

De impact van quantum

Scenario's voor de toekomst van quantumtechnologie in Zuid-Holland



15-07-2021



Colofon



Publicatie: 15 Juli 2021

Auteurs:

- Bas van der Starre
- Corine Bos
- Elmar Cloosterman
- Jan Peter van den Toren

Representatie opdrachtgevers:

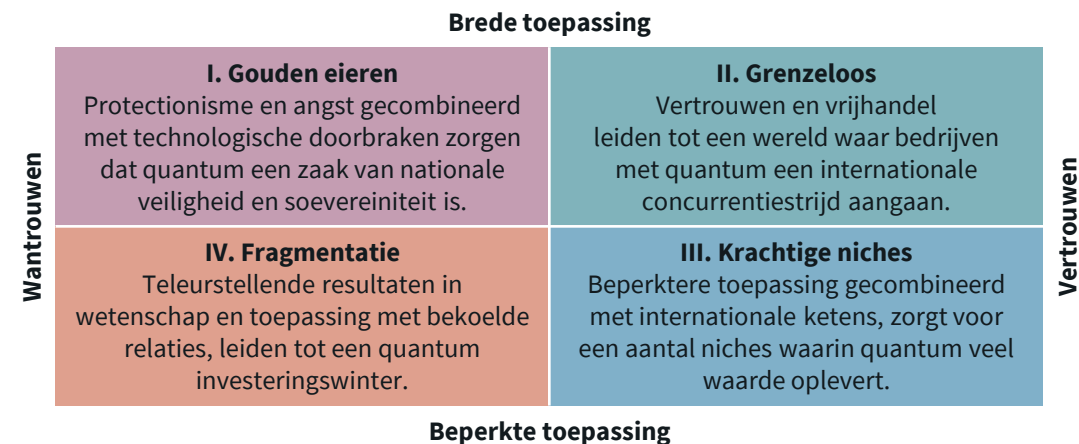
- Jacqueline Schardijn (Innovation Quarter)
- Jelmer Olsman (Provincie Zuid-Holland)
- Christine Foekens (Provincie Zuid-Holland)
- Steef Löwik (Gemeente Leiden)
- Max Tiemessen (Gemeente Den Haag)
- Danny Honigh (Gemeente Den Haag)
- David de Glint (TU Delft)
- Marly Coenders (Gemeente Rotterdam)
- Wilbert Hoondert (Gemeente Delft)

Begeleidingscommissie:

- Freeke Heijman (Quantum Delta)
- Ulrich Mans (Quantum Delta)
- Dennis Rot (Quantum for Business)
- Roland Ortt (TU Delft)
- Niels Bultink (Qblox)
- Serge de Vos (Technolution)

Managementsamenvatting

- Doorbraken in quantumtechnologie zijn aan het versnellen. Dat heeft potentieel grote gevolgen voor onze economie en maatschappij. Alhoewel de belofte groot is, is de toekomst van quantumtechnologie onzeker en verwachtingen over wat deze technologie mogelijk maakt, lopen uiteen. Vanwege deze precaire positie, de toekomstige onzekerheid en de potentieel grote impact moeten ondernemers, industrie en overheid zich voorbereiden op meerdere mogelijke gebeurtenissen in de toekomst.
- Daarom beantwoorden we* de vraag: “Wat is het **handelingsperspectief** voor Zuid-Holland om haar leidende **positie** op het gebied van quantumtechnologie te behouden en er voor te zorgen dat de technologie **economisch** en **maatschappelijk** rendeert?”
- Gegeven de grote onzekerheid helpt het om in scenario's te denken. We verkenden samen met **stakeholders** uit industrie, overheid, wetenschap en quantum startups extreme maar plausibele toekomstige ontwikkelingen.
- Daarbij kijken we naar de ontwikkelingen rondom quantum **sensoren**, quantum **communicatie** en quantum **computers**, met een tijdshorizon tot aan 2035 en speciale aandacht voor toepassingen in voor Zuid-Holland belangrijke sectoren.
- Het ontwikkelpad van quantumtechnologie wordt bepaald door meerdere drijvende krachten. Wat technisch mogelijk is, zal blijken uit welke **technologische doorbraken** komende jaren worden gerealiseerd. Afhankelijk daarvan zullen meer **toepassingen** beschikbaar komen die **investeringen** uitlokken. Die ontwikkeling wordt gestuurd door zorgen over **veiligheid**, de **concurrentie** tussen bedrijven en de **internationale verhoudingen**. Randvoorwaarden zijn dat er voldoende **talent** en **draagvlak** is.
- Stakeholders zijn het er over eens dat de grootste en meest impactvolle onzekerheden liggen op het terrein van (1) toepassingen en (2) internationale verhoudingen. Die twee thema's vormen de basis voor **vier scenario's**.



- Ondanks deze grote onzekerheden en ver uit elkaar liggende toekomstbeelden, is het mogelijk om Nederland en Zuid-Holland zo te positioneren dat quantumtechnologie economische en maatschappelijke waarde oplevert. Dat komt door de huidige sterke positie van het Nederlandse ecosysteem en doordat de innovatie nog in de ontwikkelfase is. Er is dus nog tijd.
- Dat betekent wel dat nu actie nodig is, om het ecosysteem verder te versterken en om samen met nationale programma's en andere regio's de ontwikkelingen te sturen. Daarvoor zijn meerdere acties mogelijk.
- Gelet op de huidige positie van Zuid-Holland hebben de volgende acties prioriteit voor het verder brengen van de ontwikkelingsfase van het ecosysteem:
 1. Fieldlab **experimenten** opzetten in **sensing** en **computing** met industriepartners.
 2. Als overheden een **missiegedreven agenda** starten op **communicatie**.
 3. Het verbeteren van **kennisnetwerken** tussen wetenschap en industrie.

* Birch onderzoekers in samenwerking met InnovationQuarter, Provincie Zuid-Holland, QuantumDelft en Gemeenten Delft, Den Haag, Leiden en Rotterdam.

Inhoud

Introductie en scope	<u>p. 5</u>
1. Startpunt – Waar staat quantumtechnologie nu?	<u>p. 9</u>
2. Trends – Wat drijft de ontwikkeling van quantumtechnologie?	<u>p. 16</u>
3. Onzekerheden – Wat komt er op betrokkenen bij quantumtechnologie af?	<u>p. 25</u>
4. Prioriteiten – Wat zijn de belangrijkste mogelijke veranderingen?	<u>p. 28</u>
5. Scenario's – Welke vormen van de toekomst zien we?	<u>p. 34</u>
6. Perspectieven – Wat zijn strategieën voor die scenario's?	<u>p. 49</u>
Bijlagen	<u>p. 59</u>

Introductie

Perspectief op een toekomst met quantumtechnologie

- Quantumtechnologie doorbraken zijn aan het versnellen. De belofte is dat we met deze nieuwe technologie individuele subatomaire deeltjes kunnen meten en beïnvloeden. Daardoor kunnen we in de toekomst o.a. veilig communiceren zonder mogelijkheid tot onderschepping, of kunnen we tot nu toe onoplosbare problemen kraken met een nieuw soort computer. Dat heeft potentieel grote gevolgen voor onze economie en maatschappij.
- Alhoewel de belofte groot is, is de toekomst van quantumtechnologie met onzekerheid omgeven. Quantumtechnologie is een *deep technology*, een technologie-gebied waar innovatie zich op dit moment kenmerkt door lange ontwikkeltijden, grote benodigde investeringen en hoog risico voor ondernemers. Er moeten nog grote wetenschappelijke doorbraken worden gedaan en technische uitdagingen worden overwonnen om de beloofde toepassingen waar te maken. Nederland heeft een sterk wetenschappelijk gedreven ecosysteem dat in de voorhoede opereert van deze ontwikkelingen. Nederland is echter niet het enige land dat hier actief is. Grote (voornamelijk Amerikaanse, Chinese en Japanse) bedrijven en overheden investeren miljarden om o.a. een Quantum Computer te ontwikkelen. Op dit moment is er nog geen duidelijke ‘winnaar’ aan te wijzen.
- Vanwege deze precaire positie, de toekomstige onzekerheid en de potentieel grote impact moeten ondernemers, industrie en overheid zich voorbereiden op meerdere mogelijke gebeurtenissen in de toekomst. Wat zijn de grootste onzekerheden voor quantumtechnologie in Nederland? En wat is, gegeven die onzekerheden, het handelingsperspectief voor ondernemers, industrie en overheid? Daarbij helpt een scenario-verkenning, waarin we antwoord zoeken op de onderzoeksvragen hiernaast.

“Wat is het **handelingsperspectief** voor Zuid-Holland om haar leidende **positie** op het gebied van quantumtechnologie te behouden en er voor te zorgen dat de technologie **economisch** en **maatschappelijk** rendeert?”

1. Wat is de huidige stand van quantumtechnologie en de positie van Nederland hierin?
2. Wat zijn de trends die van invloed zijn op de ontwikkeling van quantumtechnologie?
3. Wat zijn de grootste onzekerheden voor ondernemers, industrie en wetenschap?
4. Welke van deze onzekerheden zijn het belangrijkste en meest invloedrijk?
5. Welke belangrijke scenario's zien we voor de toekomst van quantumtechnologie?
6. Wat zijn mogelijke regionale strategieën voor die scenario's?

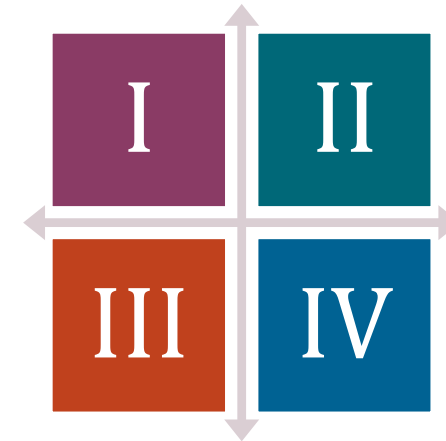
Waarom scenario's

Toekomst verkennen met scenario's door intensieve strategische dialoog

- Er zijn meerdere vormen van toekomstonderzoek. We gebruiken een scenario-aanpak om twee redenen:
 1. Niet alle ontwikkelingen rondom quantumtechnologie liggen binnen de **invloedssfeer** van het Nederlandse ecosysteem maar zijn afhankelijk van exogene onzekerheden.
 2. Het is moeilijk om accurate projecties of voorspellingen te doen vanwege onzekerheid rondom quantumtechnologische ontwikkeling, maar het is wel mogelijk om **causaal** te beredeneren hoe de wereld kan reageren op deze ontwikkelingen, als ze zich voordoen. Met die redenering is een verhaallijn te maken die aanspreekt en voorbereiding biedt op de toekomst.

Strategische dialoog met vier scenario's als resultaat

- De scenario-methode doen we in strategisch dialoog tussen wetenschappers, ondernemers en industrie-experts. Dit proces is in de periode februari tot en met juli 2021 doorlopen en de lijn van het rapport volgt de resultaten van dit proces. Zie bijlage voor een uitgebreide weergave van de stappen.
- We plotten de reacties van experts en informatie uit desk research op impact en onzekerheid en zoeken naar categorieën en gemene delers daarin. Samen met experts vormen we de twee grootste onzekerheden die de toekomst kunnen veranderen. Zo ontstaan vier scenario's.
- Bij ieder scenario komt een omschrijving; een *narrative*. We geven woorden aan de vier situaties en beschrijven de mogelijke impact.



Wat levert het op?

- Een intensieve strategische dialoog met relevante stakeholders.
- Anticiperen op veranderingen en opstellen robuuste strategie.
- *Self-destructing prophecies*: risico's van gevaren worden kleiner als ze in scenario's verschijnen door preventief handelen.

Wat levert het niet op?

- Een gedetailleerde voorspelling van de toekomst.
- Een voorkeursscenario als enige optie waar mee rekening gehouden hoeft te worden.
- Interventies die gegarandeerd werken voor elke sector of elk beleidsterrein.

Scenario's – scope

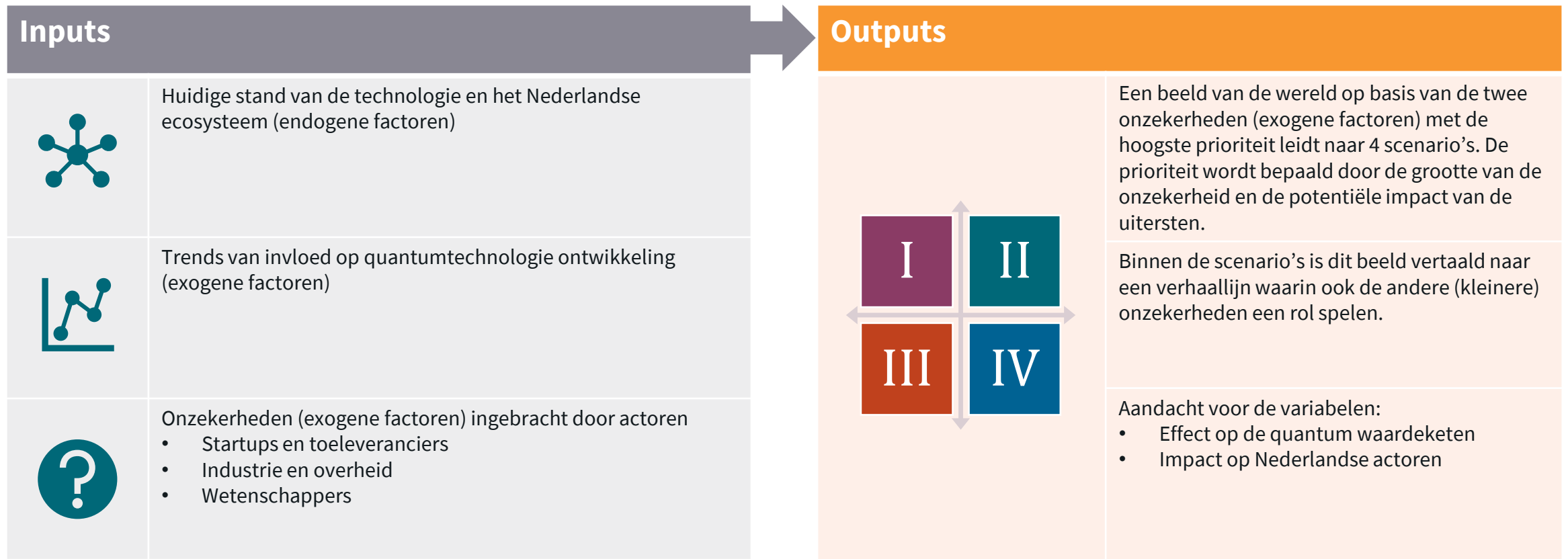
Scenario's zijn gebaat bij scherpe afbakening om prioriteiten te stellen

Scope scenario's quantumtechnologie

 Hoofdvraag	“Wat is het handelingsperspectief voor Zuid-Holland om haar leidende positie op het gebied van quantumtechnologie te behouden en er voor te zorgen dat de technologie economisch en maatschappelijk rendeeft?”
 Tijdshorizon	2020 t/m 2035
 Afbakening	Technologische afbakening: Quantumtechnologie omvat alle wetenschappelijke en commerciële activiteiten die zich bezighouden of gerelateerd zijn aan quantum computing, quantum sensing en quantum communication. Daarbij wordt rekening gehouden met de bijbehorende waardeketens en toepassingen. Regionale afbakening: Aangezien het quantumtechnologie ecosysteem vooral internationaal is, is in sommige gevallen een nationaal of internationaal perspectief nodig. Economische afbakening: Sectoren die in grote mate te maken krijgen met de toepassingen of gevolgen van quantumtechnologie worden meegenomen in de resulterende scenario's, met speciale aandacht voor Zuid-Hollandse speerpuntsectoren en het netwerk van toeleveranciers dat hierbij hoort.

Scenario's – scope

Scenario's ontstaan uit de grootste onzekerheden over de toekomst



1. Startpunt

Waar staat quantumtechnologie op dit moment?

1. Startpunt

2. Trends

3. Onzekerheden

4. Prioriteiten

5. Scenario's

6. Perspectieven

1. Startpunt

Drie belangrijke ontwikkelingen in quantumtechnologie

- De nieuwe generatie quantumtechnologie maakt gebruik van de waarneming en manipulatie van de quantum eigenschappen van deeltjes.
- Binnen quantumtechnologie worden drie ontwikkelingslijnen of technologiecategorieën onderscheiden: sensing, communication en computing.
- De ontwikkelingslijnen bevinden zich in verschillende stadia van toepassing. Sensing is met een *technology readiness level* (TRL) van 4-6 op schaal van 9 de meest volwassen technologie (zie schema).

Technologie	Omschrijving	Functionaliteiten	Stand van de technologie
Sensing	Super gevoelige metingen	• Tijdmeting (atoomklok) • Zwaartekracht meting • Meting van magnetisme • Meting van trillingen	Mogelijke start grootschalige verspreiding in specialistische toepassingen. Nieuwe generatie sensoren is in ontwikkeling (TRL 4-6)
Communication	Veilige en snelle communicatie	• Cryptografie • Quantum Key Distribution (QKD) • Quantum Internet	Onderzoeksfase en eerste toepassingen, afhankelijk van de technologische route (TRL 3-6).
Computing	Supersnelle berekeningen	• Simulatie • Computing met specifieke quantum algoritmes	Sterk afhankelijk van toepassing & qubit roadmap. Start adoptie van eerste generatie computers, maar nog geen toepassingen die klassieke computers verslaan (TRL 1-5)

TRL 1 – Basisprincipe
waargenomen

TRL 2 – Concept
technologie

TRL 3 – Experimenteel
proof of concept

TRL 4 – Validatie in
laboratorium

TRL 5 – Validatie in
relevante omgeving

TRL 6 – Demonstratie
in relevante omgeving

TRL 7 – Systeem
prototype in productie

TRL 8 – Systeem
gekwalificeerd

TRL 9 – Systeem klaar
voor productie

1. Startpunt – Sensing

Quantum 2.0 sensoren beloven ongekeende precisie in metingen

Technologie

- Quantsensoren zijn bedoeld om via individuele deeltjes natuurverschijnselen te meten, zoals licht, elektromagnetisme en zwaartekracht. Deze sensoren zijn veel gevoeliger dan reguliere sensoren.
- Dit soort deeltjessensoren zijn nu in staat ook de quantummechanische eigenschappen van deeltjes te meten, wat tot nieuwe toepassingen leidt. Dit wordt aangeduid als de verschuiving van 1.0 naar 2.0 sensoren.
- De reguliere atoomklok is een vorm van quantum 1.0 sensor, die gebruik maakt van het veranderende energieniveau van atomen om metingen uit te voeren. Quantum 2.0 sensoren gebruiken de quantum eigenschappen van deeltjes (zoals verstrengeling, golflengte of positie) om preciezere metingen te doen.

Waardeketen

- Voor het bouwen van quantum sensoren zijn andere specialistische onderdelen nodig, zoals gevoelige detectoren, lasers, fotonica, en nanotechnologie.
- De sensoren zelf worden onderdeel van grotere meetinstrumenten en meetprocessen (zie overzicht hiernaast).
- Er zijn al meerdere sensoren commercieel verkrijgbaar, zoals PAR sensoren en kleine atoomklokken.
- Deze quantum sensoren en de metingen die ze in staat zijn te doen zijn een essentieel (hardware) onderdeel van de computing en communicatie waardeketen.

Principe	Verstrengeling	Golflengte	Superpositie
Instrument	Atoomklok 2.0	Interferometer Gravimeter PAR sensor	Nitrogen Vacancy (NV) diamanten
Meting	Precieze tijdmeting	Zwaartekracht	Temperatuur, druk en elektromagnetisme
Toepassing (niet uitputtend)	Navigatie met <10cm precisie en tracking van afstand, snelheid en rotatie	Bodemscaans, detectie fotosynthese en watervervuiling	Hoge precisie nano- MRI scans



1. Startpunt – Communication

Eerste stappen zijn gezet richting functionerend quantum internet

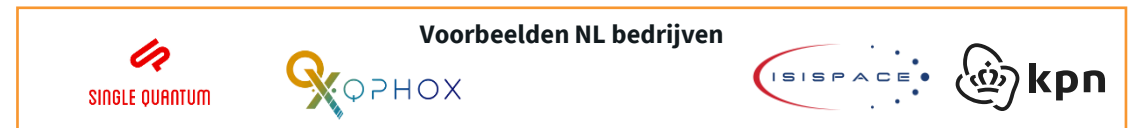
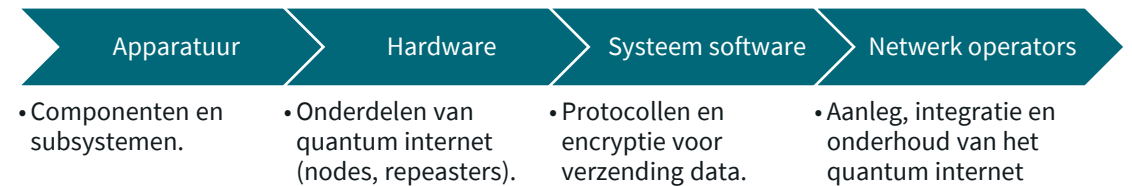
Technologie

- Quantum communicatie is een verzameling van technologieën die snelle en veilige vormen van communicatie mogelijk maakt. Informatie wordt verzonden via een verstrengeld paar deeltjes. Door de polarisatie zijn de fotonen niet te kopiëren zonder de originele eigenschappen te beïnvloeden (superpositie), waardoor onderschepping van data onmiddellijk te zien is.
- Het einddoel is een ‘quantum internet’, een wereldomvattend communicatienetwerk veilig voor inbraak. Daarin zijn verschillende fasen van ontwikkeling nodig, versimpeld weergegeven in de figuur hiernaast.
- Op dit moment is fase 1 mogelijk: punt tot punt communicatie met behulp van QKD wordt al commercieel aangeboden en gebruikt door sommige banken en overheden (in e.g. Zwitserland). In onderzoek worden nu de eerste doorbraken gerealiseerd voor fase 2 en 3.

Waardeketen

- De waardeketen wordt complexer naarmate quantum communicatie zich ontwikkelt van punt tot punt communicatie naar een netwerkstructuur.
- Een internetstructuur betekent dat er meerdere lagen hardware nodig zijn (kabels, nodes, switches en repeaters), maar ook software en standaarden om alle losse onderdelen met elkaar te laten interacteren.
- De verwachting is dat de veiligheids-, overheids- en financiële sector als eerste gebruik maken van quantum communicatie, omdat veilige punt tot punt communicatie voor die sectoren relevant is.

Fase	Technologie	Toepassing
1. Punt tot punt	Quantum Key Distribution: via glasvezel/satellieten beveiligingssleutels verzenden.	Beveiliging van kritieke data in bijvoorbeeld financiële sector of defensie.
2. Lange afstanden	Quantum Repeater: vertrouwde verbinding voor verstrengeling signaal over grotere afstanden.	Verzending van data heeft meer reikwijdte en kan niet afgeluisterd worden bij de repeater.
3. Netwerk structuur	Architectuur: Maakt informatie verzending in een netwerk mogelijk.	Kloksynchronisatie, verbinden meerdere quantum sensoren in e.g. telescopie.
4. Complexe eindpunten	Eindnodes: bestaan uit meerdere qubits, vormen een quantum computer.	Gedistribueerde berekeningen zonder mogelijkheid tot afluisteren.



1. Startpunt – Computing

Concurrerende roadmaps voor het bouwen van quantum computer

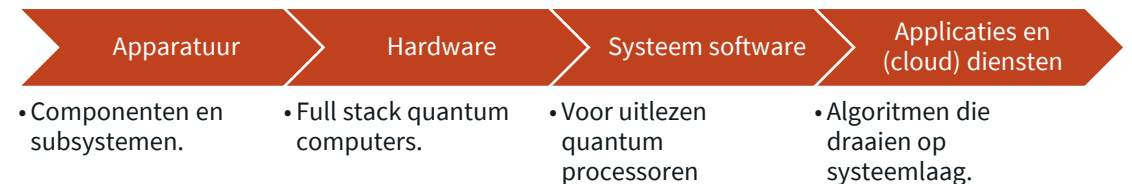
Technologie

- Waar klassieke computers op transistor-gebaseerde ‘bits’ werken, werken quantum computers (QC) met quantum bits, oftewel ‘qubits’. Door quantum eigenschappen zoals superpositie kunnen deze qubits in meerdere staten tussen 0 en 1 zijn. Een combinatie van qubits kan berekeningen uitvoeren.
- Voor sommige problemen kunnen deze gezamenlijke qubits veel sneller dan klassieke computers een oplossing vinden. Qubits gebruiken voor berekeningen vergt het gecontroleerd manipuleren van deze deeltjes. Dat wordt via verschillende roadmaps geprobeerd, zie overzicht rechts.
- De uitdaging is om dit op grote schaal te doen zonder precisie te verliezen. Dit betekent onder andere dat er meerdere fysieke qubits nodig zijn voor één ‘logische qubit’: een qubit waarvan het resultaat 100% betrouwbaar is.
- Quantum computers zijn technisch gedemonstreerd, en meerdere bedrijven hebben actieve prototypen van 50+ fysieke qubits, maar werkende systemen die grootschalige verspreiding mogelijk maken, zijn nog niet beschikbaar.

Waardeketen

- Er is veel geavanceerde apparatuur nodig voor het laten werken van een QC, zoals kabels, koeling, sensoren en meetinstrumenten. Dit is op zichzelf al een gebied waar veel geïnoveerd wordt.
- Met werkende QC’s die tijdswinst opleveren zal de meeste waarde kunnen worden gegenereerd door het verlenen van diensten. Er is nog onduidelijk hoeveel fysieke quantum computers nodig zijn.

Roadmap	Supergeleider qubit	Ion trap qubit	Halfgeleider spin qubit	Fotonische qubit	Topologische qubit
TRL	5	4	3	3	1
Uitdaging	QC’s bieden nog weinig tijdswinst ten opzichte van klassieke computers en zijn nog niet in staat complexe problemen aan te pakken. Daarvoor moet het aantal logische qubits omhoog, moeten de qubits langer stabiel blijven (decoherentie) en moeten natuurlijke fouten in de qubits voorkomen worden.				
Toepassingen	Gegeven dat dit opgelost wordt zullen toepassingen verschillen in tijdswinst, afhankelijk van het algoritme. Sommige algoritmen zullen exponentieel beter draaien op een quantum computer, anderen lineair en bij weer anderen is de tijdswinst nog onzeker. Door de quantum eigenschappen van een QC processor verwacht men use cases voor chemische simulaties, voor e.g. katalyse en medicijnen. Verder in de toekomst denkt men aan het optimaliseren van routes (Grover’s algoritme) en het factoriseren van getallen (Shor’s algoritme).				



1. Startpunt - Technologie

Quantum waardeketens maken use cases en spin-outs mogelijk

- De huidige technologische ontwikkeling wordt bewerkstelligd door een combinatie van nieuwsgierigheid gedreven onderzoek en aan de horizon glorende toepassingen van met name quantum computers.
- Grootste gedeelte van investeringen is op dit moment dan ook gericht op de ontwikkeling van de quantum computer vanwege de potentiële grootte van de markt, maar de verwachting is dat deze richting ook veel andere vindingen in andere quantumtechnologieën veroorzaakt. Veel van de componenten en principes die nodig zijn voor een quantum computer, kunnen ook een rol spelen in sensing en communication.
- Ontwikkeling in quantumtechnologie vereist niet alleen doorbraken op het gebied van quantum wetenschap en engineering zelf, maar ook in andere vakgebieden zoals nanotechnologie en fotonica, gebieden waar Nederland wereldwijd voorloper is.
- Toeleveranciers van de quantum waardeketen zoals bedrijven in nanofabricage, fotonische instrumenten en cryostatens zijn bezig met innovaties voor quantumtechnologie die ook in andere waardeketens bruikbaar kan zijn.
- Een overzicht van veel genoemde use cases staat hiernaast, uitgesplitst naar relevante sectoren voor Nederland en in het bijzonder Zuid-Holland.

Illustratief & niet uitputtend	Sensing	Communication	Computing
Energie & chemie	Exploratie en bodemonderzoek		Materiaal ontwerp en simulatie
Financiële diensten		QKD beveiligde communicatie	Optimalisatie portfolio's
Life Sciences	Medische imaging		Ontwerp eiwitten
Hightech & space	Monitoring productieprocessen	(Satelliet) communicatie	Materiaal ontwerp en simulaties
Agrifood & tuinbouw	Fotosynthese en bodemonderzoek		Kunstmest, modelleren water
Logistiek	Sensoren voor (autonome) navigatie		Route optimalisatie
Overheid	Monitoring milieu	QKD beveiligde communicatie	
<5 jaar		5-10 jaar	>10 jaar
Inschattingen van tijdlijnen verschillen veel per bron. Deze zijn zeer afhankelijk van nog te maken technologische doorbraken			

1. Startpunt - Ecosysteem

Het ecosysteem van Nederland is sterk maar wetenschappelijk gedreven

- Zowel qua omvang en kwaliteit van de wetenschappelijke kennisontwikkeling behoort Nederland met instituten als de TU Delft tot de belangrijkste producenten van kennis op het gebied van quantumtechnologie in de wereld.
- Nederland is uniek in de manier waarop deze kennispositie is ingezet om activiteiten op te zetten die de kennisontwikkeling verder versterken en het bredere ecosysteem ontwikkelen, met sterke samenwerking tussen overheden en publieke kennisinstellingen.
- Ondanks het fundamentele niveau waarop veel onderzoeksprojecten plaatsvinden lukt het Nederland om private partijen in toenemende mate hierop aan te laten haken voor experimenten.
- Er moet in de komende jaren een slag gemaakt worden in het ecosysteem om ook daadwerkelijk bovenop het kennisgedreven ecosysteem een toepassing en industrie gedreven ecosysteem te realiseren. Dat is nodig als we in Nederland de economische waarde van quantumtechnologie willen vangen. Dat vereist aanhoudende investering in kennis, maar ook in het stimuleren van vraag en het uitlokken van private investeringen in toepassingen.



Leiderschap: Met de investering van het groeifonds in Quantum Delta voor een langlopend programma staat quantum technologie hoog op de Nationale agenda's. Nederlandse instellingen zijn toonaangevend in internationale onderzoeksconsortia.



Netwerken: Nederlandse quantum onderzoeksgroepen hebben een groot internationaal netwerk. QuTech is één van de belangrijkste centrale spelers in dit netwerk.



Nieuwe kennis: Nederlands onderzoek hoort tot de wereldtop, ook als dit vergeleken wordt met andere deep technology vakgebieden. Alhoewel de output in absolute zin niet het hoogst is, is de kwaliteit consequent hoog.



Financiering: Privaat investeringskapitaal voor startups komt pas net op gang in Nederland, we lopen daarmee achter op de VS, Canada of Groot Brittannië. Grote bedrijven (Microsoft/Intel) investeren al langer in het Nederlandse ecosysteem



Talent: Er zijn veel getalenteerde onderzoekers in Nederland actief en er is voldoende aanwas van nieuw talent met een achtergrond die relevant is voor quantum technologie.



Diensten: Doordat het ecosysteem nog klein is zijn nog weinig diensten nodig. In het oog springen het Quantum Inspire platform, de ontwikkeling van het House of Quantum en de YES!Delft incubator die een aantal quantum startups begeleidde.

2. Trends

Wat drijft de ontwikkeling van quantumtechnologie?

1. Startpunt

2. Trends

3. Onzekerheden

4. Prioriteiten

5. Scenario's

6. Perspectieven

2. Trends - Technologie

Technologie ontwikkeling afhankelijk van wetenschappelijke doorbraken

Quantum sensing is de meest bewezen technologie op dit moment. Voor de toekomst wordt een aantal technologische uitdagingen gezien:

- Ontwikkelen van nieuwe sensortechnologie die gebruik maakt van andere quantum eigenschappen.
- Schaalvergroting: verbeteren van precisie, snelheid en efficiëntie en verkleinen van de 'voetafdruk' (grootte van een sensorsysteem). *Horizon: 5-10 jaar.*

Quantum communication vormt de basis van een quantum internet. De route hiernaartoe vergt meerdere doorbraken:

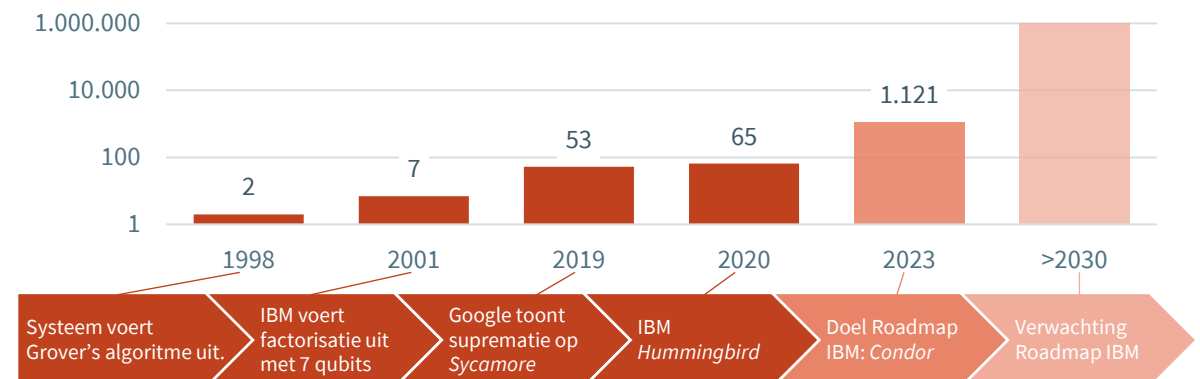
- Langere afstanden overbruggen met behulp van repeaters. Langste afstand tot nu toe gedemonstreerd is 600 km, door Cambridge en Toshiba.
- Van punt tot punt verbinding naar een netwerkvorm met meerdere punten.
- Einddoel is een netwerk van qubits dat informatie kan uitwisselen en gedistribueerd berekeningen kan uitvoeren. *Horizon: ~15 jaar.*

In **quantum computing** gaat het om het (exponentieel) sneller uitvoeren van complexe berekeningen die niet mogelijk zijn met klassieke computers.

- Hiervoor zijn steeds meer qubits nodig. Deze schaalsprong gaat met horten en stoten en het is onzeker welke limieten aan de schaal zitten met de huidige technologie. Er is nog geen duidelijke qubit technologie als winnaar.
- Het aantal qubits zegt niet alles over de prestaties van de computer. Er zijn doorbraken nodig in het controleren en corrigeren voor fouten in qubits en het is onzeker wanneer dit lukt. *Horizon: 10-20 jaar.*

	Nu	Nodig voor einddoel
Sensing	Eerste generatie sensoren is op de markt, tweede generatie in lab gedemonstreerd (TRL 4-6).	Innovaties om sensoren, goedkoper, draagbaarder, preciezer, sneller, kleiner en zuiniger te maken.
Communication	Eerste QKD systemen op de markt. Validatie van quantum verbinding tussen 3 punten in netwerk (TRL 3-6).	Vergroten afstand en betrouwbaarheid tussen punten in netwerk en nieuwe techniek voor complexe protocollen.
Computing	Meerdere platforms gerealiseerd, sommigen met bewijs in voordeel bij complexe berekeningen (TRL 1-5).	Vergroting van het aantal 'logische qubits' door schaalvergroting en foutcorrectie.

Trend aantal qubits in quantum computing (illustratief)



2. Trends - Toepassingen

Hoge belofte toepassing computers, maar met gigantische onzekerheid

De **quantum sensing** markt is afhankelijk van het aantal use cases per type sensor.

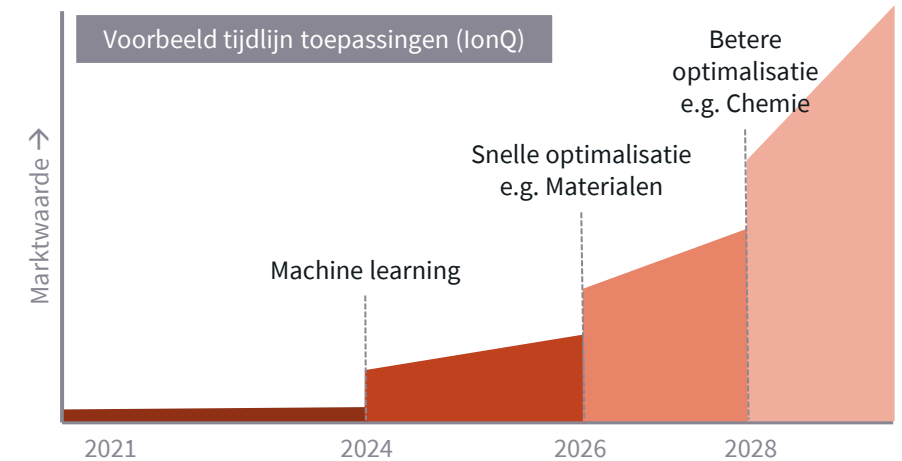
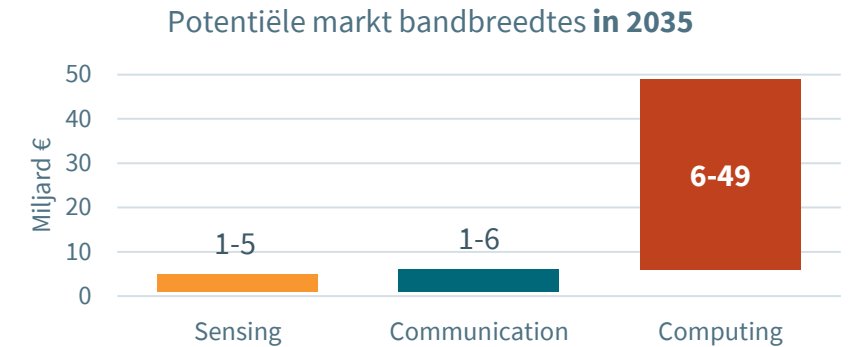
- Als toepassingen beperkt blijven tot wetenschappelijk onderzoek blijft de totale markt klein. Verwachtingen van de groei komen van de vraag naar quantum 2.0 sensoren, die een orde van grootte preciezer beloven te zijn.
- Inschatting is dat quantum sensing technologie weinig belemmering zal ondervinden naar grootschalige toepassing als de productprijs lager wordt en klassieke sensors worden vervangen.

De **quantum communication** markt is afhankelijk van netwerkbeveiliging als use case.

- Of quantum communicatie (specifiek QKD) ingezet zal worden hangt af van het succes in het implementeren van nieuwe 'post quantum' cryptografie (PQC). Als het met PQC lukt bestaande netwerken te beveiligen zal de vraag naar QKD beperkt blijven tot een select aantal eindgebruikers.
- Inschatting is dat een quantum internet nog niet uitontwikkeld is in 2035, maar in de stappen daar naartoe kunnen ook nieuwe use cases ontdekt worden.

Quantum computing is afhankelijk van het 'quantum advantage' dat behaald kan worden ten opzichte van klassieke alternatieven bij eindgebruikers.

- Naar schatting is de helft van mogelijke toepassingen nog niet in beeld. Het is moeilijk voorspelbaar wanneer 'advantage' behaald wordt, de ontwikkeling zal met onverwachte sprongen gaan en succes is allerm minst gegarandeerd. Het soort advantage is daarnaast onzeker. Quantum computers kunnen exponentieel sneller zijn of slechts marginale verbetering bieden, afhankelijk van de casus.
- De hype rondom QC zorgt voor ambitieuze tijdlijnen van commerciële spelers, terwijl de onderliggende aannames nog betwist worden (over o.a. benodigde qubits) en de benodigde doorbraken nog niet zijn gemaakt. Deze tijdlijn beloftes worden mogelijk niet ingelost.



2. Trends - Investerings

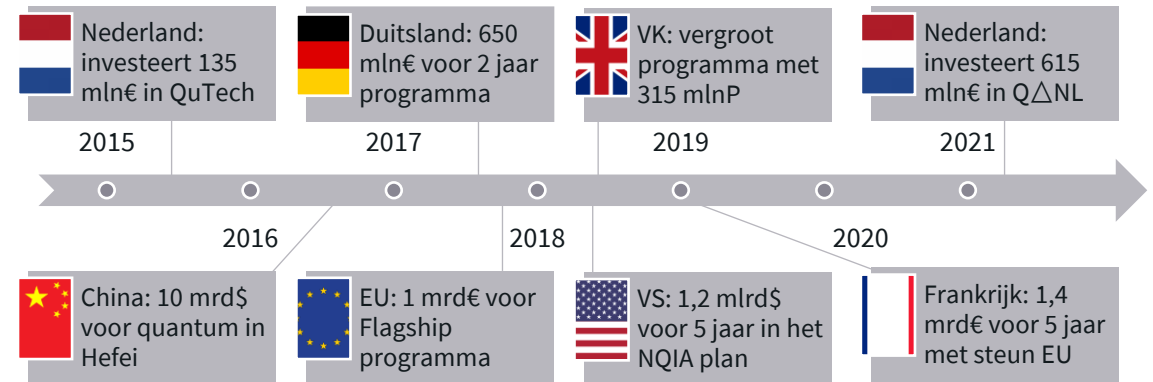
Volume groeit snel door mix van overheid, corporate en VC investeringen

Overheidsfinanciering:

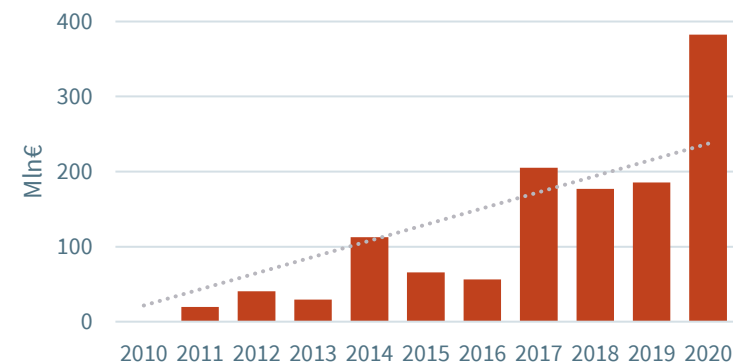
- Sinds 2015 is >14 mrd€ overheidsfinanciering gecommiteerd aan ontwikkeling van quantumtechnologie. China en de VS zijn koplopers, bij elkaar opgeteld doet de EU als derde belangrijke speler een significante investering. Nederland volgt hierin in 2021 met de investering via het nationaal groeifonds.
- Alle programma's richten daarbij veel geld op quantum computing, maar investeren ook in sensing en communication als spin-off (zoals in het VK) of in aparte actielijnen (zoals in EU Flagship en Q Δ NL). China loopt voorop, maar geluiden gaan op dat dit niet allemaal effectief gealloceerd wordt.

Private investeringen:

- Grote techbedrijven (IBM, Google, Honeywell, Microsoft, Amazon, Intel) investeren in eigen onderzoek en ontwikkeling, met name gericht op quantum computers. In sommige gevallen worden onderzoeksgroepen overgenomen (zoals Microsoft in Delft met StationQ).
- Het volume van durfkapitaal maakt op dit moment een schaa sprong. Sinds 2002 is er 1,3 mrd€ aan durfkapitaal geïnvesteerd, met name in startups uit Noord-Amerika (75%). Van 2019 naar 2020 is het jaarlijkse volume investeringen verdubbeld. Op kleine schaal wordt nu in Nederlandse startups geïnvesteerd.
- Private investeringen in onderzoek en startups concentreren zich rondom ecosystemen met hoge wetenschappelijke kwaliteit (Oxford, Toronto, Delft).
- Experts waarschuwen voor een quantum 'investeringswinter' als de beloften gekoppeld aan de huidige investeringen niet worden ingelost. Dit kan een grootschalige terugtrekkende beweging van privaat kapitaal veroorzaken.



Wereldwijd durfkapitaal in quantum



Grote recente investeringen

Wereldwijd	
rigetti	79 M\$
IQM	46 M\$
CQC	45 M\$
Nederland	
QBLOX	4,8 M€
QOPHOX	2,2 M€
SINGLE QUANTUM	2,0 M€

2. Trends - Internationale relaties

Internationale samenwerking is mogelijk maar niet vanzelfsprekend

De belangrijkste hotspots voor quantumtechnologie bevinden zich in de VS, China en in Europa. Zodra één van de spelers als eerste werkzame quantumtechnologie heeft, is het de vraag welke intenties voor gebruik of misbruik zij hebben.

- Op het wereldtoneel is een intense concurrentiestrijd gaande tussen grootmachten VS en China. Gezien de opkomende en concurrerende positie van China, is het sluiten van een verbond tussen EU en VS een mogelijkheid. Deze kans op samenwerking krimpt naarmate er meer aandacht komt voor de nationale veiligheidsrisico's van de technologie.
- EU-beleid kent verschillende statements over samenwerking met andere grootmachten. In Flagship EU wordt rondom samenwerking met de VS gesproken over 'een veilige quantum transatlantische verbinding' maar ook over 'beperkte samenwerking met de VS op het gebied van quantumtechnologie'. Het is nog onduidelijk wat de definitieve koers van de EU wordt op de langere termijn, omdat deze ook bepaald wordt door de verandering van het politieke klimaat in de lidstaten.
- Digitale soevereiniteit wordt een steeds belangrijker thema in dit debat. Nederland en de EU zijn afhankelijk van Amerikaanse en Chinese technologie en dat brengt risico's met zich mee. De recente handelsoorlog tussen de VS en China of het verschil in privacy aanpak van deze landen hebben een belangrijke digitale component die ook voor quantum geldt. Het nu afschermen van belangrijke technologie kan op termijn zorgen voor toenemend protectionisme en vergeldende maatregelen van andere staten.

	VS	China	Europa
Programma	National Quantum Initiative Act (2018): strategisch plan om de VS voorop te laten lopen in de quantum revolutie	China: Quantum Experiments at Space Scale voor communicatie, en nationaal lab voor information science.	Quantum Technologies Flagship programma (2018).
Onderzoeks-instituten	Quantum Economic Development Consortium (QED-C)	CAS (Chinese Academy of Sciences)	Belangrijkste instituten in Frankrijk, Duitsland en Nederland.
Techbedrijven	Google, IBM en Microsoft	Alibaba, Tencent en Baidu	Atos
Statement t.a.v. samenwerking	De VS is aan het nadenken over exportrestricties op het vlak van quantum technologie	China vindt internationale samenwerking belangrijk maar ziet dit ook als kans om een technologische voorsprong te behalen op de VS.	EU werkt graag samen met de VS op wetenschappelijk vlak, maar is terughoudend op het gebied van industriële samenwerking vanwege asymmetrische machtsverhoudingen.

2. Trends - Concurrentie

Beeld van een winner-takes-all markt versterkt concurrentie in computing

Omdat quantumtechnologie use cases nog waargemaakt moeten worden, richt de concurrentie zich op dit moment op technologische vooruitgang. Concurrentie lijkt het sterkst in het computing veld*, waar meerdere typen bedrijven actief zijn:

- Veel **Tech bedrijven** hebben inmiddels een quantum R&D unit die probeert een full-stack quantum computer te ontwikkelen. Deze bedrijven zien de ontwikkeling als een race, waarin de eerste speler die succesvol quantum diensten aanbiedt een voordeel heeft op de markt en in de bescherming van het intellectueel eigendom dat hierbij hoort. De roadmaps van deze bedrijven zetten elk in op een andere technologie qubits.
- In dezelfde lijn concurreren meerdere **startups** mee in de ontwikkeling van de full-stack quantum computer. Zij hebben als voordeel meer wendbare organisaties maar zijn over het algemeen minder kapitaalkrchtig. De vraag is of zij mee kunnen in de concurrentiestrijd of uiteindelijk worden opgekocht.
- Daarnaast zijn er startups die zich opstellen als leverancier en zich **specialiseren** in een specifiek deel van de waardeketen. Hun verwachting is dat grote Tech bedrijven niet willen investeren in alles zelf ontwikkelen en dus specialistische apparatuur of software zullen inkopen van leveranciers. Startups zijn vaak nu al onderdeel van het ecosysteem rondom grote Tech bedrijven. Er is veel samenwerking tussen startups en Tech bedrijven, maar niet tussen grote Tech bedrijven die elkaars concurrent zijn (e.g. Microsoft en IBM).

De vraag is of quantum computing zich meer ontwikkelt als cloud computing waar een klein aantal spelers vrijwel de hele markt beheerst, of meer als kunstmatige intelligentie, waar naast grote spelers een groot aantal niches beschikbaar is.

Niet uitputtend	Full-stack Tech bedrijven	Full-stack startups	Andere grote Tech bedrijven	Specialistische startups
Applicaties en diensten	IBM	Rigetti	Amazon	Qu&Co Cambridge Quantum Computing Zapata 1Qbit OrangeQS
Systeem software	Google Microsoft	Xanadu Qilimanjaro		
Hardware	Honeywell Alibaba Group	IonQ	Intel Bosch Toshiba	IDQ Qblox
Componenten				QuantWare DelftCircuits BlueFors

* In sensing en communication is de concurrentie minder heftig. Use cases zijn specifiek en het veld is meer beperkt tot een aantal specialistische leveranciers.

BCG (2018). The Next Decade in Quantum Computing – and How to Play. | The Economist (2018). The race is on to dominate quantum computing. | Birch (2020). Het Nederlandse Quantum Ecosysteem. | Kop, M. (2021). Hoe we Nederland voorbereiden op een kwantumtoekomst.

2. Trends - Veiligheid

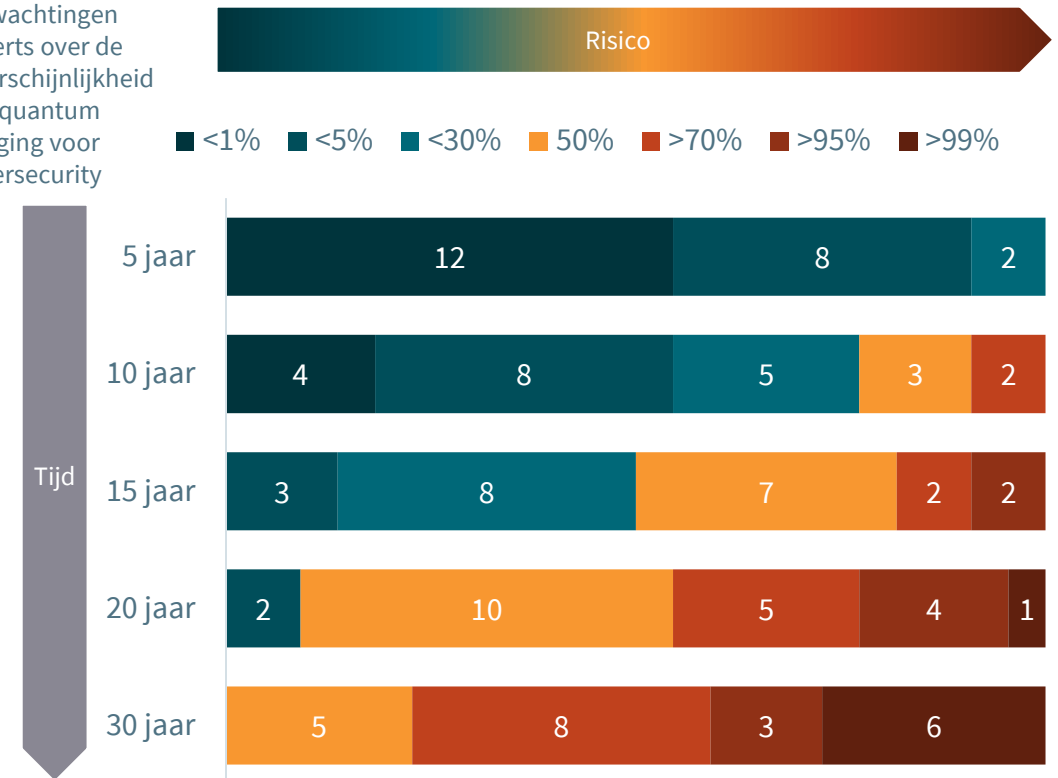
Bescherming tegen quantum computers op lange termijn nodig

Het is moeilijk in te schatten wanneer quantumcomputers krachtig genoeg zijn om encryptie te breken. Schattingen lopen uiteen van 2025 tot 2040. Dat betekent niet dat er nu geen risico is. Kwaadwillenden die nu versleutelde informatie opslaan, kunnen op een later moment de encryptie verbreken als quantumcomputers krachtig genoeg zijn. Dat geeft aanleiding om nu al na te denken over goede bescherming tegen quantum computers. Daarbij wordt gedacht aan twee routes:

- **Quantum Key Distribution** gebruikt quantum communicatie technologie om een unieke sleutel tussen twee punten te verzenden. Door quantum eigenschappen wordt onderschepping van die sleutel direct geregistreerd, waardoor de verzending afgebroken kan worden. Daarbij is het wel nodig dat beide eindpunten gegarandeerd veilig zijn.
- **Post-quantumcryptografie** maakt geen gebruik van quantumtechnologie, maar van wiskundige problemen waar (nog) geen quantum oplossing voor is als basis voor nieuwe cryptografische sleutels. Of deze oplossingen toekomstbestendig zijn is nog onzeker.

Het is niet ondenkbaar dat buitenlandse staten en bedrijven op termijn quantum computers zullen gebruiken om Nederlandse organisaties en infrastructuur aan te vallen. Op het digitaal domein vallen staten elkaar steeds meer aan. Behalve digitale spionage gaat het hier ook om voorbereidingsactiviteiten voor digitale verstoring en sabotage. Op dit moment is internationale (wetenschappelijke) samenwerking hoog en wordt het veld nog niet gedomineerd door belangen van nationale veiligheid, mede doordat de cryptografische toepassing van QC's naar verwachting verder weg ligt en er verdediging in ontwikkeling is.

Verwachtingen experts over de waarschijnlijkheid van quantum dreiging voor cybersecurity



2. Trends - Talent

Goede positie WO, QT kan in toekomst niet zonder beroepsonderwijs

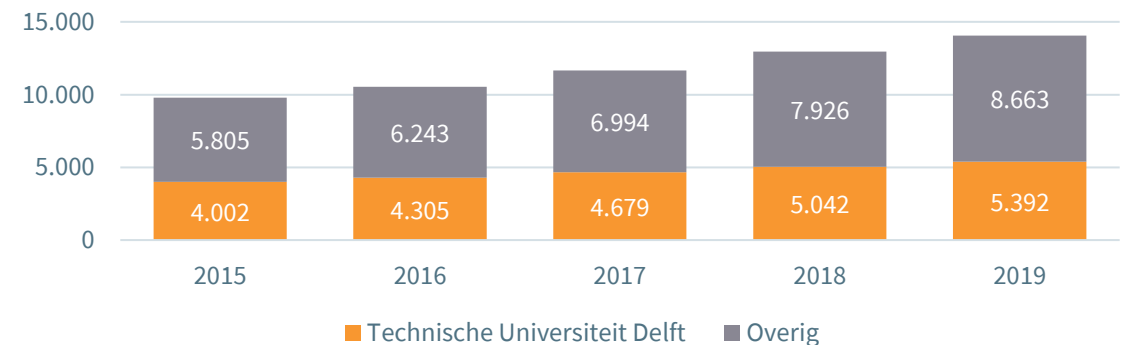
Talentontwikkeling wordt gezien als een belangrijke voorwaarde voor de doorontwikkeling van quantumtechnologie.

- De verwachting is dat de capaciteit van huidige opleidingen niet toereikend zijn om aan groeiende vraag van quantum ingenieurs te voldoen. Er wordt op dit moment veel geïnvesteerd in onderwijsaanbod in Nederland.*
- Nederland heeft een relatief sterke positie in het opleiden van talent: jaarlijks studeren 4.500 mensen af met een diploma direct gerelateerd aan quantumtechnologie. Daarmee staat Nederland op de 7e plek wereldwijd, gerekend per hoofd van de bevolking. Breder bekeken vanuit de hele waardeketen is er een groei van 43% in aantal masterstudenten met relevante opleiding tussen 2015 en 2019. Hierin zitten niet alleen ingenieurs, maar ook wiskundigen en computerwetenschappers.
- Experts verwachten een groeiende behoefte en werkplekken voor mbo'ers en hbo'ers in de waardeketen, zoals bijvoorbeeld in de productie van instrumenten. Men is bang voor een gebrek aan kennis niet alleen op wetenschappelijk niveau, maar ook in het vinden van 'gouden handen'.
- Een ander probleem is de gendergelijkheid: op dit moment is het quantum technologie vakgebied overwegend mannelijk, wat consequenties heeft voor de ontwikkeling.
- Met steeds zwaardere internationale concurrentie vergroot ook het risico dat (wetenschappelijk) talent vertrekt naar het buitenland, o.a. door hogere salarissen geboden door Tech bedrijven of door de overname van Europese startups.

(Toekomstige) QT professionals in en uit alle leer- en beroepslijnen

Voortgezet onderwijs (vo)	Beroepsonderwijs (mbo/hbo)	Wetenschappelijk onderwijs (wo)
• Quantum awareness in lespakketten	• Fabricage specialisten • Systeem integrators • Manufacturing, bouwen van cyrostaten bijvoorbeeld • Fijnmechanici/instrumenten makers	• Expertamenteel natuurkundigen • Engineering (mechanical engineering, aerospace engineering) • Computer scientist (Data Science en Informatica)

Aantal masterstudenten met quantum-gerelateerde onderwijsachtergrond



2. Trends - Draagvlak

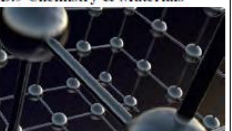
Roep om meer bewustzijn en controlemechanismen voor quantum

Nu quantumtechnologie verder ontwikkeld wordt en toepassingen aan de horizon verschijnen, is het ook nodig het draagvlak van de technologie te bestuderen. Quantumtechnologie wordt gezien als een technologie met hoge risico's. Er kan veel schade gedaan worden door de technologie verkeerd toe te passen:

- Ongelijke **toegang** tot de technologie als gevolg van de macht van Tech bedrijven of staten kan leiden tot grotere ongelijkheid op maatschappelijk of economisch vlak.
- De dreiging voor de beveiliging van communicatie en financiële transacties kan leiden tot een **verlies van vertrouwen** in het financiële stelsel. Ditzelfde kan gebeuren met burgerlijke vrijheden of medische gegevens, met verlies van vertrouwen in de overheid of de zorg als gevolg.
- Met quantum computing is het mogelijk een **black box** te maken, een situatie waarin de eigenaar van de computer niet weet wat de computer berekent voor een andere gebruiker, wat potentieel misbruik in de hand werkt.
- Overheden die als eerste toegang hebben tot quantumtechnologie hebben een communicatie, surveillance of militair voordeel en sommige mogelijke toepassingen kunnen zowel positief als negatief worden ingezet (e.g. ontwerp van medicijnen of bio-wapens). Experts betwijfelen of al deze toepassingen (voorbeelden rechts) daadwerkelijk mogelijk zullen zijn, maar vanuit de defensiehoek worden de ontwikkelingen met interesse gevolgd en gestimuleerd met financiering.

Dat betekent dat het maatschappelijk bewustzijn rondom de technologie moet worden vergroot. Net als bij kunstmatige intelligentie ontstaat de roep om betere controlemechanismen voor de verdere ontwikkeling van de technologie. Die roep kan zich vertalen in strengere regelgeving, maar slecht ontworpen regelgeving kan verdere innovatie hinderen. Op dit moment is er een te klein deel van de bevolking dat de werking van de technologie afdoende begrijpt voor een constructief maatschappelijk debat, wat de roep om meer bewustzijn vergroot.

Voorbeelden van **militaire applicaties** voor quantumtechnologie in een toekomstverkenning van de NAVO

D.1 Transparent Ocean  Obtain the position of any submarine, at any depth, everywhere on Earth, through ultra-sensitive magnetic, gravity or acoustic sensors.	D.2 Quantum Cryptography  Crack certain types of encryption in microseconds. Overcome cyber defences to disrupt or destroy others' computer systems.	D.3 Quantum Radar  Use air and space-based covert ultra-sensitive very low power radar systems to track and identify air targets at the extreme line-of-sight ranges.
D.4 Computational Dominance  Utilise novel quantum algorithms (optimisation, neural networks, etc.) to provide a decision edge supporting military and enterprise operations and functions.	D.5 GPS Denied Environment  Operate for weeks at a time in a GPS denied environment with complete geospatial and temporal awareness, equivalent to that of today's GPS systems at sea, in the air or on land.	D.6. Precision Navigation  Conduct under-ice precision navigation with unmanned underwater vehicles for months, without GPS updates, in the deep ocean and littoral areas.
D.7 Quantum Illumination  Short-range very low power non-invasive imaging for security or biomedical applications.	D.8 Quantum Communications  Communicate instantaneously at long range without being prone to eavesdropping.	D.9 Chemistry & Materials  Simulate the quantum structure and behaviour of new chemicals and materials to create new biochemicals and materials important for CBRN countermeasures.

3. Onzekerheden

Wat komt er op betrokkenen bij quantumtechnologie af?

1. Startpunt

2. Trends

3. Onzekerheden

4. Prioriteiten

5. Scenario's

6. Perspectieven

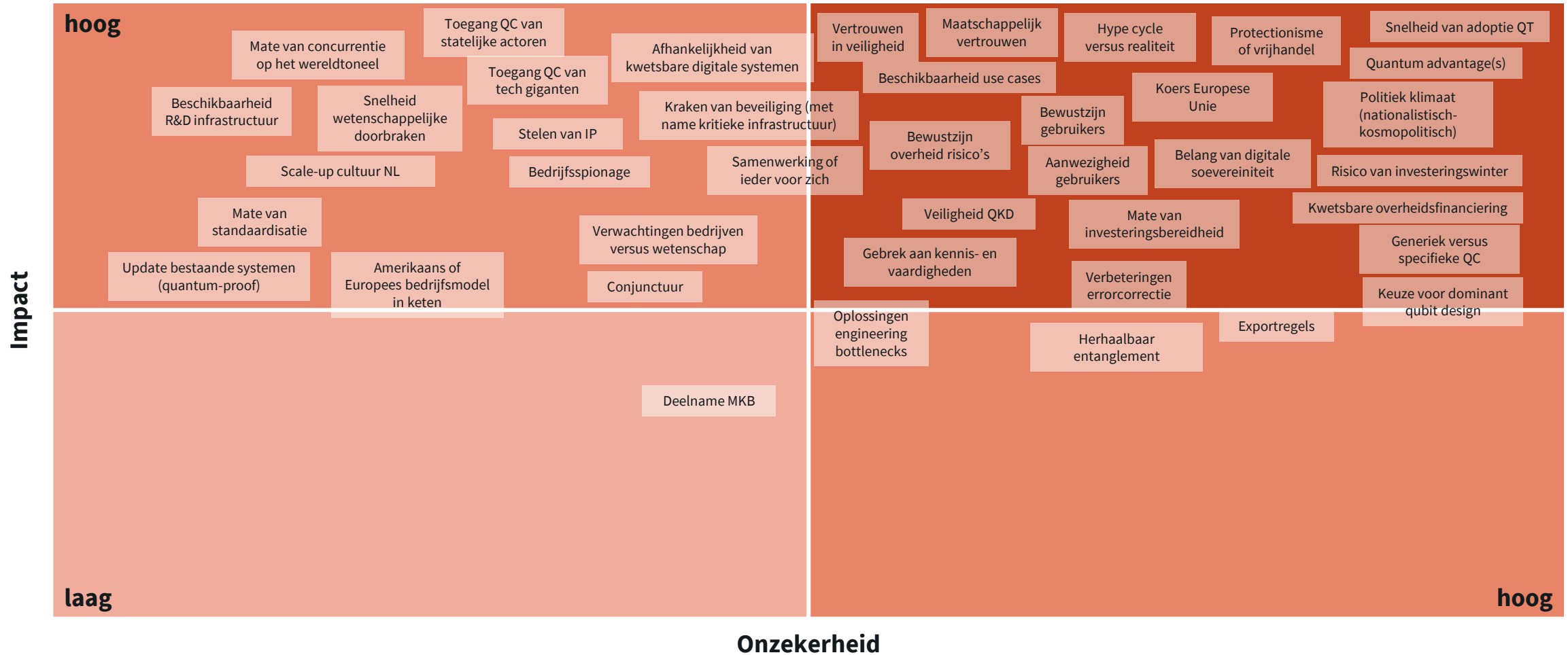
3. Onzekerheden

De belangrijkste factoren voor de komende 15 jaar beslaan 8 dimensies

- In gesprekken en sessies is een groot aantal factoren de revue gepasseerd die zorgen veroorzaken bij experts over de toekomst. Deze factoren zijn in te delen in acht dimensies en zo te groeperen.
- Op de volgende bladzijde plaatsen we deze factoren op basis van desk research en gesprekken aan de hand van de onzekerheidsgraad (laag of hoog) en de potentiële impact (laag of hoog).
- Dit doen we om te identificeren in welke dimensies de factoren vallen die het grootste potentiële risico's met zich meebrengen (kans × effect).

	Dimensie	Onderwerpen van onzekerheid
1	Technologie	Nodige wetenschappelijke doorbraken, oplossen van engineering problemen (e.g. verbeteren errorcorrectie), dominant qubit design, ...
2	Toepassingen	Halen van quantum advantage(s), aanwezigheid en bewustzijn van gebruikers, ontdekking van nieuwe use cases, snelheid adoptie, ...
3	Investerings	Hype rondom verwachtingen, Kwetsbare overheidsfinanciering, aanhoudende private investeringen, ...
4	Internationale relaties	Protectionisme, Koers Europese Unie, Politiek klimaat (nationalistisch-kosmopolitisch), exportregelgeving, Samenwerking of ieder voor zich, ...
5	Concurrentie	Samenwerking of niet, Scale-up cultuur, Macht van Tech bedrijven, Overnames, ...
6	Veiligheid	Toegang van statelijke actoren tot QC, Bedrijfsspionage, Beveiliging kritieke infrastructuur, Veiligheid van quantum proof oplossingen, ...
7	Talent	Beschikbaarheid van talent, behoud van talent, QT in beroepsonderwijs, ...
8	Draagvlak	Standaardisatie, Maatschappelijk sentiment, Ethiek, Risicobewustzijn van overheid, ...

3. Onzekerheden - Plaatsing



4. Prioriteiten

Wat zijn de belangrijkste mogelijke veranderingen?

1. Startpunt

2. Trends

3. Onzekerheden

4. Prioriteiten

5. Scenario's

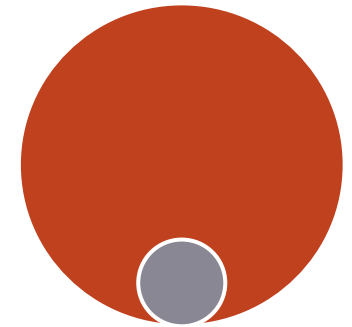
6. Perspectieven

4. Prioriteiten

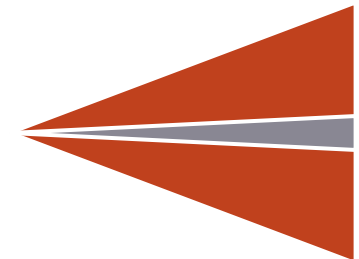
Keuze dimensies met grote impact en onzekerheid en grote bandbreedte

- Uit de wolk onzekerheden die genoemd zijn in de gesprekken en in de eerste scenariosessie maakten we gezamenlijk een keuze welke onzekerheden voor hen het meest belangrijk waren.
- De experts en stakeholders hebben onafhankelijk van elkaar gestemd over welke dimensies voor hun praktijk het meeste belang zouden hebben in de toekomst.
- Aan de hand van de discussie hierover zijn meer uitspraken gedaan over de uitersten van deze dimensies, hoe groot de impact kan zijn en hoe de onzekerheid van deze dimensies beoordeeld kan worden.
- Deze input gebruiken we voor het verder beredeneren van welke dimensies de meeste prioriteit krijgen in de toekomstige scenario's en bepalend zijn voor de kwadranten. Op de volgende pagina geven we een reflectie van die discussie en selecteren we twee dimensies die als basis dienen voor onze assen.
- Bij die keuze houden we rekening met de volgende elementen.
 - De **impact** van de dimensie is groot, de gevolgen van een verandering hebben invloed op de hele quantum waardeketen.
 - De **onzekerheid** van de dimensie is groot. Er is op dit moment niet goed te voorspellen welke kan het opgaat met deze dimensie en beide uitersten lijken even waarschijnlijk.
 - De **extremen** liggen zo ver mogelijk uit elkaar. De ene uiterste maar plausibele beweging is een wereld van verschil met het andere uiterste.

Impact = groot



Onzekerheid = groot



Extremen = ver uit elkaar



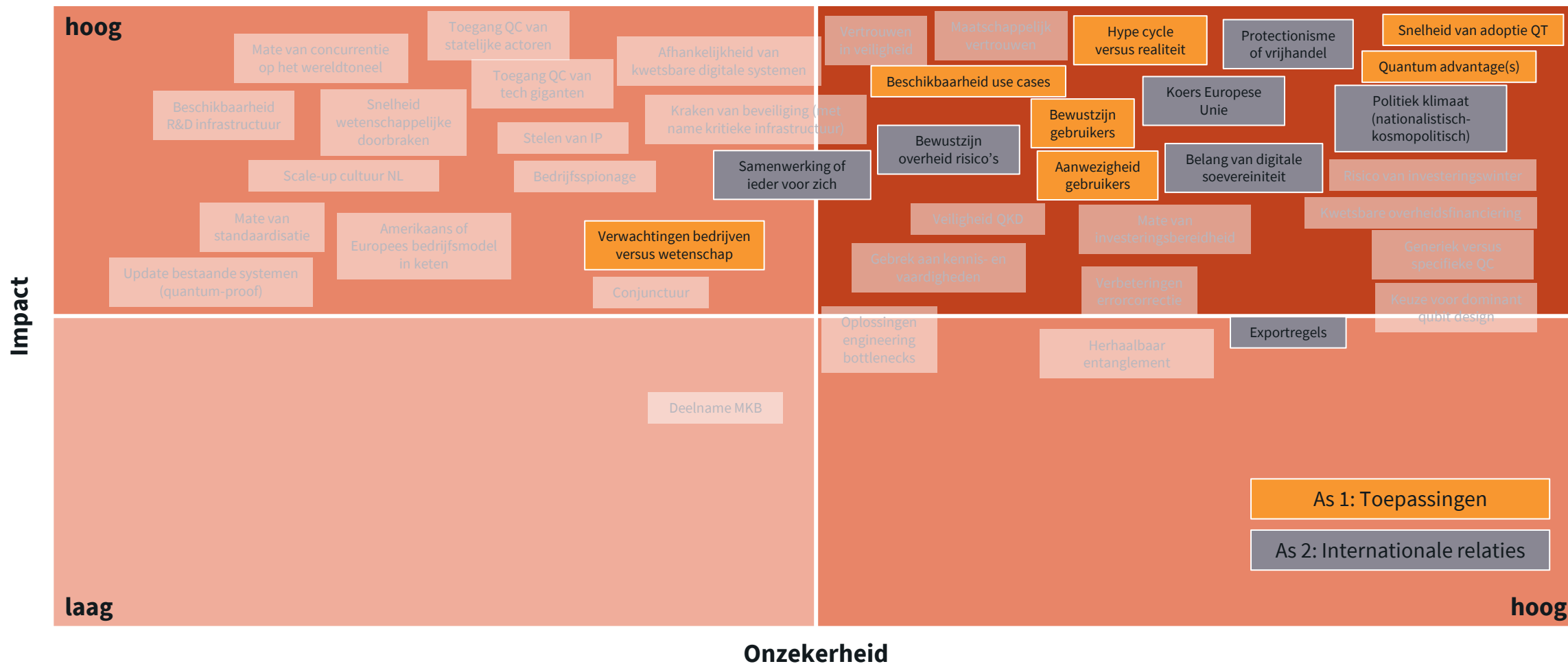
4. Prioriteiten

Twee dimensies zijn bepalend voor de toekomst van quantumtechnologie

	Dimensie scenario's	Ondergrens	Bovengrens
1	Ontwikkeling technologie	Moeizaam pad Niets lukt	Doorbraak versnelling Alles lukt
2	Beschikbaarheid toepassingen	Niches Klein voordeel	Breed toepasbaar Groot voordeel
3	Investerings	Laag Winter zet in	Hoog Hype blijft aan
4	Internationale relaties	Wantrouwen Protectionisme	Vertrouwen Vrijhandel
5	Concurrentie	Monopolisten Ieder voor zich	Macht verdeeld Gezamenlijk doel
6	Veiligheid	Massa hacks QKD als oplossing	Quantum proof PQC als oplossing
7	Draagvlak	Laag Verborgten beslissingen	Hoog Openbaar debat
8	Talent	Blijft achter Blijft behouden	Groeit mee Weggekocht

- De ontwikkeling van de technologie (1) is niet geheel exogeen; Nederlandse spelers hebben invloed op de richting. Daarnaast geldt dat de ontwikkeling deels weer afhankelijk is van investeringen (3). Investerings (3) zijn afhankelijk van de perceptie rondom toepassingen van quantumtechnologie in verschillende sectoren en kunnen hier niet los van worden gezien. Talent (8) is hiervoor een andere voorwaarde en een dimensie waar Nederland zelf ook invloed op heeft.
- Veiligheid (6) betreft een specifieke angst voor het gebruik van een quantum computer. Aangezien statelijke actoren en grote techbedrijven waarschijnlijk de eerste partijen zijn die toegang hebben tot een dergelijk apparaat is dit direct verbonden aan de internationale verhoudingen en de concurrentie tussen bedrijven (5).
- Draagvlak (7) voor gebruik van quantumtechnologie is een direct gevolg van hoe staten en bedrijven zich opstellen naar aanleiding van de onderlinge verhoudingen. Daarnaast heeft het maatschappelijk veld nog weinig macht over het gebruik, door het gemis van een directe relatie van consumenten met de technologie.
- Dat betekent dat de **beschikbaarheid van toepassingen (2)** en **internationale verhoudingen (4)** bepalend zijn voor de assen van de scenario's. (Onderdelen van) deze thema's worden door experts relatief het meest genoemd als belangrijke onzekerheid. Alle andere dimensies zijn hiervan afhankelijk en zullen de thema's vormen waar de scenario's aan de hand van worden beschreven.

4. Prioriteiten - Belangrijkste onzekerheden



4. Prioriteiten - As 1: Toepassingen

Beperkte toepasbaarheid

Brede toepasbaarheid

- De **beschikbaarheid van toepassingen** voor quantumtechnologie is onzeker en zeer beperkt beïnvloedbaar door individuele spelers. Of een toepassing wel of niet slaagt in het brengen van een verbetering is daarom een externe onzekerheid.
- Aan de ene kant is de kans reëel dat het aantal toepassingen voor quantumtechnologie **beperkt** blijft. Voor de sensoren geldt dan dat het in veel gevallen niet nodig is om de extra precisie die quantumsensoren leveren te gebruiken. Voor communicatie geldt dat bestaande infrastructuur zonder quantum key distribution beveiligd kan worden. Voor quantum computing geldt dan dat de tijdwinst geboekt door de ontwikkelde computers de investeringen niet terugverdient en dat daadwerkelijk winstgevendende applicaties hogere technische eisen hebben dan aanvankelijk gedacht. Dat betekent dat per sector er maar een paar applicaties zijn waar quantum geld opbrengt en het voor het grootste deel van de bedrijven in die sectoren niet de moeite waard is om veel te investeren. Quantum diensten blijven de komende 15 jaar een niche product, dat slechts echt relevant is voor een beperkt aantal sectoren. Het grootste deel van de industrie en economie kan prima verder zonder quantumtechnologie.
- Aan de andere kant is de kans reëel dat er veel **bredere toepassingen** zijn dan tot nu toe werd aangenomen en dat de al bekende toepassingen veel succesvoller zijn dan initieel werd gedacht. Quantumsensoren blijken handzamer en preciezer dan bestaande alternatieven en leveren daarmee een grote optimalisatieslag. Quantum communicatie wordt gezien en toegepast als een essentieel onderdeel van de beveiliging van financiële en kritieke infrastructuur. Quantumcomputers realiseren exponentiële versnelling op bestaande problemen en zijn in staat nieuwe problemen aan te pakken. Er worden nieuwe use cases gevonden die op dit moment nog niet bekend zijn. Bedrijven worden door deze positieve voorbeelden aangespoord om zelf te investeren in het afnemen van quantum diensten en de adresseerbare markt maakt een enorme groei door in de komende 15 jaar.

4. Prioriteiten - As 2: Internationale relaties

Wantrouwen

Vertrouwen

- De **internationale relaties** zijn van grote invloed op het ontwikkelpad van quantumtechnologie maar zijn niet door de ontwikkelaars of gebruikers te bepalen. Dat maakt ze tot een belangrijke externe onzekerheid.
- Aan de ene kant is er een reële kans op **onderling wantrouwen** op het wereldtoneel. Als relaties tussen de machtsblokken VS, China en de EU bekoelen zullen deze naar binnen keren. De ontwikkeling van quantumtechnologie zal zich verhoudingsgewijs meer gaan vermengen met belangen van nationale veiligheid. Het is niet uitgesloten dat de technologie gebruikt wordt voor surveillance, digitale weerbaarheid of zelfs militaire doeleinden. Bekoelde handelsrelaties zullen de samenwerking tussen bedrijven van verschillende landen bemoeilijken, wat internationale innovatie in de weg staat. Het land dat als eerste de quantum computing race wint zal moeilijker in te halen zijn.
- Aan de andere kant is er een reële kans op **onderling vertrouwen** op het wereldtoneel. Met meer mondiale wetenschappelijke samenwerking is de kans groter dat wetenschappelijke doorbraken die nodig zijn elkaar sneller opvolgen, maar ook dat industriële samenwerking van de grond komt. In een open handelsklimaat zal het meer gaan om de concurrentie tussen internationale bedrijven, waarbij mogelijke winnaars de Tech bedrijven of nieuwe startups zijn. Het maakt het sneller mogelijk om internationale standaarden af te spreken en gezamenlijk roadmaps te ontwikkelen voor nieuwe applicaties.

5. Scenario's

Welke vormen van de toekomst zien we?

1. Startpunt

2. Trends

3. Onzekerheden

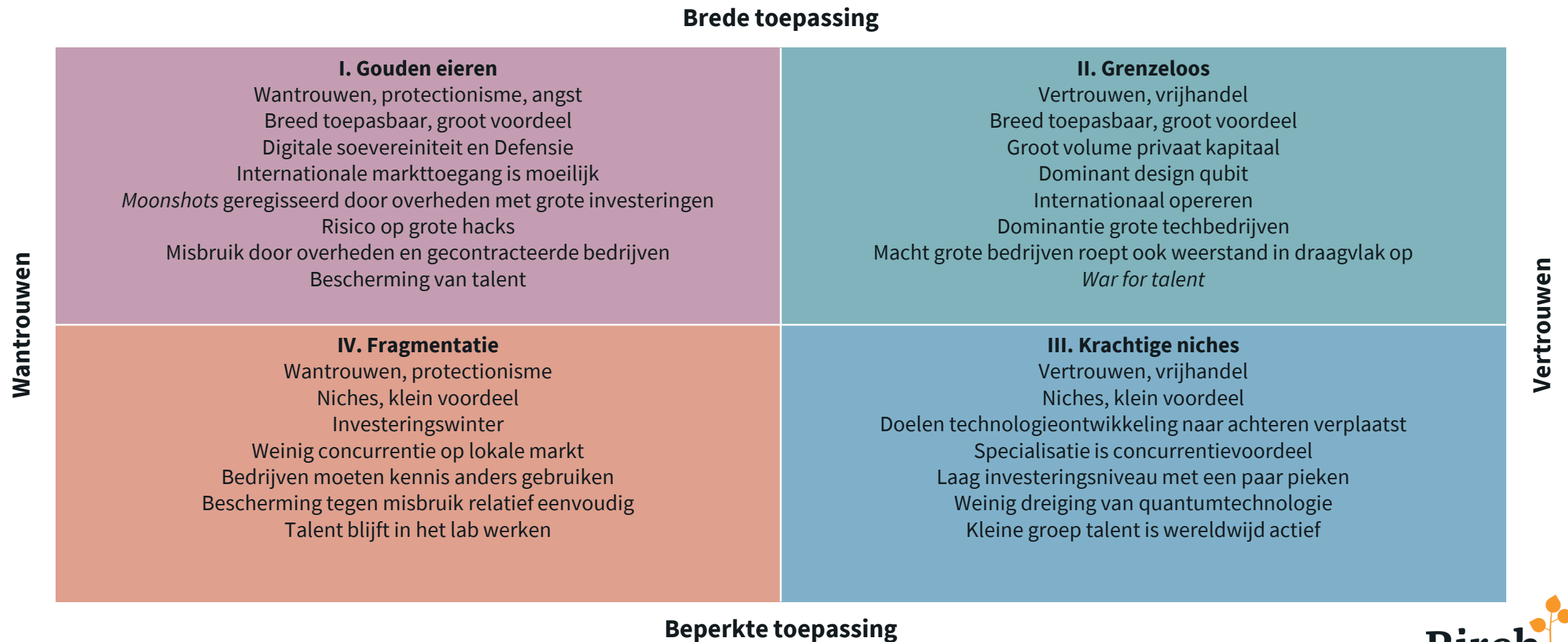
4. Prioriteiten

5. Scenario's

6. Perspectieven

5. Scenario's

De vier mogelijke scenario's in steekwoorden op basis van reactie experts



5. Scenario's

Deze vier mogelijke scenario's worden beschreven in verhaallijnen

Brede toepassing

Wantrouwen

I. Gouden eieren

De internationale verhoudingen tussen de continenten worden gespannen. Dat betekent dat de EU quantumtechnologie gaat beschouwen als domein van 'strategische autonomie' en veiligheid. De grote machtsblokken investeren bovengemiddeld veel in quantumtechnologie en regisseren de keten van onderzoek-R&D-productie-toepassing. De grote corporates investeren gestructureerd en de facto afgestemd in relevante (defensie)toepassingen, ondersteund door publiek gefinancierde 'moonshots' van enkele grote landen.

IV. Fragmentatie

De internationale verhoudingen worden zelfs binnen de EU guur. Landen willen hierop autonoom een positie verwerven of zoeken nieuwe samenwerkingen die elders weer wantrouwen oproepen. Bedrijven in toepassingsdomeinen worden afwachtend doordat toepassingen uitblijven. Investerings worden ongecoördineerd versnipperd over veel landen, bedrijven en ketens waardoor schaalbare toepassingen naar achteren schuiven. Een 'quantum winter' volgt, waarin weinig doorbraken worden verwacht.

II. Grenzeloos

De mondiale verhoudingen ontwikkelen zich zo dat er mondiale regie mogelijk is bij de ontwikkeling van quantumtechnologie. De meerderheid van landen en bedrijven volgt een gedeelde roadmap en stemt investeringen daarop af. Europa en Noord-Amerika zijn in staat de investeringen van hun (lid)staten te regisseren. Consortia en roadmaps in de keten worden ondersteund en krijgen de ruimte. Grote techbedrijven kunnen de belangrijkste roadmaps integreren in hun portfolio en zijn daarmee een dominante speler.

III. Krachtige niches

De mondiale regie richt zich op quantum computing capaciteit maar de toepassingsgebieden blijven het domein van consortia van corporates met hun ecosystemen van toeleveranciers, universiteiten en startups. Door wetenschappelijke teleurstellingen en gebrek aan regie op grote doorbraaktoepassingen (moonshots) wordt de voortgang afhankelijk van commerciële toepassingen, maar door lange time-to-market, gebrekkige werfkracht naar talent, startups en kapitaal valt de trekkracht en belofte van toepassingen terug. Er zijn slechts enkele waardeketens waar de toepassing van quantum een sterke propositie biedt.

Vertrouwen

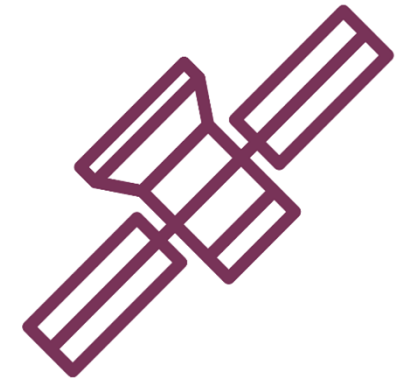
Beperkte toepassing

5. Scenario's - I. Gouden eieren

Een wereld verweekt in een wedstrijd om quantum dominantie

Het is 2035. De internationale verhoudingen tussen de continenten zijn in de afgelopen 15 jaar steeds gespannen geworden. De EU is in die periode quantumtechnologie gaan beschouwen als domein van 'strategische autonomie' en investeerde bovengemiddeld in onderzoek en ontwikkeling. Tegelijkertijd pakte de unie een grote rol in het regisseren van productie en toepassing, met name gericht op veiligheid van digitale communicatie en defensie. Maar de EU is niet de enige. De grote machtsblokken bekijken elkaar met argusogen en de VS en China investeerden net zo hard, zo niet harder. China pakte daarbij de grote voorsprong, want kon in haar politiek bestel veel meer investeringsruimte vrijmaken dan de EU, of zelfs de VS. Grote corporates met hoofdkantoren in de VS, China en de EU investeren per continent gestructureerd en de facto afgestemd in relevante (defensie)toepassingen, ondersteund door 'moonshot' investeringen van de meest voorop lopende landen. *Management by fear* kenmerkt publieke en private diensten.

De technologische vooruitgang legitimeert deze investeringen, er worden steeds meer toepassingen voor quantumtechnologie gevonden die een significant voordeel opleveren ten opzichte van klassieke methoden. Innovaties begonnen in het domein van defensie, waar sensing en communicatie met grote stappen vooruit werden gebracht onder de druk en dreiging van een naderende universele quantum computer. Vanuit daar sijpelde het door naar andere sectoren: eerst om kritieke infrastructuur te beveiligen tegen statelijke actoren (denk aan financieel verkeer, elektriciteitsnet, havens), daarna ook in andere sectoren. Er zijn steeds meer duidelijke demonstrators van QT merkbaar in het dagelijks leven. De potentie voor quantum advantages in andere sectoren blijft langer onbenut, de breedte van de afzetmarkt wordt beperkt door bekoelde internationale relaties. In 2035 wordt de grote doorbraak door China aangekondigd: dat land heeft een eerste quantum computer die de beveiliging van het internet kan kraken gerealiseerd...



5. Scenario's - I. Gouden eieren

Torenhoge investeringen in veiligheid in gescheiden machtsblokken

- **Technologie:** wantrouwen in combinatie met brede toepasbaarheid zorgt ervoor dat de technologie vooral werd ontwikkeld vanuit veiligheidsredenen. Dat gaf extra impuls aan technologie in quantum sensing en communicatie voor defensiedoeleinden. Nationale laboratoria werkten met private partners ondertussen aan steeds sterkere quantum computers. Standaardisatie van quantumtechnologie wordt uitgevoerd binnen de machtsblokken, het is moeilijk gebleken om internationale standaarden af te spreken. Op langere termijn heeft het wantrouwen effect op de kwaliteit van de wetenschap en de verwachting is dat na 2035 het tempo van doorbraken zal dalen. Men maakt zich zorgen hoe het veld verder te brengen nu internationale samenwerking zo aan banden is gelegd.
- **Investerings:** Er zijn grote publieke budgetten vrijgemaakt om 'de eerste' te zijn bij een aantal quantum doorbraken, die niet alleen worden gebruikt voor verdere R&D maar ook tot doel hebben een eigen waardeketen en industrie op te bouwen binnen de machtsblokken VS, China en EU. Na verloop van tijd stapten private partijen in, met investeringen gericht op beveiliging van eigen infrastructuur. Met name de telecom en de bancaire sector maakten een schaa sprong in *quantum proof* beveiliging.
- **Concurrentie:** Door het internationale wantrouwen ervaren grote Techbedrijven minder speelruimte. Het belemmert gelijke concurrentie door verschillen in toegang tot markten. In elke regio zijn bedrijven opgekomen die voorlopen in quantumtechnologie. Door bescherming van de digitale soevereiniteit hebben lokale startups de kans om overeind te blijven, maar zijn ze tegelijkertijd beperkt in hun ambitie om een wereldspeler te worden, uit angst voor kennislekken naar concurrerende machten.
- **Veiligheid:** Veiligheid van kennis plus veiligheid van financiële markten kregen prioriteit. Overheden en kritieke infra sectoren investeerden hard in QKD. Wantrouwen in internationale relaties dwong grootmachten om energie te verdelen over innovatie en verdediging. Vanwege de investering in geld en tijd aan veiligheid en bescherming, kan minder worden ingezet voor verdere verbreding van toepassingen. Op allerlei vlakken vindt spionage plaats: wetenschappers en bedrijven moeten waakzaam zijn dat hun kennis niet in de handen van buitenlandse diensten valt. De NSA probeert een internationale quantum cryptografische standaard af te dwingen.
- **Talent:** Werken met vertrouwelijke informatie is een groot onderdeel van werkzaamheden rondom quantumtechnologie. Soft skills zoals beïnvloeding en politieke sensitiviteit zijn belangrijk bij het werven en behouden van talent. Dit maakt dat naast technologische specialismen, ook andersoortige functies rondom quantumtechnologie ontstaan. Mondiale uitwisseling van arbeidskrachten en talent is moeilijk, maar talent lekt weg naar de VS en China waar de budgetten gigantisch toenemen. Er is flink geïnvesteerd in Benelux en EU campussen met intensieve samenwerking tussen kennisinstellingen en overheden.
- **Draagvlak:** De dreiging van een quantum computer in vijandelijke handen wordt breed uitgemeten in de pers, vanuit prestige en verdediging voor eigen positie op het wereldtoneel. Het zijn vooral de nauw betrokkenen, zoals werknemers van defensie en Techbedrijven, die de echte effecten van de technologie onder ogen komen. Er ontstaat weerstand bij werknemers van Techbedrijven tegen het gebruik van quantumtechnologie voor defensieve of offensieve projecten die ethische grenzen overschrijden: dat wat technisch kan, hoeft niet daadwerkelijk te worden uitgevoerd.

5. Scenario's - I. Gouden eieren

Waardeketens ingericht door overheidssturing, geheimhouding troef

Mogelijke plotselinge gebeurtenissen met grote impact

- China lanceert een grootschalig satellietnetwerk met quantum sensing en communication capaciteiten. Langzaam maar zeker gaan grote bedrijven en overheden op het *Quantum Positioning System* (QPS) over, daarmee de technologische afhankelijkheid van China vergrotend en andere machtsblokken aanzettend om concurrerende systemen te lanceren.
- Een onbekende vreemde mogendheid weet Europese staatsgeheimen van de jaren '20 te ontcijferen door dataverkeer te onderscheppen en later te kraken met een quantum computer. Er volgt een reeks internationale incidenten die de relaties verder onder druk zetten.

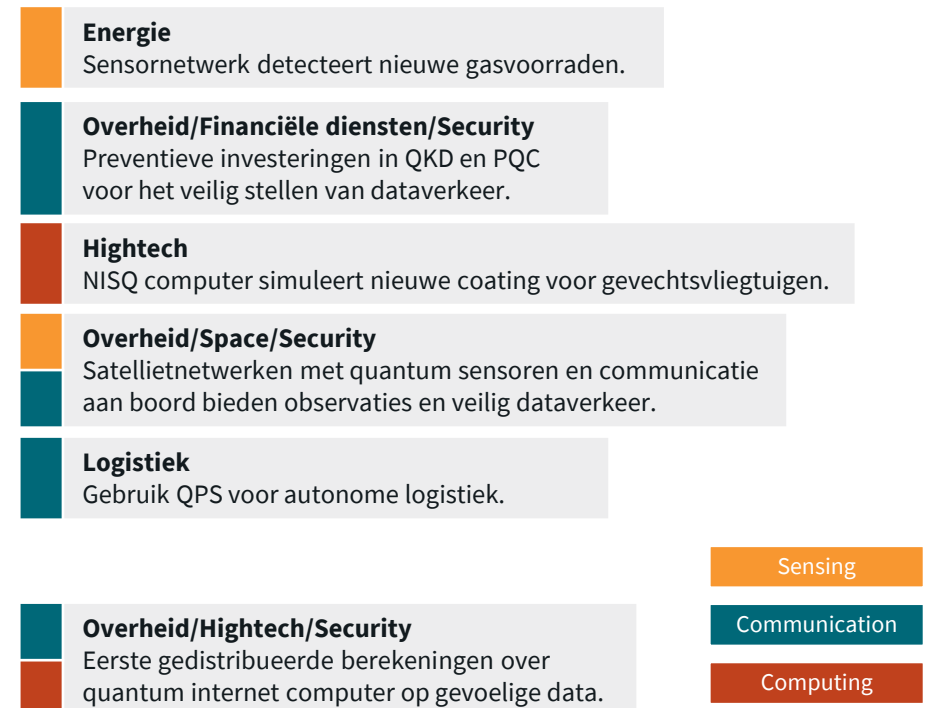
Reacties van stakeholders

- Wetenschap: Richt zich op nationale programma's en overheden als financier. Ondanks de aan banden gelegde samenwerking onderhouden wetenschappers informele netwerken om voortgang te boeken.
- Startups en leveranciers: proberen om steeds strengere overheidsregulering heen marktaandeel te pakken en waardeketens te bouwen. Dat kan bijvoorbeeld door buitenlandse *subsidiaries* op te richten.
- Overheid: probeert eigen industrie te beschermen en tegelijkertijd weglek van kennis te voorkomen. Defensie is sturend in ontwikkelingen
- Industrie en eindgebruikers: Eerste toepassingen komen boven in samenwerkingen met de overheid (vaak op het gebied van beveiliging en defensie).



Voorbeelden van quantumtechnologie ontwikkelingen

Indicatief, op basis van verwachtingen experts en condities scenario (teamanalyse)



5. Scenario's - II. Grenzeloos

Ongelofelijke innovatie gecombineerd met moordende concurrentie

Het is 2035. De afgelopen vijftien jaar stonden in het teken van de quantum revolutie. Door continue ontwikkeling in hardware (sensoren, repeaters, processoren) zijn er steeds meer en betere toepassingen aan het licht gekomen. Nieuwe algoritmen maken gebruik van deze hardware om tot nu toe tijdsintensieve of zelfs onmogelijke computationele problemen steeds sneller op te lossen. Ondersteund door technologische doorbraken en investering van een groeiend aantal industriële partijen is quantumtechnologie een vast onderdeel van de *technology stack* van grote bedrijven geworden, wat nieuwe mogelijkheden biedt voor optimalisatie en ontdekkingen. Er is een uitgebreide waardeketen om een dominante qubit roadmap heen ontstaan, die standaardisatie gemakkelijker maakt.

De mondiale verhoudingen hebben zich zo ontwikkeld dat er internationale regie mogelijk is. De meerderheid van landen en bedrijven volgt een gedeelde roadmap voor quantumtechnologie en stemmen investeringen daarop af. Door de vertrouwensband die opgebouwd is zijn wetenschappers en ondernemingen in de hele waardeketen in staat samen te werken op onderzoek, ontwikkeling en implementatie. Europa en Noord-Amerika kunnen de investeringen van hun (lid)staten te regisseren. Er is mondiaal een gedeeld beeld van de toepassingen waarin quantum waarde kan hebben. Consortia en roadmaps in de keten worden ondersteund en krijgen de ruimte door gezamenlijke publieke en private investeringen. Grote techbedrijven hebben in deze wereld een natuurlijk voordeel, ze hebben genoeg kennis en kapitaal om zich in te kopen in de belangrijkste waardeketens en het nieuwe platform te realiseren dat de wereld van quantum computing capaciteit gaat voorzien.



5. Scenario's - II. Grenzeloos

Grote bedrijven bepalen de ontwikkelrichting van quantumtechnologie

- **Technologie:** In het quantumveld volgden de doorbraken elkaar steeds sneller op. Wetenschappers waren in staat om steeds effectiever en met minder foutmarge quantumeffecten te manipuleren in herhaalbare experimenten die met steeds betere apparatuur uit te voeren. Het zorgde voor een niet aflatende interesse van internationaal bedrijfsleven in de ontwikkelingen. Er is een dominant design qubit gevonden die voor 90% van use cases uitstekend werkt.
- **Investerings:** Grote bedrijven zien mogelijkheden met de nieuwe technologie en investeren voluit, bovenop de nationale en Europese programma's die de eerste ontwikkelingsimpuls gaven. Daarbij wordt het meest geïnvesteerd door grote Techbedrijven in hun eigen quantum business units, waarvoor ze vaak onderzoekers en soms hele groepen van universiteiten overkopen om te komen tot nieuwe hardware en software. Tegelijkertijd explodeerde de startup scene, waar nieuwe bedrijven steeds grotere investeringsrondes ophalen en in sommige gevallen snel de beurs op gingen (via SPACs). Bijzonder is China, die met een combinatie van planeconomie en techreuzen een inhaalslag maakt ten opzichte van het kennisniveau van de VS en Europa.
- **Concurrentie:** Niet al deze investeringen konden uitlopen op een succesverhaal. Er is inmiddels een aantal dominante QT spelers overgebleven, die een slagveld van mislukte startups en een aantal grote bedrijven achter zich laten. De succesvolle spelers hebben een genadeloze strategie die erop gericht is monopolist te worden en de volledige hardware keten te beheeren, zodat ze quantum als dienst kunnen leveren aan eindgebruikers. Grote Techbedrijven hebben hun inhouse ontwikkeling beschermd met uitgebreide patentportfolio's, waardoor ze nog moeilijker in te halen zijn.
- **Veiligheid:** Vanwege het onderling vertrouwen, hoeft minder te worden geïnvesteerd in bescherming. Overheden met toegang tot quantum computers ontmantelden hun offensieve hackgroepen in een multilateraal verdrag, waardoor het risico op verlamdende hacks verminderd werd.
- **Talent:** De *war for talent* is volop bezig door volledige openheid van markten. Hierin hebben grote en vermogende bedrijven meer kapitaal- en organisatiekracht om talent aan zich te binden. Er is veel vraag naar personeel op alle niveaus en diverse vaardigheden; zowel specialismen als brede basis. De exclusiviteit van talent drijft de prijs van salarissen op. Talent werkt internationaal en verhuist gemakkelijk over continenten. Grote bedrijven bieden complete woonmilieus op mondiale A-locaties. Het risico op een *brain drain* voor kleinere spelers is afgelopen jaren steeds groter geworden, er valt niet te concurreren tegen de grote Techbedrijven. Er ontstaan nieuwe beroepen rondom quantum, op operationeel vlak en in productie van hardware. QT blijft een ontwikkelomgeving, maar door brede bekendheid en toepassingen gedijen praktisch opgeleiden in de waardeketen. Wetenschappers maken *en masse* overstap naar grote bedrijven. De ontwikkeling van nieuwe software zorgt voor behoefte aan een nieuw soort IT'er.
- **Draagvlak:** Zoals in 2021 discussie en weerstand ontstond over uitrol van 5G-netwerken, zo gaan de gesprekken nu over quantum. Er is sprake van weerstand tegen de marktmacht van grote conglomeraten, hun machtspositie is groter dan die van overheden. Het economische spel wordt dusdanig hard gespeeld, dat het maatschappelijk sentiment minder over de maatschappelijke baten van quantumtechnologie gaat en meer over concurrentiebeding en monopolies.

5. Scenario's - II. Grenzeloos

Quantum computing wordt een 'slagveld' voor bedrijven

Plotselinge gebeurtenissen met grote impact

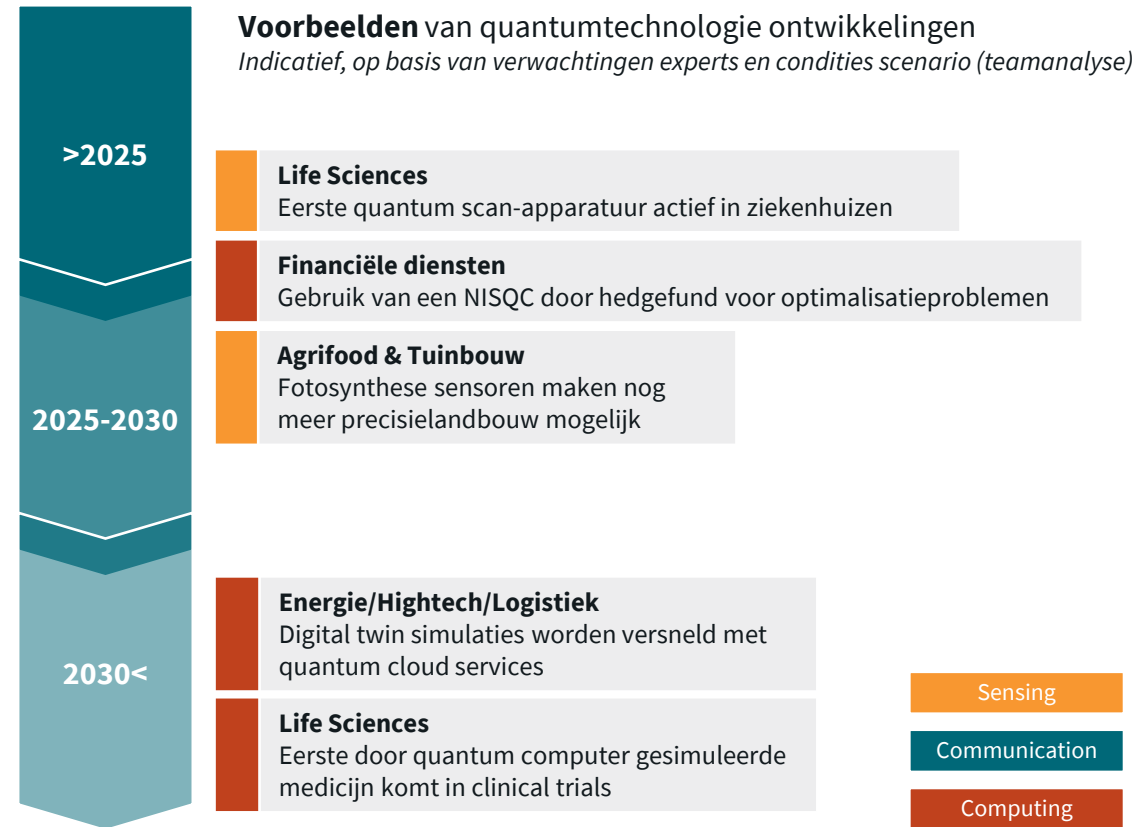
- Het dominant qubit design wordt uitgevonden en doorontwikkeld in de VS. Als gevolg daarvan delven veel startups die met alternatieve roadmaps bezig waren het onderspit. Toeleveranciers moeten zich specialiseren in deze roadmap of andere niches vinden voor hun instrumenten.
- Er wordt een grote concurrentiezaak aangespannen door de EU tegen een Amerikaans Tech bedrijf vanwege de waargenomen monopoliepositie op het gebied van quantum cloud services. In 10 jaar heeft het bedrijf te veel marktmacht gekregen door verticale integratie met toeleveranciers en het opkopen van potentiële startup concurrenten.

Reacties van stakeholders

- Wetenschap: Steeds dieper wordende publiek private samenwerking met grote bedrijven, veel focus op spin-offs. Universiteiten stimuleren wetenschappers nog meer te gaan ondernemen met hun vindingen.
- Startups en leveranciers: Bescherming en uitbreiding van de eigen unieke positie op quantumtechnologie is cruciaal, via patenten, talent en acquisitie van concurrenten en toeleveranciers.
- Overheid: Probeert mogelijk opkomende tech monopolies aan banden te leggen en te reguleren om level playing field te behouden.
- Industrie en eindgebruikers : starten lange termijn samenwerking met grote spelers of consortia quantum leveranciers om gezamenlijk quantum advantages te vinden.

Voorbeelden van quantumtechnologie ontwikkelingen

Indicatief, op basis van verwachtingen experts en condities scenario (teamanalyse)

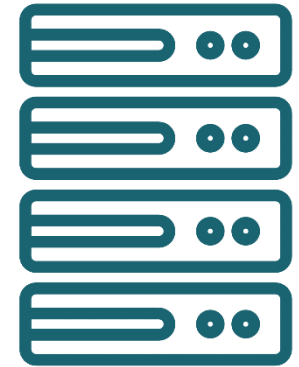


5. Scenario's - III. Krachtige niches

Gerichte specialisatie en expertise in internationale ketens

De afgelopen 15 jaar heeft de wereldwijde samenwerking rondom quantumtechnologie op volle toeren gedraaid, maar het resultaat bleek beperkt. Beloofde wetenschappelijke doorbraken lieten op zich wachten of blijken bij nader inzien niet zo stevig als verwacht. De doorbraken die wel gerealiseerd werden leidden niet tot quantum advantages die ordegrottes beter zijn dan de huidige klassieke alternatieven, zonder dat daar gigantische investeringen tegenover staan. De business cases zijn slechts in een paar sectoren echt haalbaar. De roadmaps voor ontwikkeling zijn zich in de jaren steeds meer gaan richten op die specifieke niches, omdat de beschikbaarheid van kapitaal in andere markten opdroogde. In een aantal sectoren komt een diep kennisveld tot stand, in de rest van de economie blijft quantum op afstand. Quantumtechnologie wordt inmiddels aangeduid als een kruiskopschroevendraaier, niet meer het Zwitsers zakmes dat in alle denkbare situaties soelaas biedt.

De open houding van landen zorgt voor internationale, geglobaliseerde ketens en gezamenlijke roadmaps voor technologische ontwikkeling. In de beschikbare niches biedt dat volop kansen voor gespecialiseerde bedrijven om een internationale positie in te nemen. Door de relatief beperkte toepassing van quantum zijn er weinig zorgen van de bestaande machtsblokken over kennisuitwisseling en potentieel misbruik van de technologie. Bedrijven hebben de vrijheid om internationaal te opereren.



5. Scenario's - III. Krachtige niches

Specialisatie is voorwaarde voor succesvolle positie op wereldtoneel

- **Technologie:** Er is sprake van sterke internationale wetenschappelijke samenwerking met gemeenschappelijk doel en een roadmap, maar de vooraf beloofde milestones worden zelden gehaald. Het blijkt veel moeilijker dan verwacht om herhaalbaar en effectief error corrected logisch qubits te bouwen. De piketpaaltjes van de gezamenlijke roadmap worden verzet naar na 2035 om te proberen alsnog de beloofde doelen te halen. Voor een aantal speciale niches is de technologie geschikt, maar de belofte van een breed bruikbare platformtechnologie blijft uit.
- **Investerings:** Wetenschappers en bedrijven die met quantum bezig zijn moeten het hebben van het stapelen van kleine investeringen. Landen en grote bedrijven durven niet groot in te stappen, maar er is wel toegang tot de internationale kapitaalmarkt waarin veelbelovende niches gefinancierd kunnen worden.
- **Concurrentie:** Specialisatie werd belangrijk om een competitief voordeel te behouden. Omdat quantum maar in een paar niches echt aansloeg bewogen de huidige ontwikkelaars zich daar naartoe. Daarbij geldt dat niet degene met de beste brede technologie de winnaar is maar degene die de quantum dienst als beste op de use case kan afstemmen. We zien verhuizingen of het openen van vestigingen van quantumtechnologie startups naar/in de ecosystemen die het best passen bij hun niche. Schaal is minder een noodzaak dus meer landen hebben kansen. Individuele bedrijven vormen op specifieke toepassingen wereldwijde ketens waarin goed wordt samengewerkt tussen producenten, toeleveranciers en eindgebruikers.
- **Veiligheid:** Internationale verhoudingen kenmerken zich door vertrouwen en dat betekent dat ontwikkelaars minder bezig zijn met het beschermen van systemen en intellectueel eigendom. Daardoor konden de wetenschap en high tech industry hun tijd volledig richten op de verbeteringen in specifieke niches. Investeren in veiligheidsmaatregelen is ook minder nodig, gezien de prettige onderlinge verstandhouding en het open handelsklimaat.
- **Talent:** De vraag naar talent is gericht, quantum kennis wordt als plus op bestaande vakgebieden gewaardeerd in functies die zich niet met onderzoek en ontwikkeling bezig houden. De arbeidsmarkt is internationaal en doordat schaal minder een voorwaarde is kunnen ook kleinere hubs een rol spelen. Experts op specifieke niches worden over de hele wereld gevraagd.
- **Draagvlak:** Quantumtechnologie blijft relatief verborgen voor burgers. In enkele sectoren zijn diepe kennisvelden ontstaan. Dat gaat dusdanig diep dat het niet zichtbaar en merkbaar is in alledaagse zaken.

5. Scenario's - III. Krachtige niches

Quantumtechnologie transformeert een beperkt aantal sectoren

Plotselinge gebeurtenissen met grote impact:

- Een doorbraak in een van de niches waar quantum toepassing heeft, raakt een mondiale uitdaging die op dat moment speelt (zoals een pandemie of droogte) waardoor overheden en NGO's middelen ter beschikking stellen voor deze specifieke missie.

Reacties van stakeholders

- Wetenschap: financiering wordt schaarser, wat aanzet tot meer samenwerking. Een deel van de wetenschappers verruimt de quantum technologie weer voor meer fundamenteel onderzoek.
- Startups en leveranciers: Zoeken naarstig naar niches waar hun producten van waarde zijn. Veel van deze bedrijven blijven klein en worden gespecialiseerd leverancier van laboratoria in nano-, fotonica en quantumtechnologie.
- Overheid: zet gespecialiseerde roadmaps op, maar heeft vaak gebrek aan serieuze financiering om echt grote bijdrage te leveren.
- Industrie en eindgebruikers : de meeste industrieën hoeven niet te investeren in quantumtechnologie. Grote gespecialiseerde bedrijven met sterke eigen R&D zetten samenwerkingen op met startups en leveranciers om in niches quantum advantage te realiseren.

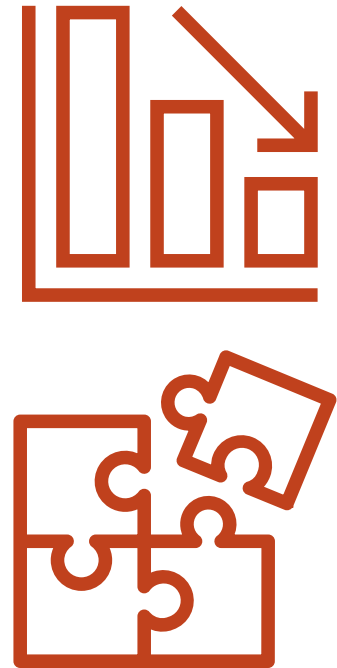


5. Scenario's - IV. Fragmentatie

Stagnatie door gebrek aan samenwerking en resultaten

Vanwege groot wantrouwen in internationale relaties, gingen landen afgelopen 15 jaar heel lokaal te werk. Quantumtechnologie is maar beperkt van strategisch belang gebleken voor de grote machtsblokken van de VS, China en de EU, doordat de grote belofde (defensie)toepassingen uitbleven. Het zorgde ervoor dat landen meer op zichzelf en de eigen industrie aangewezen waren om een positie te verwerven in dit veld. Na de initiële wereldwijde hype met de (publieke) investeringen die daarbij hoorden is het verwachte resultaat uitgebleven. Landen die hebben voorgefinancierd kregen maar weinig terug voor hun investeringen in termen van veelbelovende business cases of vorming van nieuwe industrie. Resultaten en doorbraken die de afgelopen 15 jaar verwacht werden blijven uit of worden vertraagd.

Ook bedrijven in deze landen die investeren in quantumtechnologie werden maar beperkt beloond. De technologieproducenten kunnen maar een relatief kleine afzetmarkt bereiken vanwege restrictieve internationale handelsverdragen. De paar niches waar quantum een significant voordeel levert ten opzichte van klassieke alternatieven worden door lokale ketens bediend. De grote investeringen van de jaren '20 zijn verleden tijd en er is een quantum 'winter', waarbij alleen business cases met weinig risico op geld kunnen rekenen. Van de grote machtsblokken is alleen de VS betrokken genoeg om te blijven investeren in quantumtechnologie voor defensietoepassingen. Op de lange termijn na 2035 kan dit voor nieuwe doorbraken zorgen, maar vooralsnog blijft het stil. Quantumtechnologie blijft door deze fragmentatie voornamelijk een instrument voor meer precisie in onderzoek en ontwikkeling, maar maakt maar mondjesmaat de stap naar een massamarkt.



5. Scenario's - IV. Fragmentatie

Investeringswinter leidt tot vertraging van ontwikkeling op alle terreinen

- **Technologie:** Ideeën zijn gefragmenteerd door gelimiteerde wetenschappelijke samenwerking. Daardoor was het moeilijk om internationale onderzoeksresultaten uit te wisselen en te repliceren en sneller voortgang te boeken. Standaardisatie werd als minder noodzakelijk gezien nu het gros van de toepassingen zich toch nog in het lab bevindt.
- **Investerings:** Niemand durft groot in te stappen. Ook belangwekkende niches worden maar langzaam gefinancierd waardoor toepassingen vertraagd worden. Na de desillusie van 2025, waarin bijna geen enkel ambitieus bedrijf de roadmap doelstellingen heeft gehaald, hebben investeerders het opgegeven om grootschalig in quantum te investeren en de afgelopen 10 jaar is geduid als 'quantum winter'.
- **Concurrentie:** In een kleine markt zijn nog maar weinig spelers actief. De meeste startups van de jaren '20 zijn over de kop, de meeste grote bedrijven hebben hun quantum business unit opgeheven of doorverkocht aan een hedgefund. Er is wereldwijd een aantal plekken waar deze bedrijven afzetmarkt vinden maar het is moeilijk om toegang te krijgen tot die markten.
- **Veiligheid:** Op het wereldtoneel is sprake van politiek wantrouwen. Echter wordt dit vanwege achterblijvende toepassingsgebieden minder manifest op het terrein van quantumtechnologie. In niche gebieden van kleine omvang, zijn de gevolgen minder groot indien onverhoopt toch cyberaanvallen of diefstal van Quantum IP plaatsvindt. Doordat quantum computers minder snel beschikbaar worden is het mogelijk om op tijd de belangrijkste infrastructuur afdoende te beveiligen.
- **Talent:** De arbeidsmarkt is zeer gefragmenteerd. De vraag naar talent is beperkt, quantum kennis wordt als kleine plus op bestaande vakgebieden gewaardeerd. De technologie blijft voornamelijk het terrein van onderzoekers, dus er is weinig vraag naar andere vaardigheden.
- **Draagvlak:** Quantumtechnologie blijft relatief verborgen voor burgers. Toepassingen zijn heel specifiek en bieden weinig grote maatschappelijke voordelen. Om die reden is het beperkt merkbaar in alledaagse zaken. In publieke communicatie is quantumtechnologie amper onderwerp van gesprek. Maatschappelijke dialoog blijft uit.

5. Scenario's - IV. Fragmentatie

Belangstelling op een laag pitje in afwachting van nieuwe doorbraken

Plotselinge gebeurtenissen met grote impact:

- Onverwacht schalen enkele grote concerns hun R&D in quantum af ongeveer op hetzelfde moment, en komen er zo veel onderzoekers tegelijkertijd op beschikbaar op de arbeidsmarkt. Er is geen andere keus voor dit talent om in andere sectoren aan de slag te gaan.

Reacties van stakeholders

- Wetenschap: quantumtechnologie blijft in het lab en wetenschappers zijn veel tijd kwijt aan vinden van financiering voor onderzoek.
- Startups en leveranciers: toeleveranciers proberen ander gebruiken voor al ontwikkelde instrumenten voor de quantum waardeketen te vinden en wijken uit of gaan failliet.
- Overheid: ziet geen noodzaak voor specifiek quantumtechnologie beleid.
- Industrie en eindgebruikers: slechts een paar grote bedrijven met hele specifieke toepassingen zullen blijven investeren in de ontwikkeling van quantumtechnologie.



6. Perspectieven

Wat zijn strategieën voor de scenario's?

1. Startpunt

2. Trends

3. Onzekerheden

4. Prioriteiten

5. Scenario's

6. Perspectieven

Scenarioproces laat belangrijke afwegingen voor toekomst bovenkomen

- Quantumtechnologie is vrijwel in alle toepassingen nog in de ontwikkelingsfase. Er zijn veel ideeën over hoe de nieuwe technologische mogelijkheden kunnen worden gekoppeld aan toepassingen, maar er is nog geen uitgekristalliseerde markt.
- Het risico op niet terug te verdienen van investeringen in quantum is daardoor reëel. Ofwel omdat de verwachtingen op toepassingen niet worden ingelost, of omdat bedrijven in de concurrentiestrijd niet overeind blijven.
- Door de diversiteit aan roadmaps kunnen de belangrijkste doorbraken plaatsvinden in het buitenland. Voor een klein land als Nederland is het van belang om een divers portfolio bedrijvigheid te hebben die op dit soort doorbraken kan inspelen.
- Overheid en (regionaal) bedrijfsleven in de quantum keten zoals toeleveranciers en startups zullen goede afspraken willen maken over het internationaal opereren van de bedrijven in termen van export, IP, vestigingen in het buitenland en overnames. Daarin wordt de kunst bedrijven niet te beteugelen maar wel het belang van Nederland en Europa te beschermen.

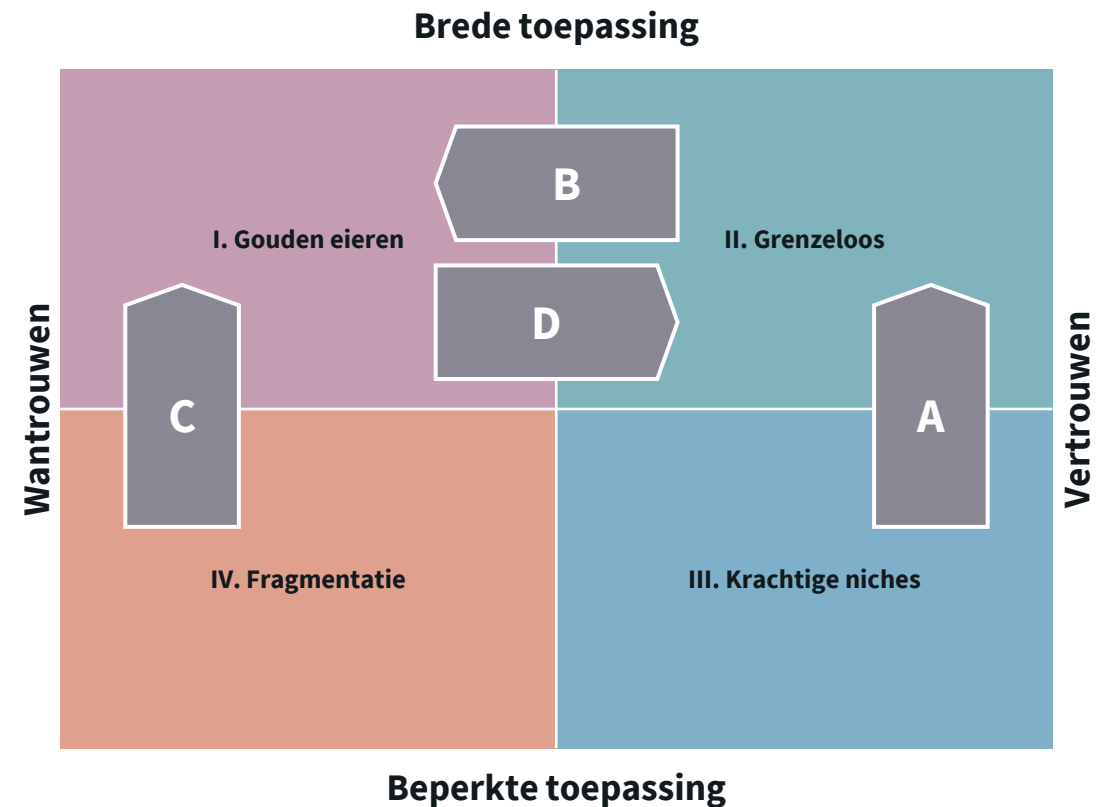
Wantrouwen

6. Perspectieven - Conclusies strategische dialoog

Belangrijk om relaties tussen scenario's mee te nemen in overwegingen

In de discussies met experts bleken de scenario's niet statisch. Er zijn allerlei *feedback loops* geïdentificeerd die beweging tussen de scenario's in de toekomst mogelijk maken.

- A** Vindingen in niches kunnen op termijn leiden tot bredere doorbraken. Doordat doorbraken gepaard gaan met onverwachte schokken in plaats van geleidelijke verandering kan er plotseling een beweging op de verticale as ontstaan.
- B** Opkomst van monopolies gebonden aan een land kunnen meer wantrouwen veroorzaken. We zien nu een 'techlash' ontstaan tegen de macht van Amerikaanse en Chinese platformbedrijven. Veel van deze spelers investeren ook in quantumtechnologie, als deze beweging zich doorzet kan hun macht beperkt worden.
- C** Een gebrek aan toepassingen gecombineerd met wantrouwen kan leiden tot gerichte investeringen in niches die wel resultaat boeken. Als de belofte van quantumtechnologie voor veilige communicatie sterk genoeg blijft, ondanks beperkte andere toepassingen, kan dit alsnog op langere termijn een renaissance in toepassingen veroorzaken.
- D** R&D uitgevoerd door Defensie vindt vaak haar weg naar de maatschappij in andere toepassingen. Denk aan de transistor, het internet of het touchscreen, die allen uit innovatieprojecten van het Amerikaanse leger zijn ontstaan. Op dezelfde manier kan quantumtechnologie steeds meer gemeengoed worden vanuit een scenario dat zich richt op toepassingen in nationale veiligheid.



6. Perspectieven - Sectoren

Potentiële gebruikers kunnen nu instappen om positie te versterken

Quantumtechnologie blijft voor veel beslissers abstract en de drempel om in te stappen en te experimenteren is hoog. Dit is begrijpelijk gezien de onzekerheid.

- De kans is groot dat quantumtechnologie de waardeketen van meerdere Zuid-Hollandse industrieën gaat veranderen. Binnen nu en tien jaar zal dat waarschijnlijk nog niet met quantum computing gebeuren, maar quantum sensing en quantum communicatie kunnen een belangrijke rol kunnen spelen in hun technologie en daarmee marktoppositie.
- Het betekent dat quantumtechnologie onder de aandacht moet blijven bij de Zuid-Hollandse industrie, om wetenschappelijke doorbraken die relevant zijn (en in NL plaatsvinden) snel door te vertalen naar toepassingen en innovaties in hogere TRL. Dit vergt regie zonder de onderlinge concurrentie te beïnvloeden.
- Nu gezamenlijk met wetenschap investeren in een roadmap met een hoger TRL, zoals sensoren en Quantum Key Distribution (QKD) systemen, levert daarnaast nuttige ervaring op voor latere toepassingen rondom computing.

Sensing	De ontwikkeling van quantum sensoren is nu op een punt dat prototypen buiten het lab in gebruik genomen kunnen worden, de onzekerheid van deze technologie is relatief laag. Dat biedt experimenteerruimte in meerdere sectoren.
Communication	Financiële dienstverleners en toeleveranciers doen er goed aan te investeren in ontwikkeltrajecten en expertiseopbouw in quantum beveiliging.
Computing	Voor sommige sectoren zal nu instappen lonen om een kennisbasis op te bouwen, ook al is er geen directe businesscase te maken. Voor hightech, energie en chemie is dit extra relevant: simulatie van (kleine) atomen en materialen is kansrijk.

Brede toepassing

Wantrouwen	I. Gouden eieren • Financiële diensten & security: investeer in cryptografie en QKD systemen om netwerken te beveiligen. • Hightech & space: zoek aansluiting bij (defensie)roadmaps rondom (satelliet)communicatie en QC R&D als toeleverancier. • Andere sectoren: zoek aansluiting bij overheidsroadmaps	II. Grenzeloos • Energie, agrifood, chemie, life sciences & hightech: start snel experimenten met quantum sensoren (e.g. in field labs) en houd beloftes computing goed in de gaten. • Logistiek: onderzoek mogelijkheden van combinatie van sensoren en communicatie voor navigatie.	Vertrouwen
	IV. Fragmentatie • Alle sectoren: monitor de ontwikkeling van quantumtechnologie	III. Krachtige niches • Alle sectoren: monitor de ontwikkeling van nieuwe quantumtechnologie en benchmark die tegen huidige alternatieven. • Hightech: probeer toegang te verkrijgen tot internationale waardeketens voor nichetoepassingen.	

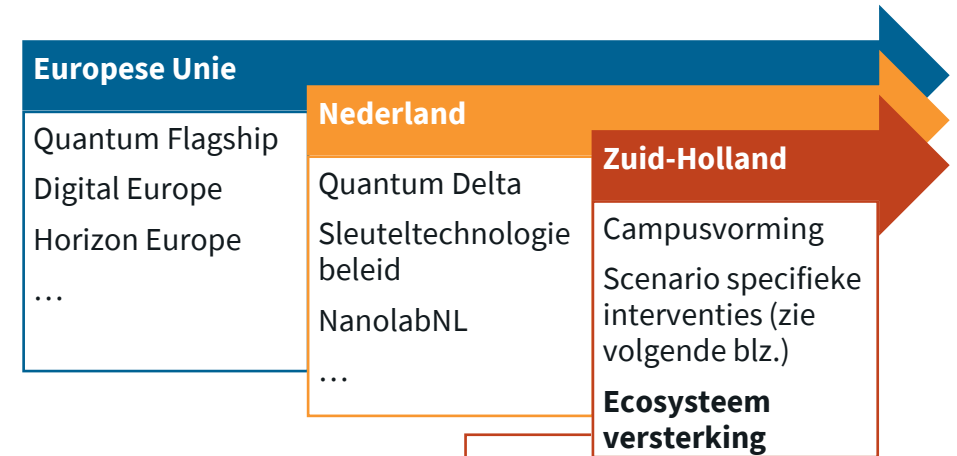
Beperkte toepassing

6. Perspectieven - Regio

Versterking ecosysteem is een winnende strategie ongeacht scenario's

Het is mogelijk om in elk scenario als Zuid-Holland een 'winnaar' positie te krijgen. Dat betekent echter in het scenario fragmentatie wel iets anders dan in het scenario grenzeloos. Gegeven het huidige speelveld is versterking van het Nederlandse ecosysteem een belangrijk element van de quantumstrategie die aansluit op meerdere bewegingen:

- De EU zal in het komende decennium nog veel investeren in quantumtechnologie via het flagship programma en via alle andere programma's die zich richten op digitale innovatie en R&D.
- Nederland heeft een sterk quantum ecosysteem dat stevig groeit. Quantum Delta regisseert dat ecosysteem gericht op baanbrekende innovaties, marktcreatie, human capital en maatschappelijke dialoog.
- Met QuantumDelft is een campus gecreëerd waar quantum activiteiten zich kunnen focussen en ondernemerschap kan starten. Dit moet onderhouden en uitgebreid kunnen worden als daar vraag naar is. Op de campus wordt nu House of Quantum gebouwd als trekpleister voor (inter)nationale partners.
- De regio Zuid-Holland kan hierop aanvullend een sterke rol spelen in versterking van het ecosysteem en door uitdagingen waar quantumtechnologie bij helpt als probleemeigenaar op te pakken samen met de industrie.
- Dat kan door het mogelijk maken van meer **experimenten**, het verstrekken van **kapitaal** en het bijdragen aan of formuleren van maatschappelijke en/of commerciële **missies**. Daarover meer op de volgende bladzijde.



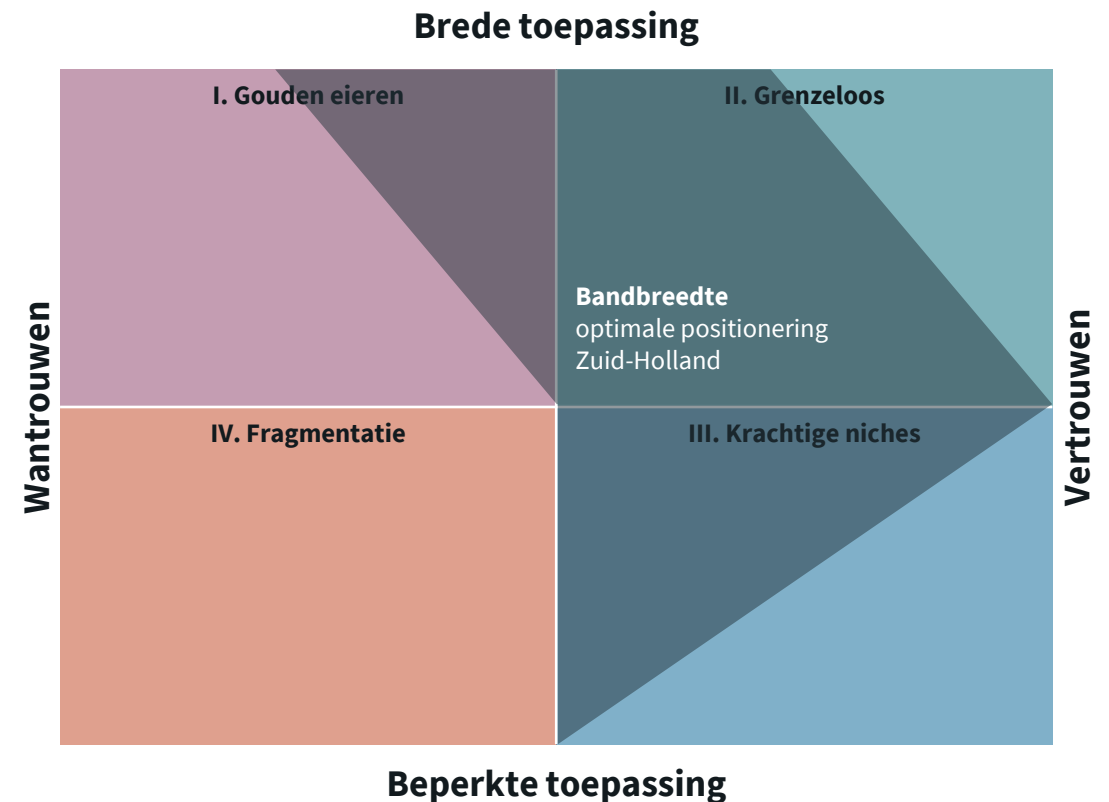
Experimenten	Kapitaal	Missies
De regionale overheden bieden een veilig platform voor (sectorale) gesprekken over quantum, waaruit deelname aan fieldlabs of gezamenlijk opzetten van kleine roadmaps kan resulteren.	Ontwikkeltijden in quantum technologie zijn lang en vragen geduldig kapitaal. Regionale geldschietters zoals een ROM en Provincie kunnen startups van (seed) financiering voorzien onder de juiste voorwaarden.	Koppel quantumtechnologie aan maatschappelijke vraagstukken die aansluiten op landelijk beleid en regionale sterktes. Stel daarbinnen doelen en orkestreer samenwerking tot langdurige programma's.

6. Perspectieven - Regio

Er is een voorkeursbandbreedte waar Zuid-Holland het sterkst kan zijn

Alhoewel Nederland en Zuid-Holland beperkt invloed hebben op de richting die de wereld op gaat in de komende 15 jaar, is er een bandbreedte waarin de kans van slagen en de potentie van quantumtechnologie voor economisch en maatschappelijk rendement in Nederland en Zuid-Holland het hoogst is. Daarbij spelen de volgende overwegingen:

- Wanneer toepassingen beperkt blijven kunnen via wereldhandel en internationaal vertrouwen toonaangevende waardeketens ontwikkeld en opgezet worden in Nederland in het scenario van **krachtige niches**. Dit wordt interessanter voor Zuid-Holland naarmate meer toepassingen mogelijk zijn.
- Bij maximale brede toepasbaarheid zijn de uitersten van zowel de scenario's grenzeloos als gouden eieren onwenselijk. Teveel in grenzeloos en Nederlandse spelers vallen ten prooi aan buitenlandse techbedrijven, teveel in gouden eieren en quantum blijft een technologie voor nationale veiligheid die weinig andere economische en maatschappelijke bijdragen kan leveren.
- Hoe meer toepassingen beschikbaar komen, hoe meer **een middenweg tussen grenzeloos en gouden eieren**, met elementen van beide scenario's de voorkeur heeft. In een dergelijk scenario kan Nederland open handelen met de wereld maar zich richten op Europa als belangrijke hub voor het continent. Dit is in lijn met de internationale strategie van Quantum Delta NL, die zich erop richt om Nederland de belangrijkste quantum hub voor Europa te maken door samenwerking en informatiedeling te versterken. Activiteiten samen met andere landen moeten ten goede komen aan de versterking van het Europese ecosysteem en Europese partners.

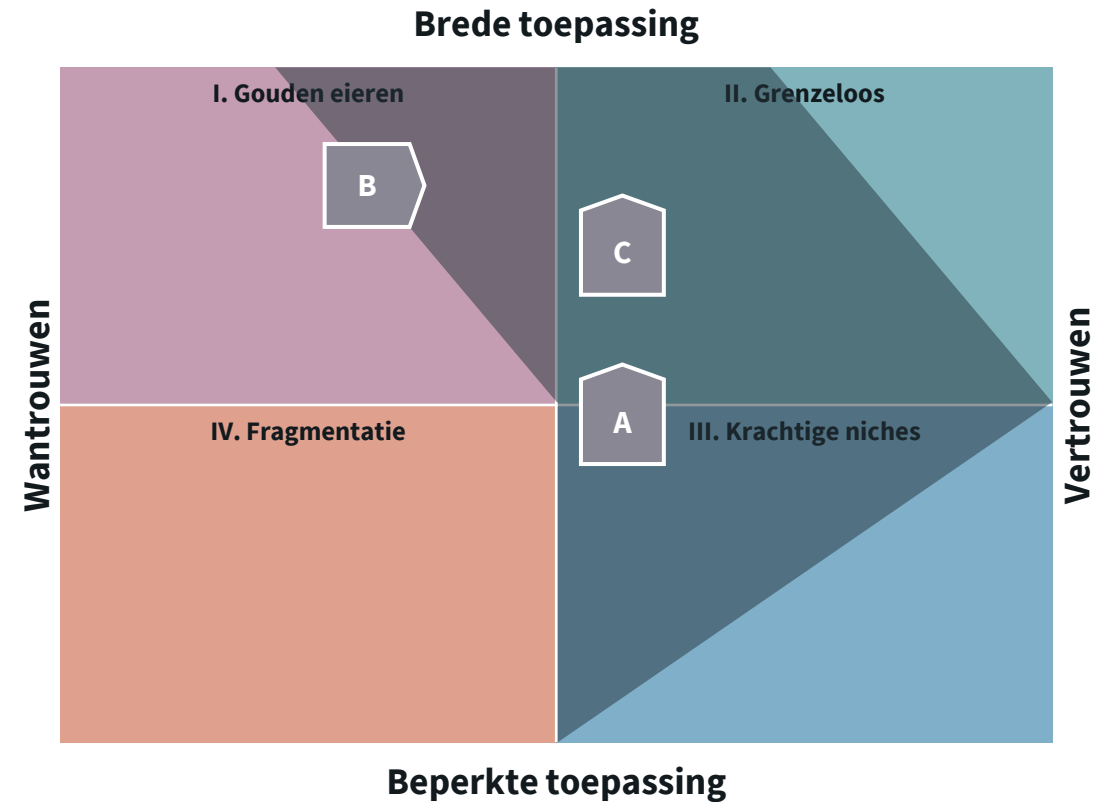


6. Perspectieven - Regio

Interventies die helpen sturen op de bandbreedte zijn mogelijk (1)

Deels is het mogelijk om interventies die het ecosysteem versterken zo in te richten dat ze bijsturen naar de gewenste scenario's.

- A Experimenten:** In het opzetten van sector gedreven projecten kan gestuurd worden op Europese samenwerking (zoals via Kansen voor West) en kan de regio als facilitator optreden en Zuid-Hollandse partijen positioneren in Europese roadmaps. Als vragende partij kan de regio samen met andere provincies met quantum hubs (e.g. Amsterdam en Eindhoven) zoeken naar het vergroten van publieke waarde, zoals het gebruik van quantumsensoren bij infrastructuurprojecten of het aanleggen van een QKD netwerk.
- B Kapitaal:** Naast het beschikbaar stellen van eigen groeikapitaal in de regio kan dit ook meer in verbinding worden gebracht met andere regionale, nationale (e.g. Invest-NL) en Europese initiatieven. Het is een expliciet doel van de EU Quantum Flagship strategie om groeifinanciering te kunnen bieden aan quantum startups (op lager TRL dan reguliere MKB financiering) om een Europese quantum waardeketen mogelijk te maken en regionale instrumenten kunnen hieraan bijdragen. De regio kan, afhankelijk van het scenario, variëren in haar steun tussen publiek opdrachtgeverstap, subsidies of financiering.
- C Missies:** Op de langere termijn, als computing meer volwassen wordt, kunnen missie gedreven agenda's samen met partners gerealiseerd worden die als magneet voor de regio werken (bijvoorbeeld quantum R&D voor energie en klimaat). Voorbereiding en keuze voor thema's kan nu beginnen.

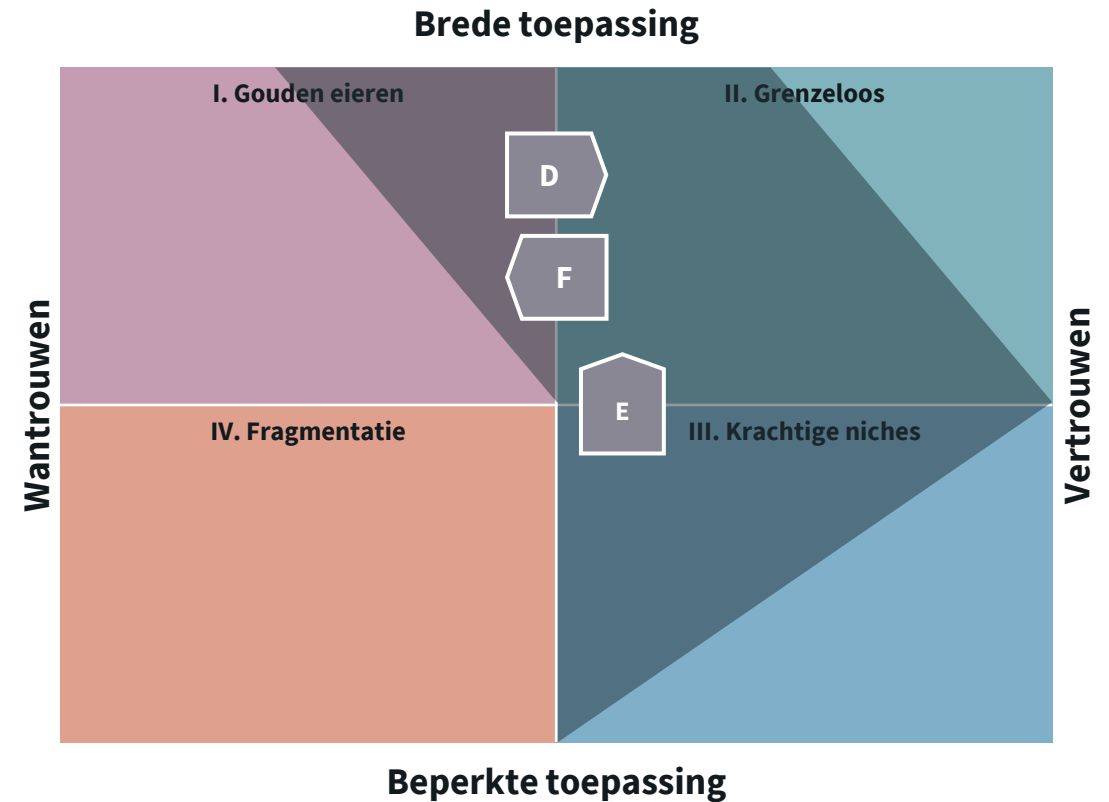


6. Perspectieven - Regio

Interventies die helpen sturen op de bandbreedte zijn mogelijk (2)

Naast ecosysteemversterking zijn deels ook nieuwe interventies mogelijk die zich specifiek richten op de waardeketens in Zuid-Holland:

- D Acquisitie:** Monitor met partners scherp welke niches relevant worden en ondersteun samenwerkingen in kansrijke gebieden. Selecteer die niches waar Nederlandse spelers veel toegevoegde waarde kunnen bieden en acquireer buitenlandse industrie en R&D partners die een toevoeging kunnen bieden op die waardeketen. Nederland en Zuid-Holland hebben een uitstekend kennisecosysteem, wat op dit moment de onderscheidende sterkte is voor de vestigingsbeslissingen van bedrijven. De ROM kan hierbij in de lead zijn.
- E Regie:** Door de kennis van Quantum Delta NL en regionale hubs goed te combineren kan het veld zo georganiseerd worden dat bedrijven in Nederland de juiste ketenpartners vinden. Daarnaast kan de aandacht voor verschillende uitdagingen op een goede manier gespreid worden, om kluitjesvoetbal of schieten met hagel te voorkomen. Hier ligt een rol voor de KAT leiders van de Nationale Agenda Quantum Technologie.
- F Positionering:** Zorg bij het stimuleren van bedrijvigheid voor goede bescherming van intellectueel eigendom of garandeer dat bedrijven in Nederland hoofdkantoor blijven houden. Tegelijkertijd moeten Nederlandse startups geen restricties opgelegd krijgen voor handel en export waarmee hun groeikansen geschaad worden. Quantum Delta NL heeft een valorisatieteam opgericht dat kan helpen met het beschermen van intellectueel eigendom. De provincie kan samen met het Rijk afspraken maken over de beste manier om quantum bedrijvigheid te beschermen.



6. Perspectieven - Acties

Acties die mogelijk zijn voor versterking van ecosysteem Zuid-Holland

Experimenten 	Sensing: sturen op een demonstratieproject in e.g. tuinbouw, logistiek (smart mobility) of infrastructuur met gebruik van quantum sensoren.
	Communication: betrek de hightech, space en security community van bedrijven bij quantum (satelliet) communicatie en bouw voort op de in gang gezette Europese projecten in dit domein.
	Computing: formeer experimenten rondom gebruik van Quantum Inspire en/of andere platforms en consortia voor eenvoudige molecuul/materiaalsimulatie voor de chemie, energie of composieten.
Kapitaal 	Investeer in veelbelovende spin-offs, heb daarbij aandacht voor sensing en communicatie, waar sneller applicaties verwacht worden dan in computing. Boor een (internationaal) netwerk van deep tech investeerders aan voor het aantrekken van groei-investeringen voor quantum startups. Kies daarbij als publieke financiers voor een positie in de take-off fase. Het Lightspeed initiatief van Q Δ NL kan eerste pre-seed financiering leveren, private investeerders kunnen opschalen, maar daartussen is en blijft kapitaal nodig om productontwikkeling en markttoegang te financieren.
Missies 	Wees als regio (eventueel samen met andere regionale/decentrale overheden) probleemeigenaar en <i>launching customer</i> van een uitvraag waarbij quantumsensoren of quantumcommunicatie gebruikt kunnen worden. Begin daarnaast met langere termijn plannen voor een missiegedreven R&D centrum voor quantumtechnologie op een maatschappelijke uitdaging (zoals energie en klimaat).
Keten & talent 	Onderzoek samen met Nederlandse quantum-bedrijven en eindgebruikers welke internationale spelers naar Nederland gehaald kunnen worden voor de versterking van de keten. Maak samen met wetenschap en industrie een keuze over welke niches als eerste aandacht krijgen in een actieagenda voor internationale acquisitie. Maak samen met Q Δ NL en de nationale overheid goede afspraken over hoe de regio kan bijdragen aan de bescherming van quantumtechnologieën. Zet talent en gendergelijkheid in quantumtechnologie hoog op de agenda om een inclusievere werkomgeving te realiseren en meer talent aan te trekken.

Bij experimenten kan aangesloten worden bij het Quantum Delta NL programma voor fieldlabs.

6. Perspectieven - Prioriteiten

Zuid-Holland kan nu beginnen met acties voor versterking ecosysteem

Quantumtechnologie is een innovatie ecosysteem in de ontwikkelingsfase. Het Zuid-Hollandse ecosysteem is zeer sterk in kennisontwikkeling en onderneemt nu eerste stappen richting commercialisatie. Dat betekent dat ondernemers

1. experimenteerruimte moeten krijgen,
2. aan moeten sluiten op een missie en
3. kennis moeten kunnen uitwisselen.

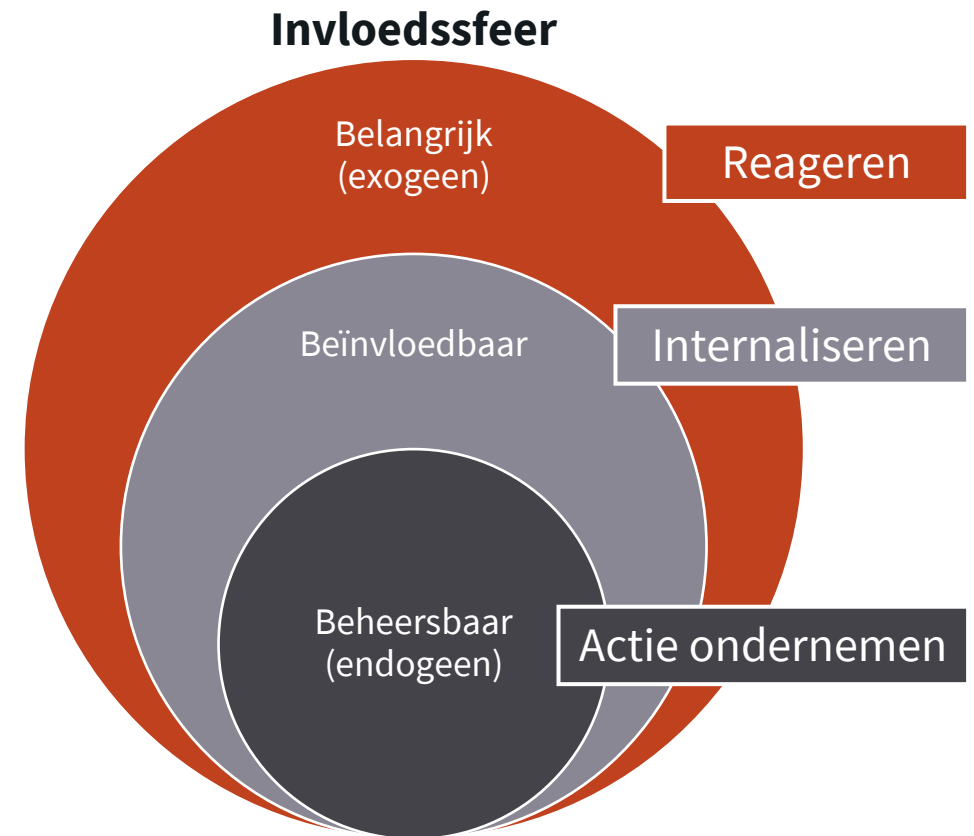
De regio kan hier op dit moment aan bijdragen met drie typen acties die verbonden zijn met de agenda van Q△NL. Om te laten zien waar concrete acties behulpzaam zijn, zijn deze hiernaast tentatief uitgewerkt. Bij de uitwerking zullen concrete details scherper worden.

Programma	Trekker	Samenwerking	Beoogd Resultaat
1. Experimenten via Fieldlabs in sensing voor hightech en logistiek en computing (simulatie) voor chemie.	InnovationQuarter en industriële partners	KAT 1 (computing) en KAT 3 (sensing applications) van Q△NL, EBZ groeiagenda, accounthouders gemeenten	Twee werkende demonstratieprojecten binnen e.g. 2 jaar.
2. Missiegedreven agenda om een werkend quantum key distribution netwerk tussen de Zuid-Hollandse gemeenten te bouwen.	Provincie en gemeenten als vragende en financierende partij, wetenschappelijk boegbeeld en private partijen als opdrachtnemer	KAT 2 (national quantum network) van Q△NL, andere regio's (Eindhoven & Amsterdam), KPN	Binnen e.g. 2 jaar aan elkaar verbonden operationele nodes in grootste gemeenten Zuid-Holland.
3. Kennisnetwerken tussen wetenschap en industrie verder stimuleren, private spelers werven om deel te nemen aan experimenten.	QuantumDelft en InnovationQuarter	Actielijn 2 (ecosysteem) van Q△NL, andere regionale quantum hubs, accounthouders gemeenten	Vijf nieuwe industriële partners in het Zuid-Hollandse quantum ecosysteem binnen e.g. 2 jaar.

Bijlagen

Scenario's geven perspectief op een onzekere toekomst

- Vanwege de toekomstige onzekerheid en de potentieel grote impact hebben ondernemers, industrie en overheid in de toekomst in regio Zuid-Holland perspectief nodig op quantumtechnologie en de factoren die de ontwikkeling daarvan beïnvloeden. Door middel van toekomstonderzoek kunnen stakeholders prioriteiten stellen voor de toekomst, en zich voorbereiden op meerdere mogelijke gebeurtenissen.
- Er zijn meerdere vormen van toekomstonderzoek. We gebruiken een scenario-aanpak om twee redenen:
 1. Niet alle ontwikkelingen rondom quantumtechnologie liggen binnen de **invloedssfeer** van het Nederlandse ecosysteem maar zijn afhankelijk van exogene factoren. Door deze factoren in kaart te brengen versterken we de voorbereiding.
 2. Het is moeilijk om accurate projecties of voorspellingen te doen vanwege onzekerheid rondom quantumtechnologische ontwikkeling, maar het is wel mogelijk om **causaal** te beredeneren hoe de wereld kan reageren op deze ontwikkelingen, als ze zich voordoen. Met die redenering is een verhaallijn te maken die aanspreekt.



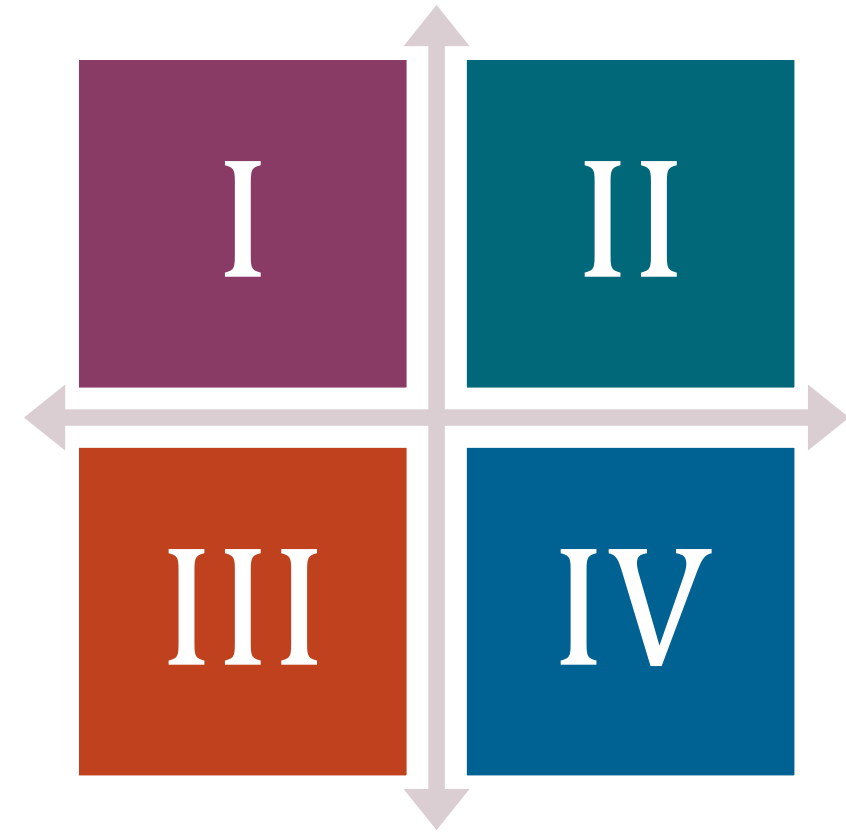
Toekomst verkennen met scenario's door intensieve strategische dialoog

Strategische dialoog

- De scenario-methode doen we in strategisch dialoog tussen wetenschappers, ondernemers en industrie-experts. We gaan met elkaar de omgeving van QT *verkennen*.
- In de periode februari tot en met juni 2021 doorlopen we een iteratief proces.
- Het proces is ook een resultaat op zich: we spreken diverse partijen en gaan op een andere manier in gesprek.
- Polariteit helpt om extreme hoekpunten op te zoeken.
- Samen proberen we antwoorden te formuleren op de vraag: *What if...?*

Toewerken naar vier scenario's

- We plotten de reacties van experts en informatie uit desk research op impact en onzekerheid en zoeken naar categorieën en gemene delers daarbinnen.
- Samen met experts vormen we de twee grootste onzekerheden die de toekomst kunnen veranderen.
- Zodra deze onzekerheden loodrecht tegenover elkaar komen te staan, ontstaan vier scenario's in een kwadrant.
- Bij ieder scenario komt een omschrijving; *een narrative*. We geven woorden aan de vier situaties en beschrijven de mogelijke impact voor bijvoorbeeld speerpuntsectoren.

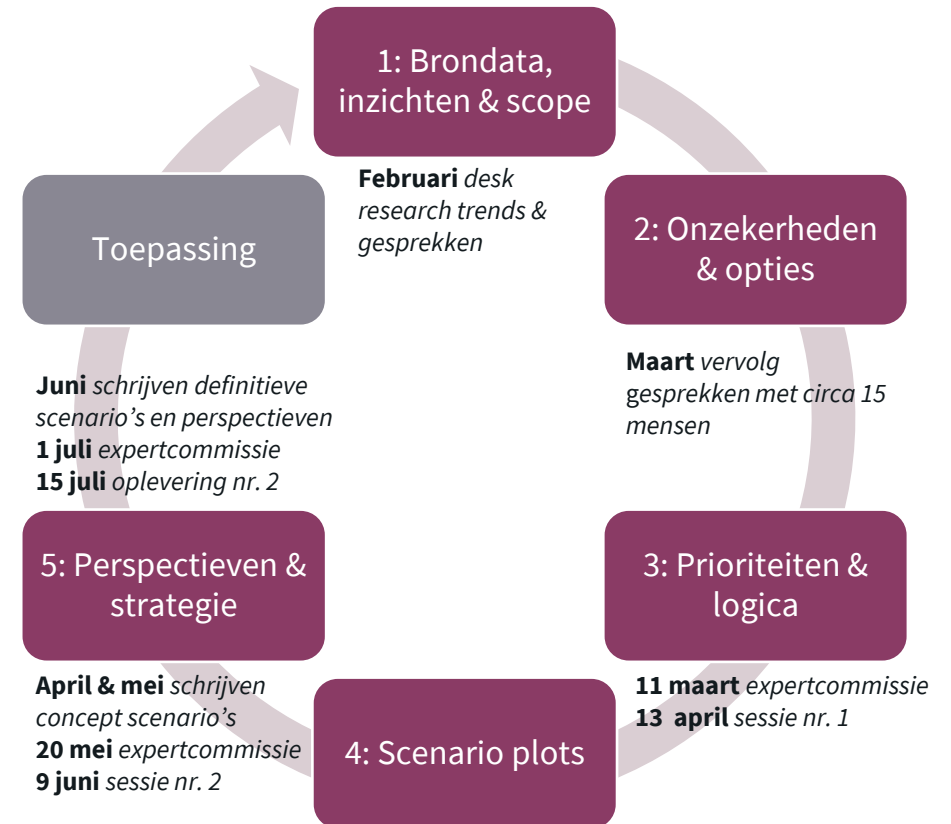


Methode

Stappenplan voor het vormen van scenario's

In de periode februari tot en met juli 2021 doorlopen we vijf stappen.

- Stap 1: Verzamelen brondata, verkrijgen van inzichten en vaststellen scope. Met behulp van desk research en informatie uit de gesprekken met de stakeholders en experts bakenen we het onderzoek af.
- Stap 2: Inventariseren onzekerheden en opties. Door gesprekken met respondenten uit de wetenschap, industrie en ondernemers inventariseren we de grootste onzekerheden.
- Stap 3: Bepalen van prioriteiten en logica. In een gezamenlijke scenariosessie verzamelen we alle onzekerheden en prioriteren we samen welke het meest invloedrijk zijn.
- Stap 4: Opstellen van scenario verhaallijnen. Met de meest invloedrijke onzekerheden beschrijven we vier scenario's en werken we een plausibele verhaallijn uit.
- Stap 5: Beschrijven van perspectieven en strategieën. Met behulp van reacties van onze stakeholders, experts en respondenten verfijnen we de scenario's en werken we een aantal mogelijke interventies uit voor regionaal beleid.



Respondenten

We danken deze organisaties voor deelname aan interviews en sessies

Industrie en potentiële eindgebruikers

- ABN Amro
- Demcon
- Cisco
- Havenbedrijf Rotterdam
- Keygene
- Fox-IT
- Ispispace
- Compumatica
- SBL cybersecurity
- Deloitte
- Agentschap telecom
- MinBZK
- Batenburg
- Technolution

Startups en toeleveranciers

- OrangeQS
- Delft Circuits
- Quantware
- Qblox
- Quix

Kennisinstellingen

- TNO
- Universiteit Leiden
- QuTech
- TU Delft
- Hogeschool van Amsterdam
- Universiteit Twente

Netwerken

- Quantum Delta NL

Bas van der Starre
(bas.vanderstarre@birch.nl)

Corine Bos
Elmar Cloosterman
Jan Peter van den Toren

Driebergen, 15-07-2021