoek in samenwerking met de industrie. Dit maakt effectieve valorisatie van fundamentele en toegepaste kennis in commerciële producten mogelijk. In combinatie met onze uitstekende kennis van software engineering en systeemintegratie geeft dit ons unieke mogelijkheden voor het bouwen van quantumcomputers, sensoren en netwerken. Daarnaast zijn er groeiende kansen voor de Nederlandse hightech-maakindustrie om innovaties op het gebied van quantumtechnologie mogelijk te maken, door onder andere gebruik te maken van onze kennisbasis op het gebied van optomechatronica, halfgeleiders, fotonica en cryogenica.

2.2. Kansen en uitdagingen

De kansen voor quantumtechnologie zijn enorm. Quantumcomputing, -communicatie en -sensing kunnen tegen 2035 tot 2 biljoen aan waarde ontsluiten in sectoren zoals de farmaceutische

⁴ [Quantum Delta NL Fase 3 Plan](#)

⁵ [Home | Quantum Delta NL](#)

industrie, materiaalkunde, energie, logistiek en financiën.⁶ Nederland, met zijn sterke basis in hightech-innovatie,⁷ is goed gepositioneerd om een aanzienlijk deel van dit marktpotentieel te benutten. De internationale concurrentie is echter hevig en de tijd om strategische acties te ondernemen is beperkt, waarbij vooral de komende jaren doorslaggevend kunnen zijn in een mogelijke fase van marktconsolidatie.⁸ Naast economisch potentieel heeft quantumtechnologie een directe link met nationale veiligheid vanwege haar militaire toepassingen. Dit wordt benadrukt door de opname van quantum als een van de vijf belangrijkste pijlers van de Nederlandse Defensie Strategie voor Industrie en Innovatie 2025-2029 (DSII).⁹ In combinatie met de bredere toename van de defensie-uitgaven in Europa,¹⁰ is er een enorme kans voor de Nederlandse industrie om gebruik te maken van het dual-use karakter van quantumtechnologie.

Toch blijven er uitdagingen bestaan om deze kansen te benutten. Het Nederlandse quantumecosysteem mist grote bedrijven die aanzienlijke R&D-budgetten investeren in quantumtechnologie. Ook zijn er momenteel te weinig bedrijven die aan quantumsoftware werken, wat cruciaal is voor het creëren van economische waarde. Eindgebruikersmarkten voor quantumcomputing staan nog in de kinderschoenen, en onzekerheid over commerciële tijdlijnen bemoeilijkt investeringsbeslissingen. Ondanks deze onzekerheid is het pad voorwaarts duidelijk. Internationale boegbeelden uit de industrie voorzien een toekomst waarin supercomputers hybride systemen zijn, waarbij quantumprocessoren nauw worden gekoppeld aan andere high-performance computing-modaliteiten.¹¹ Om onderdeel te blijven van deze toekomstvisie is onmiddellijke actie vereist. Momenteel wordt de groei van de Nederlandse industrie beperkt door gefragmenteerde en kortlopende financieringsinstrumenten en beperkte beschikbaarheid van durfkapitaal, evenals complexe regelgevende kaders. Onderhandelingen over intellectueel eigendom met universiteiten verlopen traag en exportcontroleregels maken het speelveld complexer. Zonder deze knelpunten aan te pakken, loopt Nederland het risico momentum te verliezen en achter te blijven bij internationale concurrenten die agressief investeren.

Om onze leiderschapspositie te behouden zijn een langetermijnvisie en coherent industriebeleid essentieel. Dit omvat het uitbreiden van onderzoeks- en testfaciliteiten, het versnellen van vroege financiering en groeikapitaal voor start-ups en scale-ups, en het versterken van de organisatorische capaciteit in het innovatie-ecosysteem. Talentontwikkeling is daarnaast ook cruciaal: nieuwe masterprogramma's in quantumtechnologie en initiatieven zoals Quantum Talent & Learning Centres zijn gericht op het opbouwen van een pijplijn van beroeps- tot postdoctoraal talent,¹² maar de absorptiecapaciteit in het MKB blijft soms achter. Het aantrekken en behouden van toptalent vereist concurrerende arbeidsvoorwaarden en internationale verbondenheid, terwijl kennisoverdracht en valorisatie sneller en effectiever moeten worden.

6 [*JRC Publications Repository - Future Directions for Quantum Technology in Europe*](#)

7 [*Home | NXTGEN Hightech*](#)

8 [*Quantum Technology Investments hits a Magic Moment - McKinsey 2025*](#)

9 [*Defensie Strategie voor Industrie en Innovatie 2025-2029 | Beleidsnota | Defensie.nl*](#)

10 [*EU Defence Industry Transformation Roadmap: Unleashing Disruptive Innovation for Defence Readiness*](#)

11 [*NVIDIA GTC Washington D.C. Keynote | Jensen Huang | 28 okt 2025 | 12 uur EDT*](#)

12 [*Talent & Learning Centres | Quantum Delta NL*](#)

2.3. Internationale positionering

Internationaal is quantumtechnologie een strategische prioriteit geworden voor veel landen.¹³ De Europese Unie werkt aan de vervolgstappen van het Quantum Flagship initiatief door eerder dit jaar de Quantum Europe Strategy te lanceren, gericht op het versterken van onze industriële concurrentiekracht.¹⁴ Deze strategie zal in 2026 worden omgezet in een EU Quantum Act, wat de Europese slagkracht verder zal versterken. Binnen Europa wijst de recent gepubliceerde Duitse High-Tech Agenda miljarden toe aan quantumonderzoek en industrialisatie, terwijl Frankrijk en het VK op grote schaal programma's hebben aangekondigd om quantuminnovatie te versnellen.^{15,16,17} Buiten Europa investeren onder andere de Verenigde Staten, China, Japan, Australië, Zuid-Korea en Canada agressief in quantumtechnologie, waarbij Japan bijvoorbeeld onlangs ¥50 miljard (circa €273 miljoen) heeft toegezegd ter ondersteuning van quantumstart-ups.¹⁸ Deze initiatieven benadrukken de intensiteit van de wereldwijde concurrentie en de noodzaak voor Nederland om het momentum vast te houden. Vanuit internationaal defensieperspectief heeft het Amerikaanse Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) zijn Quantum Benchmarking Initiative gelanceerd dat honderden miljoenen dollars verstrekt aan niet-Europese bedrijven die hun quantumcomputers in de komende jaren kunnen opschalen.¹⁹ De NAVO heeft in 2024 haar quantumstrategie gelanceerd die militaire innovatie in de komende jaren zal versnellen.²⁰

Hoewel Nederland geografisch gezien relatief klein is, heeft ons quantumecosysteem wereldwijd een sleutelpositie veroverd dankzij de goede verbondenheid en hoge publieke investeringen per hoofd van de bevolking. Dit biedt volop mogelijkheden voor internationale samenwerkingen en zorgt voor toegang tot wereldwijde markten, evenals invloed op het vormgeven van internationale standaarden en beleid. In de loop der jaren hebben we ons gevestigd als een van de toonaangevende ecosystemen in Europa, wat bijvoorbeeld zichtbaar is door het Nederlands-Frans-Duitse trilaterale partnerschap op het gebied van quantumtechnologie.²¹

Ondanks deze sterke punten staat Nederland voor uitdagingen om zijn concurrentievoordeel te behouden. Internationale concurrenten profiteren van grotere binnenlandse markten, diepere financieringsmogelijkheden en een bredere industriële basis. Gefragmenteerde Europese financiering en het ontbreken van een uniforme EU-strategie voor quantumindustrialisatie creëren extra obstakels. Geopolitieke fragmentatie en complexe compliance-eisen kunnen de internationale betrokkenheid vertragen, terwijl het ontbreken van Nederlandse quantum-unicorns de wereldwijde concurrentiekracht beperkt ten opzichte van spelers in de VS of China.

13 [*Quantum Initiatives Worldwide 2025 - Qureca*](#)

14 [*Quantum Europe Strategy | Shaping Europe's digital future*](#)

15 [*Hightech Agenda Deutschland: Home*](#)

16 [*Programme PROQCIMA - Portail de la stratégie nationale quantique*](#)

17 [*Quantum computing is getting real-and Britain wants to lead*](#)

18 [*Japan Backs Quantum Startups in 50 Billion Yen Push for Tech Leadership*](#)

19 [*QBI: Quantum Benchmarking Initiative | DARPA*](#)

20 [*NATO releases first ever quantum strategy | NATO News*](#)

21 [*https://quantumdelta.nl/news/european-quantum-collaboration-strengthened-with-trilateral-call*](https://quantumdelta.nl/news/european-quantum-collaboration-strengthened-with-trilateral-call)

Om haar internationale positie te consolideren, moet Nederland blijven investeren in het opschalen van start-ups en het versnellen van innovatie in de industrie. Het versterken van verbindingen tussen regionale hubs en Europese ecosystemen, het vroegtijdig aanpakken van regelgevende barrières en het bevorderen van Nederlands leiderschap in standaardisatie zal cruciaal zijn om onze strategische internationale positie te behouden. Door gebruik te maken van zijn geïntegreerde ecosysteem- en productiekrachten kan Nederland een control point verkrijgen in de wereldwijde waardeketens van quantumtechnologie als we in de komende jaren daadkrachtig handelen.

2.4. Conclusie: kansen voor de toekomst

De hierboven beschreven kernpunten kunnen worden samengevat in de volgende SWOT-analyse.

Sterktes - Groeibasis van quantumbedrijven die toonaangevende producten en diensten leveren - Sterke kennisbasis en wetenschappelijk leiderschap - Goed georganiseerd ecosysteem dat verbinding kan maken met de hightech maakindustrie	Zwaktes - Barrières voor industriële opschaling, waaronder toegang tot durfkapitaal - Gefragmenteerde financieringsinstrumenten en complexe intellectuele eigendomsovereenkomsten - Kleine bestaande eindgebruikersbasis, waaronder in Nederland
Kansen - Exponentieel groeiende marktpotentie in het komende decennium - Toename in defensie-uitgaven dankzij het dual-use karakter van quantumtechnologie - Zeer zichtbare internationale positie	Bedreigingen - Hevige internationale concurrentie met meer financieringsmogelijkheden en minder strenge regelgeving - Gefragmenteerd Europees quantumecosysteem - Risico op het ontbreken van lange termijn stabiliteit door eindigende NGF financiering

De komende vijf tot tien jaar zullen cruciaal zijn. Door haar sterktes te benutten en structurele zwaktes aan te pakken, kan Nederland een leidende rol veroveren in quantumtechnologie-waardeketens, waarbij wetenschappelijke excellentie en hightech-maakcompetenties van wereldklasse worden omgezet in economische en maatschappelijke impact. De uitvoering van de actieagenda zal essentieel zijn om de *valley of death* te overbruggen, innovatie te versnellen en de rol van Nederland als quantumtechnologie-grootmacht te verzekeren.



3. Ambitie en opgaves

Quantumtechnologie is een belangrijke sleuteltechnologie, niet alleen voor de NTS en het Ministerie van Economische Zaken, maar ook voor het Ministerie van Defensie via de DSII⁹ en de Europese Commissie.²² Maar de wereld om ons heen beweegt snel en om onze concurrentiepositie te behouden, moeten we de komende periode uitzonderlijk ambitieus zijn.

3.1. Ambitie van de NTS

De oorspronkelijke ambitie voor quantumtechnologie zoals gedefinieerd in de NTS is als volgt²³:

“In 2035 is het Nederlandse quantumecosysteem van wereldklasse, op zowel academisch als industrieel gebied, en een internationale magneet voor bedrijvigheid en talent. Nederland is een gidsland met control points in internationale waardeketens voor alle drie de beschreven technologiegebieden, met spelers die concurreren op internationaal niveau. Binnen de EU is Nederland onderdeel van de kopgroep en heeft een sterke positie voor fabricage en commercialisatie.”

Dit is een duidelijke stip aan de horizon die verwezenlijkt moet worden door de actieagenda.

3.2. Economische en maatschappelijke opgave

Het Nederlandse quantumecosysteem streeft ernaar om tegen 2035 van wereldklasse te blijven en erkend te worden voor zijn wetenschappelijke excellentie en industrieel leiderschap. QDNL heeft deze ambitie nog verder gespecificeerd door te streven naar Nederland als een van de drie grootste quantumeconomieën wereldwijd, gemeten naar quantum-gerelateerd bruto binnenlands product (BBP) per hoofd van de bevolking.²⁴ Dit betekent dat Nederland niet alleen voorop moeten lopen in onderzoek en innovatie, maar ook een robuuste, zelfvoorzienende quantumindustrie moeten hebben die hoogwaardige banen creëert, concurrerend is op wereldmarkten en oplossingen levert voor dringende economische en maatschappelijke uitdagingen. Er zou een levendig portfolio van quantumtechnologiebedrijven moeten zijn, van start-ups tot scale-ups en multinationals met ten minste één unicorn, geïntegreerd in wereldwijde toeleveringsketens. Deze bedrijven moeten bovendien bijdragen aan een wereldwijd concurrerende Europese quantumindustrie die bijdraagt aan onze technologische soevereiniteit en strategische autonomie.²⁵

Een uniek aspect van het Nederlandse ecosysteem is de toewijding en voortdurende inspanning om maatschappelijke uitdagingen rondom quantumtechnologie aan te pakken. Dit is geïntegreerd in het Centre for Quantum and Society (CQS) van QDNL, dat tot doel heeft de ethische, juridische

22 [*Recommendation on critical technology areas | European Commission*](#)

23 [*De Nationale Technologiestrategie | Beleidsnota | Rijksoverheid.nl*](#)

24 [*Vision for the Quantum Ecosystem towards 2035 - Quantum Delta NL*](#)

25 [*Competitiveness compass - European Commission*](#)

en maatschappelijke uitdagingen rond quantumtechnologie aan te pakken.²⁶ Het CQS richt zich op het toegankelijk maken van quantumtechnologie voor een breder maatschappelijk publiek door projecten te lanceren die verband houden met verantwoorde innovatie en wetenschapscommunicatie. Daarnaast werkt CQS aan het koppelen van toepassingen van quantumtechnologie aan de maatschappelijke missies die door de Nederlandse overheid zijn gedefinieerd, zoals de energietransitie, het watersysteem en de gezondheidszorg.²⁷ In 2035 zal quantumtechnologie positief hebben bijgedragen aan de Sustainable Development Goals van de Verenigde Naties en zal deze worden ingebed in alle lagen van de Nederlandse samenleving, waar het dient als een bron van inspiratie en kansen voor burgers van alle leeftijden.

Om bovenstaande ambities te realiseren, moet het ecosysteem verschillende acties ondernemen:

1. Versnel technologie- en marktgereedheid

Het verder ontwikkelen en opschalen van industriegerichte innovaties in quantumtechnologie, met de nadruk op hardware, software en productiecapaciteiten. Hiervoor kan het Nederlandse ecosysteem gebruikmaken van de pilot lines en productiefaciliteiten voor quantumchips en componenten die op nationaal en EU-niveau zijn opgezet, waarbij we synergiën met de fotonica-, optomechatronica- en halfgeleidersector benutten. Tegelijkertijd moeten we de betrokkenheid van eindgebruikers stimuleren, zodat innovaties inspelen op bestaande marktbehoeften in sectoren als energie, financiën, gezondheid en veiligheid.

2. Versterk het industriële ecosysteem

Bevorder ondernemerschap en ondersteun de groei van start-ups en scale-ups via gerichte en coherente financieringsmechanismen, challenge-based programma's en toegang tot gedeelde infrastructuur. We moeten meer internationale bedrijven en investeerders aantrekken en Nederland positioneren als een toonaangevende 'quantum valley',²⁸ vergelijkbaar met Silicon Valley in Californië. Dit kan alleen slagen met een aantrekkelijk vestigingsklimaat, door grootschalige en langdurige financieringsrondes mogelijk te maken, en publiek-private samenwerkingen te ondersteunen met gunstige voorwaarden voor bedrijven.

3. Ontwikkeling van menselijk kapitaal en maatschappelijke gereedheid

Breid de onderwijs- en trainingsprogramma's uit op alle niveaus (van MBO tot postdoctoraal) en zorg voor een stabiele instroom van quantumtalent. Binnen deze talentenpool moeten we diversiteit en inclusie bevorderen, zodat het ecosysteem voor iedereen toegankelijk wordt. Extern moeten we de samenleving betrekken via bewustwordingscampagnes, ethische kaders en verantwoorde innovatie, zodat quantumtechnologie wordt ontwikkeld en ingezet voor het maatschappelijk belang.

Door zich te richten op innovatieprogramma's die met name de Nederlandse quantumindustrie ondersteunen, kan de actieagenda een belangrijke bijdrage leveren aan al deze vereisten.

²⁶ [*Centre for Quantum and Society / Quantum Delta NL*](#)

²⁷ [*Quantum for Good - Quantum for Everyone*](#)

²⁸ [*Rapport Wennink: Projectvoorstellen December 2025*](#)

3.3. Innovatieopgave

De innovatie-uitdagingen waarmee het Nederlandse quantumecosysteem wordt geconfronteerd zijn veelzijdig, en het aanpakken ervan vereist een gecoördineerde, vooruitstrevende aanpak. Naarmate quantumtechnologie zich ontwikkelen van fundamenteel onderzoek tot praktijktoepassing, moet het ecosysteem obstakels overwinnen bij het opschalen van laboratoriumprototypes naar industriële productie. Dit vereist de ontwikkeling van robuuste productie-infrastructuur, waaronder pilot lines en gedeelde cleanroom faciliteiten om de betrouwbare fabricage van quantumchips, sensoren, netwerkkapparaten en andere componenten mogelijk te maken. De innovatie-uitdagingen worden versterkt door de aanzienlijke investeringen die nodig zijn om deze infrastructuur op te zetten, waarbij het ecosysteem moet concurreren met bedrijven die in sommige gevallen meer kapitaal tot hun beschikking hebben dan gehele nationale meerjarige programma's in Europa.

Een andere cruciale uitdaging is de integratie van quantumtechnologie in bestaande computing-, communicatie- en sensorinfrastructuren en -markten. Het ecosysteem moet eindgebruikerssectoren identificeren, prioriteren en versnellen waar quantumoplossingen de grootste impact op korte termijn kunnen leveren, wat op zichzelf al een grote uitdaging is. Dit omvat niet alleen technologische innovatie, maar ook de creatie van nieuwe businessmodellen, standaarden en regelgevende kaders die adoptie en interoperabiliteit vergemakkelijken. Het vroeg betrekken van eindgebruikers en het verlagen van het adoptierisico is essentieel om ervoor te zorgen dat innovaties voldoen aan bestaande marktbehoeften en meer waarde opleveren dan de investeringskosten.

Talentontwikkeling en -behoud brengen verdere complicaties met zich mee voor innovatie in de praktijk. Het snelle tempo van technologische vooruitgang vereist een stabiele instroom van hooggekwadificeerde professionals, van onderzoekers en ingenieurs tot ondernemers en technici. Samenwerking tussen universiteiten, beroepsscholen en het bedrijfsleven is essentieel om menselijk kapitaal op te bouwen dat innovatie kan stimuleren, en we moeten zorgen voor de beschikbaarheid van aantrekkelijke arbeidsvoorwaarden om te concurreren om wereldwijd talent.

De actieagenda kan deze uitdagingen aanpakken door middelen en inspanningen te richten op het oplossen van de belangrijkste innovatie-uitdagingen van de komende tien jaar.

3.4. Kennis- en technologieopgave

De snelle ontwikkeling van quantumtechnologie vereist voortdurende vooruitgang in het begrijpen en integreren van exotische materialen, system engineering en softwaretools tot schaalbare, betrouwbare en marktklare oplossingen. Om bijvoorbeeld schaalbare quantumcomputers te realiseren, moet de industrie zich "richten van het najagen van de volgende algoritmische demonstratie naar het aanpakken van de enorme productie- en engineeringuitdaging die voor ons ligt (...) en fundamentele wetenschappelijke ontdekkingen



moeten plaatsmaken voor het tijdperk van industriële productie.”²⁹.

In deze richting zal de actieagenda de volgende kennis- en technologische uitdagingen aanpakken:

- Het benutten van bestaande industriële capaciteiten om geïntegreerde quantumcomputers te ontwerpen en te produceren voor commerciële toepassing;
- Het bouwen van nieuwe en efficiënte geïntegreerde chips en algoritmen voor qubit controle en quantum foutcorrectie;
- Verpakkings- en testapparatuur ontwikkelen die nog niet op de markt verkrijgbaar is;
- Een op verstrengeling gebaseerde quantumconnectiviteit backbone opbouwen in Nederland;
- Het verbinden van applicatieontwikkelaars, quantumcryptografen en apparatuur-leveranciers om samen nieuwe quantumnetwerktoeepassingen te ontwikkelen;
- Het bouwen van quantumsensoren die aantoonbaar voordeel bieden ten opzichte van klassieke alternatieven;
- Systeemintegratie om te voldoen aan de eisen van eindgebruikers van quantumsensoren, inclusief extreme cryogene omgevingen, en integratie met biologische systemen;
- Ontwikkeling van software en zowel korte- als lange-termijntoeepassingen van quantum computing, waarbij gebruik wordt gemaakt van, en verbinding wordt gemaakt met, AI.

Door Nederlandse quantumbedrijven te verbinden met toonaangevende kennisinstituten, richt de actieagenda zich op het oplossen van de meest uitdagende, urgente technologische uitdaging door unieke en baanbrekende kennis te ontwikkelen.

3.5. Ecosysteemopgave

De ontwikkeling van het Nederlandse ecosysteem staat centraal voor het toekomstige succes van het Nederlandse quantumlandschap, aangezien dit bepaalt hoe onder andere bedrijven, kennisinstituten, talent, intellectueel eigendom, infrastructuur en kapitaal worden samengebracht om innovatie te stimuleren. Nederland moet fragmentatie voorkomen en effectieve samenwerking bevorderen tussen universiteiten, onderzoeksinstituten, start-ups, scale-ups, gevestigde industrie, de overheid en eindgebruikers. Het opbouwen en onderhouden van een samenhangend ecosysteem is essentieel voor de valorisatie van wetenschappelijke doorbraken tot economische en maatschappelijke waarde.

Een belangrijke uitdaging is het einde van de NGF-financiering in 2028. Zonder een sterke continuïteitsstrategie bestaat het risico dat de activiteiten die de afgelopen jaren zijn opgebouwd door QDNL – zoals de regionale hubs, nationale collectieve doelstellingen en internationale zichtbaarheid – verloren gaan. Er is hernieuwde publieke commitment nodig om de erosie van deze kwaliteiten te voorkomen.

²⁹ Nobelprijswinnaar John Martinis in een interview met de Financial Times, zie: [*Quantum computing needs its own industrial revolution*](#)

Een andere belangrijke uitdaging is het aantrekken en behouden van investeringen, zowel publiek als privaat, ter ondersteuning van de groei van bedrijven en het opschalen van innovaties. Hoewel het Nederlandse bedrijfsleven tot op heden mondjesmaat in quantumtechnologie investeert, beschikken we over een robuuste, exportgerichte industriële basis die benut en opgeschaald kan worden. Om deze groei te stimuleren, is flexibele toegang tot private durfkapitaal cruciaal, in combinatie met snelle screeningsprocessen voor buitenlandse investeringen. Daarnaast heeft het ecosysteem wetgevingskaders nodig die start-upvriendelijk zijn, met name met betrekking tot mede-werkersparticipatie, en coherente exportcontroleregels die internationaal op elkaar afgestemd zijn.

Het ecosysteem moet gunstige intellectuele eigendomsovereenkomsten stimuleren en mechanismen bieden om start-ups en scale-ups te ondersteunen tijdens hun kritieke groeifasen. Dit vereist duidelijke governance-structuren, transparante en snelle besluitvorming, en effectieve ondersteuningsprogramma's.

Toekomstbestendig en coherent overheidsbeleid, en het vermogen om het complexe landschap van nationale en Europese initiatieven te navigeren, zijn andere randvoorwaarden voor succes. De uitvoeringsfase van de actieagenda moet nauw worden gecoördineerd met gerelateerde actieagenda's, Quantum Delta NL, de Defensiestrategie voor Industrie en Innovatie, en relevante Europese programma's zoals het Quantum Flagship, EuroHPC en EuroQCI. Dit zorgt ervoor dat innovatie-inspanningen synergetisch zijn en middelen optimaal worden gebundeld en ingezet.

Internationalisering is ook van vitaal belang. Het Nederlandse ecosysteem moet zich positioneren als een toonaangevende hub binnen Europa en daarbuiten, strategische partnerschappen ontwikkelen, deelnemen aan grensoverschrijdende initiatieven en zorgen voor toegang tot internationale markten en toeleveringsketens. Dit omvat actieve betrokkenheid bij Europese programma's, betrokkenheid bij de ontwikkeling van internationale standaarden en het vermogen om buitenlandse bedrijven en talent aan te trekken.

Door een ambitieus plan voor de komende tien jaar te bieden, kan de actieagenda zorgen voor consistente en duurzame lange termijn financiering om het Nederlandse ecosysteem strategisch verbonden te houden.

3.6. Inhoudelijke focus en samenhang van het programma

Om bovenstaande uitdagingen aan te pakken, hebben we op grote schaal input verzameld bij de Nederlandse (quantum)industrie, kennisinstituten en andere relevante stakeholders. Samen hebben meer dan veertig organisaties input geleverd – zie een overzicht van alle betrokkenen op de laatste pagina van dit document. Dit heeft geleid tot in totaal vijf innovatieprogramma's die zich richten op quantumcomputing, quantumcommunicatie, quantumsensing, het maken van quantumtechnologie en quantumsoftware. Er zijn veel verbanden tussen deze innovatieprogramma's, evenals met andere actieagenda's, wat de groeiende rol van quantumtechnologie in de Nederlandse hightechindustrie benadrukt.

4. Innovatieprogramma's

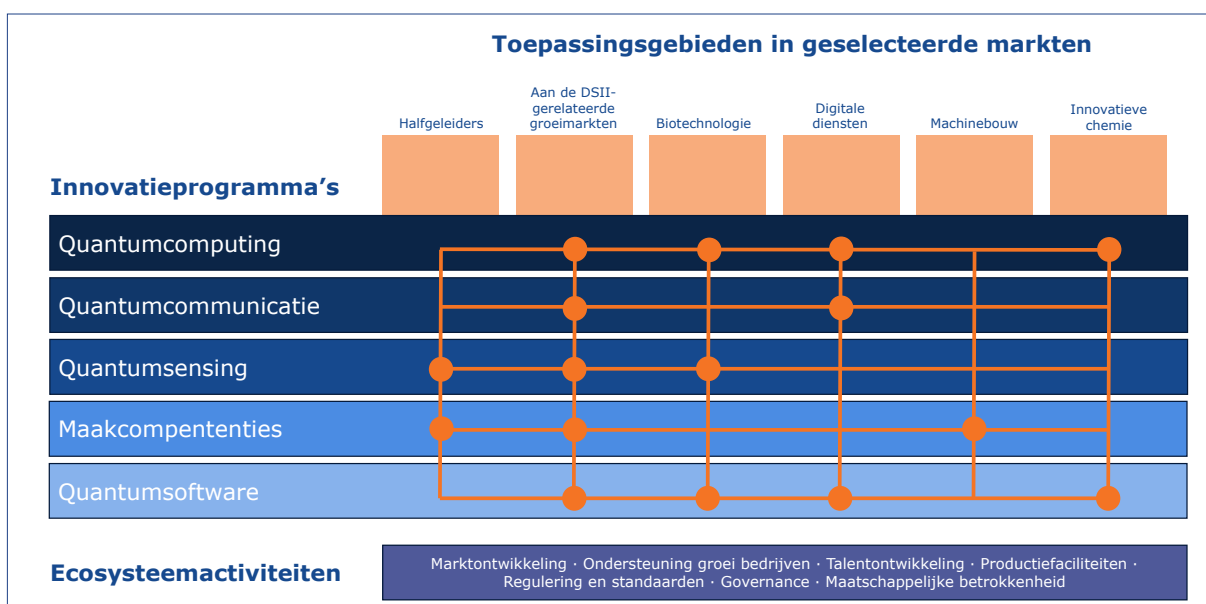
In totaal hebben we vijf ambitieuze innovatieprogramma's ontwikkeld die zich richten op quantumcomputing, quantumcommunicatie, quantsensing, het maken van quantumtechnologie en quantumsoftware. Deze worden hieronder in detail beschreven.

De vijf innovatieprogramma's kunnen worden gekoppeld aan de zes markten die zijn geïdentificeerd in de Kamerbrief over industriebeleid die in oktober 2025 is gepubliceerd.² Deze markten zijn:

- halfgeleiders
- aan de DSII-gerelateerde groeimarkten
- biotechnologie
- digitale diensten
- machinebouw en
- innovatieve chemie

Ondanks het feit dat sommige quantumtechnologie-apparaten een nog relatief laag-TRL hebben, zijn er verschillende connecties tussen de activiteiten in de innovatieprogramma's en deze specifieke eindgebruikersmarkten – zie Figuur 4-1.

We hebben een mix van 'innovatieprogramma's' (toepassingsgericht) en 'verdiepingsprogramma's' (technologiegericht) in deze actieagenda, volgens de terminologie van de KIA ST. Naast de technologische ontwikkelingen in de innovatieprogramma's hebben we ook een reeks specifieke ecosysteemactiviteiten nodig die de ontwikkeling van de Nederlandse quantumindustrie mogelijk maken. Deze worden verder gespecificeerd in Sectie 5.



Figuur 4-1 Connecties tussen de innovatieprogramma's en de groeimarkten zoals vastgesteld in Kamerbrief over industriebeleid,² en een overzicht van de benodigde van ecosysteemactiviteiten.



4.1. Innovatieprogramma 1: Een ‘grand challenge’ voor een geïntegreerde quantumcomputer

Het doel van dit innovatieprogramma is om quantumcomputers van industriële schaal te bouwen en te hosten van in Nederland, waarbij voornamelijk kritieke componenten van Nederlandse leveranciers worden gebruikt. Hierdoor worden tegelijkertijd industriële capaciteiten opgebouwd om quantumcomputers te produceren en te gebruiken. Dit innovatieprogramma richt zich op de belangrijkste stappen die nodig zijn om van huidige prototypes naar commercieel bruikbare systemen te gaan.

4.1.1. Drivers

De belangrijkste driver achter dit innovatieprogramma is het bevorderen van de R&D die nodig is om een schaalbare, fouttolerante quantumcomputer te realiseren, met een sterke focus op full-stack implementatie. Er zijn momenteel bedrijven actief op drie qubittypes in Nederland: supergeleiders, op halfgeleider-gebaseerde spins en fotonische qubits. Daarnaast hebben andere Nederlandse bedrijven in de waardeketen ruime commerciële ervaring, gecombineerd met een sterke bestaande hightechindustrie die complexe geïntegreerde producten kan produceren, bouwen en exporteren. De belangrijkste impact van het innovatieprogramma is het mogelijk maken van quantumcomputers die kunnen worden ingezet om economische en maatschappelijke waarde creëren, terwijl tegelijkertijd onze digitale soevereiniteit en andere publieke waarden worden gewaarborgd.

4.1.2. Kennisontwikkeling

De overgang van huidige prototypes naar een systeem met 100.000 qubits vereist het aanpakken van de enorme uitdagingen rondom hardware-opschaling en -ontwerp. Om deze grote schaal te bereiken, is een modulaire en schaalbare architectuur nodig, die effectief overgaat van de kleinschalige demonstraties van vandaag naar quantumcomputers van industriële schaal van morgen. Parallel aan technologische opschaling moet het programma de Nederlandse toeleveringsketen versterken om onze technologische soevereiniteit en verdienvermogen in brede zin te waarborgen. Dit gebeurt door quantumcomputers te bouwen waarvan de meerderheid van de kritieke componenten en subsystemen in Nederland zijn geproduceerd. Een andere centrale kennisvraag is quantumfoutcorrectie: wat is de meest resource-efficiënte en betrouwbare methode voor foutcorrectie (bijvoorbeeld surface codes, LDPC-codes) en hoe kunnen deze geïntegreerd worden in quantumcomputers om logische qubits te bereiken en uiteindelijk fouttolerante berekening te realiseren. Tot slot, aangezien quantumcomputers uiteindelijk moeten worden geïntegreerd in datacenters, is een fundamentele vraag hoe we kunnen bepalen welke delen van een rekenkundig probleem door klassieke HPC-systemen, AI-chips of door quantumprocessors moeten worden uitgevoerd om optimale prestaties, nauwkeurigheid en energie-efficiëntie te bereiken.

4.1.3. Impact op verdienvermogen en maatschappelijke uitdagingen

Quantumcomputing wordt naar verwachting een miljardenmarkt wereldwijd. Investeren in een ultramoderne quantumcomputer en de bijbehorende toeleveringsketen is strategisch gezien

een cruciale zet om een aanzienlijk marktaandeel te veroveren, waarmee het toekomstige verdienvermogen van Nederland wordt veiliggesteld. Het programma kan bovendien direct bijdragen aan de ontwikkeling van control points door, naast de quantumcomputer zelf te bezitten, capaciteiten te ontwikkelen voor kritieke componenten en subsystemen die door het programma zijn opgebouwd. Voorbeelden van dergelijke belangrijke subsystemen zijn ultra-low-loss-koppelingen, lichtbron- en lichtdetectie-subsystemen, quantumprocessoren, cryogene in- en outputketens, controle-elektronica en kalibratiesoftware. Door de productie en export van deze geïntegreerde quantumproducten te stimuleren, creëren we een sterke economische positie en verminderen we de afhankelijkheid van buitenlandse entiteiten. Het innovatieprogramma maakt uiteindelijk quantumcomputers mogelijk die kunnen worden ingezet om grote maatschappelijke uitdagingen aan te pakken, zoals in gepersonaliseerde gezondheidszorg en geneesmiddelenontwikkeling, geavanceerde materialen, optimalisatie van klimaatmodellen en verbetering van onze vitale infrastructuur.

4.1.4. Plan van aanpak

Dit innovatieprogramma tackelt de belangrijkste kennis- en R&D-vragen door te investeren in quantumcomputingsystemen via een inkoop-gedreven innovatiemodel: een competitie tussen bedrijven of consortia, met uitdagende mijlpalen op basis van internationale benchmarks. Het is daarmee bedoeld om de overgang van huidige prototypes naar een systeem met 100.000 qubits te overbruggen, wat vereist dat de enorme uitdagingen op het gebied van hardware en architectuur worden aangepakt.

Het programma is als volgt opgebouwd:

Fase 1: Bouwen van state of the art quantumcomputers

- Doel: quantum computers leveren met 100–1.000 qubits, waarmee ze voldoen aan belangrijke eisen van hoogwaardige twee-qubit gate-fidelity en het vermogen om logische foutpercentages aan te tonen die lager zijn dan de onderliggende fysieke qubit-fouten door quantum-foutcorrectie.
- Financiering: €190 miljoen, verdeeld over drie verschillende concurrerende qubittechnologieën (bijv. supergeleidend, spin-qubit, fotonisch). De eerste stap zal zijn het opzetten van een governance-mechanisme en een technisch comité om de aanbesteding toe te wijzen en de voortgang te beoordelen. Elk consortium dat zich aanmeldt voor de aanbesteding, definieert een systeemarchitectuur met een bijbehorend ontwikkelingsplan en mijlpalen.
- Deelnemers moeten daarnaast een innovatieroadmap opleveren, zodat de aankoop niet slechts een eenmalig commercieel product is, maar een gezamenlijke visie die verder kan worden ontwikkeld. De meerderheid van de kritieke componenten en subsystemen moeten in Nederland worden gemaakt.

Fase 2: Toename van het aantal qubits richting vroege fouttolerante computing

- Doel: het leveren van quantumcomputers met 5.000-10.000 fysieke qubits gebaseerd op de meest veelbelovende technologieën uit Fase 1, waarmee de succesvolle schaalvergroting en vroege implementatie van Fault-Tolerant Quantum Computing (FTQC) architecturen wordt gemarkeerd.
- Financiering: tot €600 miljoen plus mogelijke medefinanciering van gebruikers die zorgt voor industriële relevantie en betrokkenheid.
- De overgang van Fase 1 naar Fase 2 zal worden bepaald door technische KPI's en internationale benchmarks

Fase 3: Utility-scale machine voor eindgebruikers

- Doel: het leveren van een industrieel-relevant quantumcomputingsysteem met 100.000 fysieke qubits, dat in staat is honderden betrouwbare logische qubits te ondersteunen en waardevolle marktgedreven problemen op grote schaal op te lossen.
- Financiering: de aanschaf van de quantumcomputer wordt gefinancierd via een nieuw financieringsinstrument naast de actieagenda met betrokkenheid van eindgebruikers, wat een verschuiving markeert van publieke R&D-investeringen naar marktgedreven aankoop, wat technologische volwassenheid en bewezen bruikbaarheid aanduidt. De quantumcomputer zal kunnen worden gehuisvest bij een publieke instelling, en het hosten, onderhoud en de gebruikerstoegang zullen worden gefinancierd door publieke bijdragen vanuit de actieagenda.

De fasen worden in de loop van de tijd sequentieel uitgevoerd, zoals getoond in Tabel 41.

Tabel 4-1 Gantt-diagram voor de uitvoering van het quantumcomputing innovatieprogramma.

Fase	Grootte (€ mln)	Totale duur									
		2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Bouw van state of the art quantumcomputers	190										
Toename van het aantal qubits richting vroege fouttolerante computing	600										
Utility scale machine voor eindgebruikers	10 NTS + andere financiering										

4.1.5. Verbinding met andere actieagenda's

Het programma is niet direct afhankelijk van andere actieagenda's. Echter, om grote quantumcomputingsystemen te maken verwachten we een synergetische interactie met relevante stakeholders die betrokken zijn bij de agenda's van Optical Systems en Integrated Photonics, Mechatronics en Optomechatronics en Semiconductor Technologies. De beoogde

gebruikers van de quantumcomputersystemen zullen daarnaast waarschijnlijk afkomstig zijn uit de gebieden Cybersecurity Technologies, Biomolecular en Cell Technologies, en Energy Materials. Deze toepassingsgebieden relateren sterk aan ons vijfde innovatieprogramma rondom quantum software. Ten slotte wordt strategische afstemming met AI & Data Science ook verwacht als een noodzakelijk onderdeel voor de succesvolle integratie en implementatie van quantumcomputingsystemen in datacenters.

4.1.6. Financiële breakdown

De totale omvang van het innovatieprogramma vereist €800 miljoen aan publieke financiering, die de kosten dekt voor zowel publieke instituten als particuliere bedrijven, voor de aanschaf van quantumcomputerprototypes. Er is een nieuw financieel instrument nodig: een inkoopgedreven innovatiemodel dat concurrentie bevordert bij de aanschaf van quantumcomputers, met uitdagende mijlpalen die aansluiten bij internationale benchmarks. Inkoop moet verder reiken dan de aankoop van bestaande marktproducten en toekomstbestendige oplossingen omvatten, ondersteund door een duidelijke R&D-roadmap voor voortdurende verbetering en langetermijn-borging. De precieze voorwaarden waaronder bedrijven hun R&D-ontwikkeling kunnen co-financieren als onderdeel van de aanbesteding worden later bepaald. Een of meer quantumcomputers die opgeleverd worden aan het einde van het programma, zullen worden gefinancierd door een andere bron naast de actieagenda, inclusief financiering voor eindgebruikers. Publieke financiering in de laatste fase van het programma is voorzien voor de publieke instelling.

Tabel 4-2 Schatting van de publieke en private kosten per werkpakket.

Fase / werkpakket	Totale kosten (€ mln)	Publiek (€ mln)	Privaat (€ mln)
Bouw van state of the art quantumcomputers	190	190	NTB
Toename van het aantal qubits richting vroege fouttolerante computing	600	600	NTB
Utility scale machine voor eindgebruikers	10 + NTB	10	NTB
Totaal programma	>800	800	NTB

4.2. Innovatieprogramma 2: Het bouwen van quantumcommunicatienetwerken voor sociaaleconomische waarde

Het doel van dit innovatieprogramma is om Nederland te positioneren als een wereldwijde koploper in quantumconnectiviteit door middel van nieuwe technologische ontwikkelingen, wereldwijd verbonden infrastructuur en geavanceerde applicatieontwikkeling. In 2035 zal Nederland niet alleen een R&D-leider in quantumcommunicatie blijven, maar ook een innovatiehub zijn. Wereldwijd uitblinkende start-ups en scale-ups zullen de adoptie en toepassing van quantumnetwerken mogelijk maken, waaronder voor veilige communicatie en

gedistribueerde quantumcomputing en -sensing. Bovendien zal Nederland, net zoals Amsterdam een essentieel connectiviteitsknooppunt is voor het klassieke internet, via dit programma de belangrijkste toegangspoort worden voor wereldwijde quantumcommunicatie. Daardoor worden zowel vertrouwde, quantumbeveiligde data-uitwisseling als op verstrengeling-gebaseerde quantumconnectiviteit tussen overheden, industrieën en onderzoeksecosystemen mogelijk.

Door de uitrol van lokale testbeds en een nationale quantumconnectiviteit-backbone biedt het programma start-ups kansen om de functionaliteiten van hun apparaten te verbeteren en biedt het dienstverleners de infrastructuur om zowel veilige encryptiesleutels als later volledige verstrengelingsconnectiviteit aan eindgebruikers te leveren. Nederland beschikt over alle noodzakelijke elementen voor een complete toeleveringsketen om quantumnetwerken te creëren die sociaaleconomische waarde opleveren. De ambitie is niet alleen om verbinding te maken, maar ook om te herdefiniëren hoe samenlevingen data beveiligen en beheren in het quantumtijdperk.

Naast het creëren van economische waarde versterkt dit initiatief de digitale soevereiniteit van Europa, beschermt het vitale infrastructuur tegen quantumbedreigingen en positioneert het Nederland als stuwende kracht met control point(s) rondom het ontwerpen, uitrollen en besturen van veilige quantumnetwerken voor de toekomstige digitale samenleving.

4.2.1. Drivers

Een eerste belangrijke drijfveer voor dit innovatieprogramma is de dreiging die quantumcomputing vormt voor digitale beveiliging en kritieke overheidsdiensten door bestaande encryptieprotocollen te ondermijnen. Quantumcommunicatie biedt een nieuw, inherent veilige manier van encryptie om onze samenleving te beschermen tegen deze dreiging. Op maatschappelijk niveau ondersteunt deze beveiliging het publieke vertrouwen in digitale overheidsdiensten door langdurige vertrouwelijkheid en integriteit van communicatie tussen burgers en de staat te waarborgen.

Als tweede belangrijke drijfveer creëert de realisatie van geavanceerde quantumnetwerken die verstrengeling distribueren, nieuwe, brede kansen in gedistribueerde coördinatie, computing en sensing – met groot strategisch belang voor de EU-economie en -samenleving. De uitstekende wetenschappelijke positie voor quantumcommunicatie in Nederland die we in het afgelopen decennium hebben opgebouwd, moet worden versterkt en vertaald naar een leidende positie in de industrie op beide fronten. Dit zorgt voor hoogwaardige werkgelegenheid en talentbehoud in Nederland voor een wereldwijd concurrerende sector, en biedt exportmogelijkheden voor quantumcommunicatieproducten en -diensten.

Een andere unieke drijfveer is dat Nederland, en meer specifiek Amsterdam, al een centrale rol speelt in klassieke digitale communicatie met AMS-IX. Deze centrale positie geeft ons een voordeel bij de oprichting van wereldwijde quantumcommunicatienetwerken door onze internetexchange-capaciteiten uit te breiden met quantumconnectiviteit, en legt de basis voor de ontwikkeling van Nederlandse control points.

4.2.2. Kennisontwikkeling

Hoewel quantumcommunicatie-apparaten voor quantum key distribution (QKD) al worden ingezet, zijn er nog steeds veel technologische uitdagingen op het gebied van capaciteit, functionaliteit en schaalbaarheid om aan de langetermijneisen van quantumcommunicatie te voldoen. Deze moeten worden aangepakt met initiatieven die expliciet gericht zijn op het vergroten van de volwassenheid van de technologie. De huidige status vormt een belemmering voor de adoptie door overheid en industrie, en voor de ontwikkeling van nieuwe kansen om de meest geavanceerde quantuminternettoepassingen mogelijk te maken.

Om een nationale quantumconnectiviteit-backbone te realiseren, moeten verschillende nieuwe capaciteiten worden ontwikkeld op het gebied van technologie, uitvoering en governance. De eerste implementatie-inspanningen, gericht op QKD, zullen geavanceerde MDI-QKD-systemen vereisen via bestaande optische vezelinfrastructuur. Er moet een diverse set softwaretechnologieën worden ontwikkeld om quantumnetwerken te implementeren en te benutten, waaronder:

- besturings- en controlesoftware die routing en prestatie-monitoring mogelijk maakt,
- node-besturingssystemen om applicaties uit te voeren en quantumoperaties te besturen,
- softwareontwikkelingskits om de programmeerbaarheid van verschillende gebruikssituaties te vergemakkelijken, en
- integratielagen die quantumcapaciteiten verbinden met bestaande bedrijfssystemen en workflows.

Aan de integratiekant zijn hybride cryptografische kaders nodig die quantum- en post-quantummethoden combineren om continuïteit tijdens de overgangsfase te garanderen. Bovendien moeten nieuwe standaardisatie-, certificerings- en compliance-mogelijkheden worden opgezet om componenten en interfaces te valideren. Operationele mogelijkheden, zoals quantumgerichte netwerkooperatie, levenscyclusbeheer en veilige sleuteldistributiediensten, moeten worden gebouwd om ervoor te zorgen dat de backbone functioneert als een vertrouwd, upgradebaar en schaalbaar element van de Nederlandse digitale infrastructuur. Op de lange termijn zullen we lokale testbeds, nationale en grensoverschrijdende QKD-netwerken en opkomende quantuminternet-testbeds met elkaar moeten verbinden, zodat ze verkeer kunnen uitwisselen. Hiervoor is een quantum internet exchange point nodig, vergelijkbaar met AMS-IX voor digitale connectiviteit.

Tot slot is één van de grootste open vragen waar het 'quantumvoordeel' ligt, oftewel in welke domeinen we het meest profiteren van quantumcommunicatie. We zullen deze uitdaging expliciet aanpakken door applicatieontwikkelaars, quantumcryptografen en apparatuurleveranciers op centrale hubs te verbinden om samen nieuwe applicaties te ontwikkelen. Ons doel is om op korte termijn toepassingen in quantumcryptografie te ontwikkelen die verder gaan dan QKD, zoals quantumpositieverificatie, terwijl we ook applicaties voorbereiden en ontwikkelen die binnen bereik komen met de beschikbaarheid van krachtigere verstrengelingsmogelijkheden, zoals verbeterde coördinatie of gedistribueerde quantum computing.

4.2.3. Impact op verdienvermogen en maatschappelijke uitdagingen

De wereldwijde quantumcommunicatiemarkt in 2023 werd gewaardeerd op \$1 miljard. Er wordt verwacht dat deze \$10,5 tot \$14,9 miljard zal bereiken in 2035, met een CAGR van 23 tot 25%.³⁰ Andere rapporten suggereren nog hogere groei, waarbij sommigen ('Business Research Insights') een marktomvang van \$220 miljard voorspellen in 2035. Recent marktonderzoek van Fortune Business Insights bevestigt de snelle uitbreiding van quantumcryptografie en aangrenzende markten. De wereldwijde markt voor quantumcryptografie werd in 2023 gewaardeerd op ongeveer €158 miljoen en zal naar verwachting groeien tot €1,5 miljard in 2032, met een robuuste CAGR van 28,8% over de prognoseperiode. Noord-Amerika domineert momenteel de markt, maar Europa zal naar verwachting een aanzienlijk aandeel winnen, gedreven door overheidsinvesteringen, cybersecurity-initiatieven en Europese quantumcommunicatieprogramma's.

De belangrijkste doelmarkten voor quantumbeveiligde communicatie zijn telecommunicatie, defensie, financiën en kritieke infrastructuursectoren – sectoren waar veilige, hooggewaarborgde communicatie essentieel is. Deze sectoren zijn actief op zoek naar quantumbestendige oplossingen om cryptografische risico's op de lange termijn te beperken. Verder bieden verstrengelingsdistributienetwerken nieuwe mogelijkheden, zoals gedistribueerde quantumcomputing, ultraprecieze synchronisatie en veilige multi-party computation. Dit heeft direct betrekking op de maatschappelijke missie rond nationale veiligheid en beveiliging.

Gebruikersbetrokkenheid, bewustwordingscreatie en marktontwikkelingsactiviteiten zullen cruciaal zijn om op termijn een aanzienlijk Nederlands deel van deze totale toegankelijke markt te ontsluiten. Hier moeten we de toegevoegde waarde voor leidende gebruikers en startende klanten laten zien om de businesscase voor nieuwe gebruikers te rechtvaardigen, en duidelijk de urgentie van quantumveilige migratie in de komende jaren communiceren.

4.2.4. Plan van aanpak

Dit innovatieprogramma zal bestaan uit drie werkpakketten:

WP1: Ontwikkeling en testen van quantumnetwerkapparaten

Dit werkpakket richt zich op het ontwikkelen van state-of-the-art apparaten voor quantumnetwerken, zoals geavanceerde QKD-producten, quantum interconnects, quantum memories en uiteindelijk quantum repeaters. Door iteratieve innovatie zullen we quantumnetwerkapparaten verder ontwikkelen en integreren in operationele testbeds die technologieontwikkelaars, wetenschappelijke partners en eindgebruikers met elkaar verbinden. De testbeds zullen een continue feedbackloop creëren tussen technologische prestaties, functionaliteit en praktijktoepassing, waardoor de volwassenheid en adoptie worden versneld.

Naarmate de volwassenheid van de quantumnetwerkapparaten toeneemt, zullen deze testbeds kunnen worden geïntegreerd of gecombineerd met de operationele quantumcommunicatie-

30 [*Quantum Technology Monitor 2025 | McKinsey*](#)



backbone van WP2 om quantumvoordelen voor de Nederlandse en wereldwijde industrie te waarborgen. Het garanderen van de interoperabiliteit en upgradebaarheid van de quantumnetwerken in de loop van de tijd zal een belangrijke activiteit van dit werkpakket zijn.

WP2: Het inzetten van de operationele quantumconnectiviteit backbone

Parallel zal het tweede werkpakket zich richten op het opzetten van een op verstrengeling gebaseerde quantumconnectiviteit backbone in Nederland, te beginnen met een operationeel nationaal QKD-netwerk. Deze backbone zal heel Nederland beslaan en (overheids-)datacenters en computercentra verbinden, evenals andere kritieke locaties. Dit kernnetwerk zou in de loop van de tijd moeten kunnen worden opgewaardeerd met de verbeterde apparaten uit het eerste werkpakket naarmate ze verbeteren, met als doel onze leidende positie voor een Europees quantuminternet in 2035 te versterken als onderdeel van Europese programma's zoals EuroQCI, de Quantum Internet Alliance en IRIS².

De kernactiviteiten van dit werkpakket omvatten de integratie met bestaande digitale infrastructuur, grensoverschrijdende verbindingen en standaardisatie om interoperabiliteit te waarborgen. Door een QKD-as-a-service-model te ontwikkelen, maken we verbindingen mogelijk met een groeiende eindgebruikersgroep. Hier kunnen we bovendien onze bestaande hubfunctie in digitale infrastructuur benutten via bijvoorbeeld AMS-IX, terwijl we ook verbinding maken met Noordwijk voor grondstations die op satelliet-gebaseerde quantumconnectiviteit mogelijk maken en integratie met (inter)nationale telecomoperators waarborgen. Ten slotte zal het nationale quantumnetwerk direct profiteren van de vooruitgang uit de testbeds en zal het in de loop van de tijd evolueren tot een quantuminternet backbone en het Europese en wereldwijde quantuminternet verbinden via een quantuminternet exchange point dat in Amsterdam zal worden gevestigd.

WP3: Geavanceerde toepassingen mogelijk maken

Het derde werkpakket richt zich op de ontwikkeling van geavanceerde use cases en technologieën die de volledige omvang van quantumnetwerkmogelijkheden ontsluiten. Dit omvat de ontwikkeling van faciliteiten, in lijn met de EU-ambities van het Quantum Internet Initiative, aangedreven door de door Nederland geleide Quantum Internet Alliance: een op verstrengeling gebaseerde pilotfaciliteit die is gebouwd in samenwerking met early adopters. Dit netwerk maakt de validatie van aangepaste gebruikssituaties mogelijk, met behulp van op afstand gekoppelde quantumprocessors voor bijvoorbeeld snelle coördinatie. Ten tweede omvat dit de ontwikkeling van openaccess-faciliteiten om een breed quantumnetwerk-ecosysteem mogelijk te maken dat ontwikkelingen langs de hele waardeketen ondersteunt. Dit omvat een Nederlandse openaccess-faciliteit ter ondersteuning van de open ontwikkeling van use cases en softwaresystemen, wat de creatie van een Nederlandse platformindustrie stimuleert. Op de lange termijn bereiden deze twee activiteiten integratie voor met een Europees netwerk gebaseerd op verstrengeling dat quantumapparaten verbindt met toepassingen zoals blind quantum computing, distributed quantum computing en distributed quantum sensing.

Om te voldoen aan de behoeften van de quantumcryptografie gemeenschap, omvat open access ook een Advanced Quantum Cryptography hub. Het kernidee van zo'n hub is om leveranciers en apparatuurontwikkelaars te verbinden met quantumcryptografen om nieuwe toepassingen en gebruikssituaties voor quantumnetwerken te ontwikkelen. De focus van deze hub zou liggen op cryptografen die applicaties en beveiligingsbewijzen ontwikkelen tegen goed gedefinieerde interfaces en apparatuur die door leveranciers worden geleverd. Nederland is goed gepositioneerd om wereldwijd leider te worden op dit gebied dankzij sterke quantumcryptografiecapaciteiten.

Een belangrijke overkoepelende activiteit die deel zal uitmaken van alle werkpakketten, richt zich op het stimuleren van applicatieontwikkeling en de adoptie van quantumnetwerken. Dit kan worden gedaan door eindgebruikers te betrekken bij het definiëren van KPI's of functionaliteiten die een nieuwe generatie netwerkknooppunten zou moeten hebben, en door eindgebruikers actief te betrekken bij de implementatie van quantumnetwerken. Deze eindgebruikers kunnen zowel uit de industrie komen (bijvoorbeeld leveranciers van kritieke infrastructuur) als uit de overheid (bijvoorbeeld ministeries). Internationale telecomeaanbieders kunnen een sleutelrol spelen in het stimuleren van deze adoptie.

De werkpakketten worden continu parallel uitgevoerd via iteratieve ontwikkelingscycli – zie Tabel 4-3. Wanneer mijlpalen zijn bereikt voor nieuwe technologische mogelijkheden, kunnen deze apparaten worden ingezet in lokale testomgevingen en zodra ze volwassener zijn, kunnen ze worden ingezet in de operationele connectiviteitbackbone. De uitkomsten van dit proces voeden direct in de volgende technologische ontwikkelingscyclus.

Tabel 4-3 Gantt-diagram voor de uitvoering van het quantumcommunicatieprogramma.

Werkpakket	Grootte (€ mln)	Totale duur									
		2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
WP1: Ontwikkeling en testen van quantum-netwerkapparaten	160			★	★	★					
WP2: Het inzetten van de operationele quantumconnectiviteitbackbone	240		★		★			★			★
WP3: Geavanceerde toepassingen mogelijk maken	200			★		★					★

Enkele voorbeelden van ambitieuze mijlpalen zijn:

- Werkpakket 1
 - **2028:** MDI-QKD netwerk over een afstand van 500 km en publicatie van standaard voor quantumnetwerkapparaat;
 - **2029:** Lokale testbeds voor quantuminternet-uitwisselingspunt in Amsterdam en satelliet-gebaseerde connectiviteitstests in Noordwijk;

- **2030:** Mass-multiplexed gebufferde verstrengelingsknopen (1.000+ modi).
- Werkpakket 2
 - **2027:** Eerste stap in een nationaal netwerk met minstens zeven knooppunten op meerdere eindgebruikerssegmenten;
 - **2029:** Volgende stap in het nationale netwerk waarbij nog eens elf knooppunten worden verbonden op meerdere eindgebruikerssegmenten;
 - **2032:** Lancering van quantum internet exchange point in Amsterdam;
 - **2035:** Eerste knooppunten van landelijke quantuminternet ingezet.
- Werkpakket 3
 - **2028:** Geavanceerde toepassingen voor quantumcommunicatie gerelateerd aan QDNL CAT-2;
 - **2030:** Eerste demonstratie van op verstrengeling-gebaseerde snelle coördinatie in een metropolitaanse pilotfaciliteit;
 - **2035:** Distributed quantum computing op afstand.

4.2.5. Verbinding met andere actieagenda's

Er is een verband met de cybersecurity-actieagenda via post-quantum cryptografie (PQC), wat in die agenda wordt geborgd. Terwijl QKD de lagere lagen van de internetstack beveiligt via fysieke principes, biedt PQC quantumveilige protocollen gebaseerd op wiskunde die typisch wordt toegepast in de hogere applicatielagen. Uiteindelijk zal de combinatie van PQC en QKD deel uitmaken van een volledig quantum-secure beveiligingspakket voor eindgebruikers.

Er is ook een verband met de agenda voor Mechatronica en Optomechatronica, aangezien laser-satellietcommunicatie daar binnen de scope valt, wat nauw verwant is aan satelliet-gebaseerde quantumnetwerken. Op de lange termijn moeten deze twee netwerktypen (terrestrisch en satelliet-gebaseerd) met elkaar verbonden zijn als onderdeel van een groter overkoepelend netwerk, dus het is cruciaal dat deze initiatieven op één lijn blijven. Vooral het Europese Eagle-1 systeem en de laser-satcomhub in Noordwijk zullen cruciaal zijn voor satelliet-gebaseerde QKD-verbindingen in het komende decennium.

De agenda voor Optical Systems and Integrated Photonics omvat de ontwikkeling van geïntegreerde fotonische circuits, fotondetectoren en optische interfaces voor quantumtechnologieën, inclusief quantumcommunicatie. Deze componenten kunnen allemaal worden gebruikt voor verdere ontwikkeling, miniaturisatie en opschaling van quantumnetwerkapparaten.

Ten slotte richt één van de waardeketenanalyses van de Regionale Ontwikkelingsagentschappen (ROMs) zich op quantumcommunicatie als onderdeel van hun Regionale Versterkingsplannen NTS.³¹ Dit maakt een sterke verbinding mogelijk tussen de nationale en regionale plannen binnen Nederland, wat bijvoorbeeld nuttig is voor het onderling verbinden van lokale testomgevingen.

31 [*Trots op het Regionaal Versterkingsplan NTS – samen verder bouwen aan sterke waardeketens – ROM's*](#)

4.2.6. Financiële breakdown

De totale omvang van het programma bedraagt €600 miljoen, zie Tabel 44.

Tabel 4-4 Schatting van de publieke en private kosten per werkpakket voor het quantumcommunicatie programma.

Werkpakket	Totale kosten (€ mln)	Publiek (€ mln)	Privaat (€ mln)
WP1: Ontwikkeling en testen van quantumnetwerkapparaten	160	128	32
WP2: Het inzetten van de operationele quantumconnectiviteit backbone	240	168	72
WP3: Geavanceerde toepassingen mogelijk maken	200	140	60
Totaal programma	600	436	164

Als uitgangspunt voor de publiek-private splitsing gebruiken we de 20% private co-financieringsvereiste uit het QDNL-programma als baseline, die geleidelijk toeneemt tot 40%. In WP1 verwachten we een iets lagere private bijdrage omdat de ontwikkelingen daar fundamenteeler zullen zijn, terwijl de activiteiten in WP2 en WP3 meer mogelijkheden bieden voor private co-financiering, bijvoorbeeld door eindgebruikers.

Omdat er te veel onzekerheid is over de instrumenten en middelen die de komende tien jaar beschikbaar zullen zijn (bijvoorbeeld financiering van de TKI's of het Quantum Flagship), kunnen we geen betekenisvolle verdeling van de financiering over de jaren maken. In het algemeen verwachten we dat het grootste deel van de financiering uit nieuwe activiteiten en nieuwe middelen moet komen.

Naast industriegerichte innovatie en R&D vereist dit programma ook een aanzienlijke investering in infrastructuur om alle ambities te realiseren. Deze infrastructuur zal nodig zijn voor de ontwikkeling van zowel de lokale testbeds van WP1, de nationale quantumconnectiviteit backbone van WP2, als de pilotfaciliteiten en cryptografiehub van WP3. Gezamenlijk zal dit minstens €200 miljoen aan investeringen vereisen, die kunnen voortkomen uit een grotere impulsfinanciering voor nationale quantumtechnologie-infrastructuur.

4.3. Innovatieprogramma 3: Quantsensoren ontwikkelen voor kritieke toepassingen

Het doel van dit innovatieprogramma is om Nederland te vestigen als technologische leider op het gebied van quantsensoren. Dit zal worden bereikt door de quantsensoren te industrialiseren die economisch voordeel kunnen bieden in markten waarin er een raakvlak is tussen de expertise van het Nederlandse industriële ecosysteem en een externe marktvraag.

4.3.1. Drivers

Quantumsensing is een breed vakgebied waarin verschillende technologieën kunnen worden toegepast in uiteenlopende toepassingsgebieden. Daarom bestaan er veel kansen, duidelijke drijfveren en ontwikkelingsuitdagingen. De gemeenschappelijke factor is dat een quantumsensor een duidelijk voordeel moet bieden ten opzichte van bestaande sensoren om waarde te bieden aan eindgebruikers. De focus van dit programma zal liggen op drie toepassingsgebieden waarbij quantumsensoren een duidelijk voordeel bieden en Nederland een technologische positie heeft:

- Metrologie en foutanalyse
- Dual-use detectietechnologieën
- Levens- en gezondheidswetenschappen

In next-generation computingplatforms, zoals fotonische, neuromorphic en quantumcomputing, worden functionele eigenschappen, bijvoorbeeld eigenschappen gerelateerd aan elektrische stromen en magnetische velden, van cruciaal belang. Deze functionele eigenschappen kunnen niet worden aangepakt door de traditionele metrologische instrumenten van de halfgeleiderindustrie, die zich richten op de kritische dimensie. Daarom zal een nieuwe set sensorinstrumenten nodig zijn voor metrologie en foutanalyse in deze zich ontwikkelende vakgebieden. Dit vormt zowel een directe economische drijfveer in het bedienen van deze markten, als een technologische drijfveer ter ondersteuning van de zich ontwikkelende Nederlandse next-generation computing-industrieën. Op dit gebied is Nederland goed gepositioneerd om een leidende rol te spelen dankzij het rijke academisch en industriële ecosysteem in next-generation computing en de aanwezigheid van de halfgeleiderindustrie. Daaruit kan expertise worden gehaald in het ontwikkelen van metrologische standaarden en werkwijzen. De halfgeleiderindustrie kan ook als belangrijke eindgebruiker van deze tools optreden. Cruciaal is dat de vraag naar op quantumsensing-gebaseerde metrologietools niet beperkt is tot computing. Het omvat ook sectoren als quantummaterialen en energieopslag, die een positieve bijdrage leveren aan de energietransitie.

Er ontstaat aanzienlijke vraag vanuit de defensie-industrie naar sensoren voor radiofrequentie (RF)-detectie en -positionering, navigatie en timing (PNT). Deze sensoren presteren beter dan klassieke sensoren die vaak gebaseerd zijn op verouderde technologie en niet zijn uitgerust om het versnellend tempo van defensietechnologie aan het front bij te benen. Er is een sociale drijfveer bij de ontwikkeling van deze technologieën in Nederland vanwege de behoefte aan een robuuste Europese defensie-industrie. Daarnaast is er bovendien een economische driver achter de ontwikkeling van deze technologieën voor de enorme wereldwijde civiele markt voor RF-sensing en PNT, bijvoorbeeld in zelfrijdende voertuigen.

Ten slotte vereist de vergrijzende bevolking en de toename van chronische ziekten eerdere, preciezere diagnostiek. Quantumsensing kan zwakke ziekte-indicatoren, zoals oxidatieve stress en neurale signalering, aan het licht brengen lang voordat symptomen verschijnen. Realtime cellulaire uitlezingen maken ook gepersonaliseerde geneesmiddelrespons-profilering mogelijk. Deze vooruitgang sluit aan bij de maatschappelijke missies op het gebied van gezondheidszorg. Verbeterde diagnostiek kan de zorgkosten verlagen door preventie en gerichte behandeling mogelijk te maken.

4.3.2. Kennisontwikkeling

De werkpakketten binnen dit innovatieprogramma draaien om een reeks sensorinstrumenten waarvan veel van de kernmechanismen volwassen technologie zijn. Er blijven echter uitdagingen bestaan op het gebied van sensorfunctionaliteit en systeemintegratie. In het bijzonder is voor metrologie verdere ontwikkeling noodzakelijk om de specifieke behoeften van verschillende eindgebruikers te begrijpen en te vervullen, sensoren in cryogene omgevingen te laten functioneren en schaalbaarheid en gemeenschappelijke workflows, standaarden en benchmarks te ontwikkelen. PNT-sensoren zijn een volwassen technologie, maar vereisen integratie voor ruige omstandigheden, terwijl aanzienlijke ontwikkeling op sensorniveau nog steeds nodig is voor RF-detectie. Ten slotte moeten voor toepassingen in de gezondheidszorgen vragen worden beantwoord met betrekking tot sensorontwerp, werking en integratie met biologische systemen.

Naast de ontwikkeling van bestaande sensormodi bestaat een belangrijk gebied van kennisontwikkeling uit het ontwikkelen van nieuwe type quantumsensoren. Deze kunnen bedoeld zijn om beter te voldoen aan de bestaande marktbehoeften en om nieuwe toepassingen aan te pakken zodra deze ontdekt worden via het systeemintegratieproces en organisch ontstaan.

4.3.3. Impact op verdienvermogen en maatschappelijke uitdagingen

Nu de financiering voor Quantum Delta NL afloopt, bevindt de Nederlandse quantumindustrie zich op een cruciaal punt om te profiteren van eerdere investeringen. Door dit programma uit te voeren, zal Nederland groeimogelijkheden in meerdere sectoren ontwikkelen, sociale en technische uitdagingen aanpakken op het gebied van gezondheid, next-generation computing en defensie, en krijgt het de kans om control points in opkomende sectoren te veroveren, waarmee ons toekomstig verdienvermogen wordt veiliggesteld.

4.3.4. Plan van aanpak

Dit innovatieprogramma bestaat uit één werkpakket voor ieder van de drie geïdentificeerde toepassingsgebieden, elk reikend tot 2035. Deze werkpakketten zullen gebaseerd zijn op publiek-private samenwerking. De vroege fasen van elk werkpakket worden voornamelijk publiek gefinancierd, met steun van bijdragen in natura van de bedrijven die het ontwikkelingswerk uitvoeren. Daarnaast wordt ook €10 miljoen aan financiering toegewezen door Quantum Delta NL via challenge-based calls. Naarmate kennisvragen worden beantwoord en sensoren worden ontwikkeld en geïntegreerd, zal de totale financieringsbehoefte toenemen. Durfkapitaalinvesteringen en inkomsten uit sensorsystemen zullen echter een steeds groter deel van de kosten uitmaken. Tegen 2035 zal dit programma een sector hebben gecreëerd die kan floreren op private investeringen en gegenereerde inkomsten.

WP1: Quantsensing voor metrologie en foutanalyse

Dit werkpakket zal opkomende metrologiebehoeften aanpakken met quantumsensoren zoals millikelvin scanning magnetische velddetectoren en single-photon-detectoren. Use cases zullen zowel quantum- als niet-quantumtoepassingen omvatten, zoals hierboven beschreven. De belangrijkste ontwikkelingsdrijfveer komt, althans aanvankelijk, van de bedrijven die de

sensorinstrumenten zullen produceren, aangezien het voordeel van quantumsensoren ten opzichte van alternatieven in het algemeen moet worden gevalideerd voordat er interesse uit de industrie ontstaat. Een eerste ronde validatieprojecten, gevraagd door de Nederlandse quantumindustrie en Nederlandse sensorfabrikanten, zal het ontwikkelingspad en specifieke gebruiksscenario's voor verschillende sensoren uiteenzetten. Een paar van deze projecten worden geselecteerd voor de volgende ronde, waarbij de focus wordt verkleind tot een handvol sensoren. Er bestaan quantumsensoren voor metrologie van meerdere volwassenheidsniveaus, waarvan sommige binnen het komende jaar omzet kunnen genereren. Daarom zullen projecten enige variatie hebben in hun tijdlijnen, maar de volgende structuur:

- Valideer use cases voor metrologische tools samen met academische partners, kennisinstituten en vroege gebruikers uit de industrie;
- Valideer waardepropositie voor ontwerp en karakterisering van apparaten en materialen door systeemintegratie met academische en industriële partners, waardoor de verkoop groeit;
- Ontwikkel tools om fabricage op te schalen samen met industriële partners;
- Standaardiseer tools, stel gemeenschappelijke eisen, workflows en supply chains vast.

WP2: Dual-use quantumsensortechnologieën

Hoewel bij Nederlandse kennisinstituten zoals TNO expertise bestaat, is er onvoldoende focus van Nederlandse quantumsensingbedrijven voor defensietoepassingen en van defensiebedrijven voor quantum sensing. Daarom zal de nadruk voor financiering in de vroege fasen van de uitvoering liggen op het opbouwen van expertise binnen bedrijven en te voldoen aan de vraag naar dual-use quantumsensoren. De belangrijkste opdrachten zullen daarom zijn:

- Ontwikkel kennis over quantumsensing bij Nederlandse bedrijven en verbind quantumsensingbedrijven met het defensie-ecosysteem en eindgebruikers;
- Maak gebruik van de dringende behoefte van de defensie-industrie door PNT- en RF-detectiesensoren te ontwikkelen die voldoen aan de gestelde eisen;
- Identificeer civiele eindgebruikers van de technologie die ontwikkeld wordt voor defensie, en voer systeemintegratie uit om aan hun behoeften te voldoen zodat het dual-use-potentieel van deze technologieën wordt benut.

Er wordt verwacht dat het merendeel van de publieke financiering binnen dit werkpakket uit toekomstige defensie-uitgaven zal komen.

WP3: Quantumsensing voor biowetenschappen

De ontwikkeling van quantumsensing voor de biowetenschappen in Nederland is voornamelijk gericht op NV-centres in nanodiamant. Net als bij de metrologie moeten projectvoorstellen worden ontworpen met de Nederlandse quantumindustrie om de ontwikkelings- en commercialisatieroutes voor nanodiamant-gebaseerde technieken en complementaire technologieën te beschrijven. Er bestaan meerdere mogelijkheden om biowetenschappelijke en gezondheidsproblemen met quantumsensoren aan te pakken.

Het derde werkpakket zal bestaan uit verschillende parallelle sporen:

- Ontwikkel en optimaliseer sensorplatforms;
- Ontwikkeling van technologie voor oppervlaktefunctionalisatie om biomoleculen aan sensoren te koppelen;
- Gebruik de sensoren in celgebaseerde assays voor geneesmiddelenontdekking met farmaceutische partners, waarmee wordt aangetoond dat quantumsensoren nieuwe inzichten kunnen bieden in de effectiviteit of toxiciteit van geneesmiddelen;
- Voer pilotstudies uit op klinische prototypes voor gerichte diagnostiek;
- Voer systeemintegratie uit en schaal op.

De bovenstaande tekst schetst een routekaart voor quantumsensing voor de komende tien jaar, gebaseerd op de stand van de technologie en markt op basis van de huidige inzichten, grotendeels gebaseerd op de bestaande sensortypes. Desondanks is quantumtechnologie een snel ontwikkelend vakgebied, waardoor het belangrijk is om het pad dat de industrie zal nemen niet te veel vast te leggen. Er moet sprake zijn van flexibiliteit om de weg vrij te laten voor volgende generatie sensortypes en onverwachte toepassingsgebieden. Hierdoor verwachten we een parallelle uitvoering van het programma over de tijd, zoals te zien in Tabel 4-5.

Tabel 4-5 Gantt-diagram voor de uitvoering van het quantumsensing programma.

Werkpakket	Grootte (€ mln)	Totale duur									
		2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
WP1: Quantumsensing voor metrologie en foutanalyse	90										
WP2: Dual-use quantumsensor- technologieën	65										
WP3: Quantumsensing voor biowetenschappen	60										

4.3.5. Verbinding met andere actieagenda's

Dit innovatieprogramma sluit aan bij de Optical Systems and Integrated Photonics Actieagenda. De OSIP-agenda omvat innovatieprogramma's voor quantum photonic integrated circuits (QPIC's). QPIC-productie is zowel een potentiële eindgebruiker voor quantumsensor-gebaseerde metrologie-instrumenten als een potentiële bron van quantumsensoren voor andere toepassingen.

Dit innovatieprogramma sluit ook aan bij de Semiconductor Technologies Actieagenda via het

Chip Design innovatieprogramma. Quantummetrologie-instrumenten kunnen een rol spelen bij het meten van functionele eigenschappen van chips en het uitvoeren van foutanalyses tijdens het onderzoeks- en ontwikkelingsproces. Als dit gebruiksscenario wordt gevalideerd, zou de halfgeleiderindustrie een belangrijke eindgebruiker van quantumsensoren zijn.

Daarnaast sluit het derde werkpakket aan bij de Biomolecular and Cell Technologies Actieagenda, waarbij quantumsensoren fungeren als een potentieel instrument voor onderzoek en ontwikkeling binnen het Organ on a Chip-innovatieprogramma.

4.3.6. Financiële breakdown

De totale omvang van het programma bedraagt €215 miljoen, waarbij meer dan de helft uit private financiering kan komen – zie Tabel 4-6.

Tabel 4-6 Schatting van de publieke en private kosten per werkpakket voor het quantumsensing programma.

Werkpakket	Totale kosten (€ mln)	Publiek (€ mln)	Privaat (€ mln)
1. Quantumsensing voor metrologie en foutanalyse	90	30	60
2. Dual-use quantumsensortechnologieën	65	45	20
3. Quantumsensing voor biowetenschappen	60	30	30
Totaal programma	215	105	110

4.4. Innovatieprogramma 4: Industriële maakcompetenties, componenten en (sub)systemen voor quantumtechnologie

Het doel van dit innovatieprogramma is het ontwikkelen van sleutelcapaciteiten om (sub)systemen te ontwerpen en bouwen die de productie, verpakking, testen en integratie van quantumtechnologieën mogelijk maken, waarmee Nederland centraal staat in de wereldwijde quantumtoeleveringsketen.

4.4.1. Drivers

De belangrijkste drijfveren achter de beoogde ontwikkeling komen voort uit een combinatie van technologische ambitie, economische kansen en maatschappelijke behoefte aan strategische autonomie van EU en Nederland in quantumtechnologieën. Technologisch vereist de snelle wereldwijde race naar grootschalige quantumcomputing doorbraken in productie, verpakking en testen die de kloof kunnen overbruggen tussen laboratoriumprototypes en industriële systemen op grote schaal. Het vermogen om subsystemen voor quantumcomputers, communicatiesystemen en sensoren te bouwen, te integreren en te valideren, vereist fundamentele vooruitgang in precisietechniek, cryogene verbindingen, geïntegreerde elektronica en quantum-grade metrologie. Economisch gezien positioneert het opzetten van dergelijke capaciteiten de Nederlandse industrie op belangrijke control points in de internationale quantumtoeleveringsketen en zal het spillover-toepassingen vinden in andere hightechsectoren. Maatschappelijk ondersteunt het ontwikkelen

van deze productiecapaciteiten een technologische soevereiniteit door de afhankelijkheid van buitenlandse leveranciers te verminderen en innovatie-ecosystemen te bevorderen die waardevolle banen en technische expertise creëren. Daarmee ligt er de basis voor een duurzame en strategisch onafhankelijke quantumindustrie die zowel economische groei als technologische vooruitgang kan stimuleren.

4.4.2. Kennisontwikkeling

De overgang naar de productie van grootschalige aantallen qubits, fotondetectoren, QKD-transceivers of quantumsensoren vereist inzicht in hoe de prestaties van quantumtechnologie behouden kan blijven bij de overgang van laboratoriumprototypes naar grootschalige productie. Dit omvat vragen over materiaalzuiverheid, interface-kwaliteit, thermisch beheer en de beperkingen van huidige nanofabricage- en verpakings- en assemblagemethoden, waaronder cryogene compatibiliteit. Een andere cruciale uitdaging ligt in het ontwerpen en ontwikkelen van schaalbare cryogene architecturen die een hoge integratiedichtheid en nauwkeurige quantumcontrole mogelijk maken. Traditionele halfgeleiderproductietools zijn onvoldoende om aan deze eisen te voldoen. Daarom is er een dringende behoefte om speciale apparatuur te ontwerpen en te bouwen die specifiek geoptimaliseerd is voor de productie van quantumtechnologieën. Dergelijke instrumenten moeten assemblage met hoge precisiemogelijk maken, fotonische en/of supergeleidende verbindingen met lage verliezen ondersteunen. Daarnaast moeten zij beschikken over metrologiesystemen die in staat zijn om apparaten te testen en valideren bij cryogene temperaturen en gevoeligheden op quantumniveau. De ontwikkeling van deze nieuwe instrumenten zal niet alleen reproduceerbare fabricage ondersteunen, maar ook nieuwe standaarden neerzetten voor quantum-grade packaging, testen en screening. Deze capaciteiten gaan verder dan wat momenteel mogelijk is met conventionele halfgeleiderapparatuur en zijn gebaseerd op de behoeften van de quantumtechnologie-toeleveringsketen.

4.4.3. Impact op verdienvermogen en maatschappelijke uitdagingen

De ontwikkeling van schaalbare quantumsubsystemen, productieprocessen en speciale apparatuur zal een diepgaande impact hebben op zowel het verdienvermogen als het vermogen om grote maatschappelijke uitdagingen aan te pakken. Economisch gezien zal het opzetten van industriële capaciteiten voor de productie, packaging, testen en integratie van grootschalige of hoog-volume quantumsystemen, de betrokken kennisinstellingen en quantum- en toeleveringsbedrijven aan de voorhoede van een snelgroeiende wereldmarkt plaatsen. Op basis van McKinsey-ramingen die uitgaan van een quantumhardwaremarkt van €15 miljard in 2035, vertegenwoordigt het deel productie, packaging-, testen en integratie een jaarlijkse marktpotentie van €6 tot 8 miljard, uitgaande van een vergelijkbaar aandeel als in de halfgeleiderindustrie. Het verwerven van 5 procent van dit segment positioneert Nederland op het verkrijgen van €375 miljoen aan jaarlijkse economische activiteit. Deze ambities kunnen alleen worden gerealiseerd door een bloeiend ecosysteem waarin partners samenwerken. Academische instellingen en kennisinstituten (zoals de NanolabNL-infrastructuur) spelen een cruciale rol in fundamenteel onderzoek en talentontwikkeling voor de productie van quantumtechnologie, maar het is de industrie die uiteindelijk de technologische grenzen verlegt en marktklare oplossingen voor Nederland levert.



Het programma bouwt voort op een bestaande Nederlandse quantumtoeleveringsketen bestaande uit bedrijven met vijf tot tien jaar commerciële basis, die in staat zijn complexe geïntegreerde producten te produceren, assembleren en exporteren, gecombineerd met een sterke industriële basis van maak- en engineeringbedrijven. Deze volwassenheid biedt een solide basis om innovatie te versnellen en de productie op te schalen om aan de internationale vraag te voldoen. Door control points binnen de wereldwijde waardeketen van quantumtechnologie te verzekeren, versterkt dit initiatief de technologische soevereiniteit en zorgt het ervoor dat economische waarde, expertise en productiecapaciteit binnen Nederland blijven. Maatschappelijk gezien zullen schaalbare en betrouwbare quantumsystemen baanbrekende oplossingen mogelijk maken voor uitdagingen zoals klimaatmodellering, materiaalontdekking, dual-usetoepassingen en geneesmiddelenontwikkeling, met rekenmogelijkheden die ver uitstijgen boven die van klassieke systemen. De innovaties van het programma op het gebied van cryogene integratie, metrologie en precisieproductie zullen spillover-effecten genereren naar andere deeptechsectoren, waardoor het innovatieve vermogen van Nederland op verantwoorde wijze wordt versterkt en het leiderschap in quantumtechnologie en geavanceerde maakindustrie wordt uitgebouwd.

4.4.4. Plan van aanpak

Dit innovatieprogramma heeft als doel om uiterlijk in 2035 een sterke Nederlandse basis te realiseren voor het ontwerpen, produceren, verpakken en testen van quantumtechnologie op industriële schaal. Het programma ondersteunt de ontwikkeling en inzet van quantumcomputers, -netwerken en -sensoren, en creëert daarbij strategische control points in internationale waardeketens. Het programma blijft in de tijd open voor nieuwe deelnemers, technologieën en projectideeën.

Wij stellen voor het programma te organiseren langs twee complementaire programmalijnen (pijlers).

Pijler A – Schaalbare productie van quantumsubsystemen

Deze pijler richt zich op de ontwikkeling van schaalbare architecturen, subsystemen en productiemethoden die quantumtechnologie van laboratoriumprototypes naar industriële producten brengen. Uitgaande van systeemdoelstellingen voor 2035 richten consortia zich op kritieke quantumcomponenten of -subsystemen waarvan de prestaties en kosten bepalend zijn voor de Nederlandse concurrentiekracht. Projecten worden gedreven door knelpunten die door bedrijven zijn geïdentificeerd op gebieden zoals fabricage, packaging, interconnects, cryogenica, regelelektronica en software. Consortia definiëren gezamenlijke ontwikkelpaden die de opbrengst (yield), reproduceerbaarheid en maakbaarheid op schaal verbeteren, en die kunnen worden geïmplementeerd door Nederlandse hightech-maakbedrijven en hun toeleveranciers.

Voorbeeldprojecten zijn:

- Schaalbare productie van single-photon-detectorsystemen;
- Schaalbare cryogene I/O-ketens voor meerdere platforms; en subsysteem-demonstrators die de maakbaarheid aantonen bij relevante volumes;
- Cryo-chipontwerp om integratie te bevorderen, waardoor het mogelijk is op te schalen naar



- miljoenen qubits;
- Geminiaturiseerde energiezuinige quantumcommunicatiemodules en quantumsensoren;
- Materiaalmodellering en -ontwikkeling voor cryogene temperaturen (assemblage, chiptechnologie, interfaces).

Deze voorbeelden illustreren de reikwijdte, maar de pijler blijft open voor andere subsystemen en hardwareplatforms.

Pijler B – Toepassingsgedreven apparatuur en metrologie voor quantumproductie

Deze pijler richt zich op gespecialiseerde apparatuur en metrologie waar conventionele halfgeleider apparatuur tekortschiet. Het doel is om tools te ontwerpen, bouwen en valideren die industriële productie en kwalificatie van quantumtechnologie mogelijk maken, over verschillende modaliteiten en toepassingen heen. Consortia verbinden precisie- en mechatronicaleveranciers met quantumbedrijven om dergelijke apparatuur gezamenlijk te ontwikkelen en te integreren in realistische productieprocessen.

Voorbeeldprojecten zijn:

- Packaging tools met lage verliezen voor multi-fiberoplossingen voor fotonische geïntegreerde circuits bij cryogene temperaturen;
- Test- en screeningssystemen op wafer- en moduleniveau voor quantumapparaten;
- Benchmarking- en diagnostische tools voor quantumsubsystemen inzetbaar voor overtoepassing bij van computers, communicatie en sensoren.

Ook hier gaat het om mogelijke startprojecten; de pijler blijft open voor aanvullende testapparatuur en metrologie die meerdere platforms en toepassingen bedienen. Quantumsensoren als zodanig, bijvoorbeeld voor metrologische toepassingen, vallen onder het quantumensing-innovatieprogramma.

In beide pijlers stimuleren we door industrie geleide consortia (met optionele deelname van kennisinstituten) met iteratieve oproepen, demonstratoren en roadmap-updates. Hiermee borgen we dat het programma meebeweegt met internationale ontwikkelingen en het op de lange termijn Nederlandse de control points in de quantumwaardeketen versterkt.

Tabel 4-7 Gantt-diagram voor de uitvoering van het innovatieprogramma voor het produceren van quantumtechnologie.

Pijlers / werkpakket	Grootte (€ mln)	Totale duur									
		2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
A. Schaalbare productie van quantum-subsystemen	120										
B. Toepassingsgedreven apparatuur en metrologie voor quantumproductie	120										

4.4.5. Verbinding met andere actieagenda's

Dit programma bouwt voort op generieke fotonische platforms, packaging en optische communicatietechnologieën die zijn ontwikkeld in de Optical Systems en Integrated Photonics-agenda, en voegt daar de quantumspecifieke eisen aan toe (cryogene werking, ultra-low loss, quantum-grade metrologie) die nodig zijn om ze om te zetten in maakbare quantumsubsystemen.

Waar de Process Technologies-agenda zich richt op grootschalige chemische en materiaalkundige conversieprocessen, kan dit innovatieprogramma gebruikmaken van nieuwe materialen, coatings en procesroutes die de betrouwbaarheid, stabiliteit en levensduur van quantumcomponenten en cryogene assemblages verbeteren.

Dit innovatieprogramma maakt sterk gebruik van Nederlandse sterktes in mechatronica, motion control en optomechanisch ontwerp, om hoge precisie, cryo-compatibele packaging en metrologieapparatuur voor quantumhardware te realiseren. Hierin ligt een verbinding met de Actieagenda voor Mechatronica en Optomechatronica.

Tenslotte werkt het innovatieprogramma nauw samen met Semiconductor Technologies op het gebied van chipontwerp, geavanceerde packaging en apparatuur, maar richt het zich specifiek op het aanpassen en uitbreiden van deze mogelijkheden om te voldoen aan de extreme prestaties en omgevingseisen van quantum technologieën.

4.4.6. Financiële breakdown

De totale omvang van het innovatieprogramma bedraagt €240 miljoen zoals te zien is in Tabel 48. Deelnemende bedrijven zullen gedeeltelijk in natura bijdragen om hun R&D-bijdrage te cofinancieren, zoals weergegeven als private cofinanciering in de onderstaande tabel.

Tabel 4-8 Schatting van de publieke en private kosten per werkpakket voor het innovatieprogramma voor het produceren van quantumtechnologie.

Pilaar / werkpakket	Totale kosten (€ mln)	Publiek (€ mln)	Privaat (€ mln)
A. Schaalbare productie van quantumsubsystemen	120	100	20
B. Toepassingsgestuurde apparatuur en metrologie voor quantumproductie	120	100	20
Totaal programma	240	200	40

We hebben een nieuw financieel instrument nodig dat de industrie direct kan financieren voor cruciale R&D-activiteiten zoals ontwerp, systeemengineering, architectuur en technologische ontwikkeling. Onderzoeks- en kennisinstituten zullen naar verwachting een kleine rol spelen in het programma. De industrie zal het voortouw nemen in het programma, om grenzen te verleggen en marktklare oplossingen voor Nederland te leveren.

4.5. Innovatieprogramma 5: Fast track naar waardevolle toepassingen van quantumcomputing

Het doel van dit innovatieprogramma is het versnellen van de ontwikkeling en verbetering van waardevolle toepassingen van quantum computing, via algoritmen, methoden, software- en applicatieontwikkeling, evenals ondersteunende softwaretools en softwarestacks.

4.5.1. Drivers

Om de waarde van quantumcomputers te ontsluiten, zijn software en algoritmen nodig om uitdagingen in zowel bestaande als toekomstige industrieën op te lossen. Huidige quantumcomputers beschikken over te weinig fouttolerante qubits om praktische en economisch waardevolle berekeningen uit te voeren. Hoewel er aanwijzingen zijn dat quantumcomputers op verschillende gebieden een gamechanger kunnen zijn, zijn er momenteel weinig concrete toepassingen bekend. Door te investeren in algoritme- en softwareontwikkeling kan de Nederlandse industrie technologisch leiderschap tonen in de waardevolle toepassing van quantumcomputers. De eerste toepassingen van quantumcomputers zullen naar alle waarschijnlijkheid plaatsvinden in de chemische en farmaceutische industrie en in materiaalontwikkeling. Gezien de huidige positie van Nederland op al deze toepassingsgebieden, biedt dit een meer dan solide basis voor Nederland om een aanzienlijk strategisch voordeel te behalen. Naarmate er meer toepassingen worden ontwikkeld, moeten we flexibel genoeg blijven om ook in andere toepassingsgebieden te investeren.

4.5.2. Kennisontwikkeling

Belangrijke kennisontwikkeling die in dit innovatieprogramma zal worden behandeld, zijn onder andere:

- Welke algoritmen en methoden (ook gerelateerd aan foutcorrectie) zijn nodig voor

- doorbraken in quantumchemie, materiaalkunde, moleculair ontwerp?
- Welke softwarelagen moeten worden ontwikkeld om naadloos te schakelen tussen klassieke (HPC en AI) computing en quantum computing?
 - Hoe en welke quantumsoftwaretools zijn nodig om het ontwerp en de implementatie van quantumalgoritmen te verbeteren en te vergemakkelijken?
 - Op welke manier kan AI (machine learning) worden ingezet om de ontwikkeling en optimalisatie van quantumcircuits en algoritmen te versnellen?
 - Hoe identificeren we relevante problemen die moeilijk zijn voor klassieke computers en waar quantumcomputers realistische voordelen bieden?
 - Hoe integreren we quantumoplossingen in bestaande software (bijvoorbeeld plug-ins) voor sectoren zoals chemie?
 - Welke componenten van de quantumsoftware-stack zijn cruciaal en zouden in Nederland ontwikkeld moeten worden?
 - Wat zijn de volgende veelbelovende toepassingsgebieden, naast scheikunde en simulatie?
 - Welke basis-algoritmische primitieven en softwaretools kunnen we ontwikkelen die nuttig zijn in veel of alle potentiële toepassingen?

4.5.3. Impact op verdienvermogen en maatschappelijke uitdagingen

Op dit moment zijn er nog weinig quantumsoftware-start-ups in Nederland. Desondanks bevinden de hardware-ontwikkelingen zich nog in een vroeg stadium. Daarom is juist nu het ideale moment om te investeren in quantum software. Analoog aan de ontwikkelingen in de reguliere computerindustrie, zal de markt voor quantumsoftware sterk groeien en relevant worden voor de brede economie. Dit programma slaat een brug tussen de huidige NISQ-technologie (Noisy Intermediate-Scale Quantum) en toekomstige fouttolerante quantum computers, waardoor het 'waardegat' in de quantum-ontwikkeling wordt gevuld. Huidige marktkansen beperken zich tot het verkopen van hardware en integratieoplossingen, terwijl het investeren in algoritmen, software, en use-case-gedreven oplossingen een volledig nieuwe markt ontsluit.

Onderzoek toont dat quantum computing een waarde ontsluit van \$450 tot \$850 miljard over verschillende industrieën:

- medicijnontwikkeling,
- luchtvaartonderzoek,
- chemie en katalyse,
- energie (zonnecellen),
- logistiek (routeoptimalisatie),
- financiën (portfolio-optimalisatie),
- verzekeringen, marktsimulatie),
- AI-algoritmeontwikkeling,
- fraudedetectie, en
- het breken van encryptie.³²

32 <https://www.bcg.com/publications/2024/long-term-forecast-for-quantum-computing-still-looks-bright>

Daarnaast worden er nog toepassingen verwacht waar nu nog geen kijk op is, net zoals de meest waardevolle toepassingen van reguliere computers pas veel later werden ontwikkeld. De quantumsoftware-industrie heeft nu al een waarde van \$0,5 tot \$1 miljard en zal naar verwachting in de komende vijf jaar miljarden bereiken en in de komende tien jaar meer dan \$30 miljard.³³ Verwacht wordt dat verkopers van quantumhardware maar 6% van de totale omzet in de quantumindustrie kunnen realiseren. Groot inzetten op de ontwikkeling van quantumsoftware heeft economisch enorme potentie voor het nationaal verdienvermogen.

Plan van aanpak

Om een realistisch beeld te krijgen van de toepassingen van quantumsoftware, is het goed om naar hardware-ontwikkelingen te kijken. Daarbij kan het aantal logische qubits worden beschouwd als een maat voor de rekenkracht. Zodoende kunnen er drie periodes worden onderscheiden:

- het huidige NISQ-tijdperk (waarin qubits nog te veel fouten bevatten en in een te gering aantal zijn voor praktische toepassingen),
- het eFTQC-tijdperk (early fault-tolerant quantum computing, met eerste toepassingen in bijvoorbeeld vastestofchemie, quantumchemie, materiaalwetenschappen, en cryptanalyse), en het FTQC-tijdperk (volledig fouttolerant) vanaf ongeveer 2035.

Het hoofddoel van dit innovatieprogramma is om meer te bereiken met minder logische qubits. Hiervoor moeten nieuwe algoritmen worden ontwikkeld (voorbij het breken van asymmetrische encryptie), zodat er meer disruptieve toepassingen voor de quantumcomputer zullen ontstaan.

Aangezien er in eerste instantie veel fundamenteel werk moet plaatsvinden op het gebied van algoritmes en methodes, zal er aanvankelijk relatief veel financiering gaan naar academisch geschoolde arbeidskrachten. Naarmate het quantumveld zich ontwikkelt, zal er ook en meer financiering naar hooggeschoolde, gespecialiseerde arbeidskrachten (HBO) gaan. Tijdens het hele innovatieprogramma is toegang tot quantumhardware een belangrijke kostenpost.

Er worden drie verticale markten geïdentificeerd waar de eerste economische toegevoegde waarde van quantumcomputing wordt verwacht:

1. Natuurkundesimulaties (NISQ/eFTQC)
2. Scheikunde/farmacie (eFTQC)
3. Materialenwetenschap (zoals lucht- en ruimtevaart) en optimalisatie (FTQC)

Andere toepassingsgebieden zijn expliciet niet uitgesloten, maar deze gebieden krijgen prioriteit omdat ze het meest veelbelovend zijn.

Hieruit volgen de volgende werkpakketten:

33 <https://market.us/report/quantum-computing-software-market/>



WP1: Quantumalgoritmen en -methoden

Zolang er geen fouttolerante quantumcomputers beschikbaar zijn, kan er al veel voorwerk worden verricht om ons academisch leiderschap te behouden en te vergroten. Dit werkpakket zal zich daarom richten op fundamenteel onderzoek aan kennisinstellingen voor de ontwikkeling van nieuwe algoritmen en methoden.

WP2: AI als enabler

Gedurende het gehele innovatieprogramma is kunstmatige intelligentie (specifiek machine learning) een veelbelovend onderwerp, om meer te doen met minder qubits. Dit werkpakket richt zich op het verbinden van de AI- en quantumgemeenschappen in Nederland om nieuwe oplossingen in beide richtingen te creëren: 'AI4Quantum' en 'Quantum4AI'.

WP3: Software- en applicatieontwikkeling voor commerciële exploitatie binnen tien jaar (eFTQC)

Het ontwikkelen van commercieel interessante toepassingen in het tijdperk van kleine, fouttolerante quantumcomputers vereist:

- Ontwikkeling van low-level softwaretools voor het ontwikkelen van geoptimaliseerde, fouttolerante programma's, evenals compilers en middleware;
- Domein-specifieke omzetting van een industrie-relevant probleem naar een proof-of-conceptmodel, evenals toegang tot diverse HPC-geïntegreerde quantumcomputersystemen om oplossingsalgoritmen te draaien;
- Effectieve mechanismen voor technologieoverdracht om ondernemerschap onder medewerkers van kennisinstellingen te bevorderen, wat leidt tot nieuwe start-ups en spin-offs die zowel softwaretools als applicaties ontwikkelen;
- Kennispartners en onderwijsinstellingen voor het opleiden van hoogopgeleide kenniswerkers als beroepsbevolking bij quantumsoftware- en hardwarebedrijven.

WP4: Software- en applicatieontwikkeling voor commerciële exploitatie (FTQC-tijdperk)

Voor (baanbrekende) toepassingen van grote, fouttolerante quantumcomputers op middellange tot lange termijn is het volgende nodig:

- Fundamenteel onderzoek naar nieuwe algoritmen en methoden, zowel bij kennisinstellingen als in samenwerking met grote industriële bedrijven (zoals chemie, farmaceutische industrie, evenals andere veelbelovende domeinen);
- Hoogwaardige softwaretools voor het ontwikkelen en implementeren van quantumalgoritmen en het compileren daarvan tot efficiënte, geoptimaliseerde, fouttolerante programma's;
- Quantumcomputing-softwarebedrijven die zich richten op FTQC-algoritmen en toegang tot FTQC-computersystemen die deze algoritmen kunnen uitvoeren.

Deze werkpakketten zullen grotendeels parallel worden uitgevoerd – zie Tabel 4-9.

Tabel 4-9 Gantt-diagram voor de uitvoering van het quantumsoftware programma.

Pijlers / werkpakket	Grootte (€ mln)	Totale duur									
		2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
WP1: Quantumalgoritmen en -methoden	60										
WP2: AI als enabler	45										
WP3: Software en applicaties voor exploitatie binnen 10 jaar	35										
WP4: Software en applicaties voor FTQC	50										

4.5.4. Verbinding met andere actieagenda's

Er is een duidelijke verbinding tussen dit innovatieprogramma en de agenda van AI en Data Science. Kunstmatige intelligentie zal de komende jaren veel onderzoeks- en innovatiegebieden transformeren, waaronder quantumcomputing. Hoe dit precies zal werken is nog onbekend, maar er zijn verschillende manieren waarop AI kan helpen bij quantumcomputingoplossingen:

- AI kan direct helpen bij het ontwerpen van quantumalgoritmen,
- AI kan mogelijk downstream worden gebruikt om ruisachtige resultaten om te zetten in betrouwbaardere resultaten, maar
- AI kan mogelijk ook upstream worden ingezet om echte problemen te vertalen naar taken die een quantumcomputer kan uitvoeren.

Een quantumcomputer kan ook waardevolle nieuwe data genereren waarop AI-systemen kunnen leren. Ten slotte kan quantum computing mogelijk worden gebruikt om data te verwerken en zo AI-benaderingen te verbeteren in hybride quantum-AI-toepassingen.

Bovendien is er ook een verband met de cybersecurity-agenda. Door het algoritme van Shor zijn de huidige methoden voor bepaalde asymmetrische encryptie onveilig. Aanvallen zijn mogelijk met een quantumcomputer met enkele duizenden logische qubits, die naar verwachting binnen de komende tien jaar beschikbaar zullen worden (het eFTQC-tijdperk). De Cybersecurity-agenda bevat activiteiten in post-quantum cryptografie (PQC), klassieke methoden waarvan wordt verondersteld dat ze bestand zijn tegen aanvallen met een quantumcomputer. Lokale expertise op het gebied van quantumsoftware is van (inter)nationaal belang, om eventuele aanvallen van quantumcomputers op PQC te herkennen ruim voordat deze praktisch uitvoerbaar zijn, en om tijdlijnen voor het uitfasen van huidige asymmetrische encryptie juist te kunnen inschatten.

4.5.5. Financiële breakdown

De totale omvang van dit innovatieprogramma bedraagt €190 miljoen zoals te zien in Tabel 4-10.

Tabel 4-10 Schatting van de publieke en private kosten per werkpakket voor het quantumsoftware programma.

Werkpakket	Totale kosten (€ mln)	Publiek (€ mln)	Privaat (€ mln)
1. Quantumalgoritmen en -methoden	60	54	6
2. AI als enabler	45	40	5
3. Software en applicaties voor exploitatie binnen 10 jaar	35	30	5
4. Software en applicaties voor FTQC	50	38	12
Totaal programma	190	162	28

Het bestaande QDNL-programma heeft in fase 3 €10 miljoen gereserveerd voor quantumsoftware in de periode tot 2028, inclusief marktontwikkeling en economische waardecreatie. Op Europees niveau zal quantumsoftware naar verwachting onderdeel worden van de Quantum Act, maar de exacte omvang en maatregelen moeten nog worden bepaald. Om de ambities van dit innovatieprogramma te realiseren en Nederland te positioneren als leider op dit gebied, is een aanzienlijke investeringsimpuls van ten minste € 700 miljoen nodig om een kwantum-AI-softwarehub op te zetten, die mogelijk in Amsterdam gevestigd zou kunnen worden.

Er zijn gerichte financiële instrumenten nodig voor het aantrekken van bedrijven die investeren in quantumsoftware-ontwikkelingen voordat er commerciële toegevoegde waarde is en voordat hardware ontwikkelingen overeenkomen met applicaties. De ervaring leert dat 1-op-1 matching weinig marktaantrekking veroorzaakt, en kennisinstellingen hebben ook te weinig eigen middelen om aan de matchingseisen te voldoen.

4.6. Totale financieringsbehoefte

De totale financiering die nodig is om de ambities uit de vijf bovenstaande innovatieprogramma's te realiseren, bedraagt (minstens) **€2.045 miljard**, waarvan ten minste 20% afkomstig is van private investeringen. De bestaande publieke financiering is een schatting van de financiering voor de komende jaren die verbonden is aan de innovatieprogramma's vanuit het NGF, EU-projecten (inclusief de pilot lines), TKI en NWO. Naast de budgetten die beschikbaar zullen worden gesteld voor de uitvoering van de actieagenda, kan de financiering voor de innovatieprogramma's ook uit andere bronnen komen die bijdragen aan de grotere behoefte aan het verhogen van onze nationale publieke en private R&D-uitgaven en economische concurrentiekracht in lijn met het Draghi-rapport.³⁴

³⁴ *Rapport Wennink: de Route naar Toekomstige Welvaart*

Tabel 4-11 Totale financieringsbehoefte voor de Actieagenda quantumtechnologie, verdeeld over private en publieke middelen.

Innovatieprogramma	Privaat (€ mln)	Publiek, bestaand (€ mln)	Publiek, nieuw (€ mln)	Totaal (€ mln)
1. Een 'grand challenge' voor een geïntegreerde quantumcomputer	NTB	50	750	>800
2. Het bouwen van quantumcommunicatienetwerken voor sociaal-economische waarde	164	50	386	600
3. Quantsensoren ontwikkelen voor kritieke toepassingen	110	20	85	215
4. Industriële maakcompetenties, componenten en (sub)systemen voor quantumtechnologie	40	40	160	240
5. Fast track naar waardevolle toepassingen van quantumcomputing	28	10	152	190
Totaal	>342	170	1.533	>2.045

4.7. KPI's

Voor de uitvoering van de innovatieprogramma's hebben we een aantal high-level KPI's geselecteerd die als benchmark kunnen dienen om de voortgang te meten. Deze bouwen voort op de indicatoren die zijn gedefinieerd in het recent gepubliceerde Fase 3-plan van QDNL,⁴ waarbij de omvang van de innovatieprogramma's en hun focus op de industrie worden gebruikt voor extrapolatie. Dit resulteert in de volgende KPI's voor 2035:

- Aanvullende nationale BBP / omzetgroei: **€8 miljard per jaar**;
- Cumulatief aantal quantum-gerelateerde banen in het Nederlandse ecosysteem, waaronder bij start-ups, scale-ups, bedrijven, en fundamenteel en toegepast onderzoek: **10.000**;
- Aantal Nederlandse control points in wereldwijde waardeketens: **3**;
- Cumulatieve particuliere investeringen in start-ups en scale-ups die in Nederland zijn opgericht of gevestigd: **€2,5 miljard**;
- Jaarlijks aantal bedrijven in Nederland dat quantum-gerelateerde activiteiten uitvoert in R&D, fabricage en ontwikkeling (exclusief quantum start-ups): **180**;
- Jaarlijks aandeel van (inter)nationale particuliere cofinanciering in quantum-innovatieactiviteiten, afkomstig van private entiteiten en zelf gegenereerd: **40%**;
- Jaarlijks aantal eindgebruikers dat producten (incl. software), diensten of infrastructuur gebruikt die is ontwikkeld via quantuminnovatie-activiteiten: **minstens 100**;
- Jaarlijks aantal patenten/octrooiaanvragen met betrekking tot quantumtechnologie die zijn gelicenseerd of overgedragen aan derden: **minstens 400**.

4.8. Bestaande activiteiten om op voort te bouwen

Met deze agenda zet Nederland een strategische overgang neer van laag-TRL R&D aan universiteiten, onderzoeksinstituten en start-ups, naar de industriële R&D die nodig is om de kloof tussen prototypes en schaalbare producten te overbruggen met kosteneffectieve productie. Om deze overgang te bereiken is het versterken van het nationale landschap van quantumindustrialisatie nodig, waardoor start-ups en scale-ups hun technologische capaciteiten kunnen uitbreiden en effectief kunnen samenwerken met de gevestigde Nederlandse hightech-maakindustrie om onze sterktes in mechatronica, machinebouw en ontwerp en productie van geïntegreerde chips te benutten. Via de actieagenda worden Nederlandse actoren uit de industrie en het onderzoeksveld ondersteund bij het uitvoeren van innovatieve, coöperatieve en multidisciplinaire projecten om hun R&D-inspanningen en technische activiteiten te versterken. Die zijn van nature complex en kapitaalintensief, maar ook cruciaal voor de realisatie van deeptech-producten. Hiervoor heeft het ecosysteem nieuwe financieringsinstrumenten nodig, naast de PPSI-regeling, om samenwerkingsprojecten in R&D mogelijk te maken tussen twee of meer industriële partners, gericht op de resource-intensieve laag- en middel-TRL-engineering die nodig is om prototypes om te zetten in commerciële producten.

Om de aanschaf van quantumcomputers te ondersteunen, en mogelijk ook quantumsensoren en quantumnetwerken, zou de actieagenda vergelijkbare constructies moeten gebruiken als toegepast in Duitsland,³⁵ Frankrijk¹⁶ en de VS.¹⁹ In plaats van fundamenteel of toegepast onderzoek te subsidiëren, richten deze programma's zich op de inkoop van complete systemen met duidelijke specificaties en gekoppeld aan concrete gebruiksscenario's. De aanschaf van het systeem door de overheid zal verschillende voordelen hebben ten opzichte van een subsidieprogramma: het vergroot de kans voor bedrijven om private financiering aan te trekken en producten aan andere eindgebruikers te verkopen, en duidelijke ambitieuze deadlines leiden tot focus in de bedrijven en versterking van de toeleveringsketen om in korte tijd en met de juiste specificaties te leveren. Dit is niet vanzelfsprekend bij subsidieprojecten.

De actieagenda zal voortbouwen op de innovatie- en ecosysteemactiviteiten die momenteel door QDNL worden uitgevoerd onder de vlag van het NGF-programma. In combinatie met EU-projecten van het Quantum Flagship en activiteiten afkomstig van Holland High Tech en NWO, is er momenteel een redelijk gestage stroom van innovatiefondsen beschikbaar voor quantumtechnologie. De financiering van de NGF zal echter officieel eindigen in 2028,³⁶ Europese financiering verschuift waarschijnlijk van het Quantum Flagship naar een ander voertuig via de EU Quantum Act in 2026,³⁷ en het Topsector-beleid zal vanaf 2026 worden uitgefaseerd.² Samen brengt dit aanzienlijke onzekerheid met zich mee voor de Nederlandse quantumindustrie in de komende jaren. De actieagenda zal een belangrijk middel bieden voor langdurige overheidssteun om het Nederlandse concurrentievoordeel te behouden. Om het Nederlandse ecosysteem in het komende decennium te positioneren als toonaangevende industriële macht op het

35 [*The DLR Quantum Computing Initiative \(DLR QCI\)*](#)

36 [*Quantum Delta NL | Nationaal Groeifonds*](#)

37 [*EU Quantum Act*](#)



gebied van quantumtechnologieën vergt het realiseren van de doelen en ambities die in de innovatieprogramma's zijn vastgesteld, een aanzienlijke investering in infrastructuur. Dit zou kunnen komen uit een nieuwe financieringsimpuls die noodzakelijk is voor onze toekomstige welvaart.³⁴

5. Ecosysteemactiviteiten

Om de industriegerichte innovatie-ambities van deze actieagenda te realiseren, zijn de volgende ecosysteemactiviteiten noodzakelijk:

- Stimulatie van marktontwikkeling door actieve betrokkenheid bij eindgebruikers in sectoren zoals energie, financiën, gezondheid en veiligheid, zodat innovaties voldoen aan de echte marktbehoeften en economische en maatschappelijke waarde leveren;
- Het ondersteunen van de groei van start-ups en scale-ups door gerichte financiering, toegankelijke innovatie-instrumenten en toegang tot gedeelde infrastructuur, evenals het bevorderen van ondernemerschap, vooral voor quantumsoftwarebedrijven;
- Educatie en aantrekken van talent op alle niveaus om een robuuste en groeiende quantumberoepsbevolking op te bouwen, waarin diversiteit en inclusie overal moeten worden bevorderd;
- Het uitbreiden van nationale en EU-niveau pilot lines en productiefaciliteiten voor quantumchips en componenten, evenals het verbeteren van de algehele processen van kennisoverdracht van de academische wereld naar de industrie;
- Consistente en evenwichtige regelgeving, waaronder start-up-vriendelijke fiscale beleidsmaatregelen, gestroomlijnde exportcontroles en effectieve screening van buitenlandse investeringen;
- Duidelijke governancestructuren, transparante besluitvorming en effectieve overheidssteunprogramma's, evenals richtlijnen om het nationale en Europese beleidslandschap te navigeren;
- Bijdragen aan de ontwikkeling van internationale standaarden om interoperabiliteit en concurrentievermogen te waarborgen;
- Maatschappelijke betrokkenheid via publiekscampagnes, ELSA-onderzoek en verantwoorde innovatie.



6. Vervolgstappen en uitvoering

De beoogde governance structuur voor de NTS-actieagenda's is beschreven in het overkoepelende document. De specifieke invulling van deze governancestructuur voor de Actieagenda Quantum Technologies, inclusief personele invulling, wordt in 2026 afgerond, in nauwe samenwerking met de KIA ST. Via de innovatiecoalitie van deze actieagenda streeft de KIA ST ernaar voldoende toezicht te houden op deze (verder) ontwikkeling, deze tot op zekere hoogte te stimuleren en in contact te blijven met alle partijen die innoveren op het gebied van quantumtechnologie. Hoewel de opstelling van de actieagenda zich richt op een beperkt aantal onderwerpen, bestrijkt de reikwijdte van de actieagenda de volledige breedte van het NTS-onderwerp. De vertegenwoordiging van de innovatiecoalitie van deze actieagenda zal daarom, naast de innovatieprogramma's, ook de focus leggen op de brede (verdere) ontwikkeling van quantumtechnologie.



Colofon

Deze actieagenda is opgesteld door de **werkgroep** bestaande uit de volgende leden (in alfabetische volgorde):

Aldo Brinkman (QuSoft: CWI & Universiteit van Amsterdam); Gabriele Bulgarini (voorzitter, Qblox); Jules Lancee (Brainport Ontwikkeling); Julian Rabbie (secretaris, TNO Vector); Laurent Molino (Onnes Technologies); Mayra van Houts (secretaris, Quantum Delta NL); Thomas van Els (QuiX Quantum); Victor Land (Universiteit van Amsterdam).

We willen alle leden van de **stuurgroep bedanken** voor hun strategische begeleiding, waardevolle input en constructieve feedback (in alfabetische volgorde):

Axel Berg (SURF); Bart Segers (QuantWare); Chigo Okonkwo (CUBIQ); Erik v/d Burgwal (toeschouwer, Ministerie van Economische Zaken); Fahri Emre Ozturk (toeschouwer, ASML); Ingrid Romijn (voorzitter, Q*Bird); Jhalak Gupta (toeschouwer, Ministerie van Economische Zaken); Lieven Vandersypen (QuTech); Liz Duijves (InvestNL); Max Kouwenhoven (Onnes Technologies); Niels Bultink (Qblox); Philippe Bouyer (Quantum Delta NL); Rebecca Mayrhofer (4TU); Rogier Verberk (TNO); Stacey Jeffery (QuSoft: CWI & Universiteit van Amsterdam); Stefan Hengesbach (QuiX Quantum)

We willen de bijdrage van onderstaande organisaties aan deze actieagenda erkennen via interviews, deelname aan de expertsessies of het anderzijds leveren van waardevolle input.





