Ministerie van Infrastructuur
en Waterstaat

Van Bits naar Qubits

Quantum Delta NL
Centre for Quantum and Society

TNO innovation for life

Nieuwe kansen van quantum-technologie voor het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Een strategische verkenning naar impact en randvoorwaarden voor nu en de nabije toekomst

Ministerie van Infrastructuur
en Waterstaat

Van Bits naar Qubits

Nieuwe kansen van quantum-technologie voor het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Een strategische verkenning naar impact en randvoorwaarden voor nu en de nabije toekomst

Quantumtechnologie

Quantumtechnologie is nog in een vroeg stadium van ontwikkeling, maar op deelgebieden al concreet aan het worden. Tevens is quantumtechnologie in de Nationale Technologie Strategie (NTS) door het kabinet aangemerkt als één van de tien prioritaire sleuteltechnologieën. De sleuteltechnologie is van strategisch belang voor Nederland en heeft een positieve impact en unieke positie, ook in het kader van recente geopolitieke ontwikkelingen. Op tijd inzetten op kennis en/of beschikbaarheid van quantumtechnologie in het kader van strategische autonomie voor Nederland én Europa is urgent en belangrijk. Daarom is vroegtijdig onderdeel zijn van het Nederlandse ecosysteem voor quantumtechnologie essentieel. Om de toepassingen voor positieve impact te verkennen, is extra kennis nodig. Er moet worden bekeken voor welk organisatievraagstuk quantumtechnologie kan helpen én welke ethische, juridische en maatschappelijke aspecten daarbij komen kijken. Zo kan het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) tijdig de collega's van bedrijfsvoering, beleid, uitvoering en inspectie meenemen in de ontwikkelingen én voortbouwen op het innovatieve karakter van IenW. In 2024 is daarom een samenwerking gestart tussen IenW het Centre for Quantum and Society van Quantum Delta Nederland en TNO om te inventariseren welke kansen de technologie biedt en welke niet-technische aspecten in de toekomst aan bod kunnen komen. Voor een aantal directoraten-generaal, Rijkswaterstaat en het Planbureau voor de Leefomgeving zijn verkennende workshops uitgevoerd, waarna afhankelijk van de uitkomsten en op basis van beschikbare capaciteit en het tijdpad is besloten tot technische verdieping en/of het verkennen van de impact op ELSA-aspecten (Ethical, Legal & Societal Aspects).

Inhoudsopgave

Voorwoord 8

1. Managementsamenvatting 10

2. Quantumcomputers – een introductie 16
- Superpositie, verstrengeling en metingen 17

3. Programmeren van een quantumcomputer 18
- Complexiteit van (quantum)algoritmes 19

4. Quantum sensing – een introductie 21
- Wat is een quantumsensor? 22
- Potentiële voordelen van quantumsensoren 23
- Soorten quantumsensoren en hun toepassing 24
- Voorbeelden van quantumsensoren 24
- Conclusie 25

5. Potentiële use cases voor quantumtechnologie 26

Directoraat-generaal Water en Bodem (DGWB) 27

Potentiële use cases quantumtechnologie DG Water en Bodem 27

Over het directoraat-generaal Water en Bodem (DGWB) 29
- De uitdagingen van DGWB 29

Mogelijke use cases van quantumtechnologie voor DGWB 30

De verdiepende use case over waterkwaliteit met Evides 32

De EQTA- workshop met DGWB en Evides 34
- De impact op technologie 36
- De impact op de omgeving 36
- De impact op de mens 37
- Vervolg 37

Directoraat-generaal Mobiliteit (DGMo) 38

Potentiële use cases quantumtechnologie DG Mobiliteit 38

Over het directoraat-generaal Mobiliteit (DGMo) 39

- De uitdagingen van DGMo 40

Mogelijke use cases van quantumtechnologie voor DGMo 41

- Vervoersmodellen: het bepalen van de bereikbaarheid via het Nederlandse wegennet 42
- Quantum machine learning 44
- Meten van de hoeveelheid verkeer per voertuigtype 45
- Navigatie zonder GPS 46

Directoraat-generaal Milieu en Internationaal (DGMI) 47

Potentiële use cases quantumtechnologie DG Milieu en Internationaal 47

Over het directoraat-generaal Milieu en Internationaal (DGMI) 48

- De uitdagingen van DGMI 49

Mogelijke use cases van quantumtechnologie voor DGMI 50

- Bepalen van stofveiligheid 51
- Detectie van gassen in de atmosfeer en internationale aspecten van vervuiling 52
- Meten van fijnstof in de lucht 53
- Quantumsensoren bij plasticrecycling en metaaldetectie 55

Directoraat-generaal Luchtvaart en Maritieme Zaken (DGLM) 56

Potentiële use cases quantumtechnologie DG Luchtvaart en Maritieme Zaken **56**

Over het directoraat-generaal Luchtvaart en Maritieme zaken (DGLM) **57**

- De uitdagingen van DGLM 58

Mogelijke use cases van quantumtechnologie voor DGLM **59**

- Vervoersmodellen 60
- Quantum machine learning 61
- Meten van de hoeveelheid verkeer per voertuigtype 62
- Navigatie zonder GPS 63

Rijkswaterstaat (RWS) 65

Potentiële use cases quantumtechnologie Rijkswaterstaat **65**

Over Rijkswaterstaat **66**

- De uitdagingen van RWS 66

Mogelijke use cases van quantumcomputers voor RWS **68**

Mogelijke use cases van quantumsensoren voor RWS **70**

- Combinatie van quantumtechnologieën 72
- Technisch perspectief van use cases RWS verder uitgewerkt 73

De verdiepende potentiële use case: bescherming van vitale infrastructuur op basis van anomaliedetectie **74**

Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) 76

Potentiële use cases quantumtechnologie
Planbureau voor de Leefomgeving 76
Over het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) 77
- De uitdagingen van PBL 77

Mogelijke use cases van quantumcomputers voor PBL 79
Mogelijke use cases van quantumsensoren voor PBL 81
Technische verdieping en EQTA: een van de use cases nader uitgewerkt 83
- Beschrijving van het model 85

6. Tijdpaden quantumcomputing & quantum sensing 87
- Tijdpad quantumcomputing 87
- Tijdpad quantum sensing 91

7. Aanbevelingen 95
- Aanbevelingen ministerie van IenW 96
- Aanbevelingen CQS 97
- Aanbevelingen TNO 98

Colofon 100

Bijlagen 102

Voorwoord

Hoe kunnen we de kans op overstromingen nauwkeuriger voorspellen? Hoe kunnen we de bereikbaarheid in Nederland sneller en efficiënter optimaliseren? En welke mogelijkheden zijn er om de gelaagdheid en stevigheid van dijken preciezer te meten?

Nederland staat voor serieuze uitdagingen, die vragen om innovatieve oplossingen. Met quantumtechnologie betreden we een nieuw tijdperk, met ongekende mogelijkheden voor technische reken-, meet- en waarnemingsmogelijkheden die tot voor kort niet bestonden.

We betreden relatief onbekend terrein, met nieuwe oplossingen en risico's. Het gekke is dat je vooral leest over die risico's. 'Wat zijn quantumcomputers en waarom bedreigen ze onze veiligheid?', kopte een tijdschrift in december 2024. Cyberaanvallen op onze vitale infrastructuur – denk aan water, energie en transport – worden steeds geavanceerder en moeilijker te detecteren. Digitale *firewalls* zijn niet bestand tegen de rekenkracht van een quantumcomputer. Het is van levensbelang dat we de cyberverdediging goed op orde houden. Terecht dat we daar veel tijd, energie en geld in steken.

Maar waar bedreigingen zijn, zijn ook kansen. Quantumtechnologie is veelbelovend voor de samenleving, industrie en wetenschap. Dat roept bij mij meteen de vraag op: wat kunnen wij ermee bij het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat? Het goede nieuws is: Nederland heeft een vooraanstaande positie op het gebied van quantumtechnologie en behoort tot de wereldwijde koplopers. Doel is om deze leidende rol te behouden en verder uit te bouwen.

De mogelijkheden van quantumcomputers, -simulators, en -sensoren zijn enorm, niet alleen voor de wetenschap, maar ook voor de industrie en de samenleving. We staan volgens kenners aan de vooravond van een technologische revolutie die kan bijdragen aan oplossingen voor allerlei grote maatschappelijke uitdagingen.

Het is geweldig mooi dat het directoraat-generaal (DG) Water en Bodem in de praktische toepassingen van quantumtechnologie is gedoken. Samen met TNO en Quantum Delta Nederland (QDNL) is een aantal workshops voor ons ministerie en haar dienstonderdelen georganiseerd om de mogelijke toepassingen en kansen te verkennen. Hierbij waren niet alleen interne collega's, maar ook het ministerie van Defensie en marktpartijen aanwezig. Het gaat om een interdepartementale, publiek-private samenwerking, waarbij nieuwe kennis en bevindingen die waardevol zijn voor heel veel mensen gezamenlijk moeten worden opgepakt en besproken.

De innovatie zit hem dus zowel in de technologie als in de 'grensoverschrijdende' manier van samenwerken. Belangrijk om te vermelden, is dat het om eerste verkenningen gaat en dat de technologie nog moet doorgroeien. Maar ik ben heel blij met deze nieuwe inzichten en ideeën. Want bedenk even: twee jaar geleden werd de wereld verrast door de indrukwekkende mogelijkheden van de generatieve AI-toepassing ChatGPT. Ergens was eraan gewerkt, en ineens 'moesten' wij er iets mee. Dit keer spelen wij meer in de voorhoede mee en zijn wij met onze samenwerkingspartners de pioniers.

Ik hoop dat deze publicatie u inspireert en dat wij aan de vooravond staan van een technologische revolutie die wij zelf kunnen vormgeven.

Heel veel leesplezier!

Jan Hendrik Dronkers
Secretaris-generaal bij het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

1. Managementsamenvatting

Nederland wil behoren tot de koplopers op het gebied van quantumtechnologie. In de Nationale Technologie Strategie (NTS) van het kabinet staat de ambitie dat het Nederlandse quantumecosysteem van wereldklasse is, op zowel academisch als industrieel gebied. Daarnaast moet Nederland een internationale magneet worden voor bedrijvigheid en talent. “Nederland is een gidsland met control points in internationale waardeketens voor alle drie de beschreven technologiegebieden (quantumcomputing, -communication en -sensing), met spelers die concurreren op internationaal niveau.”

De opkomst van quantumcomputers en quantumsensoren biedt op termijn ook ongekende mogelijkheden voor complexe vraagstukken binnen het domein Infrastructuur en Waterstaat. Van geavanceerde verkeersmodellen tot het beschermen van kritische infrastructuren op zee, en van nauwkeurigere monitoring van waterkwaliteit en bodemstructuren tot het verbeteren van machine learning-modellen voor autonome voertuigen.

De impact van quantumtechnologieën is dus veelbelovend. Om die reden heeft het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat samen met TNO en Quantum Delta NL een aantal workshops voor verschillende dienstonderdelen georganiseerd om de mogelijke toepassingen en kansen van deze technologieën te verkennen. Het gaat om de volgende DG’s en uitvoeringsorganisaties:

- Water en Bodem (DGWB);
- Mobiliteit (DGMo);
- Milieu en Internationaal (DGMI);
- Luchtvaart en Maritieme Zaken (DGLM);
- Rijkswaterstaat (RWS);
- Planbureau voor de Leefomgeving (PBL).

Het vervolg op de eerste verkennende workshops die potentiële use cases in kaart brachten verschilt per organisatieonderdeel. Met TNO zijn voor sommige onderdelen een aantal technische, verdiepende workshops georganiseerd, waarbij een of enkele potentiële use cases verder zijn uitgewerkt. Met het Centre for Quantum & Society (CQS) zijn een aantal zogeheten EQTA-workshops gedaan. EQTA staat voor Exploratory Quantum Technology Assessment. Het is een online tool ontwikkeld door het CQS die organisaties helpt om de kansen en impact van quantumtechnologie te verkennen. De EQTA biedt een praktisch stappenplan waarmee organisaties tijdig de mogelijkheden en gevolgen van quantumtechnologie kunnen identificeren en beheren, met aandacht voor ethische, juridische en maatschappelijke aspecten.

In dit boekwerk leest u meer over de uitdagingen waar de verschillende onderdelen bij het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat voor staan, welke rol quantumtechnologie – uitgesplitst in quantumcomputers en quantumsensoren – mogelijk kan spelen bij het vinden van innovatieve oplossingen en voor welke potentiële use cases deze technologie het meest kansrijk is. Hierbij gaat het om een interdepartementale, publiek-private samenwerking, waarbij nieuwe kennis en bevindingen die waardevol zijn voor heel veel mensen gezamenlijk moeten worden opgepakt en besproken.

Ondanks het feit dat de definitieve doorbraak nog wel even op zich kan laten wachten, is het belangrijk om nu al na te denken over duidelijke tijdpaden, zodat deze innovaties effectief kunnen worden ingezet. Dit helpt bij het identificeren van haalbare stappen, het plannen van benodigde investeringen en het afstemmen van beleid op technologische ontwikkelingen.

In onderstaande tabel vindt u een tijdpad van mogelijke toepassingen van quantumcomputing in het domein Infrastructuur en Waterstaat:

	Mogelijke use cases	Onderwerp	Potentieel interessant voor
	HORIZON 1 2025-2035		
1.	**Vervoersmodellen**	QML-filevoorspellingen	PBL, DGLM, DGMO
2.	**Hydrologische modellen**	Variational quantum-algoritme voor CFD	RWS, DGWB
3.	**Quantumcomputing voor chemie**	Quantum-clustering voor toxicologische eigenschappen	DGMI
4.	**Sluisoptimalisatie**	Quantum optimalisatie-aanpak voor complexe planningsproblemen	RWS
5.	**Energiemodellen**	Quantum netwerk modellen	PBL
6.	**Sluisoptimalisatie**	Quantum enhanced 2-stage optimalisatie	RWS
7.	**Vervoersmodellen**	Restricted Boltzmann Machine real time traffic control	PBL, DGLM, DGMO
8.	**Klimaat-, luchtkwaliteit- en scenario-analyse**	Restricted Boltzmann Machine voor systeemsimulatie	DGWB, RWS, DGMI
9.	**Remote sensing**	QML voor remote sensing	DGWB

Mogelijke use cases	Onderwerp	Potentieel interessant voor
HORIZON 2 2030-2040		
1. **Quantumcomputing voor chemie**	QMC for chemical properties	DGMI
2. **Risk analysis**	QMC for risk management	RWS, PBL
3. **Hydrologische modellen**	PDE solver hydrologische processen	RWS, DGWB
4. **Klimaat-, luchtkwaliteit- en scenario-analyse**	PDE solver-klimaatmodellen	DGWB, RWS, DGMI
HORIZON 3 2035-2045		
1. **Vervoersmodellen**	Lineair stelsel verkeersstromen	PBL, DGLM, DGMO

En dit is het tijdpad van mogelijke toepassingen van quantumsensoren binnen het domein Infrastructuur en Waterstaat:

	Mogelijke use cases	Onderwerp	Potentieel interessant voor
	HORIZON 1 2025-2035		
1.	**Bepalen van lagen in een dijk en detecteren van 'piping'**	Quantumgravimeters, Quantummagnetometers	DGWB
2.	**Detecteren van scheepswrakken, mijnen en containers in zee**	Quantumgravimeters, Quantummagnetometers, Quantum-LIDAR	RWS
3.	**Op afstand bepalen van waterkwaliteit en detecteren van chemicaliën**	Quantummagnetometers, Quantumdeeltjessensoren, Quantumspectroscopie	DGWB
4.	**Meten van bodemerosie en -verzakking**	Quantumgravimeters	DGWB
5.	**Bescherming van vitale infrastructuur op basis van anomaliedetectie**	Quantumgravimeters, Quantummagnetometers	RWS
6.	**Werking van klassieke sensoren monitoren met quantumsensoren**	Afhankelijk van de klassieke sensor om te controleren	RWS
7.	**Meten van fijnstof in de lucht**	Quantumdeeltjessensoren	PBL, DGMI
8.	**Quantumsensoren bij plasticrecycling en metaaldetectie**	Quantummagnetometers	DGMI
9.	**Precieze frequentiemetingen voor geluid**	Quantumklokken	DGMI
10.	**Meten van de hoeveelheid verkeer per voertuigtype**	Quantummagnetometers	DGLM, DGMO
11.	**Navigatie zonder GPS**	Quantummagnetometers, Quantumgravimeters, Quantumversnellingsmeters	DGLM, DGMO

	Mogelijke use cases	Onderwerp	Potentieel interessant voor
	HORIZON 2 2030-2040		
1.	**Detecteren van schepen waarbij Automatic Identification System (AIS) uit staat**	Quantumradar	RWS
2.	**Detectie van gassen in de atmosfeer & Internationale aspecten van vervuiling**	Quantumspectroscopie	DGMI
3.	**Schademetingen van structuren (bruggen/viaducten)**	Quantumversnellingsmeters	RWS

Tot slot staan er een aantal belangrijke aanbevelingen in dit boekwerk voor een succesvolle implementatie van quantumtechnologieën:

- Ontwikkel een goede technologie-roadmap voor quantumtechnologie;
- Investeer in het ecosysteem om direct intern knowhow te kweken op het gebied van quantumtechnologie;
- Ontwikkel een impact-roadmap en betrek alle stakeholders (in- en extern) al in een vroeg stadium;
- Zet in op een integrale aanpak voor de inzet van quantumtechnologie, omdat toepassingen relevant zijn voor meerdere organisatieonderdelen;
- (Internationale) samenwerking is cruciaal voor synergie en innovatie. Breng domeinexperts en technische quantumexperts samen om praktische toepassingen te ontwikkelen en doorbraken te realiseren;
- Houd rekening met beleid en regelgeving, inclusief ethische en veiligheidsaspecten;
- Begin met kleinschalige pilotprojecten, test en stel mechanismen in voor voortdurende monitoring en evaluatie om de effectiviteit en impact te beoordelen;
- Profiteer van de aanwezige quantumkennis in Nederland en ga pionieren!

2. Quantumcomputers – een introductie

Vrijwel iedereen heeft een of meerdere klassieke (of conventionele) computers in het bezit, of het nu een laptop of desktop is, of een kleiner apparaat zoals een smartphone of tablet. Een computer is een apparaat waarmee gegevens volgens algoritmen kunnen worden verwerkt met behulp van software. Als de gebruiker een opdracht geeft aan de computer door bijvoorbeeld een of meerdere toetsen in te drukken, wordt deze opdracht vertaald in een voor de computer leesbare taal. Deze taal bestaat uit heel veel nullen en enen – het zogeheten binaire stelsel. De volgorde waarin deze nullen en enen (ook wel bits genoemd) staan, bepaalt wat de computer doet.

Onze huidige conventionele computers kunnen veel alledaagse praktische problemen oplossen, bijvoorbeeld op het gebied van communicatie, informatie zoeken en verwerken, financiën en administratie. Er zijn echter ook uitdagingen waar ze minder geschikt voor zijn. Bijvoorbeeld bij het maken van complexe berekeningen die heel veel computerkracht en/of tijd kosten. Denk aan het simuleren van de natuur op de schaal van atomen en moleculen, het kraken van encryptieprotocollen, het sneller en beter trainen van neurale netwerken, patroonherkenning, en big data-analyse met behulp van AI. Hiervoor is een ander type computer nodig: **de quantumcomputer.**

Superpositie, verstrengeling en metingen

Met quantumcomputers kunnen straks veel sneller betere oplossingen worden bedacht voor belangrijke (maatschappelijke) uitdagingen. Een processor van een quantumcomputer kan in één keer (parallel) dezelfde berekeningen uitvoeren over een zeer grote hoeveelheid data. Wel is een quantumcomputer slechts inzetbaar op zeer specifieke taken.

Quantumcomputers maken gebruik van drie quantummechanische principes om bewerkingen uit te voeren: superpositie (0 en 1 tegelijk zijn), quantumverstrengeling (entanglement) en interferentie. Deze principes worden in de bijlage nader toegelicht. Wanneer deze drie principes op de juiste manier benut worden, kan een quantumdeeltje vanaf meerdere posities (binnen een chip) gemanipuleerd worden, zonder dat het zijn superpositie verliest.

Daarnaast zijn er **metingen** nodig om informatie uit het quantumsysteem te halen. Als je een qubit bekijkt (meet), forceer je deze om een 0 of een 1 te worden. De kans waarmee dat gebeurt hangt af van de initiële superpositie. Door één qubit te bekijken, verander je de toestand van het gehele systeem. Van de andere qubits blijven alleen de toestanden bestaan die mogelijk zijn op basis van de gevonden uitkomst van de meting.

In de bijlage staat meer uitleg over de wiskunde achter superpositie en verstrengeling.

3. Programmeren van een quantumcomputer

Quantumcomputers zijn in staat om bepaalde – dus niet alle – problemen veel sneller op te lossen dan de beste conventionele computers met de meest geavanceerde algoritmes. Quantumcomputers zijn alleen nog wel moeilijk om te bouwen. De beste quantumcomputers die tot nu zijn gebouwd, zijn nog gevoelig voor ruis en slechts beperkt inzetbaar voor het oplossen van praktische problemen. De verwachting is dat quantumcomputers de komende tien jaar steeds beter worden en vaker kunnen worden ingezet bij het vinden van oplossingen voor (maatschappelijke) problemen. Zeker in combinatie met sleuteltechnologieën als Artificial Intelligence (AI) en data science, data analytics en data spaces biedt dit oneindig veel nieuwe mogelijkheden.

Het is zaak om niet achterover te leunen totdat deze quantumcomputers op de markt komen. We kunnen deze tijd goed gebruiken om ons voor te bereiden op de quantumcomputer. Bij de conventionele computer zorgen programmeertalen, besturingssystemen en compilers ervoor dat we ons niet druk hoeven te maken over hoe de programma's en apps die we gebruiken worden vertaald in bits en operaties met die bits. Vergelijkbare zaken moeten worden voorbereid voor quantumcomputers. Daarnaast moet worden bekeken welke invloed quantumcomputers zullen hebben op de organisatie en ons werken.

De eerste programmeertalen voor quantumcomputers zijn inmiddels beschikbaar, maar de ontwikkeling hiervan heeft nog een flinke inhaalslag te maken. Verder kunnen we nu al werken aan toepassingen met quantumalgoritmes. Deze algoritmes bieden een stap-voor-stap beschrijving hoe je een probleem op kan lossen met een quantumcomputer. In Nederland houden onder meer TNO, de Universiteit Leiden en QuSoft (een combinatie van het Centrum voor Wiskunde en Informatica en de Universiteit van Amsterdam) zich hiermee bezig.

Complexiteit van (quantum)algoritmes

Om te begrijpen waar de kansen liggen van quantumcomputers, is het belangrijk om iets meer te begrijpen van de rekenkundige complexiteit. Een rekenprobleem is een taak die in principe door een computer op te lossen is door achtereenvolgens wiskundige stappen toe te passen. Dit wordt ook wel een algoritme genoemd. We onderscheiden de volgende mogelijkheden binnen de complexiteitstheorie:

- Een probleem oplossen;
- Een oplossing verifiëren;
- De beste oplossing vinden.

In de bijlage staat meer uitleg over de complexiteitsklassen binnen de informatica.

Bij het zoeken naar de juiste use case voor quantumcomputers zijn er grofweg twee mogelijkheden:

1. Problemen die een quantumcomputer efficiënt kan oplossen maar een klassieke computer niet. Dit zijn vaak problemen waar enige vorm van structuur in zit of waarbij gezocht moet worden.
2. Problemen waarbij quantumcomputers een rol kunnen spelen bij het snel(ler) vinden van een goede of betere oplossing dan bij een klassieke computer. Vaak zijn dit problemen waarbij machine learning of kansverdelingen een rol spelen.

Quantumcomputers kunnen het aantal problemen dat kan worden opgelost aanzienlijk groter maken. Wel moet worden opgemerkt dat er een enorme hoeveelheid problemen overblijft die niet efficiënt kunnen worden opgelost, zelfs niet met een quantumcomputer.

Quantumcomputers zijn bijvoorbeeld sterk in:

- het efficiënt doorzoeken van grote, complexe databases zonder vooraf gestructureerde indelingen;
- het herkennen van patronen en periodiciteit* in functies en data;
- het oplossen van lineaire systemen;
- het oplossen van bepaalde problemen binnen machine learning en AI (door de voordelen op het gebied van efficiency, tijdwinst en capaciteit).

In de bijlage leest u meer over quantumhardware en quantumalgoritmes.

*) *Periodiciteit verwijst naar een patroon of cyclus dat zich telkens opnieuw voordoet, vaak met een constante periode (de tijd of afstand tussen opeenvolgende herhalingen).*

4. Quantum sensing – een introductie

Om te begrijpen wat quantumsensoren zijn en quantum sensing precies is, beginnen we met een introductie over sensoren in het algemeen. TNO hanteert binnen dit project de volgende definitie voor sensoren:

Een sensor is een apparaat dat een stimulus (een fysieke grootheid, eigenschap of toestand) ontvangt en reageert met een elektrisch signaal.

Sommige sensoren bevatten een component dat een transducer wordt genoemd. Een transducer is in staat om de ene energievorm om te zetten in een andere. Sensoren maken meestal deel uit van een groter (data-acquisitie) systeem, dat vaak andere sensoren en elektronica omvat om de signalen die door de sensoren worden geproduceerd te evalueren.

Voorbeelden van grootheden die vaak door sensoren gemeten worden (en hoe ze worden toegepast) zijn:

- **Magnetische velden**
  Bijvoorbeeld gebruikt om objecten te detecteren die het magnetische veld verstoren (zoals onderzeeërs) of om geologisch onderzoek te doen;
- **Versnellingen**
  Bijvoorbeeld om trillingen van gebouwen te meten, om de positie te bepalen van je telefoon, om snelheden vast te stellen, of om de activiteit van vulkanen te monitoren;
- **Rotaties**
  Bijvoorbeeld om je te kunnen oriënteren, bijvoorbeeld bij gyroscopen in systemen die zichzelf stabiliseren (zoals camera's);

- **Tijd**
  Het hebben van een zeer nauwkeurige timer komt van pas bij het synchroniseren van signalen van verschillende netwerkverbindingen en is cruciaal bij plaatsbepaling met gps;
- **Druk**
  Bijvoorbeeld om de bandenspanning van voertuigen te meten, of om de hoogte te bepalen van vliegtuigen of de stroomsnelheid van vloeistoffen.

Als het gaat om de prestaties van sensoren is het belangrijk om de volgende eigenschappen in kaart te brengen:

- ruisniveaus;
- gevoeligheid (wat is de kleinste verandering in stimuli die gedetecteerd kan worden?);
- ruimtelijke resolutie (wat is de kleinste ruimtelijke scheiding tussen twee objecten die door de sensor kan worden opgelost?);
- verzadigingsniveau (wat is het punt waarop de sensor zijn maximale outputvolume bereikt? Zo geeft een thermometer die tot maximaal 100 graden gaat alle waarden boven de 100 graden aan als 100 graden).

Wat is een quantumsensor?

TNO hanteert binnen dit project de volgende definitie voor quantumsensoren:

Een quantumsensor is een sensor waarvan minstens één van de transducers een quantumsysteem is (een systeem met verschillende energieniveaus).

Quantumsensoren maken gebruik van quantumdeeltjes (zoals atomen, fotonen of elektronen) die bijzonder gevoelig zijn voor veranderingen in hun omgeving. Door deze veranderingen te meten, kunnen we informatie verkrijgen die klassieke sensoren niet kunnen leveren.

Quantum sensing is een technologie die gebruikmaakt van de unieke eigenschappen van quantummechanica, zoals superpositie en verstrengeling (zie ook het gedeelte over quantumcomputers) om buitengewoon gevoelige metingen te doen. Quantumsensoren zijn in staat om fysieke grootheden zoals tijd, magnetische velden, elektrische velden, temperatuur, druk en rotatie met een ongeëvenaarde precisie te detecteren.

Een grote uitdaging bij het bouwen van quantumcomputers is het isoleren van de qubits, aangezien qubits erg gevoelig zijn voor invloeden van buitenaf, zoals temperatuur en trillingen. Voor quantumdetectie is deze gevoeligheid juist precies waarom we deze quantumsystemen willen gebruiken. In plaats van het isoleren van het quantumsysteem van de omgeving, stellen we het systeem opzettelijk en gecontroleerd bloot aan de omgeving en laten het hierop reageren. Vervolgens proberen we de reacties te detecteren en protocollen te gebruiken om ze te interpreteren als metingen van bepaalde fysische eigenschappen in de omgeving.

Potentiële voordelen van quantumsensoren

De voordelen van het gebruik van dergelijke quantumsystemen hangen af van het type sensor en de beoogde toepassing. Maar over het algemeen zijn quantumsensoren gevoeliger, beschikken ze over een dynamischere meetrange, een betere ruimtelijke resolutie en een lager verloop. Vanwege hun precisie kunnen quantumsensoren veranderingen waarnemen die klassieke sensoren niet kunnen detecteren. Daarnaast ontstaan er nieuwe inzichten en mogelijkheden in gebieden die tot nu toe ontoegankelijk waren. Zo kunnen er metingen op nanoschaal worden verricht of bij extreem zwakke signalen. Tot slot kunnen sommige quantumsensoren sneller reageren dan klassieke sensoren.

Soorten quantumsensoren en hun toepassing

Quantumsensoren bieden nieuwe toepassingsmogelijkheden in bijvoorbeeld de medische diagnostiek, zoals gevoeligere MRI-scanners, waardoor kleinere afwijkingen in het lichaam kunnen worden opgespoord. Daarnaast kunnen quantumsensoren worden gebruikt voor het analyseren van biologische processen op moleculair niveau, zoals het meten van hersenactiviteit of het volgen van individuele eiwitten. Ook in de gravimetrie en seismologie zijn er interessante use cases, zoals het detecteren van ondergrondse olie- of waterreserves, het monitoren van vulkanische activiteit of het nauwkeuriger voorspellen van aardbevingen. Tot slot ontstaan er nieuwe mogelijkheden op het gebied van navigatie en tijdwaarneming, in de industrie, technologie en veiligheidssector.

In de bijlage staat een overzicht van bestaande quantumsystemen die worden gebruikt in sensoren, de fysieke eigenschappen die ze kunnen meten en hoe volwassen de technologie is.

Voorbeelden van quantumsensoren

De atomische gravimeter

De atomische gravimeter is gebaseerd op de principes van atoominterferometrie met lasergekoelde atomen. Deze gravimeters zijn zo nauwkeurig dat ze veranderingen in de zwaartekracht van de aarde kunnen detecteren als ze 1 centimeter omhoog of omlaag worden bewogen. Deze quantumsensoren zijn tien keer gevoeliger dan klassieke sensoren.

Klik hier of scan deze QR-code om een project met de atomische gravimeter te bekijken.

De optisch gepompte magnetometers (OPMs)
Deze meter is gebaseerd op hogedrukstoom met behulp van een laser. De atomen worden beïnvloed door magnetische velden. Deze magnetometers zijn extreem gevoelig en kunnen worden verwerkt in kleine apparaten.

Klik hier of scan deze QR-code om een project met de optisch gepompte magnetometer te bekijken.

Conclusie

Hoewel quantum sensing nog in ontwikkeling is, belooft het grote wetenschappelijke en technologische doorbraken. Er zijn nog wel een aantal belangrijke uitdagingen:

- Quantumsensoren zijn duur en complex om te produceren en te gebruiken;
- Quantumsystemen zijn gevoelig voor verstoringen van de omgeving, zoals trillingen en temperatuurveranderingen;
- Het bouwen van quantumsensoren die werken buiten een gecontroleerde laboratoriumomgeving vormt een uitdaging.

In het volgende hoofdstuk werken we een aantal potentiële use cases voor quantum sensing verder uit op het terrein van Infrastructuur en Waterstaat.

5. Potentiële use cases voor quantumtechnologie

- Directoraat-generaal Water en Bodem (DGWB)
- Directoraat-generaal Mobiliteit (DGMo)
- Directoraat-generaal Milieu en Internationaal (DGMI)
- Directoraat-generaal Luchtvaart en Maritieme Zaken (DGLM)
- Rijkswaterstaat (RWS)
- Planbureau voor de Leefomgeving (PBL)

Directoraat-generaal
Water en Bodem (DGWB)

Potentiële use cases quantum-technologie DG Water en Bodem

Over het directoraat-generaal Water en Bodem (DGWB)

Het directoraat-generaal Water en Bodem (DGWB) is een onderdeel van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW). DGWB zorgt samen met anderen voor de bescherming van Nederland tegen hoogwater, voor een verantwoord (mede-)gebruik en ruimtelijke ordening van de zee. DGWB stuurt op een duurzaam en veilig gebruik van het water-bodemsysteem dat bestand is tegen wateroverlast en droogte en blijvend kan voorzien in de juiste hoeveelheid water, van de juiste kwaliteit, op de juiste plaats.

DGWB geeft richting en invulling aan klimaatadaptatie door de (internationale) klimaatopgaven te vertalen naar uitvoerbaar en toekomstbestendig beleid als sturend fundament voor de inrichting van de fysieke leefomgeving. Zo draagt DGWB bij aan een veilig leefbaar en bereikbaar Nederland.

De uitdagingen van DGWB

DGWB loopt steeds vaker tegen de grenzen van het water- en bodemsysteem aan. Klimaatverandering leidt bijvoorbeeld tot een stijgende zeespiegel, hogere temperaturen, en meer wateroverlast of juist extreme droogte. De beschikbaarheid van voldoende (drink)water is niet langer vanzelfsprekend. Bodemdaling en lage waterstanden zorgen voor veel schade aan funderingen van gebouwen en extra onderhoud aan (spoor)wegen. De conclusie is dat gebruik van land, bodem en water beter op elkaar moet worden afgestemd.

Technische workshop met DGWB over quantumtechnologie.

Mogelijke use cases van quantumtechnologie voor DGWB

De volgende potentiële use cases van quantumcomputers voor DGWB zijn besproken tijdens de technische workshop met TNO:

- Gebruik van quantum AI voor *remote sensing* van rivieren en grote wateren om verontreinigingen in het water te detecteren;
- Ontwikkeling van *digital twin*-simulatiemodellen voor bijvoorbeeld zeespiegelstijgingen en het effect daarvan op de Noordzee;
- Ontwikkeling van modellen voor *predictive maintenance*, bijvoorbeeld voor het voorspellen wanneer een specifieke sluis onderhouden moet worden en wat de gevolgen zijn voor het operationeel waterbeheer;
- De volgende onderwerpen zijn benoemd om verschillende toekomstscenario's door te kunnen rekenen, waarbij de inzet van een quantumcomputer een efficiëntere oplossing kan zijn voor besluitvorming:
  - het versterken en beschermen van de kustlijn tegen erosie en zeespiegelstijging (kustsuppletie);
  - het simuleren en analyseren van droogteverschijnselen (droogtemodellering);
  - bodemverontreiniging;
  - klimaatadaptatie (het aanpassen aan de gevolgen van klimaatverandering);
  - effectievere en tijdigere acties bij waterbeheer en –kwaliteit;
  - het tegengaan en aanpakken van overstromingen;
  - weersverwachtingen (afgegeven door het KNMI).
- Verbeteren van simulatiemodellen voor waterveiligheid door meer factoren mee te nemen in de modellen en door de resolutie te verhogen.

De volgende potentiële use cases van quantumsensoren voor DGWB zijn besproken tijdens de technische workshop met TNO:

- Bepalen van gelaagdheid van dijken. *Piping* (het stromen van water onder dijken) is een probleem dat zo snel mogelijk gedetecteerd moet worden. Dit kan bijvoorbeeld met gravimeters die op drones bevestigd worden;
- Detectie en identificatie van gevaarlijke stoffen in grond-, oppervlakte-, afval en/of watersystemen;
- Analyse van grondlagen en bepaling van de hoeveelheid grondwater met behulp van quantumgravimeters om bodemerosie en verzakkingen op te sporen;
- Detectie van kabels in de ondergrond op basis van metingen van magnetometers (instrumenten om het magnetische veld te meten).

"Today's workshop highlighted the urgent measurement challenges in the water sector. Quantum sensors can potentially help in solving these issues, so it is highly motivating to do these workshops to align the technology development with application needs."

– Simon Cramer, Quantum Sensing, TNO

Een quantumsensor.

De verdiepende use case over waterkwaliteit met Evides

Eerder genoemde potentiële use cases zijn vervolgens nader onderzocht. TNO heeft een eerste inschatting gemaakt van de technische haalbaarheid en de termijn waarop wordt verwacht dat deze use cases te realiseren zijn. In dit geval is gekeken naar een vorm van *quantum sensing* (zie hoofdstuk 4 voor een uitleg van deze technologie). Dit onderdeel van quantumtechnologie is al vergevorderd en waarschijnlijk binnen enkele jaren inzetbaar voor het meten van de waterkwaliteit.

Evides levert veilig en schoon drinkwater aan 2,5 miljoen consumenten en bedrijven in het zuidwesten van Zuid-Holland, de provincie Zeeland en het zuidwesten van Noord-Brabant. Daarnaast biedt Evides innovatieve oplossingen op maat voor grote industriële klanten.

De laatste jaren zijn er sterke fluctuaties in de beschikbaarheid van kwalitatief goed Maaswater, dat de basis vormt voor de productie van drinkwater. De kwaliteit van het Maaswater is afhankelijk van verschillende factoren. In periodes van droogte neemt de concentratie vervuilende stoffen fors toe. Daarnaast lozen bedrijven al dan niet voorgezuiverd afvalwater in de Maas. Piekbuien in landbouwgebieden zorgen voor een verhoogde concentratie nutriënten en gewasbeschermingsmiddelen.

Omdat in toenemende mate ongewenste en onbekende stoffen in het water belanden, is Evides op zoek naar nieuwe manieren om snel, nauwkeurig en betaalbaar de kwaliteit van het Maaswater te bewaken. Op basis van actuele informatie kan Evides tijdig tot een innamestop van Maaswater in haar spaarbekkens overgaan, als de kwaliteit van de aanvoer slecht is.

Continu inzicht maakte het mogelijk om in te grijpen en te anticiperen op de wisselingen in de waterkwaliteit. Daarnaast kan met behulp van *quantum sensing* bij calamiteiten – bijvoorbeeld bij extreme neerslag – veel sneller inzicht verkregen worden in de mate van vervuiling. Vervolgens kan ook eerder worden ingegrepen. Tot slot kan er bij geruchten over mogelijke ziekmakende bacteriën en virussen sneller uitsluitsel worden gegeven over de aard van de besmetting en hoe te handelen.

"Ik vond de workshop erg waardevol, omdat ik me realiseerde dat we met quantumtechnologie aan het begin staan van een co-creatieproces. Met hulp van wetenschappers gaan we ontdekken welke kansen het ons biedt en met wie we moeten samenwerken om die kansen te realiseren. Zo kunnen we in de watersector een goed beleid op deze technologie ontwikkelen."

– Gerry van Meijel, informatiemanager Evides

Workshop DGWB over verantwoorde toepassing van quantum sensing voor het meten van waterkwaliteit.

De EQTA- workshop met DGWB en Evides

Samen met de experts van Evides, DGWB en TNO is de hiervoor beschreven use case verder uitgewerkt op de ethische, juridische en maatschappelijke aspecten door het Centre for Quantum and Society (CQS) in een EQTA-workshop (Exploratory Quantum Technology Assessment). Gekeken is hoe quantumtechnologie gaat helpen bij het meten van ongewenste en onbekende stoffen in rivierwater, voordat het wordt gezuiverd tot drinkwater.

Mogelijke oplossing: Nieuwe meetmethoden, gebaseerd op *quantum sensing*, kunnen in de toekomst mogelijk een bijdrage leveren bij het bepalen van de waterkwaliteit van ruw water voor het produceren van drinkwater. Meting en detectie kunnen zo niet alleen versneld en verbeterd worden, maar ook goedkoper, praktischer en preciezer worden uitgevoerd. De deelnemers hebben onderzocht hoe dit op een verantwoorde wijze kan worden toegepast.

Resultaten: Vanuit ethisch perspectief zien we dat de volgende waarden terugkomen in de genoemde positieve en negatieve effecten van het meten van de waterkwaliteit:

- **Gezondheid, veiligheid en transparantie**
  Het goedkoop, precies en continu kunnen meten van de samenstelling van het rivierwater, ver voordat het wordt ingenomen, maakt het mogelijk om beter te anticiperen op de kwaliteit van het water en gerichter te kiezen wanneer water wordt ingenomen. Evides is altijd heel transparant over de kwaliteit van het drinkwater: data worden continu gepubliceerd en regelmatig wordt de dialoog gezocht met belanghebbenden.
- **Flexibiliteit**
  Flexibiliteit van de meetmethode wordt steeds belangrijker omdat geruchten, incidenten (denk aan een calamiteit in de buurt van de rivier) en desinformatie direct kunnen leiden tot nieuwe vragen over waterkwaliteit en daarmee tot nieuwe, soms tijdelijke, meetbehoeften.
- **Duurzaamheid**
  Als op grote schaal wordt gemeten, betekent dit dat overal sensoren moeten worden geplaatst, enorme hoeveelheden data moeten worden verzameld en bewaard en er grote behoefte is aan rekenkracht. Het kost inspanning om alleen die data te verzamelen die gebruikt kan worden om tot beter geïnformeerde beslissingen te komen. Bij het ontwerp van de technologie – en het plaatsen ervan – moet negatieve invloed op het milieu worden voorkomen.

Handelingsperspectieven: Bovengenoemde ethische waarden hebben impact op zowel technologie, omgeving als mens. Hieronder werken we die verder uit.

De impact op technologie

Het is niet vanzelfsprekend dat de toepassing van deze use case ook ontwikkeld wordt door de markt. Daarom is in de huidige fase van techniekontwikkeling samenwerking nodig met wetenschappers en andere belanghebbenden om tot een *minimal viable product* (MVP) te komen dat de mogelijkheden illustreert en voldoet aan alle praktijkeisen. Een MVP is een basisversie van een product met genoeg functionaliteiten om waarde te bieden aan de eerste gebruikers en feedback te verzamelen. Zo kan snel worden geleerd wat gebruikers belangrijk vinden en wat wel of niet werkt. Ontwikkelaars kunnen zo met minimale middelen een productidee testen en verbeteren, voordat verder geïnvesteerd wordt in de volledige ontwikkeling.

De data die met remote sensing beschikbaar komt, is voor alle partijen in het zoetwaterdomein (DGWB, waterschappen, RWS, drinkwaterbedrijven, toezichthouders en bewoners) van grote waarde om een continu-inzicht te krijgen in de waterkwaliteit en hiernaar te gaan handelen. Een MVP is een eerste stap om te komen tot een waterkwaliteitsmonitorsysteem met landelijke dekking en kan tevens een middel zijn om alle partijen die hierbij betrokken zijn te mobiliseren.

De impact op de omgeving

Het hebben van een continu-inzicht van de kwaliteit van het oppervlaktewater noopt tot het vooraf maken van gezamenlijke afspraken op het gebied van de kwaliteit, beschikbaarheid en toegankelijkheid van de data. Daarnaast zijn afspraken nodig voor het realiseren, onderhouden, beheren en financieren van een quantum sensing netwerk in het oppervlaktewatersysteem.

De data afkomstig van quantum sensing bieden kansen voor een betere vergunningverlening en toezicht en handhaving om te werken naar een betere waterkwaliteit. Daarnaast vormen de data de bron voor het monitoren en aanpassen van beleid en leveren de data input voor wet- en regelgeving.

De impact op de mens

Quantumcomputing en -sensing is een innovatie die nog in ontwikkeling is. De toepassingsmogelijkheden zitten nog in de experimentele fase. Dit vraagt om ruimte voor (data)professionals om te kunnen en mogen experimenteren. Werving en selectie van deze dataprofessionals vraagt om aantrekkelijke werkgevers. De beschikbare capaciteit is schaars. Dit alles vraagt om investeringen in opleidingen en trainingen én om intensieve samenwerking met alle betrokken partijen en (kennis)leveranciers op het gebied van quantum.

> *"Het is belangrijk om vanuit een breed perspectief te kijken naar wat quantumtechnologie kan betekenen in het waterdomein, om onze maatschappelijke opgave om kwalitatief goed drinkwater voor een zo laag mogelijke prijs te kunnen blijven produceren. Deze workshop is een eerste stap om samen met TNO verder te onderzoeken hoe we de volgende stappen kunnen zetten."*
>
> **– Barend Koster, Domeinarchitect bij DGWB van het ministerie van IenW**

Vervolg

DGWB gaat samen met TNO en Evides onderzoeken hoe zij continu inzicht kunnen krijgen in de waterkwaliteit van Maaswater.

Directoraat-generaal
Mobiliteit (DGMo)

Potentiële use cases quantum-technologie DG Mobiliteit

Over het directoraat-generaal Mobiliteit (DGMo)

Het directoraat-generaal Mobiliteit (DGMo) is binnen het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat verantwoordelijk voor de mobiliteit van Nederland, zowel binnen Nederland als in verbinding met de landen om ons heen. Mobiliteit en bereikbaarheid (voor iedereen, waar dan ook) draagt ook bij aan de bereikbaarheid van vitaal economische en maatschappelijke functies, zoals wonen, werk, onderwijs, zorg, welzijn en recreatie.

DGMo ontwikkelt beleid op het gebied van wegen, verkeersveiligheid, openbaar vervoer en spoor, fietsverkeer en duurzame mobiliteit. Onze infrastructuur kan een belangrijke bijdrage leveren aan de toekomstige ruimtelijke inrichting van Nederland. Als het gaat om bereikbaarheid kan een breed scala aan instrumenten worden ingezet; van gedragsinterventies en wet- en regelgeving tot het beheer, de exploitatie en aanleg van (nieuwe) nationale infrastructuur. Hierbij wordt er altijd gekeken naar effectieve, efficiënte en innovatieve oplossingen. Bijzondere aandacht gaat uit naar het versterken van onze mainports en hun achterlandverbindingen, de stedelijke bereikbaarheid en die van de regio's.

Uitgangspunt is dat onze mobiliteit betaalbaar, toegankelijk en van goede kwaliteit (veilig, duurzaam en met oog voor de leefomgeving) is. De belangrijkste stakeholders voor DGMo zijn consumentenorganisaties, koepels van private organisaties en concessiebeheerders. Daarnaast wordt nauw contact onderhouden met kennisinstellingen en afzonderlijke denktanks.

De uitdagingen van DGMo

DGMo staat voor verschillende maatschappelijke uitdagingen, waarbij innovatieve oplossingen nodig zijn om mobiliteit veiliger, duurzamer en efficiënter te maken.

Enkele belangrijke uitdagingen zijn:

- Duurzame mobiliteit en CO_2-reductie;
- File- en congestieproblematiek;
- Veiligheid in het verkeer;
- Betaalbare en toegankelijke mobiliteit;
- Digitale en slimme mobiliteit;
- Veranderend mobiliteitsgedrag.

Bij het vinden van oplossingen van deze uitdagingen wordt vaak gebruikgemaakt van digitale technologische innovaties. Hierbij kunt u bijvoorbeeld denken aan slimme verkeersmanagementsystemen, het beter benutten van infrastructuur door mobiliteitsdata en AI, slimme verkeerslichten, autonome voertuigen en ADAS (Advanced Driver Assistance Systems).

Mogelijke use cases van quantumtechnologie voor DGMo

Mogelijke use cases voor quantumtechnologie, geïdentificeerd in de workshop met deelnemers vanuit DGMo:

- Real-time maken van beslissingen voor het beheren van verkeersstromen;
- Oplossen van optimalisatieproblemen in verkeersmodellen;
- Verbeteren van machine learning-modellen voor autonome voertuigen;
- Betere voorspelling van files;
- Betere verwerking van videobeelden;
- Meten van hoeveelheid verkeer/grootte/aandrijftechniek per voertuig;
- Waarnemen van voetgangers door zelfrijdende auto's.

Op de volgende pagina's worden vier potentiële use cases en/of technologieën voor DGMo verder toegelicht.

1. Vervoersmodellen: het bepalen van de bereikbaarheid via het Nederlandse wegennet

De computermodellen waarmee de bereikbaarheid van locaties via het Nederlandse wegennet wordt bepaald zijn complex. Hierin worden onder meer alle mogelijke afslagen, maximale snelheden en het aanbouwen van nieuwe woningen meegenomen. Door de vele parameters en afhankelijkheden kunnen deze berekeningen veel tijd in beslag nemen. Quantumcomputers kunnen deze berekeningen mogelijk versnellen. Daarnaast is er interesse in het doen van (real-time) voorspellingen en beslissingen om de verkeersstromen (real-time) te beheersen. Dit geldt overigens ook voor water en luchtverkeer (zie ook use case DG Luchtvaart en Maritieme zaken vanaf pagina 56).

Voor optimalisatie van het wegennet zou gekeken kunnen worden naar het (N-1) probleem of andere graaf-theoretische problemen. Hierbij kan gedacht worden aan routeringsalgoritmes zoals TSP (Travelling Salesman Problem). Andere problemen die hier spelen zijn wellicht het oplossen van (grootschalige) stelsels van lineaire vergelijkingen voor het oplossen/toewijzen van verkeersstromen aan het netwerk. Hiervoor kunnen quantumalgoritmes mogelijk gebruikt worden, net als prognosetechnieken. De-conflicting, wat in (real-time) verkeersmodellen vaak wordt toegevoegd, kan mogelijk profiteren van quantum annealing-benaderingen.

Bij het voorspellen van filevorming kan een quantummodel worden geconstrueerd om het traffic congestion prediction (TCP)-probleem te representeren. Eerst worden de verkeersdata in quantumtoestanden geanalyseerd om een oplossing in gesloten vorm voor dit probleem in de tijdsdimensie te verkrijgen. Vervolgens worden temporele kenmerken van het ontwerp van een Quantum Graph Convolutional Neural Network (QGCNN) toegepast om ruimtelijke kenmerken te verkrijgen.
Zo kan het model niet alleen de ruimtelijke topologie van verkeersdata vastleggen, maar ook de dynamische veranderingen ervan. De experimentele resultaten tonen aan dat het model een goede voorspellingsprestatie heeft en een sterke weerstand tegen verstoringen.

Er zijn veel artikelen geschreven over de optimalisatie van de verkeersstromen en de optimalisatie van verkeerssignalen. Quantum machine learning kan een rol spelen om snel voorspellingen te kunnen doen en beslissingen te kunnen nemen.

Uit de workshop kwam naar voren dat een use case in de richting van ‘oplossen van stelsels van lineaire vergelijkingen’ voor de hand ligt. Ook willen de deelnemers aan de workshop graag het trainen van een (restricted) Bolzmann machine voor real time besluitvorming verder onderzoeken. Datzelfde geldt voor een quantum machine learning (QML)-model voor filevoorspellingen.

2. Quantum machine learning

Machine learning-modellen worden in de toekomst van belang bij een heel pallet aan toepassingen, bijvoorbeeld bij autonome voertuigen, of bij het voorspellen van mogelijke incidenten bij het transport van gevaarlijke stoffen en bij het voorspellen van files.

Quantum machine learning kan zorgen voor:

- Snellere en efficiënte training van modellen: quantumcomputers kunnen lineaire algebraberekeningen, zoals matrixvermenigvuldigingen die de kern vormen van neurale netwerken, drastisch versnellen. Dit verkort de tijd die nodig is om een model te trainen. Ook is het mogelijk dat QML-modellen minder data nodig hebben om te komen tot dezelfde accuraatheid als klassieke modellen.
- Quantumalgoritmen kunnen snel de belangrijkste kenmerken in datasets identificeren, wat de training efficiënter maakt en leidt tot betere prestaties.
- Quantumcomputing kan helpen inference-modellen (gevolgmodellen) sneller te laten draaien, wat cruciaal is voor autonome voertuigen die in milliseconden beslissingen moeten nemen.

3. Meten van de hoeveelheid verkeer per voertuigtype

Het meten van de hoeveelheid verkeer, voertuiggrootte en aandrijftechnologie omvat het verzamelen en analyseren van gegevens via verschillende sensoren over verkeersomstandigheden en voertuigkenmerken. Deze informatie is cruciaal voor bijvoorbeeld verkeersbeheer, door te helpen bij het verminderen van congestie en het verbeteren van de verkeersdoorstroming door real-time gegevens te verstrekken. Maar ook bij infrastructuurplanning, door te helpen bij het ontwerpen van nieuwe wegen op basis van verkeerspatronen.

Verkeersmetingen worden nu vaak gedaan met magnetometers, zoals inductieve lusdetectoren ingebed in het wegdek die het magnetisch veld detecteren veroorzaakt door passerende voertuigen. Ook wordt veel gebruikgemaakt van videocamera's die vervolgens worden geanalyseerd met behulp van AI-methoden. Deze camera's functioneren minder goed in slechte weersomstandigheden. LIDAR-, radar- of microgolfsensoren kunnen worden gebruikt om toch een beeld van het verkeer te krijgen en analyseren. Er zijn ook systemen die pneumatische buizen of glasvezelkabels gebruiken die op het wegdek worden gelegd en wielen die eroverheen rijden detecteren. Dit gebeurt door de lucht in de pneumatische buis samen te drukken, of door een verandering in optische transmissie in de vezel te detecteren.

Quantumsensoren voor deze use case kunnen vooral bij magnetometers interessant zijn. Zo kunnen voertuigen van grotere afstand worden gedetecteerd, waardoor de sensoren aan de kant van de weg kunnen worden geplaatst in plaats van in het wegdek. Dit maakt onderhoud makkelijker. De snelle afname van het magnetisch signaal over afstand kan echter problemen opleveren. Een andere oplossing kan zijn om robuustere quantumsensoren in het wegdek in te bouwen, wat ook het onderhoud kan verminderen.

4. Navigatie zonder GPS

GPS (Global Positioning System) is de belangrijkste technologie die gebruikt wordt om te navigeren. Nadelen aan deze technologie is dat het niet altijd beschikbaar is, bijvoorbeeld wanneer het signaal wordt geblokkeerd door hoge gebouwen, dichte bebossing of door water. Een ander probleem met GPS is dat het kan worden verstoord en ook kan worden 'gespooft' (waarbij 'valse' GPS-signalen worden gebruikt om de signalen die bij de ontvanger aankomen te overschrijven, zodat deze een verkeerde positie berekent).

Quantumtechnologie kan helpen om de afhankelijkheid van GPS voor navigatie te overwinnen. Quantummagnetometers en quantumgravimeters zijn beide zeer geschikt om veranderingen te detecteren in het magnetische of zwaartekrachtveld van de aarde. Die veranderingen kunnen worden vergeleken met een magnetische/zwaartekrachtkaart van de aarde en kunnen vervolgens worden vertaald naar een positie op aarde. Quantummagnetometers en -sensoren leveren stabiele metingen over een lange tijd, terwijl ze de benodigde gevoeligheid bieden. Quantummagnetometers bieden ook nauwkeurige vectormetingen. Daardoor kunnen ze ook de richting van het magnetische veld meten, wat belangrijke informatie is voor magnetische navigatie.

Een tweede oplossing wordt inertiale navigatie genoemd, waarbij je het startpunt precies kent en daarna goed bijhoudt hoe je gereisd hebt in relatie tot dit startpunt. Hiervoor worden voornamelijk versnellingsmeters en gyroscopen gebruikt. Quantumversnellingsmeters en gyroscopen zijn gevoeliger en stabieler over tijd, zodat de sensoren ook na weken reizen nog steeds nauwkeurige metingen leveren.

Beide oplossingen kunnen ook worden gecombineerd om een groter dataverzamelingssysteem te creëren om nog nauwkeurigere resultaten te verkrijgen. Daarnaast kunnen klassieke sensoren in combinatie met quantumsensoren worden gebruikt: klassieke sensoren voor metingen met hoge frequentie en quantumsensoren om de klassieke sensoren regelmatig te kalibreren.

Directoraat-generaal
Milieu en Internationaal (DGMI)

Potentiële use cases quantum-technologie DG Milieu en Internationaal

Over het directoraat-generaal Milieu en Internationaal (DGMI)

Het directoraat-generaal Milieu en Internationaal (DGMI) bevordert een gezonde, veilige, schone en duurzame leefomgeving. Onderwerpen zijn bijvoorbeeld: circulaire economie, luchtkwaliteit, geluid, statiegeld, afval, vuurwerk, stoffenbeleid, nucleaire veiligheid, asbest, biotechnologie, het stelsel van vergunningverlening, toezicht en handhaving (VTH) en het Nationaal MilieuProgramma. DGMI coördineert daarnaast de internationale component van het departement-brede beleidswerk, inclusief internationale bezoeken en economische diplomatie.

De medewerkers van DGMI hebben veelvuldig en intensief contact met diverse stakeholders over de beleidsterreinen van DGMI. Hierbij kan worden gedacht aan maatschappelijke organisaties, kennisinstellingen, bedrijfsleven, medeoverheden, provincies en gemeenten. Binnen Nederland zijn dit bijvoorbeeld de Vereniging van Nederlandse Gemeenten (VNG), het Interprovinciaal Overleg (IPO), verschillende omgevingsdiensten, het platform duurzaamheid, MVO-Nederland, het Afvalfonds Verpakkingen, Milieu Centraal, Natuur en Milieu, VNO-NCW, en de Koninklijke Vereniging van de Nederlandse Chemische Industrie.

Daarnaast werkt DGMI met verschillende departementen samen op dossiers die elkaar raken. Op het internationale vlak heeft DGMI intensief contact met andere landen, de Europese Commissie/Raad, UN Environment Programme (UNEP), Global Centre of Adaptation (GCA) en het Platform for Accelerating the Circular Economy (PACE).

De uitdagingen van DGMI

De opgave van de directeur-generaal Milieu en Internationaal Afke van Rijn (van oorsprong Technisch Informaticus) is om nationaal en internationaal beleid te realiseren op het gebied van schonere lucht, een veilige leefomgeving, minder geluidhinder, een circulaire economie, minder uitstoot van schadelijke stoffen en beter milieutoezicht.

De basis daarvoor is het Nationaal MilieuProgramma dat zich richt op het lange termijnmilieubeleid richting 2050. Er moeten scherpe doelen worden gehaald op het gebied van een duurzame leefomgeving en circulaire economie. Het ontwikkelen van innovatieve instrumenten/methoden voor deze transitie is cruciaal. Hierbij wordt dus ook serieus onderzocht wat de mogelijkheden zijn van quantumtechnologie als een van de opkomende technologieën. Quantum is ook een van de tien prioritaire technologieën binnen de Nationale Technologiestrategie (NTS) van het kabinet.

Presentatie quantum concepten en toepassingen door Frank Philipson van TNO.

Mogelijke use cases van quantumtechnologie voor DGMI

Mogelijke use cases voor quantumtechnologie, geïdentificeerd in de workshop met deelnemers vanuit DGMI:

- Bepalen van stofveiligheid;
- Luchtkwaliteit modellering;
- Circulaire economie modellen - missende data voor grondstofstromen reconstrueren/voorspellen;
- Voorspellen van mogelijke incidenten met gevaarlijke stoffen bij opslag en transport;
- Modelleren van opeenstapelingen van risico's;
- Beter meten van chemische stoffen in de lucht;
- Potentieel gebruiken van quantumsensoren in plasticrecycling en metaaldetectie;
- Precieze frequentiemetingen voor geluid (met brondetectie);
- Internationale aspecten van vervuilingen – vinden van bronnen van vervuiling;
- Aardobservatie en beeldvorming met behulp van quantumsensoren en satellieten.

Op de volgende pagina's worden vier potentiële use cases voor DGMI verder toegelicht.

1. Bepalen van stofveiligheid

Bij de eerste potentiële use case – het bepalen van stofveiligheid – is het van belang te begrijpen hoe een stof op moleculair niveau werkt. Quantumcomputing kan hier significant bijdragen. In de eerste plaats kunnen quantumcomputers complexe moleculaire systemen met een ongekende precisie simuleren, inclusief interacties met menselijke cellen, milieucomponenten, of andere chemicaliën.

Daarnaast kan met behulp van quantumchemie voorspeld worden of een stof toxische reacties zal veroorzaken, bijvoorbeeld door te analyseren hoe een molecuul interacteert met DNA of enzymen. Tot slot kunnen met behulp van quantumcomputing fysisch-chemische eigenschappen zoals stabiliteit, reactiviteit en persistentie van stoffen sneller berekend worden. Dit is cruciaal voor de veiligheidsbeoordeling.

Quantumcomputing kan ook helpen bij het analyseren van grote hoeveelheden gegevens over chemische stoffen en deze koppelen aan bekende risico's. Met quantum machine learning (QML) kunnen stoffen in grote chemische databases sneller worden gescreend op basis van kenmerken die verband houden met toxiciteit of milieuschade. Quantumalgoritmen kunnen bovendien stoffen die qua moleculaire structuur of eigenschappen lijken op bekende gevaarlijke stoffen sneller identificeren. Quantumcomputing biedt daarnaast ook specifieke algoritmen die relevant zijn voor stofveiligheid.

Experts vertelden tijdens de workshop dat zij graag clusteringstechnieken, quantum machine learning en Monte Carlo simulaties nader willen laten onderzoeken.

2. Detectie van gassen in de atmosfeer en internationale aspecten van vervuiling

Het detecteren en identificeren van gassen in de atmosfeer is cruciaal om klimaatverandering te monitoren en te bestrijden, de volksgezondheid te beschermen en de uitstoot door industrieën te controleren en te reguleren. Denk aan het nauwkeurig meten van broeikasgassen en andere stoffen, en het monitoren van de luchtkwaliteit om snel onverwachte verontreinigingen te detecteren.

Hiervoor kunnen verschillende soorten spectroscopietechnieken worden gebruikt. Deze methode werkt door elektromagnetische straling (zoals zichtbaar licht, microgolven en infrarood licht) door een monster van materie (in dit geval voornamelijk lucht) te laten schijnen en te observeren hoe het materiaal, of in dit geval gassen, dat licht absorbeert of erop reageert. Deze absorptie werkt als een soort vingerafdruk voor specifieke gassen. Deze technologie is vrij geavanceerd en wordt in de context van atmosferische metingen meestal ingezet op satellieten. Quantumtechnologie heeft de potentie om spectroscopietechnieken te verbeteren. Er is een quantumversie van spectroscopie waarbij onderzoekers ruisniveaus onder de 'shotruislimiet' van laserlicht kunnen bereiken, wat resulteert in ongeveer tien keer betere precisie (University of Bristol). Dit zou interessant kunnen zijn voor het meten van gassen in de atmosfeer, maar het moet nog blijken of het daadwerkelijk buiten het laboratorium kan worden opgeschaald en aan de eisen van de use case kan voldoen, specifiek de te overbruggen afstanden van/naar een satelliet. Een mogelijke toepassing in het verlengde hiervan ligt bij detectie van kleine, diffuse lekken in de industrie. Een raffinaderij heeft bijvoorbeeld tienduizenden punten waar mogelijk gaslekkage zou kunnen optreden. Omgevingsdiensten meten dit met behulp van apparatuur vanuit busjes of vliegtuigen. Dat geeft afstanden van maximaal enkele tientallen meters en maakt satellieten niet noodzakelijk.

Er zijn ook inspanningen om de huidige spectroscopietechnologie te verkleinen met behulp van 'quantumdots'. Quantumtechnologie kan hiermee potentieel indirect ruimtevluchten en satellieten betaalbaarder maken door verkleinde instrumenten.

3. Meten van fijnstof in de lucht

Fijnstof (ook wel particulate matter, of PM) is de term voor deeltjes die in de lucht worden aangetroffen, waaronder stof, vuil, roet, rook en vloeibare druppels. Bij het kijken naar fijnstof maakt men meestal onderscheid tussen PM10 (deeltjes met een grootte <10µm) en PM2.5 (dus met een grootte <2.5µm). Beide typen kunnen door mensen worden ingeademd en kunnen daarom gezondheidsproblemen veroorzaken. Vooral PM2.5 kan diep in de longen doordringen.

Daarom zijn fijnstofmetingen belangrijk voor het monitoren van de luchtkwaliteit en het beschermen van de volksgezondheid. Deze metingen kunnen niet alleen worden gebruikt om voorzorgsmaatregelen te nemen om mensen te beschermen wanneer de fijnstofconcentratie hoog is, maar ook om de effectiviteit van luchtkwaliteitsbeheerstrategieën en -beleid te evalueren.

Momenteel wordt de luchtkwaliteit met verschillende methoden bepaald, veelal met traditionele gravimetrische metingen, waarbij lucht eenvoudig wordt gefilterd met verschillende filters en de filters voor en na worden gewogen om de concentratie van PM in verschillende groottes nauwkeurig te meten. Deze methode heeft nadelen, onder meer omdat er geen real-time gegevens worden verstrekt. Er bestaan wel methoden die real-time PM-concentraties kunnen meten, maar die zijn kostbaar omdat ze een bèta-stralingsbron gebruiken, wat vereisten met zich meebrengt op het gebied van training van personeel, vergunningen en accreditaties.

Een andere methode is optische deeltjestellers (OPC). Hierbij wordt een lichtbron (bijv. een laserdiode) gebruikt om deeltjes te verlichten en vervolgens verstrooid licht te meten met een fotodetector. Deze sensoren kunnen binnen tijdspannes van enkele minuten metingen uitvoeren; ze zijn echter zeer gevoelig voor temperatuur en luchtvochtigheid.

Er zijn nu ook quantumdeeltjessensoren, zoals die van Q.ANT, die fotonische superpositietoestanden gebruiken om de grootte, snelheid en het traject van deeltjes in real-time te meten. Ze streven er ook naar om in de toekomst vormherkenning te ontwikkelen met behulp van kunstmatige intelligentie. Deze specifieke sensor kan echter deeltjes tot 2µm meten, wat aan de onderkant van het bereik voor gevaarlijk fijnstof ligt.

4. Quantumsensoren bij plasticrecycling en metaaldetectie

Het detecteren van metalen tijdens plasticrecycling is een cruciale stap om de kwaliteit en veiligheid van gerecyclede kunststoffen te waarborgen. Het helpt bij het beschermen van apparatuur, aangezien metaalverontreinigingen dure machines zoals maal- en spuitgietmachines kunnen beschadigen. Het verbeteren van het proces van metaaldetectie kan daarom een belangrijke factor zijn bij het verhogen van de efficiëntie van plasticrecycling.

Er zijn twee belangrijke stadia in het plastic recyclingproces: verwerking van hele containers en verwerking van vlokken. Om van het eerste naar het tweede stadium te gaan, wordt een maal- of granuleermachine gebruikt om vlokken te maken van hele verpakkingen. Het detecteren en verwijderen van metaal in het stadium van de hele container wordt gebruikt om ten eerste het metaal opnieuw te gebruiken in andere recyclingstromen en ten tweede om de maalmachine te beschermen.

Metaalverwijdering in het vlokkenverwerkingsstadium is bedoeld om de kwaliteit van de kunststoffen te verbeteren. Metalen kunnen bijvoorbeeld worden gedetecteerd door hun magnetisch veld (als het ferrometalen zijn, hebben ze een intrinsiek veld; als het non-ferrometalen zijn, kunnen we een magnetisch veld aanbrengen dat wervelstromen in het metaal induceert, wat op zijn beurt een magnetisch veld induceert). Voor deze detectie zijn quantummagnetometers te gebruiken. Deze hebben een hogere gevoeligheid om zeer kleine metaaldeeltjes te detecteren. Het is moeilijk te bepalen welke gevoeligheid nodig is. Vooral omdat het vaak belangrijker is om het metaal van het plastic te scheiden in plaats van het simpelweg te detecteren. In plaats van magnetometers te gebruiken, kan het dus beter zijn om magneten te gebruiken om de metalen componenten direct uit het plastic te halen.

Directoraat-generaal Luchtvaart en Maritieme Zaken (DGLM)

Potentiële use cases quantum-technologie DG Luchtvaart en Maritieme Zaken

Over het directoraat-generaal Luchtvaart en Maritieme zaken (DGLM)

Het directoraat-generaal Luchtvaart en Maritieme zaken (DGLM) bestaat uit de directie Luchtvaart, de directie Maritieme Zaken; de programmadirectie Omgeving Luchthaven Schiphol, het programma Luchtruimvernieuwing en het programma Bescherming Noordzee.

De directie Luchtvaart maakt zich in nationaal en internationaal verband sterk voor een veilige, duurzame en concurrerende luchtvaart in, van en naar Nederland. Dit gebeurt op basis van de Luchtvaartnota 2020-2050. De belangrijkste stakeholders zijn alle belanghebbenden op en rondom luchthaven Schiphol, de Internationale burgerluchtvaartorganisatie ICAO in Montréal, EASA (luchtvaartveiligheid) en Eurocontrol (netwerkplanning luchtruim), Luchtverkeersleiding Nederland (LVNL), Maastricht Upper Area Control Center (MUAC) en de regionale luchthavens.

De werkzaamheden van de directie Maritieme Zaken zijn verdeeld over vijf afdelingen: Zeevaart, Binnenvaart en Vaarwegen, Zeehavens, Multimodaal Goederenvervoer en Buisleidingen en Duurzame Scheepvaart. Scheepvaart is een internationale sector, en wetgeving en beleid worden dus zoveel mogelijk internationaal afgestemd. Hiermee wordt getracht een gelijk speelveld te behouden en de concurrentiepositie van de Nederlandse scheepvaart en zeehavens te bewaken. Hierbij wordt intensief samengewerkt met diverse stakeholders.

De uitdagingen van DGLM

De belangrijkste opgaven waar DGLM voor staat zijn op dit moment:

- Mobiliteitsvraagstukken in brede zin;
- Hoe reizen personen en goederen veilig, duurzaam en slim; nu en in de toekomst; nationaal en internationaal; met oog voor de omgeving?;
- Veilige ontwikkeling van de luchtvaart en scheepvaart;
- Dit is inclusief het luchtruim en de infrastructuur en de rol van buisleidingen binnen het goederenvervoer en de rol die de overheid hierin moet spelen;
- Verduurzaming van luchtvaart en scheepvaart;
- Stimuleren van innovaties zoals smart shipping en drones.

Mogelijke use cases van quantumtechnologie voor DGLM

Mogelijke use cases voor quantumtechnologie, geïdentificeerd in de workshop met deelnemers vanuit DGLM zijn:

- Het real-time vluchtschema optimalisatie;
- Luchtkwaliteit modellering voor luchtvaart;
- Efficiënte indeling luchtlagen voor verkeersleiding luchtvaart – betere benadering van vliegveld door een vliegtuig;
- Monitoren van kritieke infrastructuur in de Noordzee;
- Waarnemen en opsporen van ‘dark ships’;
- Quantumsensoren voor het waarnemen/observeren van kleine drones/schepen;
- Navigatie bij GPS jamming voor schepen.

Op de volgende pagina’s worden vier potentiële use cases voor DGLM verder toegelicht.

1. Vervoersmodellen

De computermodellen waarmee de internationale bereikbaarheid door de lucht en op het water wordt bepaald zijn complex. Door de vele parameters en afhankelijkheden kunnen de berekeningen een lange tijd in beslag nemen. Quantumcomputers kunnen deze berekeningen mogelijk versnellen. Daarnaast is er interesse in het doel van (real-time) voorspellingen en beslissingen om de verkeersstromen (real-time) te beheersen.

Voor optimalisatie van de verbindingen in de lucht en op het water zou gekeken kunnen worden naar het (N-1) probleem of andere graaf-theoretische problemen. Hierbij kan gedacht worden aan routeringsalgoritmes zoals TSP (Travelling Salesman Problem). Andere problemen die hier spelen zijn het oplossen van (grootschalige) stelsels van lineaire vergelijkingen voor het oplossen/toewijzen van verkeersstromen aan het netwerk waarvoor quantumalgoritmes mogelijk gebruikt kunnen worden en prognosetechnieken gebruikt kunnen worden. De-conflicting, wat in (real-time) verkeersmodellen vaak wordt toegevoegd, ook bij vliegverkeer, kan mogelijk profiteren van quantum optimalisatie aanpakken.

Een andere mogelijkheid is het voorspellen van filevorming (Traffic congestion prediction problem) met behulp van een quantummodel. Het model legt niet alleen de ruimtelijke topologie van verkeersdata vast, maar ook de dynamische veranderingen ervan. De experimentele resultaten tonen aan dat het model een goede voorspellingsprestatie heeft en een sterke weerstand (robustness) tegen verstoringen.

Daarnaast kunnen quantum-inspired algoritmes worden ingezet bij de optimalisatie van de verkeersstromen en verkeerssignalen. Tenslotte zou quantum machine learning hier een rol kunnen spelen. Om snel voorspellingen te kunnen doen en beslissingen te kunnen nemen, zou gekeken kunnen worden naar het trainen van en samplen uit een Boltzmann machine.

2. Quantum machine learning

Machine learning (ML)-modellen zijn in opmars, bijvoorbeeld voor autonome voertuigen, voor het voorspellen van files en mogelijke incidenten met gevaarlijke stoffen bij transport. Ook kunnen ML-modellen worden ingezet voor een betere verwerking van video- en satellietbeelden.

Quantum machine learning kan zorgen voor snellere en efficiënte training van modellen, omdat quantumcomputers lineaire algebra-berekeningen, zoals matrixvermenigvuldigingen die de kern vormen van neurale netwerken, drastisch kunnen versnellen. Dit verkort de tijd die nodig is om een model te trainen. Ook is het mogelijk dat QML-modellen minder data nodig hebben om te komen tot dezelfde accuraatheid als klassieke modellen.

Quantumalgoritmen kunnen daarnaast snel de belangrijkste kenmerken in datasets identificeren, wat de training efficiënter maakt en leidt tot betere prestaties. Tot slot kan quantumcomputing helpen inference-modellen (gevolgmodellen) sneller te laten draaien, cruciaal voor autonome voertuigen die in milliseconden beslissingen moeten nemen.

3. Meten van de hoeveelheid verkeer per voertuigtype

Het meten van de hoeveelheid verkeer, voertuiggrootte en aandrijftechnologie omvat het verzamelen en analyseren van gegevens via verschillende sensoren over verkeersomstandigheden en voertuigkenmerken. Deze informatie is cruciaal voor bijvoorbeeld verkeersbeheer, omdat het kan helpen bij het verminderen van congestie en het verbeteren van de verkeersdoorstroming door real-time gegevens te verstrekken. Daarnaast komt het van pas bij infrastructuurplanning, omdat het helpt bij het ontwerpen van nieuwe routes op basis van verkeerspatronen.

4. Navigatie zonder GPS

GPS (Global Positioning System) is momenteel de belangrijkste technologie die gebruikt wordt om te navigeren. Nadelen aan deze technologie is dat het niet altijd beschikbaar is, bijvoorbeeld wanneer het signaal wordt geblokkeerd door hoge gebouwen, dichte bebossing of door water. Een ander probleem met GPS is dat het kan worden verstoord en ook kan worden 'gespooft' (waarbij 'valse' GPS-signalen worden gebruikt om de signalen die bij de ontvanger aankomen te overschrijven, zodat deze een verkeerde positie berekent).

Quantumtechnologie kan helpen om de afhankelijkheid van GPS voor navigatie te overwinnen. Quantummagnetometers en quantumgravimeters zijn beide zeer geschikt om veranderingen te detecteren in het magnetische of zwaartekrachtveld van de aarde. Die veranderingen kunnen worden vergeleken met een magnetische/zwaartekrachtkaart van de aarde en kunnen vervolgens worden vertaald naar een positie op aarde. Quantummagnetometers en -sensoren leveren stabiele metingen over een lange tijd, terwijl ze de benodigde gevoeligheid bieden. Quantummagnetometers bieden ook nauwkeurige vectormetingen. Daardoor kunnen ze ook de richting van het magnetische veld meten, wat belangrijke informatie is voor magnetische navigatie.

Een tweede oplossing wordt inertiale navigatie genoemd, waarbij je het startpunt precies kent en daarna goed bijhoudt hoe je gereisd hebt in relatie tot dit startpunt. Hiervoor worden voornamelijk versnellingsmeters en gyroscopen gebruikt. Quantumversnellingsmeters en gyroscopen zijn gevoeliger en stabieler over tijd, zodat de sensoren ook na weken reizen nog steeds nauwkeurige metingen leveren.

Beide oplossingen kunnen ook worden gecombineerd om een groter dataverzamelingssysteem te creëren om nog nauwkeurigere resultaten te verkrijgen. Daarnaast kunnen klassieke sensoren in combinatie met quantumsensoren worden gebruikt: klassieke sensoren voor metingen met hoge frequentie en quantumsensoren om de klassieke sensoren regelmatig te kalibreren. Er zijn al voorbeelden van experimentele testvluchten met vliegtuigen die een dergelijke quantumoplossing gebruiken om te navigeren, bijvoorbeeld door het bedrijf SandboxAQ.

Rijkswaterstaat (RWS)

Potentiële use cases quantum-technologie Rijkswaterstaat

Over Rijkswaterstaat

Rijkswaterstaat (RWS) voert het beleid uit dat is ontwikkeld door de directoraten van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW). Hier wordt al ruim 225 jaar samengewerkt met deskundige partners aan een veilig, leefbaar en bereikbaar Nederland.

Rijkswaterstaat is verantwoordelijk voor het beheer en onderhoud van onze (water)wegen, en het waterbeheer. Met iconische projecten zoals de Deltawerken, de Afsluitdijk en de vele sluizen, bruggen en tunnels die Nederland verbinden. Rijkswaterstaat streeft ernaar om de veiligste delta ter wereld te blijven, met respect voor de leefomgeving.

De uitdagingen van RWS

Rijkswaterstaat staat voor een aantal grote en complexe uitdagingen in een snel veranderende wereld. Zo werkt de uitvoeringsorganisatie aan innovatieve oplossingen om ons te beschermen tegen overstromingen, droogte en klimaatverandering. Een groot deel van Nederland ligt onder de zeespiegel en daardoor worden we steeds meer bedreigd door overstromingen. Dijken en waterkeringen moeten daarom versterkt en aangepast worden. Daarnaast wordt het weer steeds extremer (hevige regenval, langere periodes van droogte en hittegolven) wat vraagt om flexibel en toekomstbestendig waterbeheer.

Zorgen voor een vlotte en veilige doorstroming van verkeer op de weg en over water vormt een pittige uitdaging. Onze wegen en waterwegen behoren tot de drukste van Europa. Bovendien is een groot deel van de Nederlandse infrastructuur, zoals bruggen, sluizen en tunnels, sterk verouderd. Cruciale infrastructuur dient op tijd vervangen of gerenoveerd te worden, zonder het verkeer onnodig te verstoren.

Verder speelt Rijkswaterstaat een cruciale rol in de transitie naar een duurzamer Nederland. Alternatieve vormen van transport, zoals openbaar vervoer en de binnenvaart, worden bevorderd om de uitstoot van broeikasgassen te verminderen. Net als energiezuinige oplossingen in infrastructuur, bijvoorbeeld zonnepanelen op geluidsschermen of elektrische sluizen. Deze panelen wekken duurzame energie op door zonlicht om te zetten in elektriciteit. En door de energie die nodig is om de sluisdeuren te openen en te sluiten elektrisch te maken, en mogelijk te koppelen aan duurzame energiebronnen, wordt hun milieu-impact verlaagd. RWS bouwt ook zo veel mogelijk circulair in gebouwen en wegen. Dit betekent dat grondstoffen en materialen zo veel mogelijk worden hergebruikt en afval wordt geminimaliseerd. Daarnaast probeert RWS infrastructuur zo veel mogelijk te combineren met natuurbehoud bij onder meer de aanleg van ecoducten en vismigratieroutes. Zo wordt zo duurzaam mogelijk gewerkt en gestreefd de impact op het milieu te verkleinen. Tot slot bevindt RWS zich in een digitale transformatie. RWS streeft naar een toekomstbestendig beheer van de Nederlandse infrastructuur en waterwegen.

Dit betekent dat RWS het bestaande systeem efficiënter, veiliger en duurzamer willen maken. Hierbij draait het om het verbeteren van processen, sneller en beter kunnen reageren op uitdagingen, en het nemen van datagedreven beslissingen om Nederland beter voorbereid te maken op complexe vraagstukken zoals klimaatverandering, mobiliteit en technologische vooruitgang. Om de benodigde innovatie hiervoor te kunnen realiseren worden veelbelovende technologieën toegepast en verkend zoals kunstmatige intelligentie en data-analyse en – zoals in deze potentiële use case: quantumtechnologie.

Of het nu gaat om het versterken van dijken, het verbeteren van snelwegen of het beheren van natuurgebieden: Rijkswaterstaat staat aan de basis van een duurzaam en toekomstbestendig Nederland.

Mogelijke use cases van quantumcomputers voor RWS

Voor RWS zijn de volgende potentiële use cases van quantumcomputers besproken tijdens een technische workshop met TNO:

- **Het simuleren van waterstromen**
  Door waterstromen te simuleren kunnen we overstromingsrisico's beter voorspellen en beschermende maatregelen beter vormgeven. Waterstromen worden nu nog gesimuleerd met behulp van complexe computermodellen die fysieke eigenschappen zoals stroming, druk, temperatuur en interacties met objecten of kustlijnen nabootsen. Dit kan al behoorlijk nauwkeurig, maar de rekentijd is hierbij een beperkende factor. Het uitvoeren van simulaties kost relatief veel tijd, omdat er sprake is van talloze variabelen en modellen. Dit kan dus ingewikkeld zijn. Bovendien is een hoge resolutie vereist om lokale details nauwkeurig te simuleren. In noodsituaties zijn snelle simulaties nodig, maar de huidige geavanceerde modellen kunnen uren tot dagen vergen. Zelfs met krachtige supercomputers kunnen gedetailleerde simulaties lang duren, vooral bij langdurige of grootschalige scenario's.

  Quantumtechnologie heeft de potentie om de simulatie van waterstromen drastisch te verbeteren doordat quantumcomputers veel berekeningen tegelijkertijd kunnen uitvoeren dankzij het gebruik van qubits. Dit zorgt voor een hogere resolutie in minder tijd, betere omgang met chaos en onzekerheden van turbulentie en mogelijkheden tot integratie met machine learning, waardoor data-gestuurde simulatiemodellen beter worden. Op termijn is het wellicht mogelijk om met behulp van quantumtechnologie in noodsituaties

real-time scenario's door te rekenen, zoals bij overstromingen of het falen van waterkeringen. Zo wordt waterbeheer efficiënter, sneller en nauwkeuriger.

- **Het uitrekenen van de gevolgen van klimaatveranderingen op waterstromen**
  Om het effect van klimaat op binnenlandse wateren te kunnen voorspellen, moeten meerdere scenario's van klimaatverandering doorgerekend worden. Daarnaast is het wenselijk rekening te houden met de verschillende seizoenen en verschillende scenario's van zeespiegelstijging. Ook hierbij kan quantumtechnologie uitkomst bieden op het gebied van efficiëntie, snelheid en nauwkeurigheid.

- **Beheren van waterstromen door optimaal gebruik te maken van sluizen**
  Hoewel quantumtechnologie nog in ontwikkeling is, biedt het een veelbelovend perspectief om het beheer van sluizen en waterstromen in ons land naar een hoger niveau te tillen. Concrete voordelen zijn kostenbesparingen (door slimmer gebruik van sluizen en minder waterverspilling), snellere doorstroming (kortere wachttijden voor schepen) en klimaatbestendigheid (sneller inspelen op extremen zoals droogte of overstromingen). Mogelijk is efficiënter energieverbruik een voordeel, omdat er minder energie nodig is voor het pompen van water. Tegelijk werd in de workshop aangegeven dat het koelen van quantumcomputers ook veel energie vraagt.

- **Grote stelsels van differentiaalvergelijkingen oplossen**
  Rijkswaterstaat lost vaak complexe problemen op die worden gemodelleerd met behulp van differentiaalvergelijkingen. Voorbeelden zijn waterstromingsmodellen in rivieren, kanalen en sluizen, berekeningen van krachten op bruggen, dijken en sluizen, het vinden van de beste strategie voor waterverplaatsing, energiegebruik en verkeersstromen, en het voorspellen van de impact van klimaatverandering op waterniveaus en infrastructurele belasting. Deze modellen leiden vaak tot enorme stelsels van vergelijkingen die rekenintensief zijn om op te lossen met klassieke computers, vooral bij hoge resoluties of op grote schaal. Quantumcomputers bieden Rijkswaterstaat de mogelijkheid om grote stelsels van lineaire vergelijkingen sneller, efficiënter en nauwkeuriger op te lossen. Dit leidt tot verbeteringen in waterbeheer, infrastructuurplanning en klimaatadaptatie, waardoor Nederland straks beter voorbereid is op de uitdagingen van de toekomst.

Mogelijke use cases van quantumsensoren voor RWS

Voor RWS zijn de volgende potentiële use cases van quantumsensoren besproken tijdens een technische workshop met TNO:

- **Detectie van stoffen in grondwater**
  Het monitoren van grondwaterkwaliteit is belangrijk voor het waarborgen van schoon drinkwater, het beschermen van ecosystemen en om verzekerd te zijn van een duurzame toekomst. Vroege detectie en preventie zijn veel effectiever en goedkoper dan het herstellen van vervuilde watervoorraden. Door grondwater goed te beheren, draagt Nederland bij aan een gezond milieu en een veilige leefomgeving. Quantumsensoren kunnen helpen bij de detectie en identificatie van verontreinigingen. Daarnaast kunnen ‘onbekende’ stoffen in drinkwater met de huidige technieken vaak nog niet worden geïdentificeerd. Een combinatie van quantumsensoren en quantumcomputers biedt wellicht mogelijkheden in de toekomst.

- **Tijdsynchronisatie van verschillende metingen**
  Tijdens het doen van metingen is het van belang zeer nauwkeurig te weten op welke positie en welk tijdstip metingen zijn gedaan om verschillende metingen met elkaar te kunnen vergelijken. Quantumsensoren gebruiken de quantummechanische eigenschappen van atomen om veranderingen in zwaartekracht of inertie extreem nauwkeurig te meten. Dit kan worden vertaald naar exacte locatiebepaling, zelfs onder de grond of in magnetisch storende gebieden. Dit is essentieel in gebieden waar GPS minder nauwkeurig is, zoals in tunnels, diepe putten of andere geïsoleerde omgevingen.

Quantumsensoren maken ook extreem nauwkeurige tijdregistratie mogelijk, wat essentieel is om metingen met elkaar te kunnen vergelijken en trends in grondwaterkwaliteit of -niveau betrouwbaar te analyseren. Hierdoor kan monitoring en beheer van waterbronnen significant verbeteren.

- **Detectie van schepen die AIS hebben uitgezet**
  Quantumsensoren kunnen ook van pas komen bij de detectie van schepen die hun Automatic Identification System (AIS) hebben uitgezet. Hierbij wordt gebruik gemaakt van technieken zoals magnetische veldmeting, gravimetrische analyse, waterbewegingsdetectie en quantumradar om schepen op te sporen zonder dat deze zich bewust zijn van de detectie. Dit draagt bij aan maritieme veiligheid, toezicht en handhaving op open zee en in kustgebieden.

- **Bescherming van kritische infrastructuren op zee**
  Ook bij het inspecteren van onderzeese leidingen en het detecteren van onderwateractiviteit, zoals de aanwezigheid van onderzeeërs, bieden quantumsensoren mogelijk uitkomst. Quantumsensoren hebben een uitzonderlijke gevoeligheid voor magnetische, gravimetrische en andere onderwaterverstoringen, waardoor zij dreigingen vroegtijdig kunnen detecteren en een bijdrage kunnen leveren aan de maritieme veiligheid en het beheer van kritische infrastructuren op zee.

- **Inspectie van de zeebodem en onderwaterstructuren**
  Schade aan onderzeese infrastructuren, zoals leidingen, kabels, olie- en gasplatforms, en windturbines, kan leiden tot ernstige milieuschade, economische verliezen en verstoring van vitale diensten. Regelmatige inspectie helpt om defecten, slijtage, corrosie, of potentiële gevaren zoals saboteurs of schepen die nabij onderzeese leidingen varen, vroegtijdig op te sporen. Quantumsensoren, in combinatie met onderwaterdrones en quantumsensor-navigatie, lijken ideaal voor de inspectie van de zeebodem en onderwaterstructuren. De belangrijkste voordelen van quantumsensoren zijn hun buitengewone gevoeligheid, nauwkeurigheid en vermogen om te detecteren onder extreem uitdagende omstandigheden.

- **Efficiënter maken van bestaande sensornetwerken**
  Rijkswaterstaat kan waarschijnlijk profiteren van quantumsensoren door de nauwkeurigheid, gevoeligheid en efficiëntie van bestaande sensornetwerken te verbeteren. Deze technologie biedt een betrouwbare en robuuste monitoring van waterwegen, onderwaterstructuren en milieuparameters. Maar quantumsensoren kunnen ook de kosten verlagen, de reactietijd versnellen en de effectiviteit van waterbeheerstrategieën verbeteren.

- **Navigatie zonder GPS**
  De scheepvaart is nog steeds sterk afhankelijk van de beschikbaarheid van GPS (Global Positioning System). GPS biedt schepen nauwkeurige en betrouwbare gegevens over hun positie, snelheid en richting op zee, wat veilige navigeren mogelijk maakt en de scheepvaart efficiënter maakt. Andere technologieën scoren vaak minder goed als het gaat om globale dekking, betrouwbaarheid en standaardisatie. Bovendien is de reikwijdte van alternatieven vaak beperkt, en werken ze in veel gevallen pas goed in combinatie met GPS. Quantumsensoren, waarmee zonder GPS genavigeerd kan worden, kunnen de afhankelijkheid van GPS aanzienlijk reduceren.

In de workshop kwam ook naar voren dat bij potentiële use cases die een relatie hebben met klimaatverandering, het van essentieel belang is om deze samen met het KNMI te verkennen. Door gebrek aan capaciteit kon het KNMI echter niet mee doen aan deze verkenning.

Combinatie van quantumtechnologieën

De mogelijke toepassingen van quantumtechnologie die zijn geïdentificeerd in dit project zijn tot stand gekomen met behulp van alle experts die bij de workshops aanwezig waren en experts in zowel quantumcomputers als quantumsensoren. Binnen deze workshops is expliciet gekozen om de focus op deze technologieën te houden. Tijdens deze workshops zijn ook kansen geïdentificeerd van mogelijke toepassingen die gebruik kunnen maken van quantumnetwerktechnologie of een combinatie van de verscheidene quantumtechnologieën die op het moment in ontwikkeling zijn.

Een van deze toepassingen, die is geïdentificeerd in een workshop met experts van Rijkswaterstaat, willen we hierbij expliciet benoemen. Dit betreft het mogelijk toepassen van quantumtechnologie om de verschillende assets binnen Nederland zoals bruggen, sluizen, snelwegen en waterwegen, om de data van deze assets, op een vertrouwelijke manier, bij elkaar te brengen. Door dit te verwezenlijken kunnen de effecten van bijvoorbeeld het sluiten van bepaalde wegen of openen van sluizen op een veilige manier worden bepaald en aangestuurd, rekening houdend met alle assets tegelijkertijd. Deze oplossing maakt potentieel gebruik van meerdere vormen van quantumhardware, waaronder ook potentieel een quantumnetwerk. Deze netwerktechnologie is nog volop in ontwikkeling.

Technisch perspectief van use cases RWS verder uitgewerkt

De eerdergenoemde potentiële use cases zijn vervolgens nader onderzocht. Experts van TNO hebben een eerste inschatting gemaakt van de technische haalbaarheid van verschillende toepassingen en de termijn waarop deze toepassingen naar verwachting gerealiseerd kunnen worden. Oorspronkelijk was ook een workshop gepland waarin het CQS (Centre for Quantum and Society) samen met betrokkenen ELSA-aspecten zou uitwerken. ELSA staat voor Ethical, Legal en Societal Aspects: een verzameling aspecten die buiten de technologie zelf vallen, maar die van groot belang zijn voor de maatschappelijke acceptatie en integratie ervan. Mede door persoonlijke omstandigheden van betrokken medewerkers heeft deze workshop niet plaatsgevonden. De ethische, juridische en maatschappelijke randvoorwaarden van quantumtechnologie blijven bij RWS in beeld; het is de ambitie om deze op een later moment verder te verkennen.

In dit geval is gekeken naar de use case ‘inspectie van de zeebodem en onderwaterstructuren’ Hierbij gaat het onder meer om het detecteren van vijandelijke actoren (onderzeeërs, schepen, mijnen, drones, ondergrondse structuren) in zee op basis van veranderingen in het magneetveld of met gravimeters.

De verdiepende potentiële use case: bescherming van vitale infrastructuur op basis van anomaliedetectie

Quantumsensoren, in combinatie met onderwaterdrones en quantumsensor-navigatie, lijken ideaal voor de inspectie van de zeebodem en onderwaterstructuren vanwege de buitengewone gevoeligheid en nauwkeurigheid van quantumsensoren en hun vermogen om te detecteren onder extreem uitdagende omstandigheden.

Deze technologieën kunnen ook worden ingezet bij het detecteren van scheepswrakken, mijnen en containers in zee. Deze use case is relevant voor onder meer maritieme veiligheid, navigatie, en zelfs nationale veiligheid en defensie. Daarnaast is het goed om dit soort objecten in kaart te brengen in het kader van vervolgonderzoek of milieubescherming.

Momenteel worden deze objecten meestal gedetecteerd met sonartechnologieën, magnetometers, camera's, onderwaterrobots en autonome voertuigen. Deze methoden hebben vaak beperkingen in de resolutie, het bereik of het vermogen om in moeilijke omgevingen te werken. Vaak worden hier meerdere sensoren gebruikt. Sonar heeft bijvoorbeeld een groot bereik, maar een lagere resolutie, wat het moeilijker maakt om objecten daadwerkelijk te identificeren. Daarom volgt daarna vaak een visuele inspectie met een onderwatervoertuig.

Met de recente verbeteringen in Artificiële Intelligentie (AI) en beeldherkenning zien we meer oplossingen die gebaseerd zijn op camera's. SEA.AI biedt bijvoorbeeld een tool om half-ondergedompelde containers te identificeren met behulp van optische en thermische camera's binnen een bereik van 700 meter.

Quantumsensoren bieden ook aanzienlijke voordelen voor onderwaterdetectie. Zo kunnen quantumgravimetersensoren kleine veranderingen in zwaarte-krachtvelden detecteren. Zo kan eenvoudiger de aanwezigheid van grote objecten zoals scheepswrakken of containers op de zeebodem worden onthuld.

Quantummagnetometersensoren kunnen kleine fluctuaties in magnetische velden met hoge gevoeligheid detecteren, waardoor de detectie van metalen objecten zoals scheepswrakken, mijnen en containers mogelijk wordt. Quantum-LIDAR heeft veelbelovende resultaten laten zien en biedt verbeterde mogelijkheden voor het detecteren en in beeld brengen van objecten in uitdagende onderwateromgevingen, vooral in troebel water (Aurora Maccarone [et al.], 2023).

Sommige van deze quantumsensoren worden al regelmatig gebruikt. Zo gebruikt het bedrijf Geometrics quantummagnetometers (OPM's) om ferromagnetische objecten te detecteren en in kaart te brengen en om geologische studies uit te voeren. Over het algemeen komt de beperking bij het detecteren van magnetische objecten vaak niet door een gebrek aan gevoeligheid van de sensor, maar eerder door een snelle afname van de magnetische signaalsterkte over afstand en achtergrondruis. Er zijn ook voorbeelden van quantumgravimeters die op zee zijn getest en gevalideerd (University of Birmingham, 2023).

Planbureau voor de Leefomgeving (PBL)

Potentiële use cases quantum-technologie Planbureau voor de Leefomgeving

Over het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL)

Het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL), onderdeel van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, is een onafhankelijk onderzoeksbureau dat milieubeleid, natuur en ruimtelijke inrichting in Nederland en daarbuiten onderzoekt. Wetenschappers uit diverse disciplines werken hierbij nauw samen.

De onderzoeken bieden strategische kennis voor beleid, politiek en maatschappelijke organisaties, met als hoofddoel het verbeteren van de besluitvorming van kabinet en parlement. Daarnaast richt het PBL zich op andere overheden en internationale organisaties. Het bureau doet onderzoek op eigen initiatief of in opdracht van ministeries en organisaties zoals United Nations Environment Program (UNEP) en de Europese Commissie.

De uitdagingen van PBL

Het PBL brengt niet alleen de actuele kwaliteit van milieu, natuur en ruimte in beeld en evalueert het gevoerde beleid. De professionals die er werken verkennen ook de toekomstige maatschappelijke ontwikkelingen die van invloed kunnen zijn voor de leefomgeving van mensen en neemt de mogelijke beleidsopties onder de loep. Verder signaleert en agendeert het PBL maatschappelijke vraagstukken die van belang zijn voor de leefomgeving en identificeert het mogelijke strategische opties voor het bereiken van overheidsdoelen.

Nederland staat momenteel voor diverse actuele en toekomstige uitdagingen die verband houden met grote maatschappelijke en ecologische transities, zoals de klimaatverandering en energietransitie, biodiversiteitsverlies en natuurbehoud en de circulaire economie en afvalbeheer. Daarnaast zijn er ook pittige uitdagingen op het gebied van verstedelijking en ruimtelijke ordening, voedselproductie en landbouwtransitie en tot slot de sociale ongelijkheid en rechtvaardigheid in de eerdergenoemde transities.

Het PBL heeft de taak om met analyses, toekomstscenario's en beleidsadviezen beleidsmakers te ondersteunen bij deze complexe uitdagingen. Hun werk speelt een cruciale rol in het voorbereiden van Nederland op een duurzame en leefbare toekomst.

In het kader van deze publicatie zijn eerst verkennende workshops georganiseerd: hierin zijn potentiële use cases in kaart gebracht. Vervolgens is een verdiepende, technische workshop georganiseerd om een geselecteerde use case verder uit te werken. Tot slot is een EQTA-workshop georganiseerd (Exploratory Quantum Technology Assessment) om kansen en impact te verhelderen, met aandacht voor ethische, juridische en maatschappelijke aspecten.

Mogelijke use cases van quantumcomputers voor PBL

Tijdens de brainstorm over quantumcomputers als onderdeel van een technische workshop met TNO is nagedacht over de impact van quantumcomputers op rekenkundige simulatiemodellen. Binnen PBL worden veel rekenkundige modellen gebruikt en veel van de berekeningen vergen met de huidige technologieën nog aanzienlijke rekentijden. Hierbij biedt quantumtechnologie mogelijk een uitkomst in de toekomst.

Voor PBL zijn onder meer de volgende potentiële use cases van quantumcomputers besproken:

- **Verkenningen op het beoogd energieverbruik en energieaanbod binnen Nederland**
  Jaarlijks wordt bepaald wat het verwachte energieverbruik in Nederland is, wat de capaciteit van het energienetwerk is en hoe deze energie opgewekt kan worden. Op basis van deze informatie wordt geprobeerd het energieverbruik en -aanbod te optimaliseren. Voor het uitvoeren van deze berekeningen is momenteel een groep van 15 personen zo'n zes maanden bezig. Met behulp van quantumcomputers kan in de toekomst mogelijk een deel van de berekeningen aanzienlijk versneld worden. Wanneer deze berekeningen op verschillende momenten in het jaar opnieuw uitgevoerd kunnen worden, levert dit actuelere informatie op, waarop het beleid kan worden bijgesteld, indien nodig.

- **Bepalen van de bereikbaarheid via het Nederlandse wegennet**
  De computermodellen waarmee de bereikbaarheid van locaties via het Nederlandse wegennet wordt bepaald is complex. Hierbij worden onder meer alle afslagen, maximale snelheden en het bouwen van nieuwe woningen meegenomen. Door de vele parameters en afhankelijkheden nemen deze berekeningen veel tijd in beslag. Mogelijk kunnen quantumcomputers de rekentijd aanzienlijk inkorten.

- **Analyse van gewassen met behulp van satellietdata**
  Het kunnen monitoren van gewassen en de omgeving met behulp van sensoren levert cruciale informatie op over de gezondheid van gewassen, de bodemkwaliteit en waterbehoefte. Satellieten maken precisielandbouw mogelijk, waarbij boeren hun middelen (zoals meststoffen en water) gericht inzetten, wat kosten bespaart en de milieubelasting vermindert. Daarnaast leveren real-time inspecties met behulp van satellieten aanzienlijke tijdwinst op: er kan snel een groot gebied worden geanalyseerd. Dit is vooral nuttig in uitgestrekte landbouwgebieden of moeilijk toegankelijke regio's. Tot slot kan met behulp van satellietdata informatie worden ingewonnen over temperatuurveranderingen en vochttekorten. Dit helpt boeren zich aan te passen aan veranderende omstandigheden en de voedselzekerheid te waarborgen. Quantumcomputers kunnen in de toekomst een revolutionaire rol spelen door de verwerking van deze data te versnellen en complexere analyses mogelijk te maken.

Mogelijke use cases van quantumsensoren voor PBL

Vervolgens is tijdens de technische workshop van TNO met PBL nagedacht over mogelijke toepassingen van quantumsensoren. Voor PBL zijn de volgende potentiële use cases besproken:

- **Detectie van gassen in de atmosfeer**
  Binnen de huidige rekenkundige modellen van PBL wordt de verspreiding van gassen meegenomen. Het nauwkeurig kunnen meten van gasdistributies met behulp van quantumsensoren, zou de resolutie van de modellen verbeteren. Ook het kunnen detecteren van kleine deeltjes, zoals fijnstof, met behulp van quantumsensoren biedt aanzienlijke meerwaarde.

- **Inschatten van klimaatrisico's**
  Welke invloed de klimaatverandering heeft op de leefomgeving, is moeilijk te kwantificeren. Het gaat vaak om complexe en langdurige processen die afhankelijk zijn van veel variabelen, zoals temperatuur, neerslagpatronen, biodiversiteit en menselijke activiteiten. Bovendien kunnen traditionele sensoren gevoelig zijn voor onnauwkeurigheden of storingen – vooral in complexe en dynamische omgevingen – en vaak is er een gebrek aan gedetailleerde data, omdat bestaande meetmethoden een beperkte resolutie hebben in tijd en ruimte. Wellicht dat quantumsensoren hier in de toekomst verandering in kunnen brengen. Quantumsensoren bieden namelijk een ongekende precisie en gevoeligheid, waardoor kleinere trends

in klimaatveranderingen eerder te detecteren zijn, meer inzicht ontstaat in natuurlijke systemen en beleidsmaatregelen gerichter geformuleerd kunnen worden op basis van robuustere data.

- **Het maken van inschattingen over de levensvatbaarheid van winkels**
  Privacywetgeving maakt het monitoren van het bezoek aan bijvoorbeeld winkelcentra in sommige situaties complex en uitdagend. Het opslaan van gegevens over personen ligt bijvoorbeeld gevoelig in verband met de privacy. Met behulp van quantumsensoren wordt het in de toekomst wellicht mogelijk om op alternatieve wijze groepen personen te analyseren, zonder opslag van persoonsgegevens. Dit kan bijvoorbeeld doordat met deze sensoren signaalsterktes van telefoons of trillingen in de grond met behulp van accelerometers kunnen worden gemeten.

Workshop PBL over het modelleren van de kwetsbaarheid van handelsketens met behulp van quantumcomputers.

Technische verdieping en EQTA: een van de use cases nader uitgewerkt

De eerdergenoemde potentiële use cases zijn vervolgens nader onderzocht. Experts van TNO hebben een eerste inschatting gemaakt van de technische haalbaarheid van verschillende toepassingen en de termijn waarop deze toepassingen naar verwachting gerealiseerd kunnen worden.

Op 29 november 2024 organiseerde het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) samen met het Centre for Quantum and Society en TNO een workshop over de ethische, maatschappelijke en juridische aspecten van het laagdrempelig en grootschaliger modelleren van de kwetsbaarheid van handelsketens met behulp van quantumcomputers. Aan de workshop nam een brede groep van deskundigen en belanghebbenden deel, waaronder wetenschappers, beleidsmedewerkers en experts die werken aan het verminderen van kwetsbaarheden rond grondstoffen en toeleveringsketens.

Tijdens de EQTA-workshop hebben wetenschappers en mensen uit het bedrijfsleven nieuwe vragen op ethisch, juridisch en maatschappelijk vlak, die gepaard gaan met deze innovaties geformuleerd en onderzocht. Zo kunnen randvoorwaarden worden gecreëerd die de ontwikkeling van de technologie in goede banen leiden.

Quantumcomputers staan nog in de kinderschoenen, maar lijken veelbelovend. Een type berekeningen waar quantumcomputers uitermate geschikt voor blijken, is het snel inverteren en optimaliseren van grote matrixen. Dit is het meest rekenintensieve deel van dit modelleerwerk. Bovendien kunnen zo veel grotere datamatrices worden verwerkt. Dit kan worden toegepast op veel terreinen, waaronder engineering, data science, machine learning, economie en financiën, natuurkunde, beeldbewerking en computer graphics.

Ook in deze casus is het een centraal onderwerp. Voor het inverteren van een 100x100 matrix zijn ongeveer 1 miljoen berekeningen nodig. Voor een 1000x1000 matrix 1 miljard berekeningen. De matrix die in deze casus een rol speelt is al snel groter, waardoor er nog veel meer berekeningen nodig zijn. Het invoeren van de data en het uitlezen vergt nu nog veel tijdrovend handwerk en er is een grote kans op verstoringen. Met behulp van een quantumcomputer kunnen door gebruik te maken van qubits (de fundamentele rekeneenheden van quantumcomputers) de inverse van matrices sneller worden berekend. Met een algoritme dat werkt met quantum inferentie worden juiste oplossingen versterkt en de onjuiste verzwakt.

Beschrijving van het model

Kern van het model is een grote matrix die de relaties tussen de bedrijven in de internationale handelsketens beschrijft. Die matrix wordt gevuld met data over onder meer de hoeveelheid grondstoffen of producten die een bedrijf, sector, regio of land nodig heeft om te kunnen produceren.

Na het berekenen van de formule – de zogeheten Leontieff invers – wordt een algoritme toegepast om veranderingen in de matrix te vinden die de bestaande structuren minimaal veranderen, waarbij ze een beoogd effect hebben op het verminderen van economische kwetsbaarheid of afhankelijkheid.

Als duidelijk is welke veranderingen het meest effectief zijn en de minste kosten met zich meebrengen, komen de ethische aspecten aan de orde. Deze aspecten stonden centraal in de workshop.

In de workshop kwam een breed scala aan maatschappelijke, ethische en juridische aspecten aan de orde. Met het oog op opkomende quantumtechnologieën selecteerden betrokkenen vier aanbevelingen die op dit moment het meest belangrijk lijken:

1. Voorzie de modellen bij publicatie van context. Er is kennis nodig om de modellen goed te interpreteren. Als dit lukt, helpt het deskundigen om te focussen, de juiste vragen te stellen, inzicht te krijgen en betere beslissingen te nemen. Maar de modellen bieden geen waarheid op een presenteerblaadje. Het kost inspanning om de waarde van de uitkomsten van deze modellen te ontdekken en benutten.
2. Soms kan kwetsbaarheid wenselijk zijn. Bijvoorbeeld in situaties waarin samenwerking meer oplevert dan het verminderen van de eigen kwetsbaarheid. Maar ook vanwege historische of culturele redenen of met oog op duurzaamheid en solidariteit.

3. Publiceer modellen, zodat alle partijen – ook de kleine – weet hebben van kwetsbaarheden en daarop kunnen acteren. Maak de modellen onderwerp van het publieke en politieke debat. Zo voorkom je dat machtigen alleen maar machtiger worden, waardoor innovatie, autonomie, keuzevrijheid en stabiliteit onder druk komen te staan.

4. Maak niet alleen de resultaten van het model inzichtelijk, maar ook de kwaliteit van de resultaten. Maak bijvoorbeeld duidelijk wat er gebeurt met de robuustheid als er kleine veranderingen in data worden aangebracht.

6. Tijdpaden quantumcomputing & quantum sensing

De opkomst van quantumcomputers en quantumsensoren biedt op termijn revolutionaire mogelijkheden voor complexe vraagstukken binnen het domein van Infrastructuur en Waterstaat. Ondanks het feit dat de definitieve doorbraak van quantumtechnologie nog wel even op zich laat wachten, is het belangrijk om nu al na te denken over duidelijke tijdpaden, zodat deze innovaties effectief kunnen worden ingezet. Dit helpt bij het identificeren van haalbare stappen, het plannen van benodigde investeringen en het afstemmen van beleid op technologische ontwikkelingen.

Tijdpad quantumcomputing

In Tabel 1 staan de voorgestelde use cases voor quantumcomputing binnen het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat in chronologische volgorde. De tabel laat zien wanneer de voordelen van quantumcomputing gerealiseerd kunnen worden, verdeeld over drie tijdvakken:

- Horizon 1: 2025-2035;
- Horizon 2: 2030-2040;
- Horizon 3: 2035-2045.

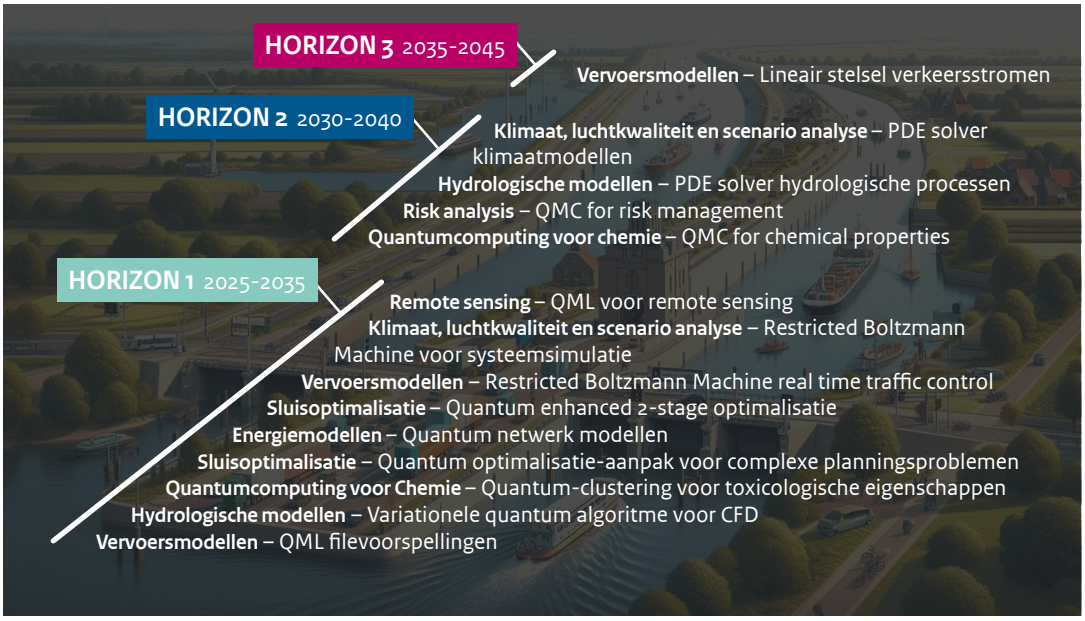
De horizonnen zijn een inschatting wanneer het waardevol kan zijn om de verschillende use cases uit te werken, rekening houdend met de verwachte ontwikkeling van quantumhardware. Hoe hoger op de lijst, hoe hoger de verwachte haalbaarheid. Deze inschatting is gebaseerd op de huidige technologische ontwikkelingen en de expertise van TNO.

Tabel 1 Tijdpad van mogelijke toepassingen van quantumcomputing

	Mogelijke use cases	Onderwerp	Potentieel interessant voor
	HORIZON 1 2025-2035		
1.	**Vervoersmodellen**	QML-filevoorspellingen	PBL, DGLM, DGMO
2.	**Hydrologische modellen**	Variational quantum-algoritme voor CFD	RWS, DGWB
3.	**Quantumcomputing voor chemie**	Quantum-clustering voor toxicologische eigenschappen	DGMI
4.	**Sluisoptimalisatie**	Quantum optimalisatie-aanpak voor complexe planningsproblemen	RWS
5.	**Energiemodellen**	Quantum netwerk modellen	PBL
6.	**Sluisoptimalisatie**	Quantum enhanced 2-stage optimalisatie	RWS
7.	**Vervoersmodellen**	Restricted Boltzmann Machine real time traffic control	PBL, DGLM, DGMO
8.	**Klimaat-, luchtkwaliteit- en scenario-analyse**	Restricted Boltzmann Machine voor systeemsimulatie	DGWB, RWS, DGMI
9.	**Remote sensing**	QML voor remote sensing	DGWB

Mogelijke use cases	Onderwerp	Potentieel interessant voor
HORIZON 2 2030-2040		
1. **Quantumcomputing voor chemie**	QMC for chemical properties	DGMI
2. **Risk analysis**	QMC for risk management	RWS, PBL
3. **Hydrologische modellen**	PDE solver hydrologische processen	RWS, DGWB
4. **Klimaat-, luchtkwaliteit- en scenario-analyse**	PDE solver-klimaatmodellen	DGWB, RWS, DGMI
HORIZON 3 2035-2045		
1. **Vervoersmodellen**	Lineair stelsel verkeersstromen	PBL, DGLM, DGMO

In Figuur 1 staan de use cases voor quantumcomputing visueel weergegeven



Figuur 1: Mogelijke toepassingen van quantumcomputers, chronologisch gesorteerd op haalbaarheid. Deze schattingen zijn gebaseerd op de huidige ontwikkelingen van quantumcomputers en inschattingen van TNO-experts.

Tijdpad quantum sensing

In Tabel 2 staan de voorgestelde use cases voor quantum sensing binnen het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat in chronologische volgorde. De tabel laat zien wanneer de voordelen van quantum sensing gerealiseerd kunnen worden, verdeeld over twee tijdvakken:

- Horizon 1: 2025-2035;
- Horizon 2: 2030-2040.

De sensoren die relevant zijn voor het eerste tijdvak zijn al veelal experimenteel gebruikt in laboratoria, terwijl de sensoren in tijdvak 2 nog verder doorontwikkeld moeten worden. Binnen deze tijdvakken is een rangorde aangegeven wanneer wordt verwacht dat de use cases uitgevoerd kunnen worden met behulp van quantumsensoren. Hierbij is 1 de hoogste verwachte haalbaarheid en 11 de laagste.

Deze inschatting is gebaseerd op de huidige ontwikkelingen en inschattingen van TNO-experts.

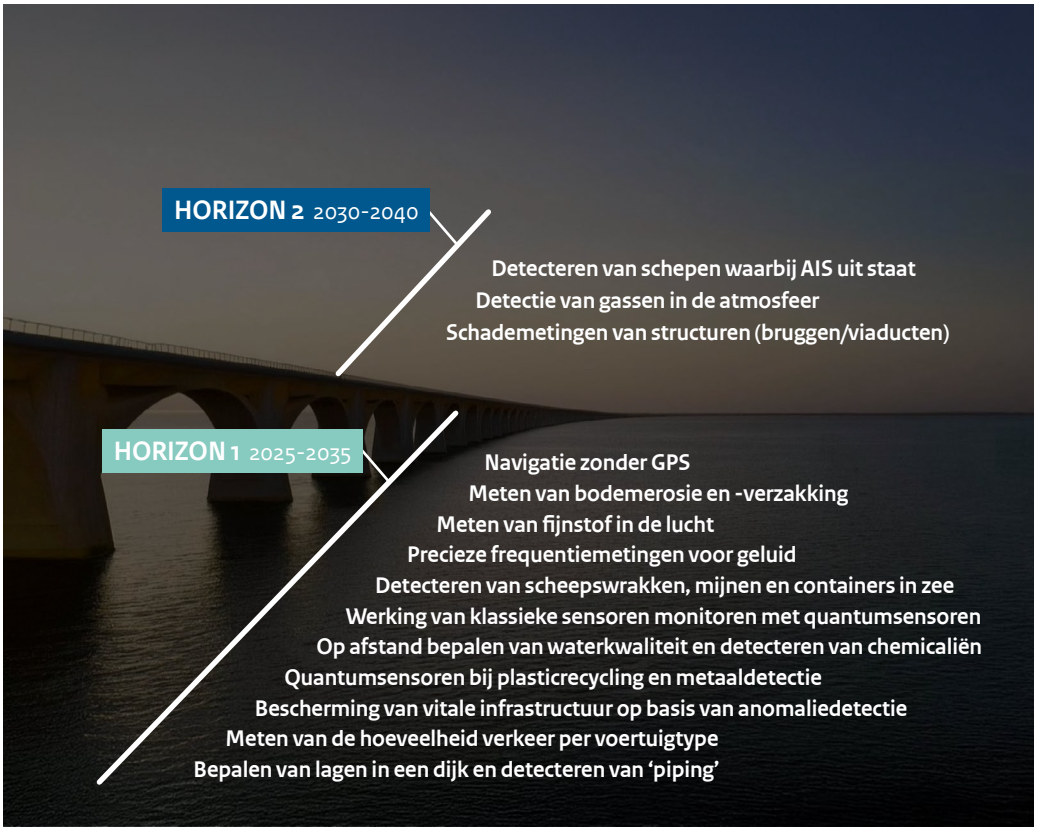
Tabel 2 Tijdpad van mogelijke toepassingen van quantumsensoren

	Mogelijke use cases	Onderwerp	Potentieel interessant voor
	HORIZON 1 2025-2035		
1.	**Bepalen van lagen in een dijk en detecteren van 'piping'**	Quantumgravimeters, Quantummagnetometers	DGWB
2.	**Detecteren van scheepswrakken, mijnen en containers in zee**	Quantumgravimeters, Quantummagnetometers, Quantum-LIDAR	RWS
3.	**Op afstand bepalen van waterkwaliteit en detecteren van chemicaliën**	Quantummagnetometers, Quantumdeeltjessensoren, Quantumspectroscopie	DGWB
4.	**Meten van bodemerosie en -verzakking**	Quantumgravimeters	DGWB
5.	**Bescherming van vitale infrastructuur op basis van anomaliedetectie**	Quantumgravimeters, Quantummagnetometers	RWS
6.	**Werking van klassieke sensoren monitoren met quantumsensoren**	Afhankelijk van de klassieke sensor om te controleren	RWS
7.	**Meten van fijnstof in de lucht**	Quantumdeeltjessensoren	PBL, DGMI
8.	**Quantumsensoren bij plasticrecycling en metaaldetectie**	Quantummagnetometers	DGMI
9.	**Precieze frequentiemetingen voor geluid**	Quantumklokken	DGMI
10.	**Meten van de hoeveelheid verkeer per voertuigtype**	Quantummagnetometers	DGLM, DGMO
11.	**Navigatie zonder GPS**	Quantummagnetometers, Quantumgravimeters, Quantumversnellingsmeters	DGLM, DGMO

Mogelijke use cases	Onderwerp	Potentieel interessant voor
HORIZON 2 2030-2040		
1. **Detecteren van schepen waarbij Automatic Identification System (AIS) uit staat**	Quantumradar	RWS
2. **Detectie van gassen in de atmosfeer & Internationale aspecten van vervuiling**	Quantumspectroscopie	DGMI
3. **Schademetingen van structuren (bruggen/viaducten)**	Quantumversnellingsmeters	RWS

Quantumsensoren zijn cursief weergegeven als ze een lager technologisch gereedheidsniveau hebben dan de andere genoemde sensoren. Dit type quantumsensoren zijn hoogstwaarschijnlijk pas tegen het einde van het opgegeven bereik toepasbaar voor de betreffende use case.

In Figuur 2 staan de use cases voor quantum sensing visueel weergegeven



Figuur 2: Mogelijke toepassingen van quantumsensoren en wanneer deze naar verwachting ingezet kunnen worden. Deze schattingen zijn gebaseerd op de huidige ontwikkelingen van quantumsensoren en inschattingen van TNO-experts.

7. Aanbevelingen

Het ministerie van Infrastructuur & Waterstaat, TNO en het Centre for Quantum and Society (CQS) hebben een aantal aanbevelingen gedestilleerd uit de workshops en verdiepende sessies.

Aanbevelingen ministerie van IenW

Voor mijn eigen departement heb ik de eer om een slotaanbeveling te doen. Het afgelopen jaar zijn veel zaken duidelijk geworden. Hoewel quantum een ver-van-iedereens-bed-show lijkt te zijn, komt het sneller dichterbij dan wij denken. De maatschappelijke opgaven van IenW vragen om een nieuwe manier van denken: hoe kunnen wij anders werken en technologie voor ons laten werken? Maar ook: hoe doen wij dit integraal, organisatie-overstijgend en met de juiste randvoorwaarden? Dit alles om Nederland veilig, bereikbaar en leefbaar te houden en te versterken.

Wij staan samen aan de lat om deze transitie vorm te geven. Mijn advies is om samen de stap te zetten van denken naar doen. Begin klein, stel een integraal team samen en onderzoek welke pilots al opgetuigd kunnen worden. Neem een voorbeeld aan de stappen die het Planbureau voor de Leefomgeving, Rijkswaterstaat en DGWB zetten.

Er is enorm veel quantumkennis in Nederland. Laten we hiervan profiteren en deze kennis inzetten voor onze eigen opgaven. Ik hoop dat dit document een eerste aanzet vormt voor toekomstige baanbrekende projecten. Maak gebruik van elkaars kennis en ga pionieren!

Sterre Romkema
Senior adviseur AI en Quantumtechnologie
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Aanbevelingen CQS

Bij technische innovaties zoals de potentiële use cases die in onze samenwerking zijn verkend, is het zaak een goede technologie-roadmap te ontwikkelen nu de urgentie en het belang zo duidelijk zijn. Daarnaast zijn investeringen in het ecosysteem van belang om direct intern knowhow te kweken op het gebied van quantumtechnologie. Het is belangrijk om alle stakeholders hierbij al in een vroeg stadium te betrekken. Zo zijn er collega's bij het ministerie van IenW die de complexe beleidsdossiers goed kennen, kunnen overzien wat de belangrijkste trends en ontwikkelingen zijn die van invloed kunnen zijn op de roadmap, en weten hoe het ecosysteem zich verder ontwikkelt.

Ook weet IenW welke externe stakeholders en betrokkenen daadwerkelijk door de implementatie van quantumtechnologie 'geraakt' kunnen worden en welke gemakkelijk over het hoofd gezien kunnen worden. Denk aan de burger wiens waterkwaliteit in het geding is, de dijkbewaker die te maken heeft met lekkende dijken en niet weet hoe hij het dienstrooster moet aanpassen voor handmatige steekproeven en controles, of de aanbestedende dienst die specifieke eisen moet stellen voor quantumsensoren die zeebodemmijnen kunnen detecteren.

Mijn advies is dan ook om naast een technologie-roadmap voor quantumtechnologie ook een impact-roadmap te maken. Zo kun je tijdig de nodige zaken inbrengen, bottom-up, met inbreng die gebaseerd is op praktische ervaring binnen organisaties.

Daniël Frijters
Teammember Centre for Quantum and Society
Quantum Delta Nederland

Quantum Delta NL
Centre for Quantum and Society

Aanbevelingen TNO

De technologische doorbraken op het gebied van quantumtechnologie, met voortdurende vooruitgang in zowel hardware als software, bieden veel kansen voor het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW). Use-cases tonen aan dat quantumtoepassingen relevant zijn voor meerdere DG's, waardoor een integrale aanpak voor de inzet van quantumtechnologie, nodig is.

Samenwerking is cruciaal om synergiën te benutten en innovatieve oplossingen te ontwikkelen. Door kennis en expertise te delen, kunnen de betrokken partijen gezamenlijk werken aan het oplossen van complexe problemen en het ontwikkelen van innovatieve oplossingen. Dit vereist een goed gecoördineerde aanpak en duidelijke communicatie om ervoor te zorgen dat alle betrokkenen op dezelfde lijn zitten en effectief kunnen samenwerken. Innovatie in het gebruik van quantumtechnologie vraagt niet alleen om technische expertise, maar ook om een diepgaand begrip van de specifieke domeinen waarin deze technologie wordt toegepast. Het is cruciaal om domeinexperts en technische (quantum) experts samen te brengen om praktische toepassingen te ontwikkelen en doorbraken te realiseren.

Het is aan te raden om te beginnen met kleinschalige pilotprojecten om de haalbaarheid en voordelen van quantumtechnologieën in de praktijk te testen. Beleid en regelgeving moeten de integratie van quantumtechnologieën in bestaande systemen ondersteunen, inclusief ethische en veiligheidsaspecten. Daarnaast zijn voldoende financiering en subsidies essentieel om onderzoek en ontwikkeling van quantumtechnologieën te stimuleren en private investeringen aan te trekken. Investeren in educatie en training voor medewerkers is eveneens belangrijk, om vertrouwd te raken met de basisprincipes en toepassingen van quantumcomputing en -sensing.

Internationale samenwerking, bijvoorbeeld binnen de EU biedt mogelijkheden om kennis en best practices uit te wisselen en gezamenlijke onderzoeksinitiatieven te starten. Het is belangrijk om mechanismen in te stellen voor voortdurende monitoring en evaluatie van de onderzoeksprojecten om de effectiviteit en impact van quantumtechnologieën te beoordelen.

Frank Phillipson
Senior Scientist bij TNO en
hoogleraar aan Maastricht University

TNO innovation for life

Colofon

Centre for Quantum & Society, Quantum Delta Nederland
Diederick Croese (diederick.croese@quantumdelta.nl)
Voor inhoudelijke vragen: Daniël Frijters (daniel.frijters@ecp.nl)
Erik Anspach
Jelle Attema
Gwendolynn Bakker
Hannah Boute
Pieter van Kuilenburg
Malon van der Toorn

Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
Sterre Romkema (sterre.romkema@minienw.nl)
Loulou Hanna
Germain van der Velden
Çağla Kirmit-Yıldız
Tzadiq Schimmel

TNO
Peter Elias - van den Berg (peter.elias@tno.nl)
Niels Neumann
Frank Westers
Mark Zijlstra
Frank Phillipson
Simon Cramer

Directoraat-generaal Water & Bodem
Barend Koster

Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Rijkswaterstaat
Bijou van Haren
Col Offermans
Rob Portielje
Peter de Boer

Planbureau voor de Leefomgeving

Planbureau voor de Leefomgeving
Sido Myselius
Nico Pieterse
Laura Zondervan
Mark Thissen

evides waterbedrijf

Evides Waterbedrijf
Gerry van de Meijel

LEES 'T

Redactie
Ester Schop

GSTALT
strategie
branding
marketing
online

Ontwerp en druk
GSTALT

Voor deze publicatie is gebruik gemaakt van een aantal rapporten van TNO, waarvoor dank. Onze dank gaat daarnaast uit naar alle deelnemers aan de workshops en iedereen die op enige wijze heeft bijgedragen aan het tot stand komen van deze publicatie.

Bijlagen

Meer over quantumhardware en quantumalgoritmes

Quantumcomputers maken gebruik van drie quantummechanische principes om bewerkingen uit te voeren: superpositie, quantumverstrengeling (entanglement) en interferentie.

- **Superpositie**
  Waar bij klassieke computers wordt gecodeerd in binaire cijfers (bits) – die altijd 0 of 1 zijn – gebruiken quantumcomputers quantumbits (qubits). Hierdoor kunnen berekeningen op een (lineaire) combinatie van de twee toestanden plaatsvinden. De precieze toestand van een qubit is over het algemeen niet bekend. Qubits bevinden zich vaak in een tussenpositie. Omdat bij het bekijken van de qubit geen tussenpositie mogelijk is, zal de qubit zich schijnbaar willekeurig voordoen als een 0 of 1. De superpositie is dan verstoord geraakt.
- **Quantumverstrengeling (entanglement)**
  Bij verstrengeling van twee gepaarde elementaire deeltjes bestaat er een verbinding tussen twee deeltjes, waarbij de fysieke locaties niet meer uitmaken. Als de toestand van een deeltje gemeten wordt, weet je ook onmiddellijk wat de toestand van het andere deeltje is, hoever zij ook van elkaar verwijderd zijn. Dit maakt communicatie mogelijk die sneller gaat dan het licht.
- **Interferentie**
  Quantumdeeltjes, zoals elektronen, fotonen en andere elementaire deeltjes, kunnen zowel de eigenschappen van een deeltje (iets met massa en een duidelijke locatie) als die van een golf (een verspreid patroon zonder vaste locatie) vertonen. Welke eigenschap naar voren komt, hangt af van hoe je het deeltje observeert of meet. Bij interferentie wordt het golfkarakter van een quantumdeeltje versterkt of uitgedoofd door een ander quantumdeeltje.

Meer uitleg over de wiskunde achter superpositie en verstrengeling (bron: TNO)

Wiskunde achter superpositie en verstrengeling

Qubits worden gerepresenteerd door twee computationele toestanden, 0 en 1. Beide kunnen we representeren als een vector $\begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix}$ en $\begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix}$, we schrijven dit vaak kortweg op als $|0\rangle$ en $|1\rangle$. In het algemeen beschrijven we een qubit $|\psi\rangle$ als een complex lineaire combinatie van lengte 1 van twee basistoestanden: $|\psi\rangle = \alpha \begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix} + \beta \begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\alpha\\\beta\end{pmatrix}$ met $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$.

Op het moment dat een qubit gemeten wordt, wordt een $|0\rangle$ of een $|1\rangle$ gevonden. We vinden de $|0\rangle$ toestand bij de meting met kans $|\alpha|^2$ en de $|1\rangle$ toestand bij de meting met kans $|\beta|^2$. Een systeem bestaande uit twee qubits bestaat uit een complexe lineaire combinatie van de basistoestanden voor elk van de twee qubits, dus in totaal uit een complexe lineaire combinatie van vier toestanden.

Twee qubits zijn verstrengeld als ze niet te schrijven zijn als het product van twee qubits. Dat wil zeggen, een twee-qubit systeem $|\psi\rangle = \alpha_{00}|00\rangle + \alpha_{01}|01\rangle + \alpha_{10}|10\rangle + \alpha_{11}|11\rangle$ zodanig dat $\sum_{i,j}|\alpha_{ij}|^2 = 1$ is verstrengeld als het niet te schrijven is als $\begin{pmatrix}\alpha\\\beta\end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix}\gamma\\\delta\end{pmatrix}$ waarbij $\otimes$ staat voor het tensorproduct van twee qubits (vectoren). Verreweg de meeste toestanden zijn verstrengeld.

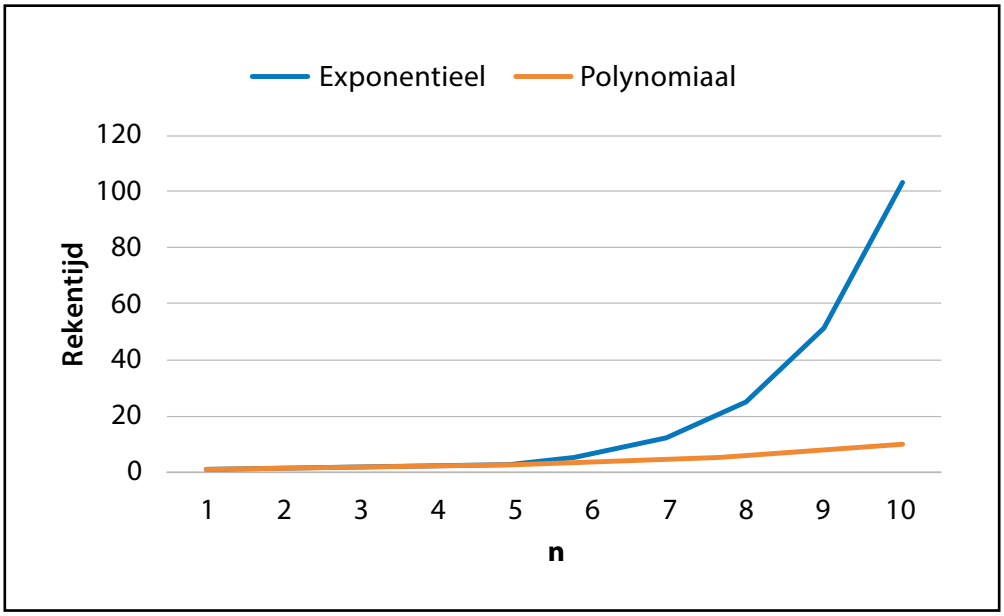
De meest bekende verstrengelde toestand is $\frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$. De twee qubits zijn verstrengeld en het meten van een van de twee qubits legt direct de meetuitkomst van de andere qubit vast.

Meer uitleg over complexiteitsklassen in de Informatica (bron: TNO)

Rekenkundige problemen kunnen worden geclassificeerd met betrekking tot hoe (rekenkundig) moeilijk het is om het probleem op te lossen of om een oplossing voor het probleem te verifiëren. Een belangrijke term hierbij is polynomiale tijd (of geheugen). Dit betekent dat de tijd (of geheugen) die het kost om een probleem op te lossen of te verifiëren kan worden uitgedrukt in de grootte van de invoer en wordt begrensd door een polynoom, uitgedrukt in de grootte van de invoer.

Een polynoom bestaat uit een som van termen, waarbij elke term een variabele bevat die wordt opgeheven tot een niet-negatieve hele macht, vermenigvuldigd met een constante (coëfficiënt). Polynomen worden in de wiskunde vaak gebruikt voor het oplossen van kwadratische of hogeregraads vergelijkingen.

Een probleem kan ook exponentieel veel tijd in de lengte van de input kosten om op te lossen. Hierbij gaat de groei vele malen sneller (zie figuur 1).

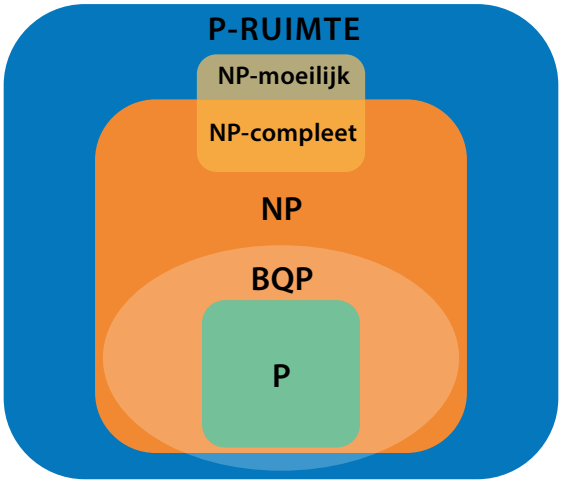


Figuur 1: Rekentijdvergelijking

Complexiteitsklassen

Binnen de informatica worden problemen vaak geclassificeerd in bepaalde klassen op basis van hoe moeilijk ze op te lossen zijn. Bekende klassen die kijken naar polynomiale rekentijden en geheugen zijn:

- P-Ruimte = alle problemen die kunnen worden opgelost met behulp van een polynomiale hoeveelheid geheugen, maar mogelijk een exponentieel aantal stappen/rekentijd.
- NP = problemen met efficiënte algoritmen die een gegeven oplossing kunnen verifiëren in polynomiale tijd.
- NP-moeilijk = verzameling van problemen die minstens zo moeilijk zijn als ieder probleem in NP. Elke probleem in NP moet in polynomiale tijd tot elk probleem in NP-moeilijk kunnen worden gereduceerd.
- NP-compleet = klasse van beslissingsproblemen die de moeilijkste problemen in NP bevat. Elk NP-compleet probleem moet in NP zijn. Dit zijn de problemen in NP-moeilijk die ook in NP zitten.
- P = Problemen met efficiënte algoritmen voor het vinden van oplossingen, deze algoritmen gebruiken hoogstens een polynomiale hoeveelheid geheugen en rekentijd.
- BQP = de klasse van beslissingsproblemen die oplosbaar zijn in polynomiale tijd op een quantumcomputer, met maximale foutkans van 1/3.



Figuur 2: Complexiteitsklassen in de Informatica

Meer over quantumhardware

Er is nog geen standaard manier om quantumcomputers te maken. Op dit moment werken veel verschillende partijen aan het bouwen van quantumcomputers en daar worden verschillende methodologieën voor gebruikt. Twee bekende modellen zijn:

- **Digitale quantumcomputing of gate-based computing**
  Bij dit model worden bewerkingen toegepast op (combinaties) van qubits, vergelijkbaar met de klassieke AND en OR operaties. Hierdoor kunnen specifieke algoritmes worden uitgevoerd.
- **Analoge quantumcomputing, zoals quantumannealing**
  Bij dit model worden alle qubits gelijktijdig beïnvloed met een overkoepelend energielandschap. Door dit langzaam toe te passen, correspondeert de toestand van de qubits uiteindelijk met de oplossing van het probleem. Dit heet adiabatische quantumcomputing. Bij een adiabatisch proces wordt er geen warmte met de omgeving uitgewisseld.

  Bij quantumannealing gebeurt dit sneller dan bij adiabatische quantumcomputing. Quantumannealing is een quantummechanische techniek die vooral wordt gebruikt om optimalisatieproblemen op te lossen. Het is ontworpen om snel een goede oplossing te vinden voor complexe problemen, zoals het vinden van de laagste energietoestand van een systeem.

Ook voor de onderliggende qubits zijn er veel technologieën beschikbaar. Iedere technologie heeft zijn eigen voor- en nadelen en kent verschillende toepassingsdomeinen. Op dit moment is nog niet duidelijk welke technologie leidend zal worden. Mogelijk wordt dit een combinatie van een van de volgende technologieën:

- **Transmon qubits**
  Deze qubits zijn relatief eenvoudig te maken en daarmee op te schalen, maar zijn wel gevoelig voor ruis;
- **Spinqubits**
  Deze qubits zijn significant kleiner dan transmon qubits, maar zijn lastiger op te schalen.
- **Trapped-ion qubits**
  Deze qubits zijn stabiel, maar het uitvoeren van berekeningen duurt langer.
- **NV-centers**
  Ook deze qubits zijn stabiel en worden vooral toegepast in communicatie. De locatie van de qubits is niet vooraf te voorspellen.
- **Fotonen**
  Bij dit type qubits wordt informatie opgeslagen in lichtdeeltjes. Afhankelijk van de toepassing kan het heel makkelijk zijn om data in de quantumtoestand te stoppen. Niet alle operaties zijn mogelijk.

Net als in conventionele berekeningen kunnen ook in quantumberekeningen fouten sluipen. Deze fouten sluipen bij qubits makkelijker in het systeem, omdat qubits gevoeliger zijn dan conventionele bits. Dit kan leiden tot andere meetuitkomsten. De kans op fouten kan worden verkleind door qubits onder zeer lage temperaturen te gebruiken – bij voorkeur tegen het absolute nulpunt aan. Ook het gebruik van qubits van betere kwaliteit helpt, net als het toepassen van codes die fouten corrigeren. Dit werkt het beste als je een aantal qubits dusdanig groepeert dat ze gezamenlijk beter bestand zijn tegen fouten. Mochten er toch fouten optreden, dan kunnen die gecorrigeerd worden door vooraf gedefinieerde metingen uit te voeren op zo'n groepje qubits.

Meer over quantumalgoritmes

In theorie kunnen quantumcomputers alles wat conventionele computers kunnen en meer. Maar niet voor alle toepassingen bieden quantumcomputers voordelen. Het is dus zaak goed te zoeken naar geschikte uitdagingen en problemen waarbij de inzet van quantumcomputers voordelen bieden.

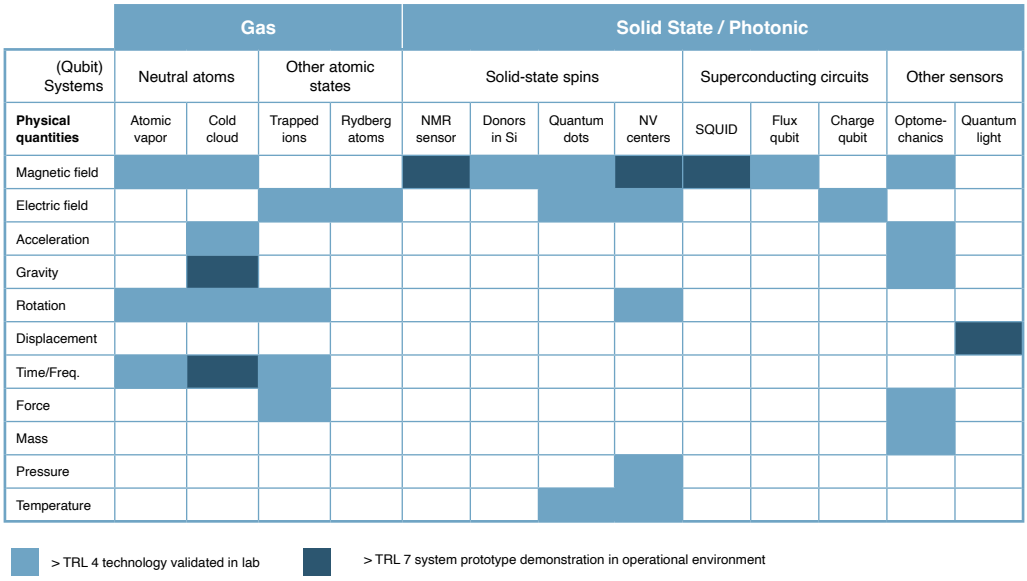
Als we in de (verre) toekomst zeker willen zijn dat bepaalde zaken geheim blijven, moeten we vandaag al onze cryptografie aanpassen. Bepaalde algoritmes, zoals die van Shor* en Grover**, zorgen er namelijk voor dat versleuteling veel gemakkelijker te kraken is. Een uitgebreide catalogus van quantumalgoritmen is te vinden in de Quantum Zoo, ga naar https://math.nist.gov/quantum/zoo of scan de QR code.

In deze publicatie werken we een aantal potentiële use cases voor quantumcomputers verder uit op het terrein van Infrastructuur en Waterstaat.

*) *Het Shor-algoritme is ontwikkeld door wiskundige Peter Shor in 1994, en is een quantumalgoritme dat efficiënt grote getallen kan ontbinden in priemfactoren. Dit is een doorbraak in de quantumcomputing en heeft belangrijke implicaties, vooral op het gebied van cryptografie.*

**) *Het Grover-algoritme is ontwikkeld door Lov Grover in 1996, en is een quantumalgoritme dat efficiënt een item kan zoeken in een niet-gesorteerde database of een oplossing kan vinden in een zoekruimte.*

Hieronder ziet u een overzicht van bestaande quantumsystemen die worden gebruikt in sensoren, de fysieke eigenschappen die ze kunnen meten en hoe volwassen de technologie is. Hoe donkerder de kleur, hoe groter de volwassenheid:



Bron: TNO

De fysieke eigenschappen aan de linkerkant van de figuur kunnen ook gemeten worden met behulp van klassieke sensoren, maar de quantumsensoren bieden voordelen in de manier waarop ze die eigenschappen meten.

Contactgegevens

Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
Sterre Romkema
sterre.romkema@minienw.nl

Centre for Quantum & Society - Quantum Delta Nederland
Diederick Croese
diederick.croese@quantumdelta.nl

Daniël Frijters (*voor inhoudelijke vragen*)
daniel.frijters@ecp.nl

TNO
Peter Elias – van den Berg
peter.elias@tno.nl

mei 2025