

Kansen van quantumtechnologie voor het ministerie van Financiën

TNO 2025 R12411 – Februari 2026

Kansen van quantumtechnologie voor het ministerie van Financiën

Auteurs	Frank Phillipson, Jesse Vogel
Rubricering rapport	TNO Public
Titel	TNO Public
Rapporttekst	TNO Public
Aantal pagina's	28 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	0
Opdrachtgever	Ministerie van Financiën
Projectnaam	Kansen van Quantum
Projectnummer	060.63185

Alle rechten voorbehouden

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

© 2026 TNO

Inhoudsopgave

1	Inleiding.....	4
2	Quantum computing.....	6
2.1	Quantumtechnologie en -computers.....	6
2.2	Mogelijkheden en onmogelijkheden	7
3	Workshops	8
3.1	Opzet en methodologie.....	8
4	Analyse	11
4.1	Clustering.....	11
4.2	Toepassingsclusters	12
4.3	Classificatie.....	18
5	Samenvatting en aanbevelingen.....	20

1 Inleiding

Quantum computing ontwikkelt zich wereldwijd in hoog tempo en wordt gezien als een technologie met potentieel grote impact op de economie, wetenschap en publieke dienstverlening. Hoewel de technologie zich nog in een vroege fase bevindt, laten recente ontwikkelingen zien dat quantumalgoritmen nieuwe mogelijkheden kunnen bieden bij rekenkundige problemen die voor klassieke computers zeer moeilijk of praktisch onoplosbaar zijn. Voor een ministerie met een sterke rol in begroting, beleidsevaluatie, toezicht en economische modellering is het daarom van strategisch belang om tijdig te verkennen waar quantum computing toegevoegde waarde kan hebben en welke ontwikkelingen op langere termijn relevant worden.

Het identificeren van zinvolle toepassingen is echter niet triviaal. Quantumcomputers lossen niet simpelweg alle berekeningen sneller op. Alleen specifieke typen problemen, zoals optimalisatievraagstukken, patroonherkenning in hoge-dimensionale data, en simulatie van complexe systemen, komen in aanmerking voor structurele versnelling. Bovendien vergt dit inzicht in zowel de beleids- en uitvoeringscontext als in de mathematische vorm van het onderliggende probleem. Toepassing is daarom niet een kwestie van “techniek erbij zetten”, maar van probleemstructuur analyseren, modellering heroverwegen en algoritmische vertaalslagen maken.

Om deze verkenning gestructureerd vorm te geven, zijn in 2025 meerdere workshops georganiseerd met medewerkers uit verschillende directies van het ministerie van Financiën. In deze sessies is gezamenlijk onderzocht:

- Welke analytische, organisatorische en rekenintensieve vraagstukken spelen er?
- Waar vormen schaal, onzekerheid, afhankelijkheid of combinatorische complexiteit een knelpunt?
- Welke processen of beleidsbeslissingen zouden significant profiteren van betere of snellere rekenmodellen?

Op basis van deze workshops is een reeks concrete use cases verzameld. Deze zijn vervolgens geclusterd in een aantal probleemklassen:

1. Quantum Optimalisatie en Portefeuillebeslissingen
2. Quantum Data-analyse, Patroonherkenning en Fraudebestrijding
3. Quantum Simulatie en Scenario-analyse
4. Quantum Machine Learning voor Forecasting & Gedragsmodellering
5. Quantum AI & Informatieverwerking

Voor elke klasse is vervolgens onderzocht:

- Of en in welke mate quantum computing volgens huidige literatuur en ontwikkelstadia perspectief biedt;
- Welke typen quantum- of quantum-inspired algoritmen relevant kunnen zijn;
- In welke technologische tijdshorizon mogelijke voordelen verwacht mogen worden;
- Welke randvoorwaarden (data, modellering, hardware, governance) aandacht vragen.

Deze analyse is geen implementatieplan, maar een onderbouwde beleids- en innovatieverkenning. Het doel is om:

- Realistische verwachtingen te schetsen over wat quantumtechnologie wel en niet kan;

- Strategische kansen te identificeren die de komende jaren verder kunnen worden ontwikkeld;
- Handvatten te bieden voor gericht experimenteren, kennisopbouw en samenwerking met kennisinstellingen, uitvoeringsorganisaties en marktpartijen.

Quantumtechnologie is daarmee geen oplossing voor alle vraagstukken, maar voor specifieke probleemstructuren kan de impact groot zijn. Door nu te investeren in inzicht, structuur en toepassingskennis kan het ministerie zich voorbereiden op een technologie die naar verwachting een belangrijke rol gaat spelen in de digitale en economische infrastructuur van de toekomst.

2 Quantum computing

2.1 Quantumtechnologie en -computers

Klassieke (of conventionele) computers zijn de computers zoals we die allemaal kennen en vrijwel iedereen er thuis eentje heeft staan. Sterker nog, ze zitten overal, ook in je telefoon, horloge en wellicht in je koelkast en auto. Als wij een opdracht geven aan de computer, door bijvoorbeeld een toets in te drukken, wordt deze opdracht voor ons onzichtbaar vertaald in een voor de computer leesbare taal. Deze taal bestaat uit heel veel nullen en enen. De volgorde waarin deze nullen en enen staan bepaalt wat de computer hierop doet, waardoor jij uiteindelijk tekst op het scherm ziet verschijnen. Wat er achter de schermen gebeurt, hoeven we ons al decennia niet meer druk over te maken. Dit gaat vanzelf, wij besturen de computer via apps, knoppen en dergelijke.

Deze klassieke computers kunnen veel alledaagse praktische problemen snel oplossen. Er zijn echter ook problemen waar ze minder geschikt voor zijn. Een voorbeeld is het simuleren van de natuur op de kleinste schaal, de schaal van atomen en moleculen. Zonder versimpelingen kunnen klassieke computers dit slechts tot een handjevol atomen doen. Een ander probleem waarvan we aannemen dat klassieke computers moeite mee hebben is het oplossen van specifieke wiskundige problemen, zoals het factoriseren van getallen, die worden gebruikt om onze communicatie te versleutelen. Zolang een computer hier slecht in is, is onze versleutelde communicatie dus veilig.

Een nieuw soort computer is echter in aantocht met de belofte dat deze in slechts een fractie van de tijd het antwoord kan geven op vragen waar de huidige generatie computers vele jaren mee bezig zouden zijn: de quantumcomputer. Deze quantumcomputer maakt gebruik van quantummechanische verschijnselen, zoals superpositie en verstrengeling, om bewerkingen uit te voeren.

Quantum computing kan grofweg in twee soorten worden verdeeld: digitale (of gate-gebaseerde) quantumcomputers en analoge quantumcomputers, waarbij de laatste vaak wordt uitgevoerd door zogenaamde quantum annealers.

Digitale quantumcomputers werken in principe zoals gewone computers, maar gebruiken een speciale soort rekenstap genaamd een quantum gate. Deze gates beïnvloeden de toestanden van qubits, de bouwstenen van een quantumcomputer. Een qubit is vergelijkbaar met een bit in een gewone computer, maar heeft een bijzonder kenmerk: terwijl een gewone bit alleen een 0 of 1 kan zijn, kan een qubit tegelijkertijd meerdere toestanden aannemen. Dit maakt het mogelijk om veel informatie tegelijk te verwerken en bepaalde berekeningen sneller uit te voeren dan klassieke computers. Door quantum gates slim te combineren, kunnen programmeurs digitale quantumcomputers instructies geven om complexe berekeningen uit te voeren die voor gewone computers moeilijk of traag zijn.

Quantum annealers zijn meer gespecialiseerd en hebben één hoofddoel: het vinden van de beste oplossing voor een probleem, zoals de meest efficiënte planning of optimale verdeling van middelen. Ze zetten het probleem om in een soort “energiekaart” en laten het systeem vervolgens vanzelf evolueren naar de toestand met de laagste energie, oftewel de optimale oplossing. Dit maakt quantum annealers vooral geschikt voor grote en complexe optimalisatievraagstukken.

2.2 Mogelijkheden en onmogelijkheden

In theorie kunnen (digitale) quantumcomputers alles wat een klassieke computer kan, plus wat extra's. Voor veel problemen bieden quantumcomputers echter geen voordeel. Het is dus zoeken naar de juiste problemen waar we mogelijk voordeel behalen door quantumcomputers te gebruiken.

Gewone taken zoals tekstverwerking, het bijwerken van spreadsheets of het uitvoeren van simpele rekenkundige bewerkingen verlopen op klassieke computers vaak net zo snel of zelfs sneller. Ook kunnen quantumcomputers niet zomaar alles tegelijk oplossen; ze hebben structurele wiskundige problemen nodig om hun kracht te benutten. Problemen die geen duidelijke wiskundige of logische structuur hebben, zoals het interpreteren van juridische teksten of het nemen van beleidsbeslissingen zonder kwantificeerbare criteria, profiteren nauwelijks van quantumalgoritmen.

Daarmee is het belangrijk te begrijpen dat quantumcomputers geen universele “allesoplossers” zijn. Kleine of eenvoudig oplosbare problemen worden vaak sneller en goedkoper opgelost op een klassieke computer, denk aan berekeningen die nu in Excel gebeuren met wellicht een database van miljoenen regels. Ten slotte kunnen quantumcomputers geen creatief oordeel vormen; ze kunnen geen beleid beslissen, rapporten schrijven of intuïtieve keuzes maken. Ze zijn hulpmiddelen voor berekening, analyse en simulatie, maar menselijke afwegingen en gezond verstand blijven onmisbaar.

Voorbeelden waar quantumcomputers wel sterk in zijn:

- Ongestructureerd zoeken: Als je een (zeer) grote database hebt en je weet niet waar je antwoord zich bevindt, dan moet je in het slechtste geval de hele database doorwerken en dan blijkt vaak het laatste element het gezochte te zijn. Quantumcomputers kunnen dit kwadratisch sneller.
- Optimalisatie: het vinden van een goede of beste oplossing voor een probleem. Denk hierbij aan beslisproblemen zoals het handelsreizigersprobleem, planningsvraagstukken en portfolio-optimalisatie. Voor kleine(re) problemen is dit eigenlijk een zoekprobleem (zie vorige punt). Voor grotere problemen is een bewezen quantumversnelling niet aanwezig en zijn we aangewezen op quantumheuristieken. Hierbij helpt de quantumcomputer om wellicht sneller een betere oplossing te vinden, net zoals dat met klassieke heuristieken werkt.
- Het vinden van patronen en periodiciteit in functies en data: quantumcomputers kunnen heel efficiënt fouriertransformaties uitvoeren. Deze bewerkingen worden gebruikt om patronen in functies en data te vinden.
- Lineaire systemen oplossen: Het oplossen van lineaire stelsels van vergelijkingen (vind vector x zodanig dat $Ax = b$ voor gegeven A en b).
- Bepaalde vormen van machine learning en AI: quantumcomputers kunnen sommige problemen binnen de machine learning beter oplossen, bijvoorbeeld doordat ze minder data samples nodig hebben om te leren (efficiëntie), doordat ze bepaald patronen sneller zien (gerelateerd aan het vinden van patronen en periodiciteit, zoals eerder gemeld), doordat ze simpelweg sneller zijn (tijdsinst) of omdat ze meer data kunnen opslaan in evenveel of zelfs minder rekeneenheden (capaciteit).
- Simuleren: het nabootsen van quantum structuren zoals atomen en moleculen. Een quantum computer kan dat aanzienlijk beter aangezien het zelf als quantum systeem functioneert en daardoor om kan gaan met het exponentieel aantal toestanden dat een dergelijke structuur kan hebben.
- Sampling: het genereren van random getallen en trekkingen uit complexe kansverdelingen.

3 Workshops

3.1 Opzet en methodologie

Door middel van meerdere workshops met afdelingen van verschillende DGs binnen het kerndepartement van het ministerie van Financiën is een aantal potentiële use cases verzameld. Deze workshops werden gehouden op:

- 3 juli 2025, met medewerkers van het SG-cluster, waaronder de directie Bedrijfsvoering (DBV), de concerndirectie Mens en Organisatie (CDMO), de directie Financieel-Economische Zaken (DFEZ), de concerndirectie Informatiehuishouding en openbaarmaking (CDIO) en de concerndirectie Veiligheid, Toezicht en Integriteitsonderzoek (CD VTI), en medewerkers van de Informatie en Technologie Services (ITS).
- 8 juli 2025, met medewerkers van het directoraat-generaal Rijksbegroting (DGRB), waaronder de directie Begrotingszaken (DBZ) en de Inspectie der Rijksfinanciën (IRF).
- 14 oktober 2025, met medewerkers van het Agentschap (AGT) van de Generale Thesaurie en directie Algemene Financiële en Economische Politiek (AFEP).

Deze workshops begonnen met een introductie over quantumtechnologie om de deelnemers bekend te maken met wat quantum wel kan en niet kan, de verschillende soorten quantumcomputers die er zijn, en de types problemen en algoritmen waar quantumcomputers naar verwachting sneller of efficiënter tot een oplossing komen dan klassieke computers. Hierbij zijn ter inspiratie een aantal voorbeelden van use cases gegeven uit verschillende probleemdomijnen, zoals Machine Learning, Optimalisatie, etc., ook vanuit een eerdere exercitie binnen het ministerie.

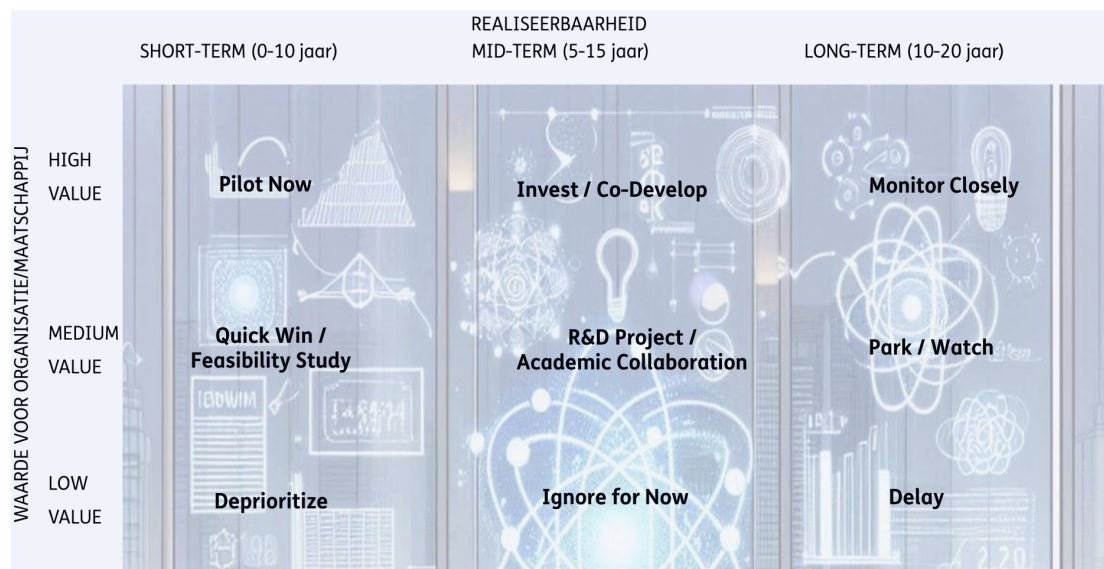
Met deze kennis werden de deelnemers aan het denken gezet over hoe quantum computing een voordeel kan leveren bij het oplossen van de problemen waar zij mee bezig zijn in hun eigen werk. Om deze gedachten te structureren, werd een canvas uitgedeeld met vragen waar de deelnemers hun use case op konden beschrijven, zie Figuur 3.1.

De hieruit voortgekomen use cases werden vervolgens plenair besproken, waarbij verder werd ingegaan op de context en de specifieke kenmerken van elke use case. In het bijzonder werd de *impact* van de use case besproken: die waarde die het oplevert als het probleem sneller of efficiënter kan worden opgelost. Verder werd besproken welke quantumalgoritmen mogelijk toepasbaar zouden zijn op de use case, en wat de *realiseerbaarheid* daarvan is: wat is de verwachte termijn waarop quantumtechnologie voldoende ontwikkeld is om het probleem daadwerkelijk aan te pakken. Om de onderlinge verhoudingen tussen de use cases op basis van deze criteria inzichtelijk te maken, werden ze geplaatst in een matrix met als assen 'impact' en 'realiseerbaarheid', zie Figuur 3.2.

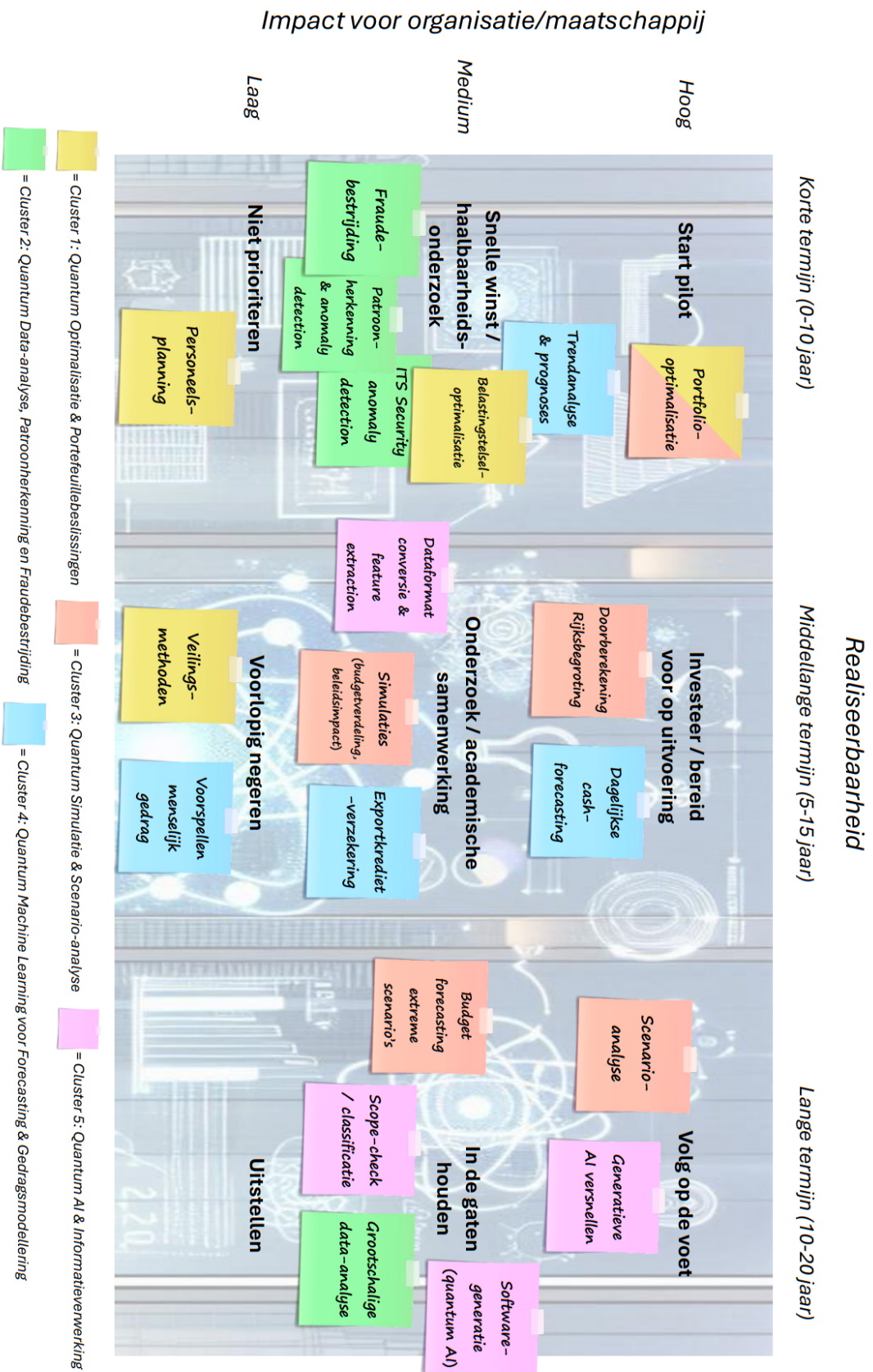
In Bijlage A is een overzicht te vinden van de use cases die uit deze workshops zijn gekomen.

Naam/functie:				
Thema	Vragen zoals:	Uitwerking		
Rekenuitdaging	Welke berekeningen of simulaties voer je uit? Welke algoritmen, datamodellen of analysetools gebruik je?			
Huidige knelpunten	Waar zit het probleem in rekentijd, schaalbaarheid, onzekerheid, datavolume of snelheid?			
Werkgebied / Proces	Wat is het probleem dat je oplost? Voor welk werkgebied is dat? Welk proces bevat dit probleem?			
Kansen voor Quantum?	Waar zie je een potentieel voordeel voor quantum computing? Waarom denk je dat?			
Beperkingen / Voorwaarden	Is dit probleem direct geschikt voor een use case? Zijn er beperkingen die moeten worden opgelost?	☐ juridisch ☐ databeschikbaarheid ☐ applicatiebeheerder/eigenaar ☐ beschikbare kennis ☐ anders	☐ juridisch ☐ databeschikbaarheid ☐ applicatiebeheerder/eigenaar ☐ beschikbare kennis ☐ anders	☐ juridisch ☐ databeschikbaarheid ☐ applicatiebeheerder/eigenaar ☐ beschikbare kennis ☐ anders
Strategisch / Financieel Belang	Hoeveel impact heeft het als dit probleem sneller/beter/efficiënter kan worden opgelost?	☐ hoog impact ☐ medium impact ☐ laag impact	☐ hoog impact ☐ medium impact ☐ laag impact	☐ hoog impact ☐ medium impact ☐ laag impact

Figuur 3.1: Canvas die werd uitgedeeld aan de deelnemers van de workshop. Hierop konden zij hun use case voor quantum computing beschrijven aan de hand van een aantal thema's en vragen.



Figuur 3.2: De impact-realiseerbaarheidsmatrix. Hierop werden tijdens de workshop de use cases van de deelnemers geplaatst aan de hand van de impact van de use case die zij aangaven en de realiseerbaarheid van de benodigde quantumalgoritmen.



4 Analyse

In dit hoofdstuk zullen we verder ingaan op de use cases die tijdens de workshops zijn geïdentificeerd. Aangezien het detailniveau dat we van elke use case hebben opgehaald nog tamelijk laag is, hebben we ervoor gekozen de use cases te clusteren. Voor elke cluster zullen we aangeven welke (quantum) techniek daarvoor gebruikt kan worden, wat de state of the art is en welke vervolgstappen we zien.

4.1 Clustering

Tijdens de workshops en gesprekken met experts binnen het ministerie van Financiën is gebleken dat de mogelijke meerwaarde van quantumtechnologie zich vooral concentreert rond een aantal terugkerende typen vraagstukken. Hoewel de concrete use cases sterk uiteenlopen, vertonen zij onderliggende overeenkomsten in de aard van het probleem en in de soorten berekeningen die nodig zijn om deze problemen op te lossen. Vanuit deze patronen zijn vijf probleemklassen (clusters) gevormd.

Deze clusters vertegenwoordigen zowel de domeinen waar quantumcomputers volgens de literatuur theoretisch voordeel kunnen bieden, als de gebieden waar binnen het ministerie de grootste behoefte is aan rekenkracht, patroonherkenning of complexe simulatie. Door de use cases in deze klassen te plaatsen, ontstaat een helder raamwerk om systematisch te analyseren welke vraagstukken kansrijk zijn voor quantumcomputing, nu of in de toekomst.

Cluster 1: Quantum Optimalisatie en Portefeuillebeslissingen

Veel financiële en beleidsmatige vraagstukken draaien om het zoeken naar de beste keuze uit een enorm aantal mogelijkheden: personeelstoewijzing, investeringsportefeuilles, planning en allocatie van middelen. Dit soort problemen groeit vaak exponentieel in complexiteit en is moeilijk te optimaliseren met klassieke methoden. Quantum optimalisatie is een van de meest onderzochte toepassingsgebieden van quantumtechnologie.

Cluster 2: Quantum Data-analyse, Patroonherkenning en Fraudebestrijding

Het ministerie werkt met grote en heterogene datasets (bijv. transacties, aangiften, financiële stromen, declaratiegegevens). Quantumalgoritmen die sneller patronen of afwijkingen kunnen herkennen zouden waardevol kunnen zijn voor detectie van fraude, onregelmatigheden of trends. De combinatie van grote volumes en complexe structuren maakt dit thema toepasselijk voor quantum-aangedreven analysemethoden.

Cluster 3: Quantum Simulatie en Scenario-analyse

Beleid en economie zijn sterk afhankelijk van scenario's en dynamische systemen met veel onderlinge afhankelijkheden. Denk aan kettingreacties bij economische schokken, doorrekening van beleidsopties of systeem-effecten. Quantumcomputers zijn theoretisch zeer geschikt voor het simuleren van complexe systemen, wat deze categorie relevant maakt voor onder andere lange-termijn scenarioanalyse, stresstests en simulaties van economische netwerken.

Cluster 4: Quantum Machine Learning voor Forecasting & Gedragsmodellering

Veel beleidsmodellen binnen Financiën steunen op voorspellingen — van kasstromen tot marktgedrag en respons van huishoudens. Quantum Machine Learning wordt in de literatuur vaak genoemd als een gebied waar quantumcomputers potentieel voordeel kunnen hebben, bijvoorbeeld door efficiënter leren van beperkte datasets of door sneller hoog-dimensionale patronen te vinden. Omdat forecasting en gedragsmodellering een centrale rol spelen in financiële besluitvorming, vormt dit een logisch cluster.

Cluster 5: Quantum AI & Informatieverwerking

Naast rekenkracht speelt ook het slim verwerken van grote hoeveelheden ongestructureerde informatie een rol binnen het ministerie: rapporten, beleidsstukken, wetsvoorstellen, antwoorden op Kamervragen, etc. Quantumalgoritmen voor informatieverwerking (zoals versneld zoeken, semantische matching of sneller doorgronden van grote documentverzamelingen) zijn een groeiend onderzoeksgebied. Dit cluster vangt daarom de use cases af die niet primair rekenen of simuleren vereisen, maar juist snellere informatieordening, integratie of analyse.

Deze clustering sluit aan op de bestaande wetenschappelijke literatuur en op de dagelijkse beleids- en analysepraktijk van het ministerie. Door de use cases te groeperen in samenhangende probleemdomeneinen wordt het mogelijk om per cluster een gerichte beoordeling te maken van haalbaarheid, technische rijpheid en verwachte impact. Tegelijkertijd voorkomt deze indeling dat de vele individuele ideeën versnipperd raken; in plaats daarvan ontstaat een helder en geordend overzicht dat richting geeft aan verdere verkenningen. Elk cluster vertegenwoordigt bovendien een andere vorm van potentieel voordeel van quantumtechnologie—of dat nu snellere optimalisatie, krachtigere data-analyse, nauwkeurigere voorspellingsmodellen of nieuwe vormen van informatieverwerking betreft. Hierdoor kan het ministerie weloverwogen strategische keuzes maken over waar verdere investering en experimentatie het meest kansrijk zijn.

4.2 Toepassingsclusters

Cluster 1: Quantum Optimalisatie en Portefeuillebeslissingen

Use cases:

- Portfolio-optimalisatie
- Personeelsplanning
- Belastingstelsel optimalisatie
- Veilingsmethoden

Onderzoeksvragen voor het ministerie:

- Hoe kunnen we met quantum optimalisatie betere, snellere of robuustere beslissingen nemen bij complexe financiële of beleidskeuzes?
- Kunnen quantumalgoritmen helpen om de combinatorische explosie van scenario's en beleidsvarianten te reduceren?
- In welke mate zijn hybride quantum-classical modellen al toepasbaar in de ondersteuning van besluitvorming?

State of the art:

Wereldwijd wordt quantumtechnologie in toenemende mate onderzocht en toegepast voor financiële (optimalisatie-) problemen¹ en belastingmodellering en -optimalisatie². Quantum annealing, zoals ontwikkeld door D-Wave, heeft hierbij een prominente rol gekregen vanwege zijn geschiktheid voor combinatorische optimalisatie, zoals portfolio-optimalisatie³ en personeelplanning⁴. Terwijl het 'Quantum Approximate Optimization Algorithm' (QAOA) veelbelovende resultaten laat zien voor vergelijkbare discrete besluitvormingsproblemen, zoals investeringskeuzes en herweging van portefeuilles⁵. Steeds vaker worden hybride quantum–klassieke benaderingen ontwikkeld, waarbij kwantumcomponenten worden ingezet binnen traditionele optimalisatiemodellen, zoals Mixed-Integer Linear Programming (MILP). Grote financiële instellingen, waaronder BBVA en Goldman Sachs, werken hierin actief samen met commerciële en academische partners⁶.

Hoewel de huidige quantumhardware nog beperkingen kent, tonen eerste academische studies in specifieke scenario's snelheidswinsten. Onderzoek naar variational approaches (zoals VQE en QAOA⁷) richt zich vooral op benchmarking tegen klassieke methoden, waarbij de vooruitgang snel gaat, maar nog geen overtuigend "quantum advantage" in realistische financiële contexten is aangetoond. D-Wave en andere partijen publiceren regelmatig casestudies, bijvoorbeeld over portefeuilles van zestig aandelen, die laten zien dat quantumoplossingen onder bepaalde voorwaarden betere resultaten of snellere convergentie kunnen opleveren⁸. De consensus in zowel wetenschap als industrie is dat de meest praktische route momenteel ligt in een hybride workflow, waarbij klassieke modellen de economische logica vastleggen en quantumalgoritmen worden ingezet voor de moeilijkste combinatorische zoekruimten.

Aanbevolen onderzoeksrichting:

- Ontwikkel één generiek quantum optimalisatie-framework dat kan worden toegepast op meerdere beleidsterreinen (portefeuilles, schuld, belastingstructuren).
- Start met QUBO-formuleringen van bestaande modellen.
- Richt een hybride pilot in: klassieke simulatie + quantum optimalisatie.

Cluster 2: Quantum Data-analyse, Patroonherkenning en Fraudebestrijding

Use cases:

- Patroonherkenning & anomaly detection
- ITS security anomaly detection
- Grootchalige database-analyse
- Fraudebestrijding

¹ Herman, Dylan, et al. "Quantum computing for finance." *Nature Reviews Physics* 5.8 (2023): 450-465.

² https://www.ey.com/en_nl/insights/tax/three-steps-tax-teams-should-take-to-prepare-for-quantum-computing

³ Gunjan, Abhishek, and Siddhartha Bhattacharyya. "A brief review of portfolio optimization techniques." *Artificial Intelligence Review* 56.5 (2023): 3847-3886.

⁴ Ciaccio, Alessia, Francesca Guerriero, and Eneko Osaba. "Quantum Annealing for Staff Scheduling in Educational Environments." *arXiv preprint arXiv:2510.12278* (2025).

⁵ Valecha, Krish, et al. "Empirical Analysis of Classical and Quantum Algorithms for Portfolio Optimization: Enhancing Financial Decision-Making Through Quantum Computing." 2024 International Conference on Sustainable Communication Networks and Application (ICSCNA). IEEE, 2024.

⁶ <https://www.bbva.com/en/bbva-and-csic-research-the-potential-of-quantum-computing-in-the-financial-sector/> en [Goldman Sachs and QC Ware Join Forces to Develop Quantum Algorithms in Finance](#)

⁷ Farhi, Edward, Jeffrey Goldstone, and Sam Gutmann. "A quantum approximate optimization algorithm." *arXiv preprint arXiv:1411.4028* (2014).

⁸ Phillipson, Frank, and Harshil Singh Bhatia. "Portfolio optimisation using the d-wave quantum annealer." *International Conference on Computational Science*. Cham: Springer International Publishing, 2021.

Onderzoeksvragen voor het ministerie:

- Kunnen quantumalgoritmen helpen om patronen, fouten of fraude sneller te detecteren in grote financiële en administratieve datasets?
- Waar ligt de grens tussen wat klassieke AI aankan en waar quantum echt toegevoegde waarde biedt?
- Hoe kunnen we quantum gebruiken zonder dataverlies of privacyrisico's?

State of the art:

Quantum Machine Learning (QML) ontwikkelt zich snel als een veelbelovende benadering voor anomaly detection⁹, met name in situaties waarin datasets klein zijn maar de onderlinge verbanden complex. Onderzoek toont aan dat technieken zoals quantum kernel-methoden (waaronder Quantum Support Vector Machines) en Quantum Boltzmann Machines in staat zijn om patronen in ruisachtige of sterk gecorreleerde data beter te herkennen dan veel klassieke methoden¹⁰. Daarnaast wordt de toepassing van quantum graph analytics en quantum graph neural networks (QGNN's) steeds belangrijker voor het analyseren van relaties tussen entiteiten — bijvoorbeeld transacties, organisaties of personen — wat directe relevantie heeft voor fraudedetectie binnen financiële netwerken en beleidsprocessen. Deze quantumgebaseerde graphmodellen kunnen complexe afhankelijkheden tussen duizenden datapunten efficiënter modelleren en helpen bij het identificeren van subtiele anomalieën die in klassieke analyses onopgemerkt blijven^{11,12,13}.

Een verwant onderzoeksgebied is quantum database-analyse, waarin algoritmen zoals Grover's search en aanverwante varianten worden ingezet om patronen of specifieke records sneller te lokaliseren binnen grote databestanden¹⁴. In de context van financieel-economische data kan dit betekenen dat foutieve of inconsistente datapunten — zoals typefouten, duplicaten of ongeldige transacties — sneller worden opgespoord, wat de datakwaliteit en de betrouwbaarheid van downstream analyses versterkt.

Recente overzichtsstudies laten zien dat QML-methoden voor anomaly detection zich in rap tempo professionaliseren¹⁵. Ze bieden een systematische indeling van quantum supervised, unsupervised en reinforcement learning-technieken, en beschrijven de hardware- en datavereisten voor hun inzet. De meerwaarde van QML blijkt vooral bij het detecteren van zeldzame afwijkingen in complexe datasets¹⁶, waarbij klassieke modellen vaak tekortschieten. Tegelijkertijd benadrukt de literatuur dat het succes van deze benaderingen sterk afhangt van de datavoorbereiding, de gekozen embedding-strategie, en de manier waarop klassieke features worden vertaald naar quantumtoestanden¹⁷.

⁹ Liu, Nana, and Patrick Rebentrost. "Quantum machine learning for quantum anomaly detection." *Physical Review A* 97.4 (2018): 042315.

¹⁰ Tomono, Takao, and Kazuya Tsujimura. "The discriminative ability on anomaly detection using quantum kernels for shipping inspection." *EPJ Quantum Technology* 12.1 (2025): 36.

¹¹ Innan, Nouhaila, et al. "Financial fraud detection using quantum graph neural networks." *Quantum Machine Intelligence* 6.1 (2024): 7.

¹² Zhu, Xianchao, et al. "Efficient relation extraction via quantum reinforcement learning." *Complex & Intelligent Systems* 10.3 (2024): 4009-4018.

¹³ Li, Yao-Chong, et al. "HQRNN-FD: A Hybrid Quantum Recurrent Neural Network for Fraud Detection." *Entropy* 27.9 (2025): 906.

¹⁴ Lavor, Carlile, L. R. U. Manssur, and Renato Portugal. "Grover's algorithm: Quantum database search." *arXiv preprint quant-ph/0301079* (2003).

¹⁵ Corli, Sebastiano, et al. "Quantum machine learning algorithms for anomaly detection: A review." *Future Generation Computer Systems* (2024): 107632.

¹⁶ Kim, Tae Hoon, and S. Madhavi. "Quantum intrusion detection system using outlier analysis." *Scientific Reports* 14.1 (2024): 27114.

¹⁷ Egginger, Sebastian, Alona Sakhnenko, and Jeanette Miriam Lorenz. "A hyperparameter study for quantum kernel methods." *Quantum Machine Intelligence* 6.2 (2024): 44.

Zowel industriële als academische experts adviseren daarom om eerst een synthetische, privacy-veilige testomgeving (sandbox) te bouwen waarin klassieke anomaly detection kan worden vergeleken met QML-prototypes¹⁸. Deze gefaseerde aanpak sluit aan bij internationale onderzoeksroadmaps en maakt het mogelijk om de praktische meerwaarde van quantumtechnologie op gecontroleerde wijze te toetsen voordat productie-implementaties worden overwogen.

Aanbevolen onderzoeksrichting:

- Ontwikkel een Quantum Fraud Detection Sandbox met synthetische data.
- Onderzoek samenwerking met het Nationaal Cyber Security Centrum (NCSC) en/of de Auditdienst Rijk op dit gebied.
- Test QML op anomaly detection (bijvoorbeeld typefouten, foutieve transacties).
- Focus op explainable QML om toepasbaarheid in audit en toezicht te waarborgen.

Cluster 3: Quantum Simulatie en Scenario-analyse

Use cases:

- Doorberekening Rijksbegroting
- Scenario-analyse (beleidsdoorrekeningen)
- Simulaties (budgetverdeling, beleidsimpact)
- Portfolio-optimalisatie (deels overlap met Cluster 1)
- Budget forecasting onder extreme scenario's

Onderzoeksvragen voor het ministerie:

- Hoe kunnen we quantum computing gebruiken om economische en begrotingsscenario's sneller en nauwkeuriger door te rekenen?
- Is het mogelijk om beleidsimpact simulaties (zoals CPB-modellen) versneld te draaien?
- Kan quantum helpen om onzekerheden (rente, gedrag, marktrespons) beter te modelleren?

State of the art:

Quantum simulatie vormt een van de kernsterktes van quantum computing, een idee dat teruggaat op Feynmans oorspronkelijke voorstel om kwantumsystemen te gebruiken voor het simuleren van complexe dynamieken die voor klassieke computers moeilijk te modelleren zijn¹⁹. Inmiddels worden hybride quantum-classical simulaties toegepast in domeinen als fysica, chemie en de financiële sector, onder meer voor risicomodellering en prijssimulaties^{20,21}. Deze ontwikkelingen zijn ook relevant voor beleidsvraagstukken binnen het ministerie van Financiën, zoals de doorberekening van de Rijksbegroting, scenario-analyses van beleidsmaatregelen, budgetverdelingssimulaties, en de optimalisatie van de schuld uitgiftestrategie.

In deze context zijn met name Quantum Monte Carlo-methoden en quantum stochastic simulations in opkomst²². Deze benaderingen maken gebruik van quantum-superpositie en

¹⁸ Aparcana-Tasayco, Andres J., Xianjun Deng, and Jong Hyuk Park. "A systematic review of anomaly detection in IoT security: towards quantum machine learning approach." EPJ Quantum Technology 12.1 (2025): 1-39.

¹⁹ Daley, Andrew J., et al. "Practical quantum advantage in quantum simulation." Nature 607.7920 (2022): 667-676.

²⁰ Kubo, Kenji, et al. "Variational quantum simulations of stochastic differential equations." Physical Review A 103.5 (2021): 052425.

²¹ Matsakos, Titos, and Stuart Nield. "Quantum Monte Carlo simulations for financial risk analytics: scenario generation for equity, rate, and credit risk factors." Quantum 8 (2024): 1306.

²² Blanchet, Jose, et al. "Connecting Quantum Computing with Classical Stochastic Simulation." arXiv preprint arXiv:2509.18614 (2025).

interferentie om het gedrag van stochastische processen — zoals onzekerheden in renteontwikkelingen, beleidskeuzes of marktreacties — efficiënter te modelleren. Theoretische analyses tonen aan dat quantumvarianten van Monte Carlo-pricing en -sampling onder ideale omstandigheden een kwadratische verbetering in foutschaling kunnen realiseren ten opzichte van klassieke Monte Carlo-methoden²³. Dit betekent dat, bij voldoende stabiele hardware, scenario's met een veelvoud aan stochastische variabelen sneller en nauwkeuriger kunnen worden geëvalueerd.

Binnen de financiële literatuur wordt quantum simulatie dan ook gezien als een van de meest directe toepassingen van quantum computing²⁴, omdat de onderliggende wiskundige structuren — zoals stochastische processen, onzekerheidspropagatie en risicoberekening — goed te vertalen zijn naar quantumalgoritmen. Tegelijkertijd blijft de praktische inzetbaarheid afhankelijk van hardwarebeperkingen, fouttolerantie en de schaalbaarheid van huidige quantumapparaten.

Aanbevolen onderzoeksrichting:

- Start met een proof-of-concept van quantum simulatie op een beleidsmodel met beperkte variabelen.
- Onderzoek of bestaande macro-economische modellen vertaald kunnen worden naar quantum formaten.
- Richt een Quantum Scenario Lab in om quantum simulatiecapaciteit te testen.

Cluster 4: Quantum Machine Learning voor Forecasting & Gedragsmodellering

Use cases:

- Trendanalyse & prognoses
- Dagelijkse cash-forecasting
- Voorspellen menselijk gedrag
- Exportkredietverzekering (risico-inschatting bij beperkte data)

Onderzoeksvragen voor het ministerie:

- Hoe kan quantum machine learning helpen om tijdreeksen, gedrag en risico's beter te voorspellen?
- Zijn quantum modellen robuuster bij beperkte of onvolledige data?
- Kunnen we quantum inzetten voor beleidsvoorbereiding in situaties met veel onzekerheid (bv. gedrag, marktdynamiek)?

State of the art:

Binnen het domein van voorspelling en risicoprognose ontwikkelt Quantum Machine Learning (QML) zich snel als een van de meest veelbelovende toepassingsgebieden van quantum computing²⁵. Onderzoek naar Quantum Neural Networks (QNNs) en Quantum Recurrent Neural Networks (QRNNs) laat zien dat deze modellen bijzonder goed presteren bij het analyseren van chaotische tijdreeksen²⁶, waarin klassieke neurale netwerken moeite hebben

²³ Rebentrost, Patrick, Brajesh Gupta, and Thomas R. Bromley. "Quantum computational finance: Monte Carlo pricing of financial derivatives." *Physical Review A* 98.2 (2018): 022321.

²⁴ Zhou, Jiawei. "Quantum finance: Exploring the implications of quantum computing on financial models." *Computational Economics* (2025): 1-30.

²⁵ Wang, Yunfei, and Junyu Liu. "A comprehensive review of quantum machine learning: from NISQ to fault tolerance." *Reports on Progress in Physics* (2024).

²⁶ Emmanoulopoulos, Dimitrios, and Sofija Dimoska. "Quantum machine learning in finance: Time series forecasting." *arXiv preprint arXiv:2202.00599* (2022).

om lange-termijn correlaties en niet-lineaire dynamiek vast te leggen. Dit maakt ze relevant voor toepassingen zoals trendanalyse en prognoses, waar complexe economische en financiële tijdreeksen worden gemodelleerd, en voor dagelijkse cash-forecasting, waarbij nauwkeurige voorspellingen van kasstromen essentieel zijn om de financieringspositie van de staat te optimaliseren²⁷.

Daarnaast wordt Quantum Bayesian Learning onderzocht als quantumvariant van probabilistische voorspelling, waarmee onzekerheid expliciet kan worden meegenomen in de voorspelling van toekomstige waarden²⁸. Deze benadering is bijzonder waardevol voor situaties waarin weinig data beschikbaar is of waar structurele onzekerheid groot is — zoals bij de Exportkredietverzekering (EKV), waar risico's moeten worden ingeschat op basis van beperkte historische informatie over landen, valuta's of politieke gebeurtenissen, maar ook voor voorspellingen van menselijk gedrag²⁹. In dergelijke contexten kunnen QML-modellen dankzij hun hogere representatiekracht beter generaliseren bij kleine datasets³⁰, iets waar klassieke methoden vaak tekortschieten.

Aanbevolen onderzoeksrichting:

- Richt een Quantum Forecasting Pilot op.
- Test quantum versus klassieke ML op historische cashflowdata.
- Richt op hybride pipelines waarin quantum wordt gebruikt als extra 'feature extractor'.

Cluster 5: Quantum AI & Informatieverwerking

Use cases:

- Generatieve AI versnellen
- Software genereren (met quantum AI)
- Scope-check / classificatie
- Dataformat conversie & feature extraction

Onderzoeksvragen voor het ministerie:

- Kan quantum helpen om documentanalyse, rapportclassificatie of GenAI sneller en betrouwbaarder te maken?
- Zijn er quantum methoden die beter omgaan met ongestructureerde data (teksten, rapporten)?
- Hoe verhoudt quantum AI zich tot de bestaande LLM-ontwikkelingen binnen de overheid?

State of the art:

Het onderzoeksveld van Quantum Natural Language Processing (QNLP) bevindt zich in een snelle groeifase en biedt interessante perspectieven voor toepassingen binnen overheids- en beleidsdomeinen³¹. QNLP combineert technieken uit de taalkunde, kunstmatige intelligentie en quantum computing, met als doel taalinhoud (zoals teksten, documenten en beleidsstukken) efficiënter te representeren en te analyseren. Onderzoek van onder meer Cambridge Quantum Computing (nu Quantinuum) en Xanadu laat zien dat quantum embeddings — vectorrepresentaties van woorden, zinnen of documenten — in staat zijn om complexe

²⁷ Thakkar, Sohum, et al. "Improved financial forecasting via quantum machine learning." *Quantum Machine Intelligence* 6.1 (2024): 27.

²⁸ Spears, Trent. *Topics in Bayesian machine learning for finance*. Diss. University of Oxford, 2024.

²⁹ Roeder, Luisa, et al. "A quantum model of trust calibration in human–AI interactions." *Entropy* 25.9 (2023): 1362.

³⁰ Caro, Matthias C., et al. "Generalization in quantum machine learning from few training data." *Nature communications* 13.1 (2022): 4919.

³¹ Widdows, Dominic, et al. "Quantum natural language processing." *KI-Künstliche Intelligenz* 38.4 (2024): 293-310.

semantische relaties compacter en energie-efficiënter vast te leggen dan klassieke embeddings³². Dit kan op termijn leiden tot snellere en nauwkeurigere classificatie-, clustering- en zoekfuncties.

Deze ontwikkelingen zijn relevant voor diverse use cases binnen het ministerie. Zo kan generatieve AI^{33,34} profiteren van quantumversnelling bij het labelen en trainen van modellen die teksten samenvatten, beleidsdocumenten analyseren of conceptantwoorden op Kamervragen genereren. Bij softwaregeneratie zou quantum-geassisteerde AI, via versneld optimaliseren van neurale netwerken of via QML-architecturen, bijdragen aan een snellere codeproductie en complexere patroonherkenning in programmeerlogica. Scope-check en classificatie — bijvoorbeeld het afbakenen van relevante bronnen binnen een veelheid aan beleidsdocumenten — kunnen efficiënter verlopen dankzij quantum-embeddingtechnieken die semantische context beter bewaren. Ook dataformat conversie en feature extraction kunnen baat hebben bij quantumrepresentaties die informatieverlies minimaliseren bij het overzetten tussen ongestructureerde en gestructureerde data.

De literatuur benadrukt echter dat QNLP nog grotendeels experimenteel is. Demonstraties zijn doorgaans uitgevoerd op kleine datasets en binnen beperkte hardwarecapaciteit.

Aanbevolen onderzoeksrichting:

- Richt een Quantum GenAI Lab op.
- Test quantum-classificatie voor rapportlabeling (bijv. Kamervragen, beleidsstukken).
- Richt op hybride AI-workflows: quantum ondersteunt pre-processing of embeddingslagen.

4.3 Classificatie

Zoals in hoofdstuk 3 is aangegeven, zijn alle use cases beoordeeld op *impact* en *realiseerbaarheid* en daarmee geplaatst op in een matrix. Deze matrix is afgebeeld in het onderstaande figuur.

Binnen deze matrix zijn negen velden te onderscheiden die aangeven met hoeveel prioriteit het probleem opgepakt kan of moet worden met gebruik van quantum technologie.

Start pilot

Start meteen met een kleine pilot of proof-of-concept om praktijkervaring op te doen en om snel waarde en haalbaarheid te toetsen.

- Portfolio-optimalisatie

Investeer en bereid voor op uitvoering

Werk samen met partners (bijvoorbeeld kennisinstellingen of bedrijven) om de oplossing verder te ontwikkelen en stap voor stap op te schalen.

- Doorberekening Rijksbegroting
- Dagelijkse cash forecasting

³² Duneau, Tiffany, et al. "Scalable and interpretable quantum natural language processing: an implementation on trapped ions." arXiv preprint arXiv:2409.08777 (2024).

³³ Winci, Walter, et al. "A path towards quantum advantage in training deep generative models with quantum annealers." Machine Learning: Science and Technology 1.4 (2020): 045028.

³⁴ Chaudhary, Smit, et al. "Towards a scalable discrete quantum generative adversarial neural network." Quantum Science and Technology 8.3 (2023): 035002.

Volg op de voet

Bouw een netwerk, doe mee in onderzoeksprojecten en blijf de technologie goed volgen zodat je er klaar voor bent zodra deze volwassen wordt.

- Scenario-analyse
- Generatieve AI versnellen

Snelle winst / haalbaarheidsonderzoek

Voer een korte haalbaarheidsanalyse uit om te bepalen of verdere inspanning zinvol is.

- Trendanalyse & prognoses
- Belastingstelsel optimalisatie
- Fraudebestrijding
- Patroonherkenning & anomaly detectie
- ITS anomaly detectie

Onderzoek / academische samenwerking

Neem deel aan een R&D-traject, bijvoorbeeld samen met universiteiten of toegepaste onderzoeksinstellingen.

- Dataformat conversie & feature extraction
- Simulaties
- Exportkredietverzekering

In de gaten houden

Leg het idee voorlopig stil, maar heroverweeg het regelmatig op basis van ontwikkelingen in technologie of beleid.

- Budget forecasting onder extreme scenario's
- Software genereren
- Scope-check / classificatie
- Grootschalige data-analyse

Niet prioriteren

Zet geen middelen in; alleen opnieuw oppakken als omstandigheden significant veranderen.

- Personeelsplanning

Voorlopig negeren

Het idee kan blijven bestaan, maar krijgt geen middelen tenzij extra capaciteit ontstaat.

- Veilingsmethoden
- Voorspellen menselijk gedrag

Uitstellen

Geen verdere aandacht of opvolging nodig in de huidige strategie.

5 Samenvatting en aanbevelingen

Quantumtechnologie ontwikkelt zich razendsnel en biedt het ministerie van Financiën strategische kansen voor het verbeteren van beleidsvorming, toezicht, economische modellering en publieke dienstverlening. Quantumcomputers zijn vooral krachtig bij het oplossen van complexe rekenproblemen, zoals optimalisatie, patroonherkenning, simulatie en geavanceerde machine learning. Niet alle vraagstukken profiteren van quantumtechnologie; de meerwaarde ligt bij problemen met een duidelijke mathematische structuur en grote schaal of complexiteit. Via workshops met verschillende directies zijn concrete use cases verzameld en geclusterd in vijf probleemklassen.

De huidige stand van de technologie laat zien dat hybride quantum–klassieke workflows het meest praktisch zijn, waarbij quantumalgoritmen worden ingezet voor de moeilijkste combinatorische en analytische taken. Het rapport benadrukt dat quantumtechnologie geen universele oplossing is, maar voor specifieke probleemstructuren een grote impact kan hebben.

Op basis van de analyse en de verzamelde use cases adviseren we het volgende:

- Investeer in kennisopbouw en experimenten: Start met pilots en proof-of-concepts om ervaring op te doen met quantumtechnologie in relevante beleidsdomeinen.
- Werk samen met kennisinstellingen en marktpartijen: Bouw aan een netwerk voor kennisdeling en gezamenlijke innovatie, bijvoorbeeld via een Quantum Scenario Lab of Quantum GenAI Lab.
- Focus op hybride workflows: Combineer klassieke modellen met quantumalgoritmen, vooral voor combinatorische optimalisatie, patroonherkenning en simulatie.
- Test quantum machine learning op historische data: Vergelijk quantum- en klassieke ML-methoden voor forecasting, gedragsmodellering en fraudedetectie.
- Stel realistische verwachtingen: Communiceer duidelijk wat quantumtechnologie nu wel en niet kan, en richt experimenten op haalbare toepassingen.
- Monitor technologische ontwikkelingen: Houd de internationale voortgang in quantumhardware en -software nauwlettend in de gaten, zodat het ministerie tijdig kan inspelen op nieuwe mogelijkheden.

Door nu te investeren in inzicht, structuur en toepassingskennis kan het ministerie zich voorbereiden op een technologie die naar verwachting een belangrijke rol gaat spelen in de digitale en economische infrastructuur van de toekomst.

Bijlage A - Use cases

Hieronder volgt een overzicht van de use cases de workshops zijn gekomen.

Portfolio-optimalisatie

Relevant voor: AGT

Omschrijving: Het ontwikkelen/optimaliseren van het portfolio van het Agentschap en de schuld-uitgiftestrategie op basis van simulaties en/of een scenario-analyse. Hierbij kan het doel zijn om zo laag mogelijke rentelasten te realiseren. Een zo laag mogelijk risico kan ook een doel zijn. Er wordt momenteel al gebruik gemaakt van een model dat de ontwikkeling van het portfolio simuleert op basis van een gekozen strategie en renteontwikkelingen, maar dit is erg rekenintensief.

Impact: Hoog

Randvoorwaarden: Het bepalen van een uitgiftestrategie maakt gebruik van marktgevoelige informatie.

Realiseerbaarheid: Korte termijn – Portfolio-optimalisatie sluit goed aan bij de mogelijkheden van quantum annealers. Dit type quantum computer is meer gespecialiseerd en kan optimalisatieproblemen van een grotere omvang aan dan gate-based quantumcomputers. Portfolio-optimalisatie met behulp van quantum annealing is in de literatuur al bestudeerd en uitgevoerd. Hier kan vandaag de dag al mee geëxperimenteerd kan worden.

Budget forecasting onder extreme scenario's

Relevant voor: DGRB

Omschrijving: Voor overheidsorganisaties is nauwkeurige forecasting van budgetbesteding essentieel om beleidskeuzes, investeringen en risico's verantwoord af te wegen. Traditionele voorspellingsmodellen raken echter snel beperkt wanneer zich complexe en zeldzame gebeurtenissen voordoen, zoals financiële crises, geopolitieke onrust of systeemshokken in de Europese economie. Het doorrekenen van dergelijke "schokscenario's" vereist het modelleren van kettingreacties en niet-lineaire effecten over meerdere niveaus: van directe gevolgen (1^e orde) tot indirecte en langdurige dynamieken in markten, handel, staatsfinanciering en publieke diensten (2^e en 3^e orde effecten).

Impact: Medium

Randvoorwaarden: Het DGRB werkt aan deze vraagstukken samen met het Centraal Planbureau oppakken (CPB). Een uitwerking van deze use case zal daarom in samenwerking met het CPB moeten zijn.

Realiseerbaarheid: Lange termijn – Quantum simulatie is een kernsterkte van quantum computing, maar de complexiteit van het probleem maakt het opstellen van geschikte modellen uitdagend. Hoewel quantumtechnieken mogelijk beter omgaan met de beperkte datasets van dit soort zeldzame gebeurtenissen, is er voor een praktische toepassing nog aanzienlijke vooruitgang vereist van quantumhardware.

Dagelijkse cash-forecasting

Relevant voor: AGT

Omschrijving: De afdeling Staatsschuld- en Schatkistbeheer maakt kasprognoses op dagelijkse basis met als doel om te bepalen hoeveel cash er nodig is om Nederland te financieren. Dit bestaat uit het maken van prognoses voor de dagelijkse inkomsten en uitgaven, met als doel om aan het einde van de dag per saldo positief uit te komen met zo laag mogelijke rentelasten. Momenteel worden keuzes gemaakt op basis van Excel spreadsheets, visuele weergaven, en ervaringen. Er wordt gezocht naar een methode die dit probleem objectiever benadert, bijvoorbeeld met behulp van *machine learning*. Dit om tot een betere saldoprognose te komen, en om minder afhankelijk te zijn van jarenlange ervaring in het opstellen van prognoses.

Impact: Hoog

Realiseerbaarheid: Middellange termijn – Quantum Machine Learning biedt potentieel om complexe tijdreeksen en onzekerheden in kasstromen beter te modelleren dan klassieke methoden, vooral bij beperkte data. De praktische inzetbaarheid blijft echter afhankelijk van verdere ontwikkeling van quantumalgoritmen en verbeteringen in hardwarecapaciteit en foutcorrectie.

Belastingstelsel optimalisatie

Relevant voor: AFEP

Omschrijving: Het doel is om te zoeken naar verschillende belastingstelsels die voldoen aan bepaalde voorwaarden. Er wordt momenteel al geëxperimenteerd met het vinden van oplossingen door het probleem te formuleren als een Mixed-Integer Linear Program (MILP), en op te lossen door middel van Gurobi. Beslissingsvariabelen corresponderen met het aan of uitzetten van een belastingregel, en continue variabelen corresponderen met waarden van tarieven of kortingen. Er zijn ook randvoorwaarden, veelal lineair. Zodra deze modellen groter of complexer worden, lopen ze tegen de limieten van klassieke solvers zoals Gurobi aan. Mogelijk bieden quantum of hybride solvers hier een oplossing.

Impact: Medium

Randvoorwaarden: Er is beperkte beschikbare kennis en capaciteit van het personeel.

Realiseerbaarheid: Korte termijn – Belastingstelsel optimalisatie is een optimalisatieprobleem wat goed aansluit bij de mogelijkheden van quantum annealers. De huidige aanpak om het probleem te formuleren als MILP kan nu al worden gebruikt om de prestaties van quantum annealers te vergelijken met die van de klassieke solvers.

Doorberekening Rijksbegroting

Relevant voor: DGRB

Omschrijving: Het doorrekenen van complexe, dynamische begrotingsmodellen. Bijvoorbeeld het simuleren van macro-economische effecten van nieuwe of bestaande beleidsmaatregelen. Dit zou kunnen leiden tot betrouwbaardere resultaten, gerichtere impactbepalingen en realistischere prognoses van effecten.

Impact: Hoog

Realiseerbaarheid: Middellange termijn – Quantum simulatie is een van de kernsterktes van quantum computing en wordt dan ook gezien als een van de meest directe toepassingen. Er worden al hybride quantum-classical simulaties voor prijssimulaties toegepast, maar de praktische inzetbaarheid blijft afhankelijk van hardwarebeperkingen, fouttolerantie en schaalbaarheid van huidige quantumhardware.

Exportkredietverzekering

Relevant voor: GT

Omschrijving: Bij het exporteren van Nederlandse goederen bestaat het risico dat de buitenlandse afnemer niet betaalt. In sommige gevallen, bijvoorbeeld bij baggerwerkzaamheden, zijn er politieke risico's en wisselkoersrisico's die niet verzekeraar zijn in de markt. Hiervoor heeft Financiën (de Generale Thesaurie) net als veel landen een exportkredietverzekering. Op basis van deze risico's wordt de verzekeringspremie bepaald. Het beter kunnen inschatten en voorspellen van deze risico's kan leiden tot minder schade en een lagere premie.

Impact: Medium

Realiseerbaarheid: Middellange termijn – Probabilistische quantumtechnieken bieden potentieel om onzekerheid expliciet mee te nemen en beter te generaliseren bij beperkte datasets dan klassieke methoden. Dit maakt ze interessant voor situaties waarin structurele onzekerheid groot is, maar praktische inzetbaarheid blijft voorlopig afhankelijk van verdere ontwikkelingen van de hardware en algoritmen.

Scope-check

Relevant voor: CDIO

Omschrijving: Het zoeken en vinden van documenten uit verschillende bronnen (denk aan e-mails, gespreksverslagen en geschreven stukken) is een complexe en tijdrovende taak binnen het openbaarmakingsproces. Bij Woo-verzoeken levert een zoekslag soms duizenden resultaten op, waardoor het lastig is om snel te filteren op relevantie. Tegelijkertijd kunnen er juist te weinig documenten gevonden worden door gebrekkige metadata als gevolg van matige informatiehuishouding. De uitdaging ligt in het doorzoeken van verschillende bronnen, het snel en accuraat beoordelen van documenten op relevantie (scope-check), en het herkennen van stukken die verplicht actief openbaar gemaakt moeten worden, idealiter met mogelijkheden tot automatische beschikbaarstelling.

Impact: Medium

Realiseerbaarheid: Lange termijn – Quantum Natural Language Processing kan op termijn helpen bij efficiëntere semantische representatie en documentclassificatie. Het onderzoeksveld is echter nog experimenteel, met demonstraties op kleine datasets en beperkte hardwarecapaciteit. Praktische toepassing vereist aanzienlijke vooruitgang in zowel hardware als quantumalgoritmen.

Patroonherkenning & anomaly detectie

Relevant voor: DBV & DGRB

Omschrijving: Het detecteren van fouten, fraude of onregelmatigheden in grote financiële datasets. Tegenwoordig gebeurt dit veelal handmatig door middel van steekproeven, wat leidt tot onzekere en trage detectie. Ook het herkennen van de patronen die deze fouten veroorzaken. Voorbeelden:

- Het detecteren van fouten, fraude of onregelmatigheden in grote financiële datasets. Tegenwoordig gebeurt dit veelal handmatig door middel van steekproeven, wat leidt tot onzekere en trage detectie. Ook het herkennen van de patronen die deze fouten veroorzaken. Voorbeeld: Anomaly detectie voor security by SOC.
- Ongeldige datapunten opsporen in databases (e.g. type-fouten)
- Fraudedetectie bij P&C-cyclus

Impact: Medium

Realiseerbaarheid: Korte termijn – Er bestaan verschillende quantumalgoritmen voor patroonherkenning en anomaly detectie, waarvan sommige gebaseerd zijn op quantum annealing en sommige op gate-based quantum computing. Recente overzichtsstudies laten zien dat Quantum Machine Learning methoden voor anomaly detection zich in rap tempo professionaliseren.

Veilingsmethoden

Relevant voor: AGT

Omschrijving: De Dutch Direct Auction (DDA) is een van de veilingmechanismes waarmee het Agentschap namens de Nederlandse Staat staatsobligaties uitgeeft aan institutionele beleggers. In deze veiling dienen deelnemers elektronisch hun biedingen in, waarin zij aangeven tegen welke rente en voor welk bedrag zij willen inschrijven. De DDA werkt volgens het principe van een uniform price auction: alle succesvolle bidders betalen uiteindelijk dezelfde prijs, die wordt vastgesteld op het punt waar vraag en aanbod elkaar precies ontmoeten. Het systeem is ontworpen om transparantie, efficiëntie en marktstabiliteit te bevorderen, en tegelijkertijd de financieringskosten van de Staat zo laag mogelijk te houden. De procedure combineert kenmerken van een open veiling en een prijsbepalingsmechanisme op basis van marktinformatie.

De potentiële use case voor DDAs zou zich niet richten op het uitvoeren van de veiling zelf, maar op het vooraf en achteraf optimaliseren en analyseren van veilingparameters en -scenario's, zoals allocatieregels, volumes en prijsvorming, met als doel het minimaliseren van financieringskosten onder verschillende marktomstandigheden.

Impact: Laag

Realiseerbaarheid: Middellange termijn – Een DDA laat zich wiskundig formuleren als een combinatorisch optimalisatieprobleem, een probleemklasse waarvoor quantumcomputers, met name quantum annealing, juist ontworpen zijn. Omdat de omvang en structuur van DDA-optimalisatie relatief compact en goed af te bakenen zijn, sluiten ze aan op de mogelijkheden van de huidige generatie hybride quantum-klassieke systemen. Het spel-theoretische aspect zorgt er echter voor dat de formulering niet direct vertaald kan worden naar een QUBO, waardoor er nog iets meer (algoritmische) ontwikkeling nodig is dan bij andere optimalisatieproblemen.

Trendanalyse & prognoses

Relevant voor: DBV

Omschrijving: Het ministerie en bijbehorende uitvoeringsorganisaties beheren grote hoeveelheden historische financiële data, zoals kasstromen, uitgavenpatronen en investeringscycli. Deze data vormt de basis voor risico-inschattingen, budgetplanning en beleidsbeslissingen.

Het analyseren van trends en het opstellen van prognoses is echter tijdrovend, omdat:

- datasets zeer groot zijn (tienduizenden tot miljoenen records) en multidimensionaal (verschillende soorten uitgaven, afdelingen, tijdsperioden);
- klassieke analysemethoden vaak lineair door de data gaan, waardoor verwerkingstijden snel oplopen;
- het voorspellen van toekomstige kasstromen complexe afhankelijkheden kent, bijvoorbeeld voor vervangingsinvesteringen of beleidsaanpassingen.

Concrete toepassingen:

- Prognoses van kasstromen voor investerings- of vervangingsprojecten;
- Risico-inschattingen bij budgetplanning, inclusief effecten van beleidsmaatregelen op verschillende afdelingen;
- Identificatie van trends in uitgavenpatronen, zodat vroegtijdig bijsturing mogelijk is;

Impact: Medium

Realiseerbaarheid: Korte termijn – Quantum Machine Learning ontwikkelt zich snel als een veelbelovend toepassingsgebied, vooral bij het modelleren van complexe en chaotische tijdreeksen. Waar klassieke modellen moeite hebben met het vastleggen van langetermijncorrelaties en niet-lineaire dynamiek, bieden quantumtechnieken nieuwe mogelijkheden om patronen en trends nauwkeuriger te voorspellen. Dit maakt ze relevant voor economische en financiële prognoses op korte termijn.

Personeelsplanning

Relevant voor: CDMO

Omschrijving: Het plannen van personeel en middelen is een terugkerende uitdaging binnen organisaties, zeker in tijden van grote uitstroom vanwege vergrijzing en taakstelling waaraan de overheid moet voldoen. Het gaat om het efficiënt toewijzen van mensen en resources aan taken en projecten, rekening houdend met beschikbaarheid, contractuele afspraken en operationele prioriteiten. Een goed opgesteld tijdschema is daarbij essentieel om werkzaamheden op elkaar af te stemmen, verstoringen te beperken en de productiviteit te waarborgen.

Impact: Laag

Realiseerbaarheid: Korte termijn – Personeelsplanning is een combinatorisch optimalisatieprobleem, wat goed aansluit bij de mogelijkheden van quantum annealers en waar vandaag de dag al mee geëxperimenteerd kan worden.

Generatieve AI versnellen

Relevant voor: CD VTI & DGRB

Omschrijving: Overheidsorganisaties beschikken over grote hoeveelheden tekstuele data, verspreid over verschillende systemen, afdelingen en historische archieven. Denk aan beleidsdocumenten, rapporten, memo's, contractstukken, antwoorden op Kamervragen en open datasets. Voor Generatieve AI-toepassingen – zoals het automatisch beantwoorden van Kamervragen, het samenvatten van rapporten of het duiden van trends in beleidsdossiers – is het essentieel dat deze informatie efficiënt wordt ontsloten, gestructureerd en gelabeld.

Het classificeren, labelen en semantisch ordenen van grote documentenverzamelingen is echter een rekenintensief proces. Zeker wanneer documenten variëren in taal, terminologie, kwaliteit en context, en wanneer relaties tussen documenten ontdekt moeten worden (bijvoorbeeld: welke rapporten gaan over hetzelfde thema, of welke beleidsmaatregel wordt op meerdere plekken verschillend beschreven?).

Impact: Hoog

Realiseerbaarheid: Lange termijn – Quantum Natural Language Processing biedt interessante perspectieven voor het versnellen van generatieve AI, bijvoorbeeld via quantum embeddings voor efficiëntere semantische representaties. Het veld bevindt zich echter nog in een experimentele fase, met demonstraties op kleine datasets en beperkte hardwarecapaciteit. Praktische toepassing vereist aanzienlijke vooruitgang in zowel hardware als quantumalgoritmen.

Software genereren

Relevant voor: CD VTI

Omschrijving: Binnen de overheid groeit de behoefte om software sneller, veiliger en robuuster te ontwikkelen. Generatieve AI kan hierbij ondersteunen door code te genereren, testscripts te schrijven of bestaande applicaties te moderniseren. In de praktijk stuit men echter op knelpunten zoals grote codebases, afhankelijkheden tussen systemen, beveiligingsvereisten en legacy-architecturen die lastig te doorgronden zijn.

Het analyseren van complexe softwarelandschappen en het automatisch genereren van veilige, consistente code bevat veel combinatorische zoekproblemen: welke modules horen samen, welke API's moeten worden aangesproken, welke architectuur is het meest efficiënt, en hoe borg je dat refactoring geen fouten introduceert? Dit zijn optimalisatie- en structuurproblemen die met klassieke rekenkracht tijdrovend en foutgevoelig zijn.

Impact: Medium

Realiseerbaarheid: Lange termijn – Technieken zoals Quantum Machine Learning en Quantum Natural Language Processing bieden theoretisch mogelijkheden om bovenstaande problemen versneld op te lossen. Het veld bevindt zich echter nog in een experimentele fase, met beperkte hardwarecapaciteit en algoritmen die niet schaalbaar zijn voor grote codebases. Praktische toepassing vereist aanzienlijke vooruitgang in zowel hardware als quantumalgoritmen.

Simulatie

Relevant voor: CD VTI

Omschrijving: Veel vraagstukken binnen de overheid draaien om het begrijpen en voorspellen van gedrag binnen complexe systemen: economische netwerken, marktinteracties, klimaateffecten, mobiliteitsstromen, of het gedrag van groepen burgers. Deze systemen bestaan uit vele actoren die onderling op elkaar reageren, waarbij kleine veranderingen grote en vaak niet-lineaire effecten kunnen veroorzaken. Traditionele simulatiemodellen vereenvoudigen deze complexiteit noodgedwongen, waardoor belangrijke dynamieken onzichtbaar blijven.

Impact: Medium

Realiseerbaarheid: Middellange termijn – Quantum simulatie is een van de kernsterktes van quantum computing en wordt dan ook gezien als een van de meest directe toepassingen. Er worden al hybride quantum-classical simulaties voor onder meer risicomodellering en prijssimulaties toegepast, maar de praktische inzetbaarheid blijft afhankelijk van de capaciteit, fouttolerantie en schaalbaarheid van huidige quantumhardware.

Scenario-analyse

Relevant voor: DGRB

Omschrijving: Bij beleidsvorming is het essentieel om te kunnen doorrekenen wat verschillende maatregelen betekenen voor burgers, huishoudens en sectoren. Denk aan fiscale hervormingen, toeslagregelingen, subsidieprogramma's of aanpassingen in inkomensbeleid. Deze analyses zijn complex omdat de effecten sterk verschillen tussen typen huishoudens, inkomensgroepen en leefsituaties – en omdat indirecte gedragseffecten vaak een grote rol spelen.

In de praktijk worden dergelijke berekeningen uitgevoerd op datasets met geclusterde representatieve huishoudtypes. Een voorbeeld: het doorrekenen van fiscale maatregelen voor 70.000 representatieve huishoudens (afgeleid uit een populatie van 11 miljoen), om het verwachte inkomenseffect voor verschillende groepen te bepalen.

Het probleem: zodra we méér beleidsvarianten, méér variabelen of langere termijn effecten willen doorrekenen, stijgt de rekendruk exponentieel. Dit maakt iteratief beleid verkennen tijdrovend, en beperkt de politieke ruimte om alternatieven goed te vergelijken voordat beslissingen genomen worden.

Impact: Hoog

Realiseerbaarheid: Lange termijn – Quantum simulatie biedt theoretisch voordelen voor het modelleren van complexe scenario's, via bijvoorbeeld quantumvarianten van Monte Carlo methoden. Het toepassen van deze quantumalgoritmen voor grootschalige scenario-analyses vereist echter nog aanzienlijke verbeteringen in de capaciteit van quantumhardware en foutcorrectie.

Voorspellen menselijk gedrag

Relevant voor: DGRB

Omschrijving: In veel financieel-economische modellen is menselijk gedrag een bepalende factor. Beleidsmaatregelen werken niet alleen via rekenkundige effecten, maar vooral via gedragsreacties van burgers, bedrijven en instellingen. Bijvoorbeeld: hoe reageert de arbeidsmarkt op een verandering in belastingdruk? Hoe beïnvloeden toeslagaanpassingen consumptiepatronen? Of hoe verandert spaargedrag in reactie op onzekerheid?

Het voorspellen van gedrag is complex omdat:

1. responsen niet lineair zijn,
2. verschillende groepen verschillend reageren,
3. context en vertrouwen een grote rol spelen,
4. vaak slechts beperkte of versnipperde data beschikbaar is.

Klassieke econometrische modellen zijn hiervoor waardevol, maar missen soms het vermogen om subtiele patronen in gedrag te herkennen.

Impact: Laag

Realiseerbaarheid: Middellange termijn – Probabilistische quantumalgoritmen bieden potentieel om onzekerheid expliciet mee te nemen en beter te generaliseren bij beperkte datasets dan klassieke methoden. Dit maakt ze interessant voor situaties waarin structurele onzekerheid groot is, maar praktische inzetbaarheid blijft voorlopig afhankelijk van verdere ontwikkelingen van de hardware en algoritmen.

Grootschalige data-analyse

Relevant voor: DGRB

Omschrijving: Overheidsorganisaties verzamelen en beheren steeds grotere hoeveelheden data, afkomstig uit beleidsmonitoring, administratieve processen, ketensystemen, open data en maatschappelijke databronnen. Het analyseren van deze data om trends, risico's, correlaties en patronen te ontdekken, wordt steeds belangrijker voor effectief beleid en uitvoering. Echter, zodra datasets groot, dynamisch en onderling verweven worden, lopen klassieke analysemethoden tegen grenzen aan. Het vinden van betekenisvolle verbanden in miljoenen tot miljarden datapunten vraagt om enorme rekenkracht en efficiënte optimalisatie-algoritmen. Bovendien zijn veel beleidsrelevante inzichten niet lineair zichtbaar maar liggen verborgen in complexe netwerkstructuren (bijvoorbeeld in de zorg, arbeidsmarkt, belastingketens of fraudepatronen).

Impact: Medium

Realiseerbaarheid: Lange termijn – Hoewel er verschillende quantumalgoritmen bestaan om data-analyse uit te voeren, zijn huidige quantumcomputers niet in staat om met grote hoeveelheden data om te gaan. Het efficiënt opschalen van deze methoden vereist aanzienlijke vooruitgang in de capaciteit van quantumhardware en foutcorrectie, waardoor praktische toepassingen nog op zich laten wachten.

ICT, Strategy & Policy

www.tno.nl