

Een verkenning van toekomstige technologische ontwikkelingen en hun verwachte impact op Gezond en Veilig werken

# Technologieradar Gezond en Veilig Werken

Deelstudie Toekomstverkenningen G&VW 2025





Een verkenning van toekomstige technologische ontwikkelingen en hun verwachte impact op Gezond en Veilig werken

# Technologieradar Gezond en Veilig Werken

Deelstudie Toekomstverkenningen G&VW 2025

## Colofon

© TNO / RIVM, 2025

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: TNO/ Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), Een verkenning van toekomstige technologische ontwikkelingen en hun verwachte impact op Gezond en Veilig werken 2025.

TNO / RIVM-rapport 2024 - 0170  
DOI 10.21945/RIVM-2024-0170

Het RIVM en TNO hecht veel waarde aan toegankelijkheid van zijn producten. Op dit moment is het echter nog niet mogelijk om dit document volledig toegankelijk aan te bieden. Als een onderdeel niet toegankelijk is, wordt dit vermeld. Zie ook [www.rivm.nl/toegankelijkheid](http://www.rivm.nl/toegankelijkheid).

### Rapportage Technologieradar, deelstudie Toekomstverkenning G&VW 2025

#### Deelteam TNO en RIVM:

Wouter van der Torre  
Wouter ter Burg  
Frank Krause  
Evi van Moll  
Sandra Mathijssen  
Chrisje Couwenbergh

**TNO** innovation  
for life



Rijksinstituut voor Volksgezondheid  
en Milieu  
Ministerie van Volksgezondheid,  
Welzijn en Sport

# Publiekssamenvatting

## Technologieradar Gezond en Veilig Werken

Technologische ontwikkelingen gaan snel en hebben veel invloed op de samenleving. Zo ook op gezond en veilig werken. Het ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid (SZW) wil vroeg in beeld krijgen hoe bestaande en nieuwe technologieën zich in de toekomst ontwikkelen en wat ze voor werkkenden betekenen. Het RIVM en TNO hebben dat op een rij gezet in deze technologieradar Gezond en Veilig Werken.

Experts verwachten dat technologische ontwikkelingen veel impact gaan hebben op gezond en veilig werken. Ze verwachten positieve en negatieve effecten. Hoe dat uitpakt, is nog onzeker. De grootste voordelen van nieuwe technologieën zijn dat ze werk gezonder en veiliger kunnen maken. Bijvoorbeeld door zwaar of gevaarlijk werk door robots te laten doen. Ook kunnen ze helpen om ongelukken te voorkomen door bijvoorbeeld veiligheid in te bouwen in machines. Verder kan technologie ervoor zorgen dat de werknemers zelfstandiger kunnen werken.

Maar er zijn ook zorgen. Die zijn er met name op gericht dat nieuwe technologieën werknemers mentaal meer belasten en voor stress zorgen. Stress kan ontstaan doordat de ontwikkelingen heel snel gaan en veel taken erdoor veranderen. Sommige werkkenden zullen moeite hebben om deze snelle veranderingen bij te houden. Daarnaast kan er meer controle van technologie uitgaan, waardoor werkkenden zich minder vrij kunnen voelen. Wat precies de gevolgen zijn, hangt voor een groot deel af van de manier waarop technologieën worden ingezet.

Voor de radar zijn eerst de belangrijkste technologische ontwikkelingen in vijf clusters samengebracht: Digitalisering, Artificiële Intelligentie (AI), Robotica, Nieuwe Materialen, en Extended Reality en de Metaverse (technieken om situaties en objecten na te bootsten in de virtuele wereld). Daarna is beschreven welke impact de technologieën hebben op de mentale belasting (denk aan stress), fysieke belasting (denk aan zwaar werk), veiligheid en blootstelling aan stoffen.

De technologieradar is onderdeel van de Toekomstverkenning Gezond & Veilig Werken, en is betaald door SZW. TNO en het RIVM stellen voor dit overzicht regelmatig aan te vullen met nieuwe inzichten om grip te houden op de snelle ontwikkelingen. Dan zijn kansen en bedreigingen goed in te schatten.

Kernwoorden: toekomstverkenning, technologie, AI, mentale belasting, PSA, veiligheid, gezondheid, blootstelling stoffen, fysieke belasting, werken, arbeid



# Abstract

## Occupational Safety and Health Technology Radar

Technological developments are following one another in rapid succession and are having a big impact on society, including on occupational health and safety. The Ministry of Social Affairs and Employment would like to get an early picture of how existing and new technologies will develop in the future and what this means for employees. With this Occupational Safety and Health (OSH) Technology Radar, the National Institute for Public Health and the Environment (RIVM) and the Netherlands Organisation for Applied Scientific Research (TNO) have created an overview of the developments.

Experts predict that technological developments will have a considerable impact on occupational safety and health, with both positive and negative consequences. It is still unclear how this will turn out. The greatest advantages of new technologies are that they can make work both safer and healthier, for example by having robots take care of heavy or dangerous work. They can also help prevent accidents, for example by incorporating safety into machines. Moreover, technology can enable employees to work more autonomously.

On the other hand, there are concerns as well, mainly with regard to new technologies resulting in an increased mental workload and stress for employees. Stress can result from developments following each other very rapidly, causing many changes in work. Some employees will have difficulty keeping up with these rapid changes. Additionally, technology can lead to increased monitoring and control, leaving employees potentially feeling less free. The impact will to a large extent depend on the way technologies are deployed.

The creators of the Technology Radar first classified the most important technological developments into five clusters: Digitalisation, Artificial Intelligence (AI), Robotics, New Materials, and Extended Reality and the Metaverse (technologies to recreate situations and objects in the virtual world). They then described the impact of the technologies on employees' mental workload (e.g. stress), physical workload (e.g. physically demanding work), safety and exposure to substances.

The Technology Radar is part of the Occupational Health & Safety Foresight Study and is financed by the Ministry of Social Affairs and Employment. TNO and RIVM recommend that this overview be updated regularly with new insights to keep a grip on the rapid developments. This will allow threats and opportunities to be estimated more accurately.

Keywords: foresight study, technology, AI, mental workload, psychosocial workload, safety, health, exposure to substances, physical workload, work, labour





# Samenvatting

## Aanleiding

Technologische ontwikkelingen gaan snel en hebben naar verwachting grote impact op gezond en veilig werken (G&VW). Tegelijkertijd is de precieze impact erg onzeker. Het in een vroeg stadium signaleren van de impact van nieuwe en opkomende technologieën is van groot belang om tijdig te kunnen inspelen op kansen en risico's op het gebied van G&VW. Deze Technologieradar G&VW richt zich dan ook op toekomstige ontwikkelingen van nieuwe en opkomende technologieën, waaronder we ook bestaande technologieën met nieuwe toepassingen verstaan. Het doel van de technologieradar is om deze nieuwe technologische ontwikkelingen in kaart te brengen en een globale inschatting te maken van de impact op gezond en veilig werken. De technologieradar G&VW is onderdeel van de bredere Toekomstverkenning G&VW, die mogelijk wordt gemaakt door een financiële bijdrage van het ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid (SZW). De inzichten uit de technologieradar zijn bedoeld ter ondersteuning van beleidsprocessen, zoals de (uitwerking van de) Arbovisie 2040 en (verdiepende) onderzoeksprojecten van onder meer TNO en het RIVM.

## Methoden

In drie fases is toegewerkt naar de technologieradar. Eerst hebben het RIVM en TNO een selectie gemaakt van methoden voor technologieverkenning en impactbepaling op basis van literatuur en expertraadpleging. In de tweede fase hebben we een overzicht gemaakt van bestaande en nieuwe technologieën die relevant zijn voor G&VW. De technologische ontwikkelingen voor de korte en langere termijn (> 5 jaar) zijn beschreven op basis van bestaande literatuur en het raadplegen van technologie-experts. In de derde fase is de impact van de technologieën op G&VW ingeschat. We hebben de impact op G&VW ingeschat op basis van literatuur, eigen inschattingen van het projectteam en experts op het gebied van G&VW. Gezien de beperkte omvang van de radar is geen systematische literatuurstudie uitgevoerd. Ten slotte zijn de uitkomsten van het gehele proces voorgelegd aan de betrokken technologie-experts, experts op het gebied van G&VW en twee klankborden.

## Technologische ontwikkelingen en impact op G&VW

We hebben vijf technologieclusters gevormd van belangrijke technologische ontwikkelingen. Die clusters zijn: Digitalisering, Artificiële Intelligentie (AI), Robotica, Nieuwe Materialen, en Extended Reality en de Metaverse. De impact is beschreven voor de verschillende deelgebieden van arbeidsomstandigheden: mentale belasting, fysieke belasting, veiligheid en blootstelling aan stoffen.

Per cluster zijn er de volgende kansen en risico's te verwachten:

- Het cluster digitalisering omvat het digitaal maken van voorheen analoge processen, maar ook toepassingen als sensoren, netwerktechnologie, (digitale) monitoring van werkprocessen en 'the internet of things' (koppelen van machines aan internet). Digitalisering biedt kansen om de veiligheid te bevorderen en fysieke belasting en blootstelling aan stoffen te verminderen door het gebruik van sensoren en monitoringssystemen. Advanced connectivity (netwerktechnologie) stelt de werkende in staat zelfstandiger te werken. De keerzijde is dat werkenden meer gemonitord en gecontroleerd kunnen worden, wat ten koste gaat van de autonomie en privacy en zo negatieve gevolgen heeft voor de mentale belasting.
- Artificiële intelligentie (AI) omvat het vermogen van machines om cognitieve (intelligente) taken uit te voeren, met een bepaalde mate van zelfstandigheid. AI verandert de manier waarop we werken. Het biedt veel kansen om de arbeidsproductiviteit en daarmee de welvaart te vergroten. De snelle ontwikkelingen in AI vereisen een groot aanpassings- en leervermogen van werkenden en kan zo zorgen voor (baan)onzekerheid. Ook kan routinematig of administratief werk geautomatiseerd worden. Dit kan echter tegelijkertijd leiden tot intensivering van werk, omdat de taken die meer aandacht vragen overblijven en natuurlijke 'rustmomentjes' (zoals cognitief eenvoudige taken) verdwijnen. AI kan de autonomie van werkenden vergroten door functionele ondersteuning te bieden of feedback te geven. Maar AI kan deze ook beperken door het gedetailleerd voorschrijven en controleren van taken (bijvoorbeeld in het kader van algoritmisch management). Ook kan AI weliswaar functionele ondersteuning bieden, maar geen sociale ondersteuning, wat een risico is op plekken waar AI mensenwerk automatiseert. Op het gebied van veiligheid kan AI een positieve bijdrage leveren door machines veiliger te maken (denk aan

safe-by-design) of met behulp van beeldherkenning risicovolle situaties tijdig te signaleren of zelfs voorspellen.

- Op het gebied van robotica richten we ons op robots met een fysiek gedaante. Deze robots onderscheiden zich van ‘gewone’ machines, doordat ze voor verschillende taken zijn in te zetten. De integratie van geavanceerde technologieën, zoals AI en beeldherkenning, maakt robots steeds capabeler. Hierdoor zijn ze in staat om zware en potentieel gevaarlijke taken over te nemen. Dit vermindert de fysieke belasting voor werkenden en de blootstelling aan gevaarlijke stoffen en dat draagt bij aan een veiligere werkomgeving. Hoewel we minder fysieke belasting en onveilige situatie verwachten, blijven er wel risico’s bestaan. Meer robots kunnen ook zorgen voor meer storingen en risico’s, bijvoorbeeld tijdens het vervangen van oude systemen.
- Bij nieuwe materialen kijken we naar nieuwe materialen, zoals nanomaterialen, en nieuwe productiemethoden, zoals 3D-printing. Nieuwe materialen kunnen veel positieve en ook negatieve effecten hebben op blootstelling aan stoffen. Ze dragen ook positief bij aan reductie van fysieke belasting door het maken van sterkere, lichtere en/of flexibelere apparaten. Persoonlijke beschermingsmiddelen worden ook verbeterd met nieuwe materialen. Maar er zijn ook zorgen over de gezondheidsrisico’s bij het verwerken of bewerken van nieuwe materialen. Het safe-and-sustainable-by-design (SSbD) -concept is een kans om aan de voorkant ervoor te zorgen dat je met nieuwe materialen gezonder en veiliger kunt werken.
- Extended reality (XR) is een verzamelnaam voor onder meer virtual en augmented reality. Virtual en augmented reality zijn respectievelijk virtuele (digitaal gecreëerde) omgevingen en de combinatie van fysieke omgevingen met virtuele elementen. De metaverse is een aansluitend geheel van virtuele omgevingen. De opkomst van de metaverse en de extended reality biedt nieuwe mogelijkheden voor het vergroten van veiligheid en het verminderen van fysieke belasting. Werkenden kunnen door realistische simulaties virtueel trainingen en instructies volgen. Het biedt daarnaast ook voordelen, zoals flexibiliteit over het (remote) indelen van werk. Het brengt echter ook uitdagingen met zich mee, zoals mentale belasting door een verstoorde werk-privébalans, intensivering van werk, privacy-kwesties en het risico op isolatie (verminderd sociaal contact). Bovendien kan het gebruik van XR-apparatuur leiden tot fysieke klachten, zoals VR-ziekte en bijziendheid.

## Conclusies en aanbevelingen

Een aantal technologieën, zoals sensing en monitoring, AI, robots, 3D-printing en extended reality, is al op korte termijn (komende vijf jaar) breed toepasbaar op de werkvloer. Andere technologieën worden naar verwachting pas later breed geïntroduceerd (>5 jaar), zoals quantumcomputing (computer hardware met veel meer rekenkracht) en brain-computer interfaces (verbindingen van hersenen met externe apparatuur). Resultaten laten verder zien dat de technologische ontwikkelingen naar verwachting de komende vijf jaar een grote impact gaan hebben op gezond en veilig werken. Enerzijds bieden ze kansen voor veilige en gezonde werkomgevingen door gevaarlijk en zwaar werk te automatiseren en risico’s vroegtijdig te signaleren. Dit kan leiden tot veiliger werk, een afname in fysieke belasting en minder blootstelling aan gevaarlijke stoffen. Anderzijds kunnen deze technologische ontwikkelingen leiden tot verhoogde mentale belasting door intensivering van werk, minder autonomie en (baan-)onzekerheid. De impact van de technologieën is afhankelijk van de specifieke technologische toepassing, van de maatschappelijke acceptatie en adoptie door bedrijven van een bepaalde technologie, (nieuwe) regelgeving (AI-act), en de wijze van implementatie in werkprocessen.

Op basis van ons onderzoek doen we de volgende aanbevelingen:

- Deze radar is een eerste inventarisatie van een breed palet aan technologieën waarvan we een globale inschatting van de toekomstige (korte termijn) impact maken. Gezien de snelheid van de ontwikkelingen, is het van belang deze radar niet eenmalig, maar periodiek uit te voeren.
- We adviseren beleidsmakers, sociale partners, toezichhouders, sectororganisaties en onderzoeksinstellingen om naar aanleiding van deze globale inschattingen verdiepende impact assessments uit te voeren op specifieke technologische toepassingen (zoals specifieke AI-toepassingen).
- Ook adviseren we beleidsmakers, sociale partners, toezichhouders, sectororganisaties en onderzoeksinstellingen, om de mogelijkheden te verkennen om de ontwikkeling van technologie actief te stimuleren, die beogen de kwaliteit van werk te verbeteren (veiliger, minder fysiek belastend, et cetera). Bij technologische toepassingen die niet primair het verbeteren van de kwaliteit van werk tot doel hebben, is het van belang vroegtijdig in te schatten wat de mogelijke impact op gezond en veilig werken is, om deze toepassingen eventueel anders te ontwerpen, of te implementeren, of om aanvullende maatregelen te kunnen nemen. Dit laatst is van belang op (inter)nationaal, sectoraal en organisatieniveau.

Tot slot willen we benadrukken dat het van groot belang blijft om de potentiële kansen en uitdagingen van technologische ontwikkelingen goed in kaart te brengen, te begrijpen en de ontwikkelingen in de tijd te blijven volgen, aangezien ze de gezondheid en veiligheid op het werk sterk kunnen beïnvloeden. De manier waarop, en de randvoorwaarden waarbinnen, de technologieën geïntroduceerd worden op het werk, zijn cruciaal om kansen te benutten en risico's te beperken.



# Inhoud

<b>Publiekssamenvatting</b>	<b>5</b>
<b>Abstract</b>	<b>7</b>
<b>Samenvatting</b>	<b>9</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>15</b>
<b>2 Methode</b>	<b>17</b>
<b>3 Digitalisering</b>	<b>21</b>
3.1 Beschrijving	21
3.2 Soorten digitale technologieën en hun toepassingen	21
3.3 Toekomstverwachting	22
3.4 Impact op gezond en veilig werken	23
<b>4 Artificiële intelligentie (AI)</b>	<b>27</b>
4.1 Beschrijving	27
4.2 Soorten AI	27
4.3 Toekomstverwachting	29
4.4 Impact op gezond en veilig werken	31
<b>5 Robots, cobots, autonome voertuigen en drones</b>	<b>35</b>
5.1 Beschrijving	35
5.2 Soorten robots	35
5.3 Toekomstverwachting	36
5.4 Impact op gezond en veilig werken	39
<b>6 Nieuwe materialen</b>	<b>43</b>
6.1 Beschrijving	43
6.2 Soorten nieuwe materialen	43
6.3 Toekomstverwachting	44
6.4 Impact op gezond en veilig werken	45
<b>7 Extended reality en de metaverse</b>	<b>49</b>
7.1 Beschrijving	49
7.2 Soorten extended reality en metaverses	49
7.3 Toekomstverwachting	50
7.4 Impact op gezond en veilig werken	51

<b>8</b>	<b>Samenvattende conclusies en aanbevelingen</b>	<b>55</b>
8.1	Digitalisering	55
8.2	Artificiële intelligentie (AI)	55
8.3	Robots, cobots, autonome voertuigen en drones	56
8.4	Nieuwe materialen	56
8.5	Extended reality en de metaverse	56
8.6	Samenvattend	56
8.7	Aanbevelingen	57
<b>9</b>	<b>Referenties</b>	<b>61</b>
	<b>Bijlage 1: Overzicht met geraadpleegde experts</b>	<b>65</b>

# 1 Inleiding

Technologische ontwikkelingen gaan snel, hebben naar verwachting een grote toekomstige impact op gezond en veilig werken (G&VW). Tegelijkertijd is deze impact erg onzeker (TNO & RIVM, 2023). Het in een vroeg stadium signaleren van risico's én kansen van nieuwe en opkomende technologieën (waaronder ook nieuwe materialen en chemische stoffen) is van groot belang om tijdig hierop te kunnen anticiperen.

Op basis van analyses van toekomstverkenningen en signaleringsprojecten uit andere domeinen, zoals medische technologieën en logistiek, is voor de vorm van een 'technologieradar' gekozen om de vroegsignalering vorm te geven.

De Technologieradar G&VW heeft als doel:

- In kaart brengen van de belangrijkste ontwikkelingen (voor de komende 5 à 10 jaar) van technologieën die van invloed zijn op G&VW;
- Van deze belangrijkste technologieën de impact op G&VW op hoofdlijnen beschrijven;
- Belanghebbenden te informeren en daarmee in staat stellen te anticiperen op verandering van risico's door technologische ontwikkelingen

De Technologieradar G&VW is ontwikkeld in samenwerking met het ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid (SZW). In het klankbord heeft, naast het ministerie van SZW, ook de NLA (Nederlands Arbeidsinspectie) meegewerkt. De technologieradar is onder andere bedoeld ter ondersteuning van beleidsprocessen, zoals de (uitwerking van de) Arbovisie van SZW, en voor verdiepende onderzoeksprojecten rondom specifieke technologieën. Ook andere stakeholders kunnen gebruikmaken van de resultaten, zoals de NLA (arbeidsinspectie), werkgeversorganisaties, vakbonden, branche- en sectororganisaties, kennisinstellingen en individuele werkgevers.

Dit is de eerste versie van de Technologieradar G&VW. Deze Technologieradar biedt een globaal beeld van technologieën die relevant zijn voor G&VW en schetst de mogelijke impact op G&VW op hoofdlijnen. De vijf clusters van technologieën in dit rapport zijn: Digitalisering, Artificiële Intelligentie (AI), Robotica, Nieuwe Materialen, en Extended Reality en de Metaverse. Hun verwachte impact op G&VW is beschreven aan de hand van de deelgebieden van arbeidsomstandigheden, waarvan bekend is dat die de grootste impact hebben op beroepsziekten en ongevallen: mentale (cognitieve en psychosociale) belasting, fysieke belasting, veiligheid en blootstelling aan stoffen. Het betreffen brede deelgebieden van arbeidsomstandigheden waaronder meerdere elementen kunnen vallen, zoals autonomie en privacy elementen zijn bij mentale belasting. Voor het deelgebied blootstelling is specifieker gekeken naar blootstelling aan stoffen, terwijl ook bijvoorbeeld fysieke blootstelling (geluid en trillingen) of blootstelling aan biologische agentia een rol kunnen spelen. Waar nodig, is dat in dit rapport wel benoemd. In het huidige rapport is echter gekozen voor een focus op blootstelling aan stoffen vanwege de link met beroepsziekten door gevaarlijke stoffen.

De resultaten geven invulling aan het hierboven geschetste doel. De opgedane ervaring met het ontwikkelen van de Technologieradar, het uitvoerende werk om de Technologieradar van inhoud te voorzien, evenals het gebruik ervan door beleid wordt in een later stadium geëvalueerd. Op basis van de resultaten van de eerste versie wordt besloten over de noodzaak en benodigde frequentie van *updates* van de technologieradar of specifieke clusters. Dit kan leiden tot een verfijning van de aanpak en de wijze van rapporteren.

Na deze inleiding beschrijven we de gehanteerde methode. Daarna volgen de hoofdstukken die gewijd zijn aan de verschillende technologieën en hun impact. We sluiten af met een samenvatting, conclusies en aanbevelingen.





## 2 Methode

De Technologieradar G&VW richt zich op toekomstige ontwikkelingen van nieuwe en opkomende technologieën, waaronder we ook bestaande technologieën met nieuwe toepassingen verstaan. De tijdshorizon van de Technologieradar is vijf tot tien jaar. Technologische ontwikkelingen gaan op dit moment snel en zijn onzeker (RIVM & TNO, 2023), waardoor verder kijken dan tien jaar weinig meerwaarde heeft. Daarnaast lijkt vijf tot tien jaar (voor technologie al lange termijn), voordat een technologie grootschalig wordt ingezet over het algemeen voldoende om verdiepende analyses en beleidsaanpassingen te realiseren.

De Technologieradar G&VW is tot stand gekomen in drie fases: een methodeselectie, een inventarisatie van relevante technologische ontwikkelingen en een inschatting van de impact hiervan op gezond en veilig werken. Hieronder staat een toelichting van de drie fases.

### Fase 1: Selectie van methode voor technologieverkenning en impactbepaling

Verschillende instanties brengen technologische ontwikkelingen in kaart. In de eerste fase is gekeken welke bronnen het meest geschikt zijn om te gebruiken voor een technologische toekomstverkenning. De verschillende beschikbare bronnen zijn beoordeeld langs de volgende criteria:

- brede scope, niet specifiek één technologie of sector;
- de methode waarmee de technologische ontwikkelingen zijn onderzocht, is expliciet beschreven;
- de inzichten en uitkomsten zijn onderbouwd met bronnen;
- het meest recente technologieoverzicht is niet meer dan vijf jaar oud;
- er mag geen commercieel belang zijn van de auteurs bij de uitkomsten;
- uitkomsten van bronnen die technologische ontwikkelingen beschrijven, moeten (al dan niet tegen betaling) openbaar beschikbaar zijn.

Ook vond een oriëntatie plaats op methoden om de mogelijke impact op G&VW van technologische ontwikkelingen te bepalen. Daartoe is gekeken naar vergelijkbaar onderzoek door verschillende Europese instanties op het gebied van arbeidsomstandigheden. EU-OSHA laat foresight studies uitvoeren door Europese onderzoekers<sup>1</sup>. De Health and Safety Executive (HSE) in Engeland maakt gebruik van toekomstverkenningen van het Government Office voor Science (GO Science)<sup>2</sup> en de Duitse DGUV heeft een Risikoobservatorium<sup>3</sup>. Om beter inzicht te krijgen in de methoden die zij bij hun toekomstverkenning hebben gebruikt, zijn (documenten op) de websites bestudeerd en zijn gesprekken gevoerd met betrokkenen bij EU-OSHA en HSE. Daaruit is gebleken dat voor het vaststellen van mogelijke risico's van nieuwe of toekomstige technologieën expertsinterviews en Delphi-onderzoek het meest worden gebruikt. In het huidige onderzoek is ervoor gekozen om veel met expertraadpleging te werken.

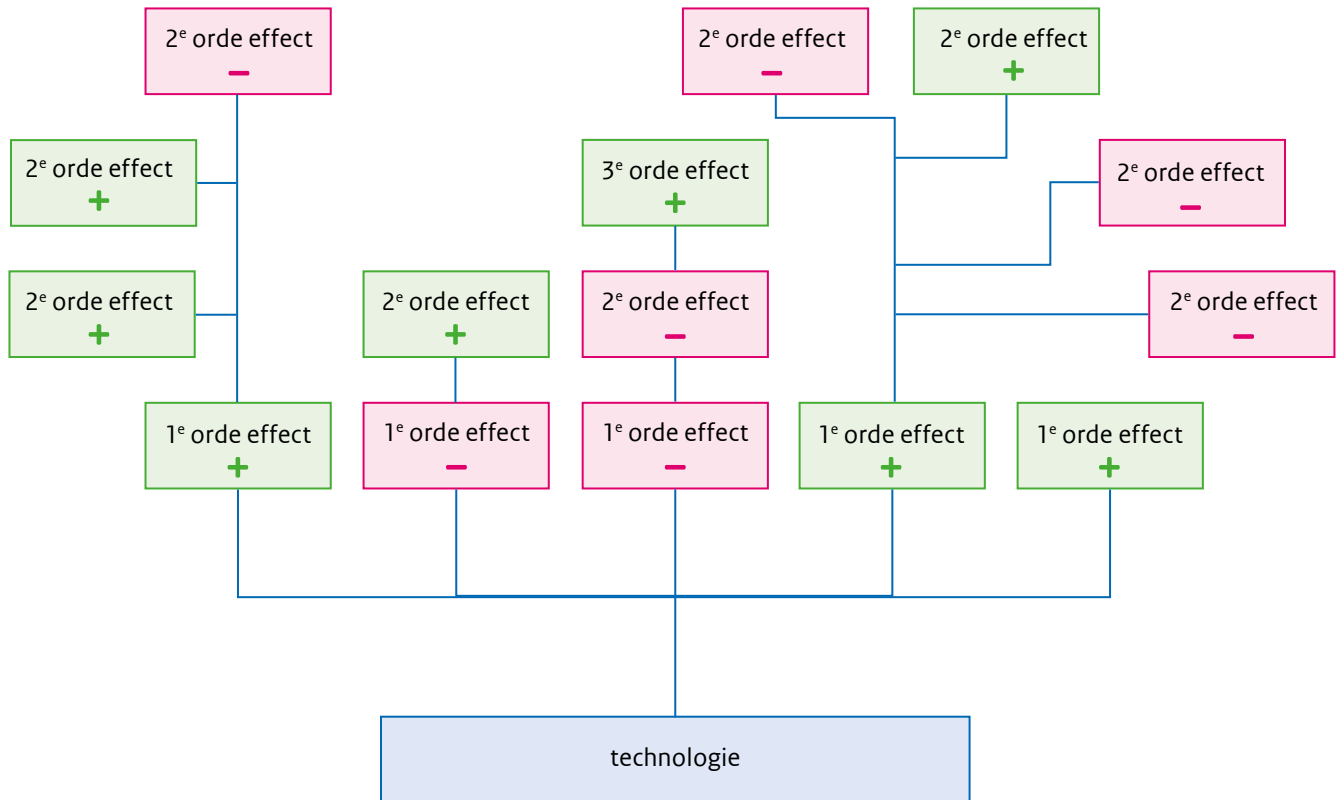
Aanvullend is gekeken naar een techniek die bij innovaties en bij scenariostudies wordt toegepast om mogelijke effecten te bepalen, de impactboom. Dit is een creatief proces, waarbij deelnemers aan een werksessie zoveel mogelijk effecten inschatten van een beslissing of ontwikkeling. Vervolgens bepaalt men van een of meer van deze effecten een mogelijke tweede en derde orde effect: het effect van een effect (van een effect) (zie Figuur 1). Deze techniek is voor de Technologieradar gebruikt (zie Fase 3).

<sup>1</sup> zie bijvoorbeeld: [Foresight Study on the Circular Economy and its effects on Occupational Safety and Health | Safety and health at work EU-OSHA \(europa.eu\)](#)

<sup>2</sup> zie: [Futures, Foresight and Emerging Technologies - GOV.UK \(www.gov.uk\)](#)

<sup>3</sup> zie: [IFA: DGUV Risikoobservatorium](#)

**Figuur 1** Principe van een impactboom, zoals gebruikt voor deze Technologieradar.



**Fase 2: In kaart brengen van relevante technologische ontwikkelingen**

Met de selectiecriteria voor bestaande technologie-rapporten is een aantal bronnen geselecteerd. Dit waren rapportages van de Future Today Institute (FTI), de sleuteltechnologieën die TNO periodiek in kaart brengt (Van Bree et al., 2024), het EU-rapport ‘100 Radical Innovation Breakthroughs for the future’ en rapporten van het World Economic Forum (WEF). Vervolgens zijn aanvullende zoekopdrachten uitgevoerd ter verdieping van relevante technologieën die naar voren zijn gekomen. Hierbij zijn overzichten van instituten als MIT, maar ook van consultancybureaus waaronder Gartner en McKinsey, als aanvullende bron gebruikt. De bronnen van consultancybureaus voldeden niet aan de selectiecriteria en zijn daarom slechts ter ondersteuning gebruikt. De focus van de inventarisatie van relevante technologische ontwikkelingen lag niet op de ontwikkeling van fundamentele technologieën, maar op de toepassing daarvan in de werkomgeving en waarbij een impact op de kwaliteit van arbeid wordt verwacht (dit is in Fase 3 uitgediept). Hierbij is ook meegenomen op welke termijn

de technologische ontwikkelingen naar een breder publiek gebracht kunnen worden. In sommige gevallen is dat lastig in te schatten, omdat een doorbraak het tijdspad opeens kan versnellen. Om die reden is ervoor gekozen om onderscheid te maken in de korte termijn (tot vijf jaar) en lange termijn (meer dan vijf jaar).

Dit is gedaan door de projectgroep waarvan de leden zelf een brede expertise hebben ten aanzien van de kwaliteit van arbeid. Criteria voor het inschatten van de impact waren: het aantal sectoren waar de technologie kan worden toegepast, een eerste verwachting van de omvang van de impact op het werk en de snelheid van de ontwikkeling en implementatie van een toepassing. De ontwikkelingen zijn gegroepeerd volgens clusters die eerder zijn gemaakt in de Horizonscan (TNO & RIVM, 2023), met uitzondering van het cluster Autonome voertuigen, dat in dit rapport is opgenomen bij robotica.

De uiteindelijke lijst van relevante technologieën, inclusief tijdshorizon, is besproken met twee brede technologie-experts en een AI-expert van TNO. Het overzicht met geraadpleegde experts staat in Bijlage 1.

### **Fase 3: Impact op gezond en veilig werken inschatten**

In de laatste stap is een inschatting gemaakt van de impact van de geselecteerde technologieën op de kwaliteit van arbeid van werkenden. Allereerst is bestaande grijze en wetenschappelijke literatuur bestudeerd. Bij de grijze literatuur gaat het bijvoorbeeld om toekomstverkenningen van EU-OSHA, HSE en DGUV. De wetenschappelijke literatuur loopt altijd enigszins achter op technologische ontwikkelingen. Mede daarom, maar ook gezien het beperkte budget, de brede scope (veel verschillende technologieën), en de wens om een eerste globale inschatting van de impact te maken, is gekozen om geen systematische literatuurstudie uit te voeren. Er is vooral gebruikgemaakt van expertraadpleging. In vier werksessies binnen het projectteam is een eerste inschatting gemaakt van de mogelijke impact van een technologie voor gezond en veilig werken. Bij deze werksessies is gebruikgemaakt van de bovenbeschreven impactboom methode (zie Figuur 1). Daarna zijn in een serie interviews wetenschappers per thema bevraagd op de impact van nieuwe technologieën op de specifieke thema's:

1. mentale belasting;
2. fysieke belasting;
3. veiligheid (ongevallen en incidenten);
4. blootstelling aan stoffen.

Per thema zijn twee wetenschappers (een van TNO en een van RIVM) van buiten het projectteam bevraagd. Ook zijn er vier interviews met externe experts gehouden. Met deze interviews is verdieping aangebracht op de inzichten uit de literatuur (voor zover beschikbaar) en de uitkomsten van de werksessies van het projectteam. De informatie vanuit de literatuur, het projectteam en de experts is schriftelijk aan de geraadpleegde experts voorgelegd ter controle en aanvulling. De feedback is verwerkt in de definitieve rapportage.



# 3 Digitalisering

## 3.1 Beschrijving

Digitalisering is het omzetten van analoge informatie naar een digitale vorm, waardoor er nieuwe mogelijkheden ontstaan om waarnemingen of informatie digitaal op te slaan, te delen en te verwerken (Van Bree, 2024). Digitalisering wordt gezien als een 'general purpose technology' (breed toepasbare technologie). Het komt in vrijwel alle onderdelen van het leven voor, waaronder het werk. De technologieën die in dit cluster vallen, maken de digitale transformatie mogelijk, breiden het uit naar andere werkgebieden of verbeteren de huidige mogelijkheden. Veel genoemde digitale technologieën, genoemd door bijvoorbeeld Future Today Institute (2023), Gartner (2023), Van Bree (2024) en Farinha et al., (2023), zijn: sensortechnologie, monitoringtechnologie, advanced connectivity, quantum technology en web 3.0. Een van de belangrijkste technologieën die ook onder digitalisering valt is artificiële intelligentie (AI) (Van Bree, 2024). Gezien de snelle ontwikkeling en de grote impact van AI, wordt het als apart cluster behandeld.

## 3.2 Soorten digitale technologieën en hun toepassingen

Van de bovengenoemde technologieën (sensor- en monitoringtechnologie, advanced connectivity, quantumtechnologie en web 3.0) wordt in de komende paragrafen ingegaan op wat deze technologieën inhouden, welke toekomstverwachtingen ermee verbonden zijn, en wat hun impact is op gezond en veilig werken (GVW).

### 3.2.1 Sensor- & monitoringtechnologie

Sensoren zijn apparaten die (veranderingen in) fysieke omstandigheden meten, zoals temperatuur, licht of snelheid. Er zijn veel verschillende soorten sensoren. Van belang voor gezond en veilig werken zijn bijvoorbeeld sensoren die de staat van machines, systemen en (onderdelen van) productieprocessen monitoren, sensoren die de luchtkwaliteit en blootstelling aan stoffen meten en sensoren die lichamelijke functies meten. Meetwaarden worden opgeslagen voor latere analyse of geven 'real-time' terugkoppeling (zie bijvoorbeeld Fisher et al., 2023; Pronk & Stierum, 2018).

Monitoren is het systematisch volgen van ontwikkelingen om bijvoorbeeld (de kwaliteit van) de output van werkprocessen in de gaten te houden. Wij leggen de focus voornamelijk op het monitoren van werkprocessen en werkenden op verschillende manieren: monitoren op afstand (remote monitoring) en monitoren via wearables (zie bijvoorbeeld Future Today Institute (2022) en Linturi & Kuusi (2019)). Door nieuwe technologieën zijn sensoren steeds accurater en efficiënter in het meten en monitoren. Met data van sensoren kunnen individuele blootstelling-effect relaties in kaart worden gebracht door gelijktijdige informatie real-time terug te koppelen. Dit vereist data-analyses die met AI kunnen worden uitgevoerd. Vervolgens zijn voorspellingen te maken en kan het systeem aansporen tot acties via real time dashboards om daarmee werknemers beter te beschermen (Robbins et al., 2021).

### 3.2.2 Advanced connectivity

'Advanced connectivity' betreft ontwikkelingen die een snellere, betrouwbare connectiviteit van digitale netwerken tot doel hebben. Zoals 5G dat zich verder ontwikkelt naar 6G, het gebruik van satellieten voor verbindingen en het 'internet of things' (IoT) (Future Today Institute, 2023; Van Bree, 2024). Met de komst van het 5G-netwerk wordt steeds meer geautomatiseerd en kan dataverwerking in de cloud of edge (decentraal) plaatsvinden. Dat kan gaan om monitoring, de analyse van data en het aansturen van machines. De belangrijkste eigenschappen van 5G-netwerken zijn dat ze grote datavolumes snel en met heel lage vertraging doorsturen. Dat maakt 5G uitermate geschikt voor real time-applicaties, zoals bij autonoom rijdende voertuigen en drones. Ook de technologie die gebruikmaakt van satellieten vindt zijn weg in steeds meer toepassingsgebieden. Hier zal de techniek vooral worden ingezet op verafgelegen locaties. De verbeterde connectiviteit zorgt ervoor dat afstanden eenvoudiger en energiezuiniger overbrugd worden. Ook verloopt de overdracht van gegevens sneller. Dit tezamen heeft invloed op het toepassingsgebied van IoT. Via de 'industrial internet of things (IIoT)' worden in de industrie grote hoeveelheden data ('big data') verzameld en gebruikt om inzicht te krijgen in prestaties, afwijkingen in het proces, aansturing van autonome voertuigen en de staat van machines. Hierbij wordt gebruikgemaakt van real-time dashboards.

### 3.2.3 Web 3.0

Web 3.0 verwijst naar de fase van het internet, waarin de inhoud niet alleen door mensen wordt gemaakt en gebruikt, maar ook door machines. Het wordt vaak geassocieerd met een gedecentraliseerd systeem, waar gebruikers meer autonomie (eigenaarschap) hebben over hun gegevens en interacties. De Web 3.0-technologie is sterk opkomend en behelst onder andere blockchaintechnologie en toepassingen zoals NFT's (non-fungible tokens) en digital ID's. Naast valuta kunnen ook kennis en digitale objecten verhandeld worden via Web 3.0. Blockchaintechnologie biedt de mogelijkheid om slimmer en decentraal om te gaan met transacties en dataopslag. De blockchain is een geavanceerd register dat het mogelijk maakt om, zonder tussenkomst van een derde partij (zoals een bank of notaris), een betrouwbare transactie te laten plaatsvinden tussen partijen. Dat komt mede omdat eigenaarschap en transacties op heel veel plekken decentraal en versleuteld zijn vastgelegd. Wat denkbaar in het arbeidsdomein is dat er per werknemer algemeen geaccepteerde skills-paspoorten (met gevalideerde skills) worden gemaakt, die een werknemer kan gebruiken bij sollicitaties of werknemer screenings voor geschiktheid. Denk bijvoorbeeld aan DigiD-toepassingen voor de arbeidshistorie. Concrete invullingen van Web 3.0 op gezond en veilig werken lijken echter indirect en beperkt. Daarom wordt Web 3.0 niet verder behandeld bij de inschatting van impact op gezond en veilig werken.

### 3.2.4 Quantum technologie

Quantum technologie gaat over de toepassing van quantummechanica in de hardware van elektronica die bij digitalisering worden gebruikt. Quantummechanica maakt gebruik van het gedrag van deeltjes op subatomaire schaal. Die deeltjes hebben bijzondere eigenschappen, die bij quantumtechnologie worden gebruikt voor technologische vernieuwingen. Quantumtechnologie zorgt voor een extreme toename in rekenkracht van computers. Daardoor kunnen berekeningen worden gedaan die met de huidige technologie niet mogelijk zijn, is een hogere gevoeligheid van sensoren mogelijk (quantum sensing) en is datacommunicatie op grote afstand mogelijk (TNO, 2024). Quantumcomputers kunnen een sprong voorwaarts betekenen op het gebied van rekenkracht en mogelijkheden om complexe problemen op te lossen. Maar omdat quantumcomputers nog in ontwikkeling en nog niet breed inzetbaar zijn, zijn high-performance computers (HPC's) voorlopig nog de beste beschikbare technologie om grote datavolumes en ingewikkelde berekeningen aan te kunnen (Joao et al., 2023).

Quantumtechnologie is een sleuteltechnologie die op termijn nieuwe producten en diensten mogelijk maakt. De potentie van quantumcomputers, -simulators, -netwerken en -sensoren is veelbelovend voor de samenleving, industrie en wetenschap (TNO, 2024). Quantsensoren, een combinatie van sensor- en quantumtechnologie, kunnen in de toekomst toepassingen hebben in verschillende vakgebieden. In de auto-industrie zouden versnellingsmeters kunnen worden gebruikt om de nauwkeurigheid van navigatie van autonome voertuigen te verbeteren. In het biomedische domein zouden magnetometers de magnetische resonantiebeeldvorming (MRI) en positronemissietomografie (PET)-scanners kunnen verbeteren (Joao et al., 2023) (Future Today Institute, 2023). De impact van quantumtechnologie op gezond en veilig werken gaat zich naar verwachting vooral uiten via AI-toepassingen en sensor- en monitoringtechnologieën.

## 3.3 Toekomstverwachting

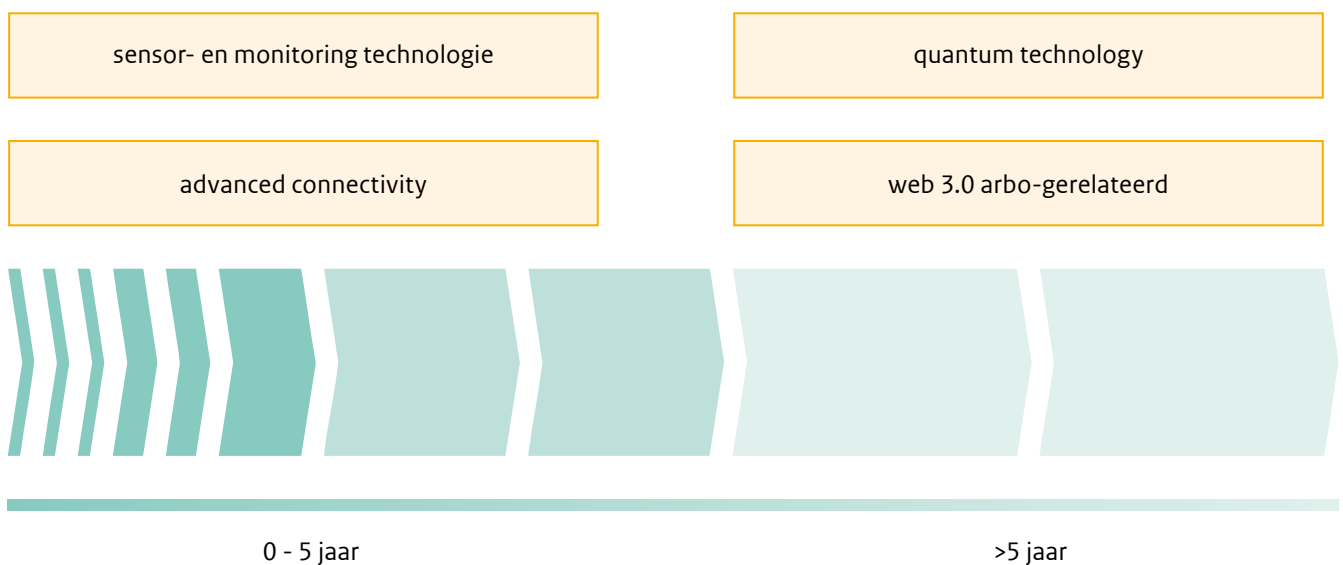
Er is steeds meer mogelijk op het gebied van digitalisering met name door de combinatie van technologieën zoals sensor- en monitoringtechnologie, advanced connectivity, quantumtechnologie, cloudcomputing en AI. Deze technologieën zullen steeds meer worden toegepast in de werkomgeving (IEC, 2020; SER, 2020). De doorontwikkeling van sensor- en monitoringstechnologie en advanced connectivity is continu gaande. De markt voor 5G-privatenetwerken begint momenteel op te komen. Voorbeelden hiervan zijn te zien in verschillende sectoren, zoals productie, logistiek en nutsbedrijven. De ontwikkelingen richten zich op de korte termijn vooral op het verbeteren, versnellen, stabiliseren en uitbreiden van netwerken. Quantumtechnologie wordt naar verwachting pas op de lange termijn (> 10 jaar) grootschalig toegepast (Karstens et al., 2023) (en interview TNO-expert<sup>4</sup>). De adoptie van quantumtechnologieën kan echter worden belemmerd door een tekort aan quantumexperts die apparaten en oplossingen kunnen bouwen met behulp van quantumtechnologieën (Mc Kinsey, 2023). Web 3.0-toepassingen zijn beschikbaar en zullen op korte termijn vaker worden toegepast. Maar veel algemene Web 3.0-toepassingen hebben naar verwachting beperkte (indirecte) impact op gezond en veilig werken. Specifieke Web 3.0-toepassingen die zich richten op gezond en veilig werken worden niet grootschalig op korte termijn verwacht.

<sup>4</sup> Een overzicht van geraadpleegde experts staat in Bijlage 1.

Bij veel van de genoemde digitale toepassingen is volgens experts wet- en regelgeving van grote invloed op het gebruik. Vooral het beschermen van de privacy van werkenden speelt een grote rol. Er is een neiging tot verschuiving van verantwoordelijkheden van de werkgever naar de werknemer door toepassingen van sensoren. Een expert benadrukte dat sensortoepassingen gericht

moeten zijn op de bron van de risico's en niet op het bemeten van (het handelen van) de werknemer. Hierin ligt een spanningsveld, omdat productiviteitsdata nodig zijn een efficiënte bedrijfsvoering, terwijl met monitoring ook gegevens kunnen worden vastgelegd die een inbreuk zijn op de privacy van de werker, zoals vastgelegd in de AVG (Marassi en Bolte, 2024).

**Figuur 2** Inschatting van de tijdshorizon van brede toepassing van digitalisering



## 3.4 Impact op gezond en veilig werken

### 3.4.1 Algemeen

De omschreven technologieën komen voor in alle sectoren en in veel beroepsgroepen, en hebben daardoor over het geheel gezien een grote impact op de manier hoe we werkprocessen organiseren en uitvoeren. Voor de beschrijving van impact op gezond en veilig werken wordt met name gekeken naar de gevolgen van sensor- en monitoringtechnologie, in combinatie met de advanced connectivity.

### 3.4.2 Mentale (cognitieve en psychosociale) belasting

Het continu monitoren van werkprocessen en de werkenden is van invloed op de mentale belasting van werkenden (Das et al., 2024). Door digitalisering kunnen veel werkprocessen en het gedrag van werkenden gemonitord worden. Sensor- en monitoringtechnologie zorgt niet alleen voor betere procesbeheersing, maar ook voor standaardisatie, nauwkeurigere taakomschrijvingen

en strakkere planning. Dat kan leiden tot intensievere werkzaamheden en verminderde autonomie (Piasna, 2024). Een afname in autonomie of regelmogelijkheden vergroot het risico op stress. Daarnaast kan monitoring stress opleveren, doordat men constant bewust wordt gemaakt van de eigen prestaties, soms zelfs in vergelijking tot die van collega's. Monitoring kan de werknemer ook empoweren. Een werknemer heeft met de data inzicht in diens werktempo en over diens belasting en kan daarmee de werkgever aanspreken. Door de inzet van monitoringdata kan de arbeidsrelatie tussen werkgever en werknemer veranderen. Experts verwachten dat er per taak en sector verschillen zullen zijn in de mate van aantasting van autonomie. Naast prestatie-indicatoren (output) kan geprobeerd worden indicatoren van psychosociale arbeidsbelasting (PSA) te monitoren. Hiermee kan de werkgever de werknemer beter beschermen en werkstress verminderen of voorkomen. Op dit moment is het echter nog moeilijk om PSA betrouwbaar en valide te meten.

### 3.4.3 Fysieke belasting

In de interviews met experts op het gebied van fysieke veiligheid kwam naar voren dat sensoren kunnen worden gebruikt om fysieke belastbaarheid en fysieke belasting van werknenden beter op elkaar af te stemmen. Volgens geïnterviewde experts zou sensortechnologie ook kunnen helpen bij het verminderen van fysieke belasting via gedragsverandering. Bijvoorbeeld doordat de werkhouding wordt gemonitord met sensoren. Daarnaast kunnen sensoren en monitoring ervoor zorgen dat werkprocessen op afstand aangestuurd worden. Dit voorkomt onnodige verplaatsingen of transportbewegingen en reduceert daarmee de fysieke belasting. Het risico op fysieke onderbelasting wordt vergroot doordat er steeds meer taken op afstand, zittend achter een bureau, kunnen worden uitgevoerd.

### 3.4.4 Veiligheid en blootstelling aan stoffen

De impact van monitoring en sensoren op veiligheid en blootstelling aan stoffen is in grote mate vergelijkbaar. Het is vooral de toepassing van het specifieke monitoringssysteem of sensor die bepaalt of het de veiligheid of blootstelling beïnvloedt. Om die reden zijn deze twee impactgebieden samengenomen.

Het monitoren met sensoren op de werkvloer kan helpen om problemen in het productieproces die de veiligheid of gezondheid van werknenden bedreigen vroegtijdig te signaleren en op te lossen (SER, 2020; Pronk & Stierum, 2018). Denk hierbij aan toepassingen als het real-time meten van blootstelling aan stoffen, alarmering tijdens incidenten, en valbescherming rondom draaiende machines. Sensoren in persoonlijke beschermingsmiddelen kunnen worden ingezet om onveilig of ongezond gedrag te detecteren. Sensoren in 'slimme helmen' detecteren bijvoorbeeld in de chemische industrie gevaarlijke gassen in de omgeving van de werknenden, en kunnen vervolgens de werkende waarschuwen wanneer concentraties worden gemeten, die schadelijk zijn voor de gezondheid<sup>5</sup>. Fysiologische sensoren in draagbare apparaten kunnen biomarkers (hartslag, hartslagvariaties, bloeddruk) meten, die een indicatie kunnen geven voor bijvoorbeeld stress, vermoeidheid en andere gezondheidssignalen, om vervolgens gezond en veilig gedrag te stimuleren. De voordelen lijken daarmee voornamelijk te zitten in het verbeteren van de arbeidsomstandigheden tijdens reguliere werkzaamheden, maar ook als mensen fouten maken of wanneer systemen falen. Het RIVM en TNO (Krom et al.

2018; Pronk & Stierum, 2018) benoemen voordelen in monitoring op het gebied van gezond en veilig werken, zoals het continu kunnen meten en het direct kunnen uitlezen van gegevens, zodat direct kan worden ingegrepen bij een gevaarlijke situatie of om werknenden te trainen om veiliger te werken (gedragsverandering). De geïnterviewde experts beamen dat dit een van de belangrijkste voordelen is van het gebruik van sensoren. Daarnaast kan het meten in sommige situaties aanleiding zijn om over te gaan tot bronpreventie.

Een nadeel van het gebruik van sensoren is dat het tot schijnveiligheid kan leiden als werknenden of werkgevers zien dat meetresultaten beneden de norm blijven en de grenzen gaan opzoeken als ze geen signaal voor gevaar afgeven. Een overvloed van sensoren en bijbehorende feedback (signalen) kunnen leiden tot afgeleide werknenden, waardoor er mogelijk onveilige situaties kunnen ontstaan. Het RIVM (Krom et al., 2018) benoemde verder als nadelen bij sensoren voor blootstelling aan stoffen dat ze nog niet altijd wetenschappelijk robuust en betrouwbaar zijn voor het gebruik in de chemiesector, dat er deskundigheid nodig is om ze te gebruiken en uit te lezen en dat ze ingrijpend kunnen zijn voor werknenden. Op dit moment zijn sensoren nog niet geschikt om aan te tonen dat de blootstelling beneden de grenswaarde blijft, waardoor er alsnog traditionele metingen moeten worden verricht. De SER adviseert dat per specifieke situatie moet worden overwogen of sensoren voldoende ontwikkeld zijn en een toegevoegde waarde hebben (SER, 2020). Daarbij is er ook een uitdaging weggelegd voor het beleid om aan te geven welke meetonzekerheden bij sensoren geaccepteerd kunnen worden bij het aantonen van een blootstelling aan een stof ten opzichte van een grenswaarde.

Een laatste aspect van impact van digitalisering is de cyber security. Door de toenemende connectiviteit van alle technische systemen op de werkvloer, neemt het risico dat deze systemen gehackt worden toe en daarmee het risico dat systemen anders dan normaal of zelfs niet meer functioneren. Al in 2021 meldde de website Werk en Veiligheid dat bij veel BRZO-bedrijven de Cybersecurity ondermaats is<sup>6</sup>. Ook de veiligheid van privégegevens komt door toenemende digitalisering onder druk wanneer hackers (delen van) databases met persoonsgebonden informatie ontsluiten.




<sup>5</sup> [www.tno.nl/nl/newsroom/insights/2021/01/slimme-sensoren-veilige-gezonde/](http://www.tno.nl/nl/newsroom/insights/2021/01/slimme-sensoren-veilige-gezonde/)

<sup>6</sup> [Cybersecurity ondermaats bij veel BRZO-bedrijven | Werk & Veiligheid - Kennisplatform over preventie, RI&E en sociale veiligheid \(werkenveiligheid.nl\)](https://www.werk-en-veiligheid.nl/kennisplatform-over-preventie-ri&e-en-sociale-veiligheid/werkenveiligheid.nl/); BRZO = Besluit risico's zware ongevallen.



Tabel 1 toont een overzicht van de verschillende kansen en uitdagingen op de deelgebieden van gezond en veilig werken.

**Tabel 1** Kansen en uitdagingen van digitalisering op de deelgebieden van gezond en veilig werken

Digitalisering	 Subcluster	 Kansen	 Uitdagingen
<b>Mentale belasting</b>	Sensor- en monitoringstechnologie & advanced connectivity	Herkenning werkstress door objectieve signalen. Inzage van eigen prestaties.	De autonomie van een werkende wordt beperkt wanneer er continu toezicht is. Ook privacy komt in het geding.
<b>Fysieke belasting</b>	Sensor- en monitoringstechnologie & advanced connectivity	Beperking fysieke belasting. Belasting en belastbaarheid beter op elkaar laten aansluiten	Fysieke onderbelasting door op afstand te werken. Verschuiving naar zittend werk.
<b>Veiligheid en blootstelling aan stoffen</b>	Sensor- en monitoringstechnologie & advanced connectivity	Vroegtijdig signaleren, in kaart brengen en waarschuwen voor risico's. Gedragsverandering door real-time feedback van eigen handelen.	Opzoeken van grenzen, wat leidt tot schijnveiligheid. Cybersecurity



# 4 Artificiële intelligentie (AI)

## 4.1 Beschrijving

Artificiële intelligentie (AI) is een containerbegrip dat momenteel hoog op de maatschappelijke agenda staat. De afgelopen decennia en recentelijk heeft AI een snelle ontwikkeling doorgemaakt, door onder meer de toegenomen rekenkracht van computers en de toegenomen hoeveelheid beschikbare data. Er is geen eenduidig geaccepteerde definitie van AI. AI wordt vaak omschreven als 'het vermogen van een machine om cognitieve taken uit te voeren, net zo goed of beter dan mensen' (Future Today Institute, 2022). De WRR definieert AI als: 'systemen die intelligent gedrag vertonen door hun omgeving te analyseren en – met enige graad van autonomie – actie te ondernemen om specifieke doelen te bereiken' (Balje, 2021). De Nederlandse AI coalitie omschrijft het als: 'intelligente systemen die zelfstandig taken kunnen uitvoeren in complexe omgevingen en eigen prestaties kunnen verbeteren door te leren van ervaringen' (Van Belkom, 2019).

AI bevat softwaresystemen die op basis van input - in meer of mindere mate - zelfstandig een besluit nemen, waarna een actie in gang wordt gezet om tot een specifiek doel te komen. Een eenvoudig voorbeeld is een schoonmaakrobot die de vloer waarneemt (input), vaststelt of deze vies is of niet (besluit) en vervolgens overgaat tot schoonmaken of niet (actie) (Canedo et al., 2021). AI is een breed toepasbare technologie, die in vele toepassingen kan worden verwerkt (Balje, 2021; Van Bree et al., 2024). Als AI wordt gecombineerd met andere technologieën, zoals sensoren (hoofdstuk 3), robots (hoofdstuk 5) en de metaverse (hoofdstuk 7) zijn veel toepassingen mogelijk. AI kan verschillende cognitieve functies uitvoeren, zoals observeren, patronen herkennen, redeneren, conclusies trekken (deductie) en prognoses maken. Het wordt in verschillende sectoren ingezet, bijvoorbeeld om fraude te detecteren, producten aan te bevelen, de vraag naar producten en diensten te voorspellen, diagnoses te stellen en voertuigen zelfstandig te laten rijden (Future Today Institute, 2022).

## 4.2 Soorten AI

Binnen AI worden de volgende subclusters nader uitgewerkt: machine learning, generatieve AI en brain-computer-interfaces. De volgende paragrafen gaan in op wat deze technologieën inhouden, welke toekomstverwachtingen ermee verbonden zijn, en wat hun impact is op gezond en veilig werken (GVW).

### 4.2.1 Machine learning

Een belangrijke ontwikkeling die een nieuwe impuls heeft gegeven aan AI is *machine learning*. Hierbij kunnen computers taken aanleren en beter worden in de uitvoering ervan door zelflerende algoritmen vanuit data. Daardoor hoeven benodigde acties niet vooraf expliciet door een mens geprogrammeerd te worden (Balje, 2021). De meeste toepassingen zijn op dit moment voorbeelden van 'artificial narrow intelligence' (ANI) of 'weak AI'. Weak AI verwijst naar het type AI dat is ontworpen om één specifieke taak uit te voeren. Deze AI kan door interactie en het verwerken van nieuwe informatie leren om die specifieke taak steeds beter uit te voeren. Het omvat vaardigheden zoals het observeren van gegevens, het herkennen van patronen, het trekken van conclusies en het maken van voorspellingen. Tegenover ANI staat AGI (Artificial General Intelligence) of 'strong' AI. AGI is in theorie in staat om verschillende taken uit te voeren en te leren van meerdere soorten input, waardoor het niveau van menselijke intelligentie wordt benaderd. Deze vorm staat momenteel nog in de kinderschoenen. Machine learning heeft de afgelopen jaren aanzienlijke vooruitgang geboekt. Het heeft geleid tot doorbraken in onder andere beeldherkenning en natuurlijke taalverwerking.

Er zijn algemene toepassingen van AI die van invloed zijn in verschillende sectoren. Zo is algoritmisch management een bekende manier om taken van managers te automatiseren (Das et al., 2024; Van Gulijk et al., 2023). Daarbij kan het gaan om het aansturen, beoordelen, controleren en ondersteunen van medewerkers. Een bekend voorbeeld zijn platformbedrijven waar taxichauffeurs en klanten worden gekoppeld op basis van algoritmes. Maar algoritmisch management wordt ook in meer traditionele organisaties ingezet, zoals bij callcenters. In call centers kunnen de gesprekken bijvoorbeeld automatisch worden verwerkt tot tekst en geanalyseerd op onder meer taalgebruik (Das et al., 2024).

Daarnaast zijn er vele sectorspecifieke toepassingen waarvan we enkele voorbeelden geven:

- In het openbaar bestuur wordt machine learning ingezet voor detectie en analyse van verdachte activiteiten. Met intelligente camera's en geluidsdetectie wordt afwijkend gedrag herkend. Door AI is het ook mogelijk dat het systeem zelf meldingen beoordeelt en zelfs notificaties/suggesties geeft voor interventies (SBB, 2023).
- In de zorg worden verpleegkundigen en verzorgenden vaak geconfronteerd met grote hoeveelheden cliëntgegevens en medische informatie. AI helpt bij het analyseren van deze gegevens en het genereren van suggesties. Dit kan variëren van het voorspellen van mogelijke complicaties bij patiënten tot het suggereren van gepersonaliseerde behandelplannen op basis van de medische geschiedenis en actuele toestand.
- AI kan ook snel beelden, zoals CT-scans, analyseren en veel efficiënter dan mensen ziektesymptomen opsporen. Wetenschappers in Australië hebben deze AI-toepassing bijvoorbeeld gebruikt voor de vroege detectie van prostaatkanker (Kok, 2021).
- In de logistiek kan AI door het automatisch vaststellen van patronen bij activiteiten, zoals goederenontvangst, orderpicking en retours, ondersteunend zijn om de voorraad en capaciteitsbehoeften beter te voorspellen. Ook wordt beeldherkenning bij automatisch orderpicking in magazijnen steeds meer toegepast om de kwaliteit van producten te controleren (Van Roosmalen, 2022).

## 4.2.2 Generatieve AI

Een nieuwe vorm van machine learning is Generatieve AI (GenAI) dat zich momenteel heel snel ontwikkelt en om die reden apart wordt behandeld. GenAI verwijst naar AI-systemen die geautomatiseerd content kunnen maken, op verzoek van een gebruiker. Met een eenvoudige opdracht in gewone taal, een 'prompt', kunnen gebruikers tekst, beeld, geluid of een computercode genereren (Kool et al., 2023; Van Bree et al., 2024). GenAI opent een breed scala aan mogelijkheden die ook veel veranderingen in de werkomgeving teweeg kunnen brengen, zoals het maken van gespreksverslagen, samenvattingen, muziekcompositie, beeldsynthese maar ook het ontdekken en ontwerpen van nieuwe moleculen en materialen.

De bekendste voorbeelden van GenAI zijn Chatbots, die tekst, beelden of video's kunnen genereren. Chatbots bestaan al langer, maar de laatste generatie chatbots met nieuwe AI-technologie heeft voor een doorbraak gezorgd. ChatGPT, het bekendste voorbeeld van GenAI, overtrof op het moment van lancering de verwachting van veel technologie-experts. Sinds de lancering van ChatGPT eind november 2022, steeg het aantal gebruikers binnen twee maanden naar ruim 100 miljoen wereldwijd (Overstegen,

2024). De nieuwste versie van het taalmodel, GPT-4o genaamd, is mei 2024 gelanceerd. Waar gebruikers met de eerste versie alleen konden chatten (geschreven tekst), combineert de jongste versie audio, video en tekst (Bronzwaer, 2024a). Naast ChatGPT zijn er andere chatbots met GenAI. Google heeft een eigen chatbot Bard ontwikkeld, Microsoft heeft Copilot en Googles taalmodel Gemini wordt in Android-telefoons geïntegreerd. Andere voorbeelden zijn bedoeld om beelden te genereren, zoals DALL-E, Stable Diffusion en Midjourney (Future Today Institute, 2023).

Naast het genereren van beelden zijn er ook GenAI-toepassingen ontwikkeld om als gebruiker zelf video's te maken. De eerdergenoemde Chatbots kunnen ook meer specifiek toegepast worden op beroepsgroepen: zo kan Microsoft Copilot bijvoorbeeld cybersecurityprofessionals in hun werk ondersteunen, door vragen te beantwoorden en te helpen snel op incidenten te reageren. Een GenAI-systeem kan gevraagd worden om een cybersecuritystelsel te evalueren: waar zitten de zwakke plekken waarvan kwaadwillenden kunnen profiteren? (Kool et al., 2023).

Voor meer specifieke ondersteuning op bepaalde vakgebieden is Retrieval Augmented Generation (RAG) van belang. Een RAG is in staat om de sterke punten van grote taalmodellen (zoals GPT) te combineren met de mogelijkheid om specifieke bronnen te doorzoeken en daaruit relevante informatie te halen. Hierdoor is een RAG-model in staat om externe databases of interne kennisbanken te doorzoeken en nauwkeurige antwoorden op een prompt te genereren met bronverwijzingen. Een monteur kan bijvoorbeeld als er technische handleidingen met een RAG direct uit deze documenten antwoorden genereren en te weten komen wat hij moet doen bij bepaalde foutmeldingen.

GenAI kan in tal van sectoren ingezet worden om processen te optimaliseren, te automatiseren en te assisteren bij taken zoals het verzamelen, samenvatten en uitwerken van (grote hoeveelheden) informatie of het schrijven van computercode. Daarmee kan GenAI onder andere zorgen voor verbeterde efficiëntie, kostenbesparing, betere besluitvorming, betere dienstverlening en tal van innovatieve oplossingen. GenAI biedt kansen, maar kan ook leiden tot nieuwe risico's zoals desinformatie en onnavolgbaarheid (ministerie van Binnenlandse Zaken, 2024).

Specifieke voorbeelden van generatieve AI in de praktijk voor enkele sectoren zijn:

- In de culturele sector wordt GenAI ter ondersteuning van creatieve processen ingezet, onder andere bij het schrijven van scripts door filmscenaristen of bij het genereren van beschrijvingen van kunstwerken (ministerie van Binnenlandse Zaken, 2024).
- GenAI kan in de zorg ingezet worden voor informatiemanagement en administratie- en schrijftaken. Het kan gesprekken en informatie documenteren, transcriberen, samenvatten, classificeren en controleren. Ook kan het gebruikt worden voor efficiënte analyse van elektronische gezondheidsdossiers en andere data-archieven (Kool et al., 2023).

### 4.2.3 Brain-computer interface

Brain-computer interfaces (BCI's) zijn elke vorm van technologie die de menselijke hersenen (neurale systemen) via speciale interfaces kan verbinden met (externe) apparatuur. Een BCI is een systeem dat met de hersenen wordt verbonden (bijvoorbeeld geïmplant) en waarmee een persoon een computer of ander elektronisch apparaat kan besturen met behulp van elektrische signalen uit de hersenen (Swan, 2016). Deze technologie wordt gebruikt voor medische doeleinden, zoals het helpen van mensen met verlamming, maar heeft ook toepassingen in gaming en neuromarketing. AI speelt een cruciale rol in het verbeteren van de functionaliteit en effectiviteit van BCI's. BCI's kunnen met behulp van AI complexere taken uitvoeren, zoals het decoderen van spraak of emoties direct uit hersenactiviteit.

De verscheidenheid aan technieken die worden gebruikt om gegevens tussen neurale en computersystemen over te dragen, kan over het algemeen worden onderverdeeld in invasieve (implantaten) en niet-invasieve (elektroden) benaderingen. Het uiteindelijke doel van BCI is om hersenen in staat te stellen te communiceren met een digitaal systeem (Grampp et al., 2022). Er zijn ook mogelijkheden voor integratie van BCI's en GenAI. Wanneer deze technologieën worden gecombineerd, kan hersenactiviteit sneller en nauwkeuriger worden omgezet in tekst. Dit biedt verbeterde communicatie voor mensen die door verlamming, bijvoorbeeld door ALS, niet kunnen spreken (Kool et al., 2023).

Er zijn nog geen voorbeelden van Brain-Computer Interfaces (BCI) uit het werkveld, omdat deze technologie zich grotendeels nog in de experimentele fase bevindt. Veel BCI-toepassingen worden nog in laboratoria getest en verder ontwikkeld, waarbij onderzoekers vooral werken aan het verbeteren van de betrouwbaarheid, veiligheid en precisie van de technologie.

De technologie is nog niet volwassen genoeg voor grootschalig gebruik in dagelijkse werkprocessen. Daarnaast zijn er ook ethische, juridische en praktische vraagstukken, die eerst geadresseerd moeten worden voordat BCI op brede schaal toegepast kan worden.

## 4.3 Toekomstverwachting

De ontwikkelingen op het gebied van *machine learning* en vooral op het gebied van GenAI gaan momenteel heel snel. Ook zijn de verwachtingen dat deze AI-ontwikkelingen de komende vijf jaar in hoog tempo blijven doorgaan. Dit geldt zowel voor de verbetering van de onderliggende technologie als de veelzijdigheid van het aantal toepassingen met AI. Specifieke AI-toepassingen worden dan ook op nog meer domeinen in het dagelijkse en werkzame leven ingezet (Balje, 2021; Dean, 2022; EU-OSHA, 2019; Future Today Institute, 2022; Van Belkom, 2019). De verwachting is dat de ontwikkeling en het gebruik van GenAI de komende twee jaar flink gaan groeien en in veel softwareprogramma's worden geïntegreerd. Slimme assistenten begeleiden gebruikers via spraak en tekst. Hiermee verandert de manier waarop mensen met informatie omgaan (Future Today Institute, 2024).

De ontwikkeling van BCI is heel onzeker. Er worden eerste klinische experimenten gedaan met BCI (Future Today Institute, 2023) en brede toepassing buiten het medische domein is voor de komende vijf jaar nog hoogst onzeker.

Het is vrij zeker dat AI veel impact gaat hebben. Tegelijkertijd blijft de specifieke impact en de snelheid daarvan onzeker. De ontwikkeling van AI-toepassingen hangt af van wet- en regelgeving, ethische aspecten en maatschappelijke adoptie. De volgende tekstbox licht de invloed van wet- en regelgeving op AI toe aan de hand van de Europese AI Act.

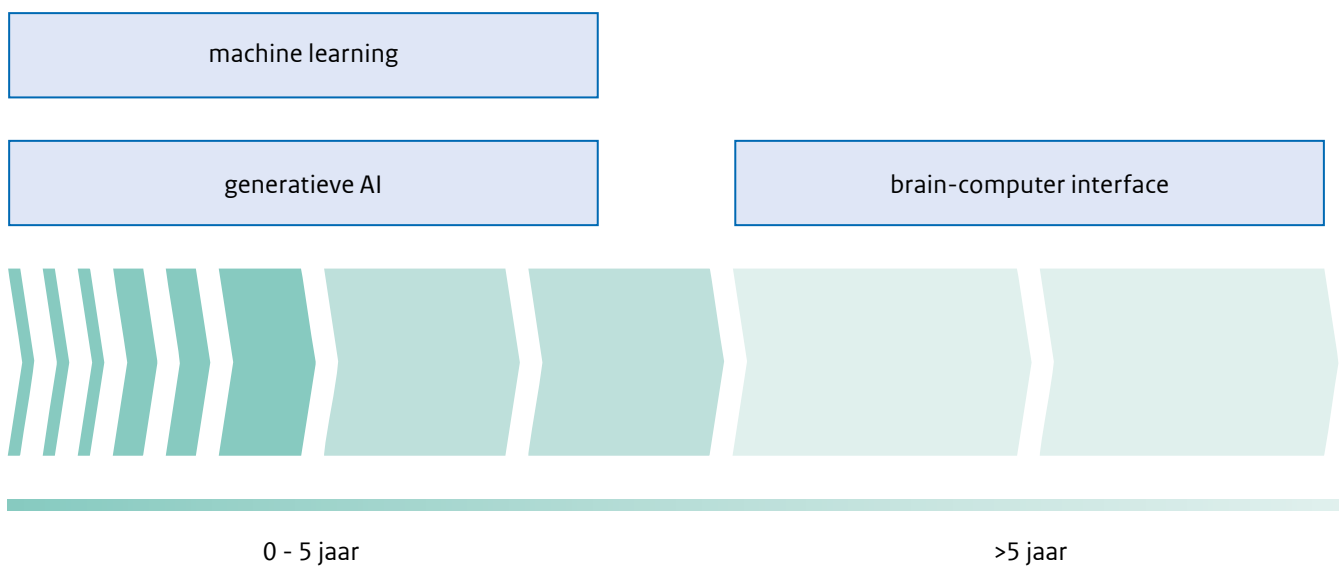
### Tekstbox 1. Wet- en regelgeving AI

Wet- en regelgeving is van grote invloed op het gebruik van artificiële intelligentie. In mei 2024 heeft de Europese Raad ingestemd met de AI Act. Dit is een belangrijke stap in de regulering van AI (Digitale Overheid, 2024). De regels worden gefaseerd ingevoerd. Een nieuw opgerichte AI Office binnen de Europese Commissie is verantwoordelijk voor handhaving en toezicht. Zij worden daarbij ondersteund door een wetenschappelijk panel van onafhankelijke experts (Rammos & Glaeser, 2024).

Het doel van deze Europese wet is zorgen voor betrouwbare en veilige AI-systemen. Om dit te bereiken, gaan eisen gelden voor AI-systemen op basis van het risico dat deze met zich meebrengen. De AI-verordening werkt met drie risicocategorieën: verboden AI-systemen, AI-systemen met een hoog risico en AI-systemen met een laag risico. Naast deze risicocategorieën zijn er ook nog basismodellen, die een aparte status innemen en niet onder één van deze drie risicocategorieën vallen. De verboden AI-systemen krijgen de hoogste prioriteit bij de implementatie van de AI-verordening. De verordening geldt direct als wet in Nederland. Een deel ervan, zoals het toezicht op verboden en hoog-risico AI-toepassingen, wordt via een Nederlandse wet verder ingericht.

De EU AI Act introduceert nieuwe verplichtingen voor aanbieders van GenAI- toepassingen, ook wel 'general purpose AI' (GPAI) -modellen genoemd. Zo worden aan alle GenAI-modellen transparantie-eisen gesteld, zodat bedrijven die met specifieke AI-applicaties voortbouwen op deze modellen toegang hebben tot onder andere de benodigde technische documentatie om aan de eisen van de AI-verordening te voldoen (ministerie van Binnenlandse Zaken, 2024). De aanbieders moeten gedetailleerde technische documentatie over de toepassing aanleveren aan de toezichhoudende autoriteit. Bovendien moeten aanbieders gebruikers in staat stellen om de mogelijkheden en beperkingen van hun GenAI toepassing te begrijpen (Rammos & Glaeser, 2024). Voor chatbots en systemen die afbeeldingen en video's genereren, staan in de AI-verordening aanvullende transparantie eisen. Aanbieders van deze systemen moeten ervoor zorgen dat het voor mensen duidelijk is dat ze met een AI interacteren of dat content door AI is gemaakt (ministerie van Binnenlandse Zaken, 2024 en Kasteleijn, 2023).

**Figuur 3** Inschatting van de tijdshorizon van brede toepassing van AI



## 4.4 Impact op gezond en veilig werken

### 4.4.1 Algemeen

Artificiële intelligentie (AI) heeft in korte tijd grote impact op vele beroepsgroepen en sectoren bewerkstelligd en de verwachting is dat die impact in de komende vijf jaar groter wordt. AI kan gebruikt worden om taken te automatiseren, wat de arbeidsproductiviteit verbetert, maar waardoor banen kunnen verdwijnen. Tegelijkertijd kunnen ook nieuwe taken en banen ontstaan (Acemoglu & Restrepo, 2020; Das et al., 2024). De inhoud van werk verandert door AI-toepassingen en het heeft ook gevolgen voor gezond en veilig werken. Daarnaast heeft AI in combinatie met andere technologieën (zoals robotica en sensors) ook een direct effect op gezond en veilig werken, onder meer door het beperken van ‘dirty, dangerous en dull’ werk (Fisher et al., 2023; Howard & Schulte, 2024). Hieronder volgt een beschrijving van de impact van machine learning en GenAI op Gezond en Veilig werken (G&VW) aan de hand van vier domeinen: Mentale (cognitieve en psychosociale) belasting, Fysieke belasting, Veiligheid en blootstelling aan stoffen.

### 4.4.2 Mentale belasting

#### Machine learning

De invloed van machine learning is naar verwachting groot op verschillende aspecten van mentale belasting. Die zorgt voor veranderingen in werkprocessen, bij veel verschillende beroepen en opleidingsniveaus. Adaptief en lerend vermogen is nodig om met deze veranderingen om te gaan. Voor mensen die over voldoende lerend en adaptief vermogen beschikken, kan machine learning voor uitdaging zorgen en ontwikkelingsmogelijkheden bieden. Werkenden die de snelle ontwikkelingen niet kunnen bijhouden, zich niet goed kunnen aanpassen en moeilijk nieuwe taken aanleren, hebben mogelijk moeite met de introductie van machine learning. Bij deze groep kan AI leiden tot een verhoogde werkdruk, een gevoel van achterlopen en een gevoel van onzekerheid. Praktisch opgeleiden vinden het moeilijker om nieuwe dingen te leren voor het werk dan theoretisch opgeleiden (Van den Heuvel et al., 2023) en vormen daarmee een risicogroep.

Tegelijkertijd is AI voor veel werkenden nog een *black box* (Balje, 2021). Deze onbekendheid kan bij werkenden leiden tot onzekerheid en stress. In het verlengde daarvan bestaat er de angst dat de mensen de controle over AI-systemen verliezen door het zelflerende karakter van de systemen en dit kan zich uiten in wantrouwen en doembeelden (Howard & Schulte, 2024). Daarnaast zal het in veel organisaties onduidelijk zijn of en welke taken worden overgenomen of

dat AI (machine learning) juist aanvullend aan menselijke taken wordt ingezet. Dit kan voor (baan)onzekerheid zorgen (Howard & Schulte, 2024).

Routinematige taken, die monotoon zijn, kunnen het eenvoudigst door AI worden overgenomen. Dus routinematige cognitieve en fysieke taken zullen verdwijnen. Dat betekent ook dat beroepen met veel routinematige taken (deels) verdwijnen. Vaak worden productieprocessen door het gebruik van AI tegelijkertijd efficiënter en sneller. Onzeker is wat er met de vrijgekomen tijd gebeurt. Aan de ene kant kan de verhoogde productiviteit leiden tot minder werkdruk. Aan de andere kant kan de verhoogde productiviteit ook juist tot hogere verwachtingen leiden voor de kwaliteit of kwantiteit van het werk en meer verantwoordelijkheid. Dit leidt tot meer werktaken en werkdruk (RIVM & TNO, 2024). Het kan zo ook resulteren in intensivering van werk. Voor taken die AI overneemt, komen doorgaans nieuwe taken terug. Deze kunnen minder routinematig zijn. Omdat routinematige taken de mogelijkheid bieden om even te herstellen van complexere taken is er minder hersteltijd, wat een belangrijke buffer is bij een hoge ervaren mentale belasting. Als hele banen met routinematige taken voor de meer praktisch opgeleiden verdwijnen en banen met complexere taken voor theoretisch opgeleiden terugkomen, wordt het werk uitdagender, maar ook cognitief meer belastend (RIVM & TNO, 2023). Overigens lijken niet alle routinematige taken te verdwijnen en ontstaan er ook nieuwe taken in werkprocessen waar AI wordt toegepast, zoals het labelen van afbeeldingen. Deze taken zijn cruciaal voor het trainen van AI-systemen. Ondanks dat deze online werkenden vaak onzichtbaar zijn, zijn ze essentieel voor het voeden van AI (Pot, 2024). Hieraan hangen ook risico's die buiten het domein van gezond en veilig werken vallen, zoals op het gebied van eerlijk werk door gebrek aan toezicht door de werkgever en op het gebied van handhaving (werkenden bevinden zich vaak elders op de wereld). Over het algemeen is de verwachting dat de routinematige taken eerder worden overgenomen en er minder overblijven, maar tegelijkertijd blijft er de komende jaren nog wel routinematig werk bestaan. AI heeft niet alleen impact op de hoeveelheid routinematige taken. Takenpakketten kunnen ook minder ‘compleet’ worden, omdat bijna alle handelingen door AI worden uitgevoerd en werkenden alleen resterende taken of een laatste controle hoeven te doen die niet te automatiseren zijn (Gmyrek et al., 2023).

AI kan de autonomie in het werk zowel vergroten als verkleinen. Zo biedt AI de kans om sneller toegang te krijgen tot meer informatie, wat de autonomie van werkenden kan vergroten. Aan de andere kant worden veel AI-systemen vaak ingezet om managementlagen

van informatie te voorzien en wordt de informatie-asymmetrie tussen management en werkenden juist groter (Noponen et al., 2023; Parent-Rocheleau & Parker, 2022). De autonomie van werkenden kan afnemen als machine learning toepassingen voor hen bepaalt wanneer en in welke volgorde een taak moet worden uitgevoerd (RIVM & TNO, 2024). Ook de gevolgen voor de autonomie van bijvoorbeeld algoritmisch management kunnen zowel positief als negatief uitpakken, afhankelijk van hoe de toepassingen worden ingezet. Zo kan algoritmisch management worden ingezet om werkenden te ondersteunen met informatie, of juist in detail aan te sturen en te controleren. Op dit moment bestaat de indruk dat veel organisaties door de inzet van algoritmisch management de autonomie van werkenden beperken (Das et al., 2024; Noponen et al., 2023; Parent-Rocheleau & Parker, 2022; Van Gulijk et al., 2023), wat een risicofactor is voor het ontwikkelen van stress en een verminderd gevoel van eigenwaarde.

Op het gebied van arbeidsverhoudingen kunnen algoritmen managementtaken objectiever en eerlijker maken. Door met standaardregels te werken, kunnen aspecten als onderbuikgevoel, discriminatie of ongewenst gedrag voorkomen worden. Aan de andere kant kunnen algoritmen ook discriminerend werken (RIVM & TNO, 2023) en ethiek is een belangrijk aandachtspunt van AI (Steen, 2022). Als er bijvoorbeeld in de data waarmee een AI-model getraind wordt menselijke voorkeur zit, dan zal het algoritme dat overnemen. Daarop moeten dan aanvullende acties ondernomen worden om dat te compenseren. Verder geldt dat bij algoritmisch management bij bijvoorbeeld bezorgers er (haast) geen contact meer is met managers. Een werknemer krijgt dan geen feedback, sociale steun of waardering van zijn leidinggevende (Van de Ven, et al., 2021). De digitale controle over werkenden, kan leiden tot stress, fysieke en mentale gezondheidsproblemen, verlies van privacy en de zogenaamde ‘dataficering’ van werkenden, waarbij hun werk wordt gereduceerd tot meetbare gegevens (Gmyrek et al., 2023). Die meetbaarheid kan leiden tot hardere normen in het algoritmisch management, terwijl dat in conflict kan staan met huidige aanpak van mentale belasting op de werkplek die zich vooral baseert op meer subjectieve gegevens. Ook maakt algoritmisch management gebruik van feedback van klanten. Dit maakt werkenden kwetsbaar enerzijds voor willekeur en pestgedrag van klanten omdat de online feedback van klanten gevolgen kan hebben voor je toekomstige opdrachten. Dit is een risico voor de baan zekerheid en inkomenszekerheid, maar het pestgedrag op zich is ook een risico voor (mentale) gezondheid en het gevoel van eigenwaarde.

### **Generatieve AI**

De verwachting is dat GenAI-toepassingen kunnen leiden tot een substantiële verhoging van de productiviteit en efficiëntie. GenAI-toepassingen zijn in veel sectoren in te zetten: van de zorg tot het openbaar bestuur, van de industrie tot de financiële sector. Het vereist nieuwe competenties en een andere invulling van werkzaamheden. Omdat GenAI nog relatief nieuw en nog steeds in ontwikkeling is, is het ook moeilijk om in te schatten wat de exacte gevolgen zijn.

In tegenstelling tot eerdere disruptieve technologieën, kan GenAI een grote impact hebben op relatief theoretische functies. Uit een studie van de International Labour Organisation (ILO) komt naar voren dat de hoogste mate van automatisering terecht zal komen bij kantoorbanen en kenniswerkers (Chui et al., 2023). Een deel van de taken die bij deze functies horen, loopt risico om geautomatiseerd te worden. ILO concludeert dat het in de meeste gevallen zal gaan om een gedeelte van het takenpakket dat geautomatiseerd gaat worden, waardoor de technologie werkenden waarschijnlijk vooral gaat ondersteunen, in plaats van in zijn geheel vervangen (Gmyrek et al., 2023).

De autonomie van werkenden kan ook door GenAI zowel vergroot als verkleind worden. GenAI kan worden ingezet om grote hoeveelheden tekst te vertalen, complexe teksten uit te leggen, de belangrijkste onderwerpen te duiden en conclusies te verbinden. Er zijn tekenen dat GenAI-toepassingen werkenden met minder kennis en ervaring helpt om bij te blijven bij werkenden met meer kennis en ervaring. Dit vergroot het gevoel van professionele autonomie en competentie. Ook betere toegang tot informatie over gezond en veilig werken kan werkenden ondersteunen en de veiligheid en gezondheid op het werk in brede zin verbeteren. Door de genoemde factoren kan de kwaliteit van werk toenemen. Het omgekeerde kan ook gebeuren. Zo is er ook een, naar verwachting kleiner, risico dat takenpakketten minder uitdagend worden doordat GenAI complexe taken overneemt (ministerie van Binnenlandse Zaken, 2024). Zo kunnen werkenden monitortaken krijgen om bijvoorbeeld een ‘human in de loop’ te houden, of om Generatieve AI te controleren (bijvoorbeeld op misinformatie door zogenaamde AI-hallucinaties; denk aan het voorbeeld van zes vingers aan een hand). Een concreet voorbeeld is een generatieve AI-tool die tekstsuggesties genereert voor vragen van klanten uit een chatgesprek. De werknemer moet dan het antwoord controleren, voordat het overgenomen wordt.



Ten slotte zijn er zorgen over hoe GenAI-toepassingen worden getraind en welke gegevens worden gebruikt en opgeslagen. Het is voor velen onduidelijk op basis waarvan een tekst wordt gegenereerd en in welke mate dit dus accuraat is. Er ontstaat het risico op desinformatie en er zijn zorgen over mogelijke schendingen van rechten op het gebied van privacy, gegevensbescherming en het hergebruik van geplaatste teksten (auteursrechten) in bijvoorbeeld ChatGPT. Transparantie in de gegevensverwerking en het bieden van duidelijke informatie aan gebruikers over hoe hun gegevens worden gebruikt, is cruciaal om vertrouwen te behouden van werknemers en werkgevers en zorgen over veiligheid van data te verminderen. Wetgeving, zoals de AI ACT, kan hierop inspelen.

#### 4.4.3 Fysieke belasting

##### Machine learning

Machine learning wordt in veel fysieke machines (robots, autonome voertuigen, sensortechnologie) geïntegreerd. In die zin heeft deze vorm van AI een positieve invloed op de fysieke belasting. Op de impact van robots op gezond en veilig werken wordt later ingegaan (zie hoofdstuk Robotisering).

#### 4.4.4 Veiligheid

##### Machine learning

Op het gebied van veiligheid biedt AI kansen (Fisher et al., 2023). Zo kunnen onveilige situaties worden voorkomen door bijvoorbeeld via beeldherkenning waar te nemen of mensen beschermende middelen gebruiken. Via sensoren en AI kunnen allerlei veiligheidssystemen en signaleringssystemen worden ingebouwd (*safe-by-design*). Verder kan de automatisering van fysieke werkprocessen (wat deels door AI mogelijk wordt) leiden tot meer technische werkzaamheden. Dat kan bij storingen en in- en buitenbedrijfstelling tot veiligheidsrisico's leiden (zie hoofdstuk 5 over robotisering).




#### 4.4.5 Blootstelling aan stoffen

##### Machine learning

Het is de verwachting van experts dat met AI het aantal beroepsziekten/doden door blootstelling aan gevaarlijke stoffen kan worden verminderd. Zo kunnen risicomodellen met AI verbeterd worden door historische gegevens van blootstellingen, incidenten en ziektes te analyseren, om voorspellingen te doen over waar en wanneer risico's het grootst zijn. Dit helpt bij het verbeteren van risicoanalyses, zodat veiligheidsmaatregelen beter kunnen worden afgestemd op de omstandigheden. AI kan ook helpen bij het opstellen van nauwkeurigere modellen rondom de ontwikkeling van beroepsziekten, waarmee preventieve maatregelen eerder kunnen worden genomen om beroepsziekten te voorkomen. Ook kunnen algoritmen afwijkingen in de concentratie van schadelijke stoffen onmiddellijk detecteren (door sensoren) en alarm slaan, voordat de blootstelling gevaarlijke niveaus bereikt. Ook in de literatuur zien we dat AI (in combinatie met sensoren) een positieve impact kan hebben op het beperken van blootstelling (Fisher et al., 2023).

Tabel 2 toont een overzicht van de verschillende kansen en uitdagingen op de deelgebieden van gezond en veilig werken.

**Tabel 2** Kansen en uitdagingen van Artificiële intelligentie op de deelgebieden van gezond en veilig werken

Artificiële intelligentie	 Subcluster	 Kansen	 Uitdagingen
<b>Mentale belasting</b>	Machine learning en generatieve AI	Door een uitdagend takenpakket zijn er meer ontwikkel-mogelijkheden en meer autonomie door ondersteuning van AI.	Snelle verandering van taken en onduidelijkheid rondom de werking zorgt voor (baan) onzekerheid. Door het verdwijnen van routinematig werk kan cognitieve belasting toenemen. Autonomie kan kleiner worden door toegenomen mogelijkheden voor aansturing, controle en informatie-asymmetrie tussen management en werkenden.
<b>Fysieke belasting</b>	Machine learning	Positieve impact via AI-toepassingen in robots en machines (zie robotisering).	Negatieve impact, mede via robots en machines door onderbelasting (zie robotisering).
<b>Veiligheid</b>	Machine learning en generatieve AI	Betere risicoanalyses om onveilige situaties te voorkomen. Safe-by-design maakt machines veiliger. AI kan via beeldherkenning controleren of werkenden de juiste beschermende middelen dragen.	Door AI is er meer automatisering mogelijk, wat leidt tot meer technische werkzaamheden met bijbehorende risico's (zie robotisering).
<b>Blootstelling aan stoffen</b>	Machine learning	Efficiëntere analyse van grote hoeveelheden gegevens en betere risicomodellen rondom schadelijke blootstelling.	Geen noemenswaardige risico's gevonden. Risico's zijn gebonden aan implementatie van dataverwerking en gebruik van risicomodellen.

# 5 Robots, cobots, autonome voertuigen en drones

## 5.1 Beschrijving

Robots zijn geautomatiseerde hulpmiddelen die menselijke taken kunnen overnemen en mensen kunnen ondersteunen bij de uitvoering van hun werk. Wat robots onderscheidt van reguliere machines is dat zij voor verschillende taken geprogrammeerd kunnen worden en steeds flexibeler worden in taakuitvoering en reactie op de omgeving. Dit is te danken aan ontwikkelingen op vrijwel alle fronten van de technologieën waarvan robotica gebruikmaakt, zoals materialen, energievoorziening, sensoren, connectiviteit, programmeren en zelflerende systemen door AI.

## 5.2 Soorten robots

Binnen deze technologie zijn de volgende subclusters te onderscheiden: robots, cobots en autonome voertuigen. De volgende paragrafen gaan in op wat deze technologieën inhouden, welke toekomstverwachtingen ermee verbonden zijn, en wat hun impact is op gezond en veilig werken (GVW).

### 5.2.1 Robots

Robots kunnen zowel een fysieke gedaante hebben, als de vorm van een softwarerobot, zoals op AI gebaseerde chatbots. Dit technologiecluster gaat specifiek in op robots met een fysieke gedaante. Deze robots kunnen zowel plaatsgebonden als mobiel zijn. Het indelen van robots op andere aspecten, zoals welke taken of handelingen ze overnemen, wordt steeds lastiger, omdat zij veelzijdiger worden. En ook plaatsgebonden en mobiel lopen steeds meer in elkaar over. Zo ontwikkelt Boston Dynamics 'orderpicking' robots, die een combinatie zijn van een robotarm en een AMR (Autonome Mobiele Robot). Deze robots zijn in staat zelfstandig naar een orderpicklocatie te rijden en daar de gewenste producten te pakken. In industriële toepassing zijn er nog voornamelijk robots met beperkte functionaliteit en een vaste opstelling: pak- en plaatsrobots en robots die bewerkingen uitvoeren, zoals spuiten, lassen, slijpen. Daarnaast worden veel rijdende robots voor transport gebruikt, de AMR, maar ook voor bijvoorbeeld schoonmaak of bediening. Drones, die autonoom of op afstand worden bestuurd, worden voor inspectie- en inventarisatietaken ingezet, maar ook voor transport zoals last-mile delivery in de logistiek en plantbevruchting, zij het dat de laatste nog sterk in ontwikkeling is. De sociale robots vormen een

aparte categorie. Zij zijn dikwijls mobiel en in staat een sociale interactie aan te gaan.

### 5.2.2 Cobots

Momenteel vormen cobots ook een aparte categorie (zie bijvoorbeeld Steijn et al., 2023). Dit zijn robots, voornamelijk plaatsgebonden, die veilig genoeg zijn om in de buurt van mensen te werken. Over het algemeen hebben zij een lage zogenoemde payload, oftewel belastbaarheid. De kracht van de robotarm is daarbij beperkt, waardoor risico's worden beperkt. De meeste mobiele transport- en sociale robots kunnen ook als cobot worden gezien. Veiligheidssystemen als LIDAR (voorkomen van botsingen) en aanraakgevoelige bekleding zorgen ervoor dat zij de werkvloer kunnen delen met de mens.

Veiligheidssystemen zijn eveneens essentieel voor de meest extreme vorm van mens-robot samenwerking, het gemotoriseerde exoskelet, niet te verwarren met de passieve exoskeletten die geen motor hebben en een brede toepassing hebben bij werk. Het gemotoriseerde of actieve exoskelet kan verschillende vormen aannemen: als ondersteuning voor iemand met een dwarslaesie, als draagbaar hulpmiddel dat een deel van het lichaam (meestal de rug) ondersteuning geeft, of het nog niet marktrijpe 'powerpak' voor de werknemer op de werkvloer, dat de werknemer 'superkrachten' geeft (zie Figuur 4). Een 'fullbody exoskelet' draagt het eigen gewicht en de gebruiker bestuurt de robot, wat een vorm van telehandling is.

### 5.2.3 Autonome voertuigen

Autonome voertuigen, voertuigen die in het verkeer kunnen deelnemen, worden verder buiten beschouwing gelaten in de impactbeschrijving vanwege de beperkte relevantie voor gezond en veilig werken *op de werkvloer*. Uiteindelijk zullen zij vooral impact hebben op de werkgelegenheid van chauffeurs, minder op de veiligheid en gezondheid van werkenden, en bovendien ligt dit naar verwachting buiten de tien-jaars horizon van dit rapport. Hoewel in San Francisco al robottaxis rondrijden, verwachten experts dat het nog zeker tien jaar kan duren, voordat deze grootschalig zijn in te zetten (RIVM & TNO, 2023). Autonome voertuigen die op privaat terrein worden ingezet, zoals een Autonome Mobiele Robot (AMR) in magazijnen, zijn bij de beschrijving van robots meegenomen (zie bijvoorbeeld Van der Beek et al., 2023).

**Figuur 4** Twee voorbeelden van een ‘powerpak’ of ‘wearable machine’. Links Sarcos’ Guardian XO (bron: Sarcos Robotics), rechts een animatie door Montgomery Design International.



Bron: *Industrial Vehicle Technology*, 2009.

### 5.3 Toekomstverwachting

Bij het bepalen van de toekomstverwachting van technologische innovaties voor gezond en veilig werken, spelen twee aspecten een rol. Enerzijds gaat het om de innovatie zelf, anderzijds gaat het om de te verwachten snelheid van adoptie van een nieuwe technologie.

Zoals eerder beschreven, profiteert robotica van de ontwikkelingen op veel verschillende technologische vlakken, met name computertechnologie. Door AI neemt het lerend vermogen snel toe. Dat verkleint de programmeerinspanning en daarmee het gemak van inzet en kan het inzetbereik vergroten. Door edge computing (decentraal programmeren) worden robots autonomer, omdat het meeste rekenwerk op of in de directe nabijheid van de robot plaatsvindt. Door data-uitwisseling binnen kleinere snelle netwerken te laten plaatsvinden, kunnen robots sneller reageren en beslissingen nemen. Een kortere latentietijd verhoogt de betrouwbaarheid van het systeem en daarmee de inzetbaarheid. Wanneer quantumtechnologie toepasbaar wordt in robots, ontstaat de volgende versneller, omdat de rekenkracht substantieel toeneemt. AI met al nemen door alle innovaties de capaciteiten van robots in hoog tempo toe, waardoor de inzetbaarheid groeit en er meer en complexere robots op de werkvloer komen. Buiten de ‘denkkracht’ en het

lerend vermogen van robots, is er nog een aantal andere ontwikkelingen. Hieronder staat een toelichting daarvan.

Robots worden meer en meer hybride en multifunctioneel en de verwachting is dat deze trend zich de komende jaren voortzet. Ze krijgen een samenstelling van functies die vooralsnog vooral afzonderlijk in robots te vinden zijn. De zelfrijdende robot kan steeds meer. Voorbeelden zijn de orderpickrobot of een plukrobot die alles, ook de meest kwetsbare vruchten, kan vinden en plukken en zelf zijn weg zoekt tussen de gewassen. Ook is er de rijdende logistieke robot in het ziekenhuis waaraan je de weg kunt vragen. De ‘informatieopnamefunctie’ van robots, die sowieso nodig is voor autonoom gedrag, wordt uitgebreid voor een betere waarneming van de omgeving, voor het kunnen reageren op *voice control*, of voor het kunnen reageren op sociale signalen. Daarmee nemen zij wellicht meer op dan strikt nodig is (zie paragraaf 5.4 over impact). Zolang de extra functionaliteit laag in gewicht is, zullen naar verwachting ook drones meer kunnen dan de nu dominante inspectietaak. In geval van drones ontstaan daarnaast meer mogelijkheden door ‘zwerm efficiëntie’ (drones die onderling communiceren), en op biomimicry (nabootsen van organismen) gebaseerde vliegtechnologie (zie Figuur 5) die bijvoorbeeld voor gewasmonitoring en bestuiving zijn in te zetten (Future Today Institute, 2023).

**Figuur 5** Delfly – op insecten gebaseerde microdrone



Bron: website TU Delft.

Met toenemende functionaliteiten neemt het aantal taken dat de robot kan uitvoeren toe en daarmee de mogelijkheid om een robot flexibel in te zetten. Binnen het EU-project Rossini<sup>7</sup> is gewerkt aan een platform dat het mogelijk maakt om meer samen te werken met een robot en met een flexibele taakverdeling te werken. Recente ontwikkelingen op AI-gebied, waaronder de lancering van GPT-4o op 13 mei 2024, vergroten deze mogelijkheden. De door de EU noodzakelijk geachte *human centredness* (Breque et al., 2021), oftewel een mensgerichte ontwerpaanpak, is daarbij niet per se vanzelfsprekend (Krause & Douwes, 2022).

Cobots worden steeds krachtiger. Binnen het EU-project Rossini<sup>8</sup> is gewerkt aan veiligheidssystemen waarmee men ook zware industriële robots, robots met een hoge payload van 25kg of meer, naast een werknemer kunnen laten werken zonder de op dit moment wettelijk vereiste afgeschermd werkruimte. In feite kunnen zelfrijdende auto's op de openbare weg eveneens als een zeer sterke en zware cobot worden gezien, met als enig verschil dat deze niet op de werkvloer, maar in de openbare ruimte rondrijdt.

De sociale interactie component met de robot zal steeds uitgebreider worden en op steeds meer robots te vinden

zijn. Zo plant Google robots met een downloadbare persoonlijkheid<sup>9</sup> en verwacht men dat robots door AI en sensortechnologie steeds meer en steeds beter op stemmingen kunnen reageren en het gedrag daarop aanpassen<sup>2</sup>. Daardoor wordt het samenwerken met een robot en het onderling verdelen van taken makkelijker, en komt het echte doel van cobots, een robot waarmee je samenwerkt, dichterbij. Cobots zijn momenteel vooral kleine robots die geen omheining nodig hebben en daardoor als 'machine' makkelijker op de werkvloer zijn in te zetten.

De draagbare robot of het gemotoriseerde exoskelet zal naar verwachting voor de werkvloer een nichemarkt blijven. Het eigen TNO-onderzoek leert dat de markt voor deze verhoudingsgewijs erg kostbare hulpmiddelen klein en lastig is. Daarnaast stuurt arbobeleid richting bronaanpak en neemt daarmee de noodzaak voor deze hulpmiddelen deels weg. Een onzekerdere toekomst is weggelegd voor de fullbody exoskeletten. Hoewel ook hier sprake is van een nichemarkt, zouden zij een specifieke toepassing kunnen vinden in omgevingen waar veel kracht, flexibele manipulatie en inschattingsvermogen gevraagd wordt. Telehandling wordt verder onderzocht in situaties waarbij

<sup>7</sup> [www.rossini-project.com/](http://www.rossini-project.com/)

<sup>8</sup> [www.rossini-project.com/](http://www.rossini-project.com/)

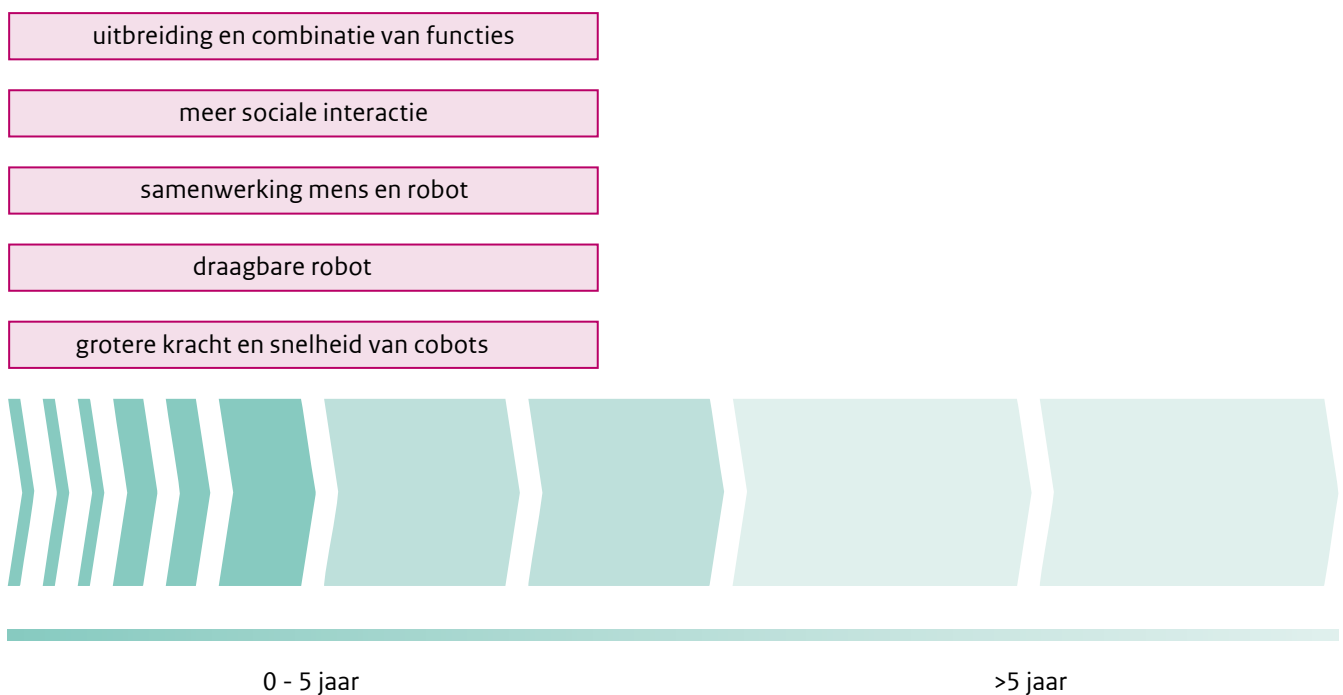
<sup>9</sup> [www.ecpi.edu/blog/7-latest-innovations-in-robotics](http://www.ecpi.edu/blog/7-latest-innovations-in-robotics)

de mens op grotere afstand is en de robot met de eigen natuurlijke bewegingen aanstuurt, zoals de Guardian XT<sup>10</sup>.

De snelheid waarmee robots op de werkvloer doordringen, hangt met een aantal zaken samen. Een belangrijke factor is de mate waarin de robots onderdeel van processen en de IT-infrastructuur zijn. Dit geldt vooral voor de maakindustrie en logistiek. In het algemeen moeten veel bedrijven in Nederland de digitaliseringslag nog maken (Connect2030<sup>11</sup>, COEN<sup>12</sup>), waarbij processen, materialen, werkinstructies en technische systemen in één samenhangend digitaal systeem zijn samengebracht. Andere bedrijven zijn daarin aanmerkelijk verder.

Robotisering is voor deze bedrijven een makkelijker te nemen horde, of een horde die al genomen is. Voor bedrijven die deze digitaliseringslag nog niet hebben gemaakt, zullen veel robotiseringsmogelijkheden op afstand blijven. Hierdoor kan de kloof tussen high- en lowtechbedrijven groter worden. Anders is het voor robots die geen, of maar beperkt onderdeel van een netwerk zijn, zoals werkplekgebonden cobots, transport- en sociale robots in ziekenhuizen, robots in de bediening of schoonmaakrobots. Deze zijn gemakkelijker in werkprocessen in te passen. Voor elke vorm van robotisering geldt dat er uiteindelijk een positieve kosten-batenbalans moet zijn voor inzet van deze robots en het onderhoud aan de systemen.

**Figuur 6** Inschatting van de tijdschijf van brede toepassing van robotica



<sup>10</sup> [www.therobotreport.com/sarcos-demonstrates-exoskeleton-and-dexterous-robot](http://www.therobotreport.com/sarcos-demonstrates-exoskeleton-and-dexterous-robot)

<sup>11</sup> Toekomstverkenning uitgevoerd door TNO in opdracht van Techniek Nederland.

<sup>12</sup> Conjunctuurenquête Nederland (CBS); [www.cbs.nl/nl-nl/deelnemers-enquetes/bedrijven/overzicht-bedrijven/coen-conjunctuurenquete](http://www.cbs.nl/nl-nl/deelnemers-enquetes/bedrijven/overzicht-bedrijven/coen-conjunctuurenquete)

## 5.4 Impact op gezond en veilig werken

### 5.4.1 Algemeen

Hoe meer capaciteiten de robot heeft (en hoe makkelijker een taak aan te leren is), hoe aantrekkelijker het wordt om robots in te zetten. Met het stijgen van de mogelijkheden kunnen meer en meer zogenoemde 3D-taken (dull, dirty, dangerous) door robots overgenomen worden (zie bijvoorbeeld Van der Beek en Van Gulijk, 2021). Dit kan voordelen hebben op het gebied van fysieke belasting, mentale belasting, blootstelling en veiligheid.

Goed beschouwd, vormen meer (en krachtiger) robots op de werkvloer voor de werknemer niet zoveel nieuws. Al sinds de eerste industriële revolutie nemen machines taken van mensen over en krijgen deze andere taken ervoor terug. Het samenstellen van taken tot een functie, oftewel het ontwerpen van werk, blijft voornamelijk een mensgebonden taak. Al zal wellicht het antwoord op de vraag of mensen of computers een taak beter kunnen uitvoeren (oftewel de HABA-MABA<sup>13</sup>-vraag) in de toekomst steeds vaker in het voordeel van de robot uitvallen.

Om de kwaliteit van werk in deze hoogtechnologische omgevingen te waarborgen, heeft de EU het gedachtengoed van Industrie 5.0 in het leven geroepen (Breque et al., 2021). Als opvolger van het sterk gedigitaliseerde Industrie 4.0 moet Industrie 5.0 drie pijlers hebben: mensgericht, duurzaam en veerkrachtig. Omdat veel bedrijven de digitaliseringsslag van Industrie 4.0 nog moeten maken, moet Industrie 5.0 vooral als een fundament voor verdere ontwikkeling van de industrie worden gezien. In hoeverre bedrijven meer mensgericht gaan worden en dus voldoende oog voor de kwaliteit van werk hebben, moet blijken. Uiteindelijk is volgens geïnterviewde experts de wijze hoe men technologie inzet een organisatorische keuze.

De impact van robots op de werkvloer is breder dan op het uitvoeren van werkzaamheden alleen, zoals wanneer het gaat om eigenaarschap van data over een werknemer. Om deze reden moeten de verschillende impactgebieden ruim worden gezien. Zo vallen alle sociale aspecten van de omgang met robots onder mentale belasting en zijn privacyaspecten geschaard onder veiligheid.

### 5.4.2 Mentale belasting

De dominantere afname van fysieke taken betekent een verschuiving naar meer cognitieve taken in het werk. Onder meer een rapport van EU-OSHA wijst op een verschuiving naar controletaken, vergelijkbaar met machinebediening (Rosen et al., 2022). Of een verschuiving naar cognitieve taken voor de medewerker positief of negatief uitpakt, hangt weer af van hoe het werk georganiseerd is. Met meer robots op de werkvloer en meer samenwerking tussen mens en robot, bestaat het risico dat werkenden minder autonomie krijgen in de uitvoering van hun werkzaamheden. Met meer robots is het verder onzeker of er voldoende taken overblijven waarmee een menswaardige functie, dus met voldoende kwaliteit van werk, te creëren is.

Naast de vaak beschreven impact op baan zekerheid zijn het sociale aspect en de sociale functies van een robot misschien wel de aspecten die de meest onvoorspelbare impact kunnen hebben, mede vanwege de AI-component. Een intensieve samenwerking met robots vormt op sociaal vlak een uitdaging volgens experts. Zij bieden geen sociale steun zoals collega's doen, terwijl de nieuwste generatie chatbot GPT-4o<sup>14</sup> nog nauwelijks van echt is te onderscheiden. Welke effecten dit heeft, moet nog blijken. Met minder collega's op de werkvloer en het uitblijven van sociale steun van de robot, neemt het risico van de eenzame werker in elk geval toe, meent een van de geïnterviewde experts.

Om te kunnen leren, moeten de robots de parameters van sociale interactie opnemen (denk aan gelaatsuitdrukkingen en geluid), en daarmee AI-modellen voeden. Dat roept vragen op als wie eigenaar is van de data en wie er meekijkt. Daarmee ontstaat ook de mogelijkheid om data te misbruiken. Onzeker is wat de downloadbare persoonlijkheid, zoals Google, voor zich ziet, met de voorspelbaarheid van gedrag doet en of deze persoonlijkheid zich ontwikkelt. Maar ook: op welke culturele aspecten worden de persoonlijkheden gebaseerd? Is voldoende diversiteit gegarandeerd of is er sprake van een Amerikaanse monocultuur?

<sup>13</sup> Humans Are Better At, Machines Are Better At

<sup>14</sup> vanaf 13/5/2024 publiekelijk toegankelijk

Een werknemer kan het gedrag van een robot beter voorspellen, wanneer een robot zijn gedrag aanpast aan de emotionele toestand van diezelfde werknemer. Dat roept echter ook ethische vragen op: wat als de robot beter dan de mens in staat is emoties te herkennen? Hoewel dit wellicht kansen biedt voor effectieve therapieën, is het op de werkvloer een schending van privacyrechten, omdat niet iedereen wil dat een ander weet hoe die zich voelt? Evenmin is gewenst dat uit het 'voorzichtige gedrag' van een robot conclusies worden getrokken over de gemoedstoestand van de werknemer waarmee deze robot samenwerkt. En ook hierbij rijst de vraag van datamanagement: welke informatie over werkenden wordt verzameld en bij wie kan deze informatie al dan niet per ongeluk terechtkomen?

Een sociale robot die in alle talen met werkenden of klanten kan spreken, heeft voordelen. Aan de andere kant kan de sociale robot ook ertoe leiden dat men minder accepteert van de echte medewerkers, bijvoorbeeld omdat men gewend is geraakt aan de extreem vriendelijke en niet boos te krijgen sociale (functie van de) robot.

### 5.4.3 Fysieke belasting

Robots bieden ontegenzeggelijk een kans om gezondheidsrisico's van fysiek zware taken te verkleinen door deze taken over te nemen. Het is echter onduidelijk wat voor werk de werknemer hiervoor terugkrijgt. Hoewel over het algemeen de verwachting is dat routinematige taken eerder worden overgenomen, blijven er ook in een werkomgeving met veel robots routinematige taken bestaan en kan het aan de andere kant leiden tot intensivering van werk. Zoals de automatisering in de logistiek een intensivering laat zien doordat loopwerk grotendeel geëlimineerd wordt, zouden sociale robots in de zorg ook tot een intensivering kunnen leiden, namelijk tot vervanging van de sociale zorgtaken door (nog niet gerobotiseerde) fysieke taken. Het uitvoeren van meer intensieve (complexe) taken of meer routinematige taken hoeft overigens op zichzelf geen probleem te zijn, of kan juist waardevol zijn. Het gaat om de balans in een takenpakket en de afstemming daarvan op de behoefte en competenties van werken.

Met de uitbreidende inzetbaarheid van robots is uiteindelijk een afname van fysieke taken te verwachten. Daarmee neemt wel het risico op onderbelasting in het werk toe, bijvoorbeeld in de vorm van sedentair gedrag.

### 5.4.4 Veiligheid

Waar robots gevaarlijke taken overnemen, hoeft de mens zich minder of niet meer in gevaarlijke omgevingen te begeven en neemt de veiligheid voor de medewerker uiteraard toe. Maar ook meer in het algemeen kan de veiligheid worden vergroot door robots in te zetten bij inspectiewerkzaamheden, zoals het uitvoeren van emissiemetingen door drones bij Shell. Op deze wijze zijn inspecties vaker en wellicht zorgvuldiger uit te voeren, wat de veiligheid voor werkenden en omwonenden kan vergroten.

Met een toename van robots in het werkdomein van de werknemer – zwaardere cobots, mobiele robots, rijdend en vliegend – zouden veiligheidsrisico's kunnen toenemen of op zijn minst verschuiven, ook al zijn ontwikkelprogramma's (zoals het EU-project Rossini) erop gericht om voldoende veiligheidsschillen te creëren en voldoende redundantie in de systemen in te bouwen (Steijn et al., 2023). Volgens het EU-OSHA-rapport (Rosen et al., 2022) liggen deze risico's op drie terreinen: aansturingsfouten, mechanische storingen en cyberveiligheidsgerelateerde storingen. Alle drie kunnen ze leiden tot onvoorziene gedragingen van robots, met het risico dat hierdoor een arbeidsongeval/veiligheidsincident plaatsvindt. Hieraan gerelateerd verdienen de tussenfases tussen uit en in bedrijf zijn aandacht. Het gaat om de zogenoemde *ramp-up* (het installeren en testen) en om het inspecteren, onderhouden en repareren van complexe robotsystemen. Dit kan bijvoorbeeld vragen om aanwezigheid van personen in de nabijheid van machines waar men normaliter niet in de buurt mag komen als ze in bedrijf zijn. Dit aspect is echter niet nieuw<sup>15</sup>. Hoe meer robots, hoe meer onderhoudswerk (met bijbehorende risico's) en hoe groter het risico op storingen, zeker bij achterblijvend onderhoud.

Waar het gaat om autonome voertuigen op de werkvloer, geven de geïnterviewde experts juist aan dat risico's afnemen, doordat er minder door werkenden bestuurde voertuigen op de werkvloer nodig zijn. Al met al verwachten zij dat robotisering het werk eerder veiliger, dan onveiliger maakt.

<sup>15</sup> Zie: ISO 10218-2 (2011): Robots en robot apparatuur - Veiligheidseisen voor industriële robots - Deel 2: Robotsystemen en integratie, waarbij integratie o.a. omvat 'the design, manufacturing, installation, operation, maintenance and decommissioning of the industrial robot system or cell'.






## 5.4.5 Blootstelling aan stoffen

In de industrie zijn er verschillende innovaties ontwikkeld rondom stofvrije productieprocessen, zodat de uitstoot van stoffen beperkt wordt of wordt afgevangen (Fransman et al., 2017). Het is daarnaast evident dat waar een robot kan worden ingezet, de mens niet of veel minder hoeft te zijn. Dat geldt dus ook voor omgevingen waar mensen het risico lopen blootgesteld te worden aan gevaarlijke stoffen of straling. Er zullen naar verwachting echter wel altijd bepaalde taken en activiteiten blijven, waarbij een

werknemer schoonmaak- of onderhoudswerkzaamheden moet uitvoeren bij of aan de robot, waardoor er momenten kunnen blijven bestaan met (hoge) blootstellingen aan stoffen. Ook bij falende techniek zal de werkende de taak moeten overnemen waar ervaring zal zijn afgenomen in het uitvoeren van de taak.

Tabel 3 toont een overzicht van de verschillende kansen en uitdagingen op de deelgebieden van gezond en veilig werken.

**Tabel 3** Kansen en uitdagingen van robotica op de deelgebieden van gezond en veilig werken

Robotica en autonome voertuigen	 Subcluster	 Kansen	 Uitdagingen
<b>Mentale belasting</b>	Algemeen	Wanneer robots 3D*-taken overnemen, kan daardoor de mentale belasting afnemen.	Minder fysieke taken, maar ook intensivering van werk, kunnen leiden tot toename mentale belasting.
	Cobots	Samenwerking met robots verbetert, doordat robot rekening houdt met mentale toestand,	Minder privacy, omdat het verborgen kunnen houden van emoties/mentale toestand lastiger wordt. Minder tolerantie voor menselijk onvolkomenheid in tonen/beheersen van emoties (in vergelijking tot robot),
<b>Fysieke belasting</b>	Algemeen	Verkleinen van gezondheidsrisico's door robots zware taken te laten uitvoeren.	Onderbelasting door afname fysieke taken.
<b>Veiligheid</b>	Algemeen	Overnemen van onveilige taken.	Meer machines op de werkplek leiden tot mogelijke toename veiligheidsrisico's, met name tijdens tussenfases tussen uit en in bedrijf zijn, maar ook door meer storingen.
	Autonome voertuigen (in bijvoorbeeld magazijnen)	Minder mensbestuurde voertuigen op werkvloer is veiliger.	
<b>Blootstelling aan stoffen</b>	Algemeen	Waar een robot wordt ingezet, hoeft de mens niet te zijn: dus lagere blootstelling.	Schoonmaak- of onderhoudswerkzaamheden bij of aan de robot kunnen (hoge) blootstelling aan stoffen veroorzaken.

\*dull, dirty, dangerous



# 6 Nieuwe materialen

## 6.1 Beschrijving

Het cluster Nieuwe materialen omvat de vele nieuwe materialen of productiemethoden van nieuwe materialen. Er zijn talloze benamingen voor de specifieke verschillende materialen (energy materials, meta materials, smart materials), hun origine (synthetisch of biologisch) en de dimensie waarop ze worden geproduceerd (micro, nano) waarbij een materiaal soms in meerdere categorieën kan vallen (Van Bree, 2024). Nieuwe materialen worden, overkoepelend, ook wel ‘advanced materials’ of ‘innovative materials’ genoemd. Nieuwe materialen kunnen materialen zijn, die zijn vervaardigd door nieuwe technieken zoals nanotechnologie, 3D-/4D-printing<sup>16</sup>, 2D-materialen<sup>17</sup> en biosynthetische technologie of uit nieuwe bronnen worden vervaardigd. In dit hoofdstuk vallen zij allemaal onder de noemer Nieuwe materialen. Het creëren van nieuwe materialen of de wijzen waarop materialen gemaakt worden, worden ook wel ‘advanced manufacturing’ of ‘advanced engineering’ genoemd.

Nieuwe materialen zijn een *enabling technology*. Dat betekent dat de materialen ondersteunend of bepalend zijn voor de ontwikkelingen van andere technologieën. Supergeleiders en energieopslag in kleinere accu’s spelen een rol in de ontwikkeling van de energietransitie, waarvan de komst van nieuwe materialen bepalend zijn. Nieuwe materialen hebben invloed op hoe de apparaten eruit kunnen zien en welke mogelijkheden ze hebben. Zo worden oprolbare schermen of schermen met variabele grootte gemaakt, of coatings die kras- en schokabsorberend zijn. Wat opvalt, is dat met de komst van nieuwe materialen niet per definitie naar één toepassing of een eigenschap wordt gekeken, maar vaker naar *multifunctionaliteit* van het materiaal (Farcas et al., 2022). Hierdoor zijn nieuwe materialen ook voor een breder spectrum inzetbaar. Nanomateriaal kan bijvoorbeeld als coating op glas UV- en vuilwerend zijn, maar is door de schaalgrootte wel doorzichtig.

## 6.2 Soorten nieuwe materialen

Binnen nieuwe materialen worden de volgende subclusters nader uitgewerkt: nanotechnologie, biosynthetische technologie, bio-engineering en 3D-printen. De volgende paragrafen gaan in op wat deze technologieën inhouden, welke toekomstverwachtingen ermee verbonden zijn, en wat hun impact is op gezond en veilig werken (GVW).

### 6.2.1 Nieuwe materialen met behulp van nanotechnologie

De recente technologische ontwikkelingen van het maken van nieuwe materialen richten zich vooral op het maken, veranderen of gebruiken van materialen met hele kleine afmetingen op nanoschaal. Nanotechnologie<sup>18,19</sup> heeft een stap gemaakt in de creatie van 2D-structuren die als bouwsteen kunnen fungeren voor nieuwe materialen.

Recentelijk worden ook op nanoschaal 2D-structuren gemaakt als bouwonderdelen, omdat deze wijze van fabricage duurzamer en efficiënter is ten opzichte van conventionele fabricagemethoden. Bij de ontwikkeling van 2D-structuren wordt vooral op moleculair niveau onderzoek gedaan naar nieuwe materialen en hun toepassingen. Bijvoorbeeld de ontwikkeling van grafeen, dat onder andere van belang is voor het transport en opslag van energie (accu’s). Een veel gebruikte verzamelterm is de MXenes, waar koolstofatomen, metalen en stikstofatomen in verschillende configuraties worden gecreëerd.

<sup>16</sup> 4D-printen is 3D-printen waarbij slimme materialen gebruikt worden die kunnen veranderen in de tijd.

<sup>17</sup> Materialen van één atoomlaag dik.

<sup>18</sup> Nanotechnologie in het spectrum van nieuwe materialen gaat nadrukkelijk niet over nanobots of technieken op nanoschaal die toepassingen hebben als sensor of medisch hulpmiddel.

<sup>19</sup> [www.rivm.nl/nanotechnologie](http://www.rivm.nl/nanotechnologie)

## 6.2.2 Nieuwe materialen op basis van biosynthetische technologie

Bij *biosynthetische technologie* gaat het om het vervaardigen van nieuwe materialen, waarbij biologisch materiaal verwerkt is. Een relatief nieuwe toepassing in het veld van nano-biotechnologie is DNA-/RNA-origami. Met behulp van DNA-/RNA-structuren worden 3D-structuren gemaakt, die een medicijn of gewasbeschermingsmiddel kunnen bevatten dat preciezer toegediend of vrijgelaten kan worden. Hiermee wordt de efficiëntie van het middel vergroot en is de werknemer beter beschermd tegen blootstelling. Bovendien is de 3D-structuur biologisch afbreekbaar en dat is weer beter voor het milieu.

## 6.2.3 Nieuwe materialen op basis van bio-engineering

*Bio-engineering* daarentegen gaat over het vervaardigen van biologische materialen die worden gebruikt voor andere doeleinden, bijvoorbeeld nieuwe elastische materialen vervaardigen uit spinnendraad of zijde uit schimmeldraden. Ook cellulose wordt in de literatuur (Future Today Institute, 2023) en door experts als bouw materiaal genoemd. Ook komen biomaterialen op, die gebaseerd zijn op neurologische structuren voor het doorgeven van elektrische signalen of creëren van netwerken.

## 6.2.4 Nieuwe materialen op basis van 3D-printen

Een andere ontwikkeling die verband houdt met nieuwe materialen is het *3D-printen*. 3D-printen is het fabriceren van onderdelen of producten op basis van 3D-tekeningen, die worden vervaardigd door laag op laag te printen. 4D-printen is een ontwikkeling die recent is opgekomen. Hierbij worden materialen gebruikt, die kunnen veranderen in de tijd (4<sup>de</sup> dimensie), bijvoorbeeld door warmte of wanneer het materiaal in aanraking komt met water (Future Today Institute, 2022; Vahabi et al., 2021). Een toepassing hiervan is mogelijk in de gewasbescherming, waarbij het actieve middel is verpakt in een 4D-structuur, die pas vrijkomt bij beregening van het gewas.

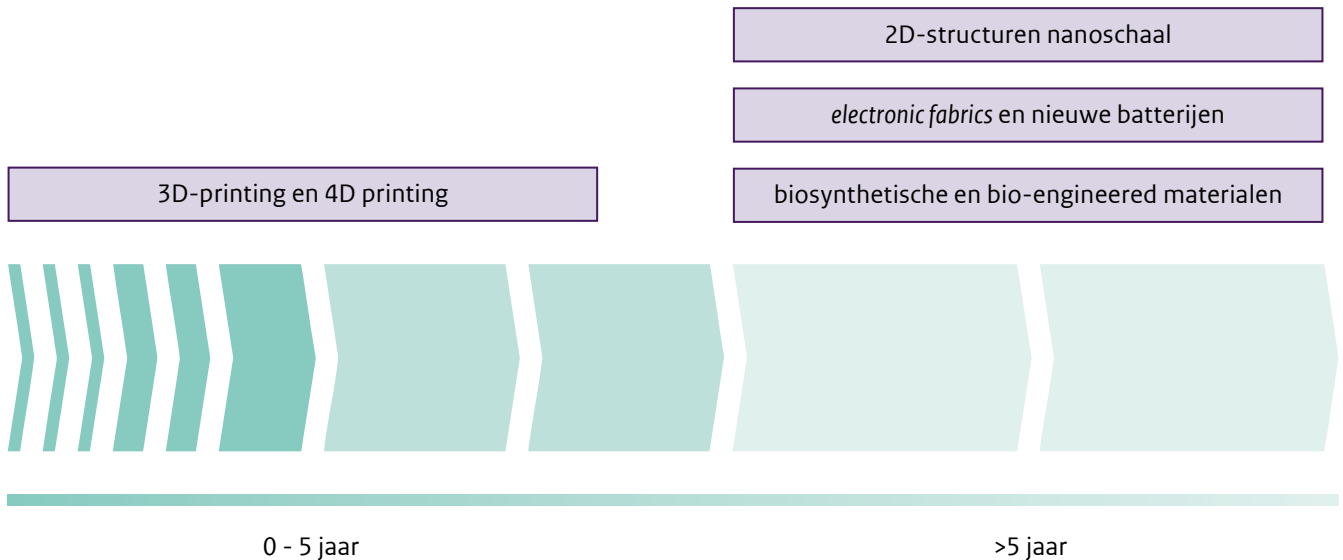
## 6.3 Toekomstverwachting

De nieuwe materialen en nieuwe manieren van produceren blijven zich doorontwikkelen. Duidelijk is dat dit vooral op de thema's van de energietransitie en duurzaamheid plaatsvindt. Neurologische biomaterialen op basis van bio-engineering staan nog verder weg in de toekomst dan de komende vijf á tien jaar (RIVM & TNO, 2023).

Naast de constatering dat 2D-structuren op nanoschaal nog steeds veelvuldig als belangrijke ontwikkeling bij nieuwe materialen wordt benoemd (RIVM & TNO, 2023), zijn er enkele belangrijke nieuwe ontwikkelingen. De eerste ontwikkeling is dat de toepassing van flexibele elektronica een vlucht gaat nemen. Twee voorbeelden zijn: (1) Het verwerken van elektronische materialen in textiel of weefsels (fabrics), zoals triboelectric nanogenerators (TENGs), die zichzelf kunnen opladen door bijvoorbeeld kinetische energie (Kim et al., 2020); en: (2) De toepassing van flexibele batterijen en schermen (Future Today Institute, 2023). Nieuwe soorten batterijen, zowel qua materiaal als qua formaat, worden veel genoemd als opkomende nieuwe materialen, zo ook door experts op het gebied van nieuwe materialen bij het RIVM. De vorm van de huidige elektronische circuits, batterijen en schermen is bepalend voor hoe producten kunnen worden toegepast. De aangepaste flexibiliteit zorgt ervoor dat beperkingen wegvallen in productontwerpen en toepassingen. Zo kunnen wearables nog beter aansluiten op het menselijk lichaam. De tweede ontwikkeling is dat er vanuit duurzaamheidsgedachte meer aandacht is en komt voor het gebruik van biologische materialen, de zogenaamde 'bio-engineered materials'. Hoewel er veel ontwikkelingen zijn op technologisch vlak, is de verwachting dat 2D-structuren op nanoschaal, biosynthetische en bio-engineered materialen, en elektronische materialen in textiel toch nog niet binnen vijf jaar grootschalig kunnen worden toegepast.

Tot slot is opvallend dat de meeste technologieverkenningen of top10-lijsten niet vaak meer de toepassing van 3D-printing vermelden. De 3D- en 4D-printtechniek zal zich wel verder doorontwikkelen en de komende vijf jaar vaker worden toegepast, maar de verwachting is dat dit meer in specifieke niches zal zijn.

**Figuur 7** Inschatting van de tijdshorizon van brede toepassing van nieuwe materialen



## 6.4 Impact op gezond en veilig werken

Aangezien nieuwe materialen een *enabling technology* is, is de impact op gezond en veilig werken vooral gerelateerd aan de uiteindelijke toepassingsgebieden van nieuwe materialen. Denk aan toepassingen bij de energietransitie, circulaire economie, maar ook aan toepassingen in werksituaties, die beschreven staan onder met name het cluster van digitalisering en AI. De impact van nieuwe materialen op gezond en veilig werken is daarmee vooral indirect. Het is ook nog niet duidelijk hoe, wanneer en in welke mate de nieuwe materialen worden toegepast in de praktijk. Dit geven ook enkele experts aan. De inschatting van de impact op gezond en veilig werken, is om die reden voor een belangrijk deel gebaseerd op inschatting van het projectteam en expertraadpleging.

### 6.4.1 Mentale belasting

De impact die beschreven staat onder digitalisering is ook hier indirect (als *enabling technology*) van toepassing. De nieuwe materialen maken het mogelijk dat werkenden beter door verbeterde technologieën worden ondersteund. Bijvoorbeeld door verbeterde draadloze netwerken, snellere datatransfers, wearables en mini-batterijen. Dit kan versneld worden wanneer technieken als TENGs zijn intrede in werkkleding gaat krijgen. Dit kan ervoor zorgen dat werkenden autonomer kunnen werken.

### 6.4.2 Fysieke belasting

De trend die zichtbaar is bij nieuwe materialen is dat zij sterker, kleiner, lichter en duurzamer zijn en een verbeterde functionaliteit hebben ten opzichte van de materialen die zij vervangen. De trend van steeds kleiner en lichter wordende wearables zorgt ervoor dat de fysieke belasting van de drager kleiner wordt. Het feit dat nieuwe materialen qua vorm ook beter aan te passen zijn aan de mens, zorgt voor verhoogd draagcomfort. Daarbij wordt wel meegegeven dat er een neiging kan zijn om meer wearables aan de werkende mee te geven, wat het eerdergenoemde effect tenietdoet.

Experts benoemen 3D-printing als een technologie die voordelen kan hebben waar het gaat om fysieke belasting, doordat handmatige werkzaamheden door de printer kunnen worden uitgevoerd. In veel gevallen gaat het om maatwerk of detaillistisch werk, die allebei een werknemer een hoge belasting kunnen geven.

### 6.4.3 Veiligheid en blootstelling aan stoffen

De impact van de technologie op veiligheid en blootstelling aan stoffen komt bij dit cluster voor deze twee impactgebieden op dezelfde manier tot uiting. Feitelijk is alleen het toepassingsgebied onderscheidend, of er impact is op veiligheid, blootstelling aan stoffen (maar ook biologische agentia) of beiden. Daarom zijn de twee impactgebieden hier samengevoegd.

De impact van nieuwe materialen of vervaardigingsmethoden worden vooral verwacht op het gebied van gezondheid en veiligheid. Experts geven aan dat het lang kan duren voordat veiligheids- en gezondheidseffecten van nieuwe materialen bekend zijn. En er wordt aangegeven dat de manier waarop de risico's zullen ontstaan nog onbekend is. Het is bijvoorbeeld denkbaar dat door TENGs elektrische stromen in kleding voor brandwonden- en elektrocutiegevaaren kunnen zorgen. Productie door 3D-printen of met bio-engineering kan mogelijk leiden tot materialen met hogere faalpercentages qua sterkte (er kan meer variatie zijn in productieprocessen die tot inconsistente producten kunnen leiden), of die makkelijker kunnen worden aangetast door natuurlijke invloeden. Dit kan tot onveiligere situaties leiden. Bij nieuwe materialen ontbreekt het ook aan een toetsingskader waaraan de materialen moeten voldoen om als veilig beschouwd te kunnen worden. Of het kan zijn dat er nog altijd aanvullende informatie over veiligheid en blootstelling verzameld moet worden, zoals geconcludeerd wordt over 2D-structuren (Lin et al., 2024). In sommige gevallen zijn de nieuwe materialen geïntegreerd in producten en processen, waardoor er tijdens toepassingen zelf minder sprake zal zijn van directe blootstelling.

Om die reden is juist het aan de voorkant kunnen inregelen van veilig gebruik via het safe-and-sustainable-by-design (SSbD) -concept belangrijk (zie bijvoorbeeld Soeteman-Hernandez et al. 2019; Braakhuis & Fransman, 2024). Het biedt een preventieve kans om tijdens de ontwikkeling van een nieuw materiaal al na te denken hoe gezonder en veiliger te kunnen werken, in plaats van pas op het moment dat het nieuwe materiaal op de markt is. Maar juist binnen dit SSbD-concept moet de producent van het nieuwe materiaal van tevoren nadenken over de mogelijke risico's van het materiaal. Die risico's dienen tijdens de ontwikkelingsfase al zoveel mogelijk beperkt te worden voor de gehele levenscyclus van het materiaal.

Bij het SSbD-concept gaat het over de risico's bij de onderzoeks- en ontwikkelingsfase, de productie van de materialen, de gebruiksfase en tijdens de afvalverwerking. Experts verwachten dat door vroegtijdige en proactieve signalering de risico's op nadelige arbeidsomstandigheden kleiner worden. Vroegtijdige signalering wordt op dit moment echter nog niet breed toegepast.

Uitdagingen zijn er vooral op het gebied van onbekende nadelige gezondheidseffecten van de nieuwe materialen

bij het verwerken of bewerken ervan. Werkenden die betrokken zijn bij de ontwikkeling van nieuwe materialen lopen daardoor grotere risico's. Daarnaast moet men zich realiseren dat tijdens de afvalverwerking nieuwe materialen bij elkaar komen. Dit moet dus allemaal aan bod komen binnen het bovengenoemde SSbD-concept voor de gehele levenscyclus van het materiaal. Een expert noemde ook het belang van het kunnen detecteren en meten van nieuwe materialen. Dan wordt pas inzichtelijk wat de risico's zijn.

Nieuwe materialen kunnen ook een direct effect hebben op gezond en veilig werken, bijvoorbeeld door het gebruik van nieuwe materialen voor betere persoonlijke beschermingsmiddelen (PBM). Denk aan oogbescherming, handschoenen, helmen, sensoren, en overalls, die sterker, flexibeler, luchtiger en lichter zijn. Hierdoor kunnen complexe (handmatige) werkprocessen waar PBM het laatste redmiddel zijn, beter worden gecontroleerd en beheerst (Future Today Institute, 2023).



Een grote zorg is er voor de onvoorziene risico's bij het werken met biologisch erfelijk materiaal (DNA en RNA), alsook bij toepassingen in de medische sector, zoals flexibele neurale elektronica die stugge pacemakers kunnen vervangen. Ondanks verhoogde aandacht in de ontwikkelfase, zoals hierboven beschreven, is het uitsluiten van nieuwe risico's niet mogelijk.

De zorgen over de impact op gezond en veilig werken van nieuwe materialen zit vooral bij werkplaatsen die niet toegerust zijn op dergelijke nieuwe materialen en technieken. Dit betreft volgens experts dan vooral ook de afvalverzamelaars en – verwerkers waar nieuwe materialen samenkomen in onverwachte en ongecontroleerde samenstellingen.

Bij het werken met 3D-printers kan blootstelling aan complexe mengsels ontstaan, die tijdens 3D-printing worden gebruikt. Daarom is het belangrijk dat bij het vervaardigen van materialen op locatie de werkomgeving is toegerust om blootstelling aan chemische stoffen en ongevallen of brandwonden te kunnen beheersen of voorkomen (Pavlovska et al., 2023).

Tabel 4 toont een overzicht van de verschillende kansen en uitdagingen op de deelgebieden van gezond en veilig werken.

**Tabel 4** Overzicht van de verschillende kansen en uitdagingen op de deelgebieden van gezond en veilig werken voor nieuwe materialen.

Nieuwe materialen	 Subcluster	 Kansen	 Uitdagingen
<b>Mentale belasting</b>	Electronic fabrics en nieuwe batterijen.	Autonomer en beter ondersteund werken.	Meer gebruik en grotere afhankelijkheid van technologie (storingen).
<b>Fysieke belasting</b>	Allen 3D-printing	Minder fysieke belasting, bijvoorbeeld door lichtere batterijen in waerables. Minder repetitieve werkzaamheden door automatisering via 3D-printing.	
<b>Veiligheid en blootstelling</b>	Allen	Safe-en-sustainable-by-design in ontwikkelproces vergroot veiligheid en blootstelling bij gebruik en verwerking. Betere materialen voor persoonlijke bescherming.	Onbekende en onvoorziene risico's van nieuwe materialen kunnen niet worden uitgesloten. Niet goed toegeruste werkomgevingen, bijvoorbeeld bij afvalverwerking zorgen voor meer blootstelling.





# 7 Extended reality en de metaverse

## 7.1 Beschrijving

*Extended reality* is een verzamelterm voor virtual, augmented, mixed en diminished reality. Het is in feite een technologische ontwikkeling binnen de digitalisering, maar wordt vanwege zijn specifieke toepassing in het werk apart behandeld. *Augmented reality* (AR) en *virtual reality* (VR) zijn vormen van gedigitaliseerde waarnemingen en omgevingen die deels of volledig gecreëerd zijn (Future Today Institute, 2022). AR maakt gebruik van de fysieke omgeving. Hieraan worden virtuele elementen of gebeurtenissen toegevoegd. Bij VR gaat het om een volledig virtuele omgeving. Het kan een afspiegeling zijn van de werkelijkheid, of het kan een volledige fictieve omgeving zijn. De persoon voelt zich alsof hij volledig in de virtuele omgeving zit. Met behulp van VR kan een werknemer getraind worden via simulaties. Denk bijvoorbeeld aan de training van piloten. Wanneer AR en VR gecombineerd worden, is er sprake van mixed reality. Als er signalen worden weggefilterd, spreek je van diminished reality. Het bekendste voorbeeld is noise-cancelling headphones.

Een vergaande vorm van VR is de *metaverse*. De *metaverse* is een aansluitend geheel van virtuele 3D-omgevingen, waar mensen met elkaar contact kunnen hebben (een collectief netwerk) (Future Today Institute, 2022). Dit kan bijvoorbeeld een werkomgeving zijn. Net als bij fysieke gebouwen, blijft de virtuele omgeving 'bestaan' en is het een wereld op zichzelf. Een avatar (virtueel persoon) kan bewegen door de *metaverse* en in deze virtuele wereld interactie hebben met anderen.

## 7.2 Soorten extended reality en metaverses

De volgende paragrafen gaan in op wat extended reality en metaverses inhouden, welke toekomstverwachtingen ermee verbonden zijn, en wat hun impact is op gezond en veilig werken (G&VW).

### 7.2.1 Extended reality

Als er wordt gebruikgemaakt van extended reality-technieken zijn het met name de immersieve technologieën die opkomen (Ex et al., 2023). Immersieve technologieën zijn bedoeld om gebruikers 'onder te dompelen' in deels of volledig virtuele werelden. Extended reality wordt daarom vaak onder immersive technology geschaard. Hier is al een aantal voorbeelden van, zoals de verscheidene VR-brillen, de HoloLens en de Google smartglasses. Maar op het vlak van immersieve technologie gaan de ontwikkelingen een stap verder. Denk hierbij aan het dragen van speciale handschoenen die de tastzin simuleren, of het gebruik van geurampullen die geur en smaak kunnen simuleren, terwijl de gebruiker zich in een virtuele wereld bevindt (Future Today Institute, 2023).

### 7.2.2 Metaverse

De metaverse is niet slechts één virtuele wereld, maar kan per omgeving gebouwd worden, zoals een digitale werkomgeving of een digitale schets van een gebouw. In de gaming industrie is het creëren van virtuele werelden waar men kan interacteren gemeengoed, maar daarbuiten is de toepassing nog beperkt (Future Today Institute, 2023). De metaverse wordt wel vaker in verband gebracht met handel van virtuele producten, zoals NFTs (Non-Fungible Tokens). Ook het nabouwen van werkelijk bestaande constructies, infrastructuur en producten in de virtuele wereld neemt toe, de zogenoemde digital twin ([Digital twinning | TNO](#)). Het gebruik van digital twins in combinatie met extended reality wordt steeds vaker toegepast in bijvoorbeeld de verkoop van producten door IKEA<sup>20</sup>, maar ook bij re-integratietrajecten door KLM<sup>21</sup>. Het 3D-ontwerp van producten, de infrastructuur en de gebouwen worden beschikbaar gesteld en virtueel zelfs 'verkend' door de koper, via bijvoorbeeld een metaverse. Via AR kan de consument vervolgens kijken hoe een bank staat in de inrichting of 'past' de consument nieuwe schoenen.

<sup>20</sup> [www.ikea.com/nl/nl/newsroom/corporate-news/breng-je-ideeen-tot-leven-met-kreativ-nieuwe-tool-in-ikea-app-pub5d485f30/](https://www.ikea.com/nl/nl/newsroom/corporate-news/breng-je-ideeen-tot-leven-met-kreativ-nieuwe-tool-in-ikea-app-pub5d485f30/)

<sup>21</sup> [nieuws.klm.com/met-zelfvertrouwen-terugkeren-naar-werk-klm-past-vr-toe-bij-re-integratie](https://nieuws.klm.com/met-zelfvertrouwen-terugkeren-naar-werk-klm-past-vr-toe-bij-re-integratie)

## 7.3 Toekomstverwachting

### Instrueren en trainen

Er lijkt wat de extended reality en de metaverse betreft, in de directe toekomst al een belangrijkere rol te zijn weggelegd. Vooral het kunnen instrueren op afstand en het trainen van werkenden is een aantrekkelijke eigenschap van deze technologieën (Arana-Landín et al., 2023). Dit toepassingsgebied is groeiende. Hoewel er nu concrete voorbeelden zijn van extended reality technieken voor instrueren en trainingen (bij chirurgen, monteurs, e-learnings, en dienstensectoren), zien we deze doeleinden ook terug in de industrial metaverse, waarbij niet alleen de mens, maar ook de machine en complexe systemen via AI in een digitale omgeving getraind kunnen worden. De efficiëntie van het draaien van een industrieel complex is van tevoren uit te denken.

### Metaverse in de gezondheidszorg en industriële complexen

Een opkomende trend die wordt opgemerkt in FTI (2023) is de toepassing van de metaverse in de gezondheidszorg. Interactie met patiënten kan en gebeurt steeds vaker met virtuele spreekuren, waar een arts of apotheker op afstand beschikbaar is. Ook asymmetrische digitale communicatie met behulp van AI (geschreven berichten met foto) komt vaker voor. Het doel hierachter is een toegankelijker gezondheidszorg en afname van werkdruk in de zorg. Er kunnen meer patiënten worden gezien in kortere tijd en de virtuele spreekuren fungeren ook als screening voor patiënten die wel gezien moeten worden. Efficiëntie is daarmee ook een belangrijke drijfveer voor het toepassen van de metaverse in de gezondheidszorg.

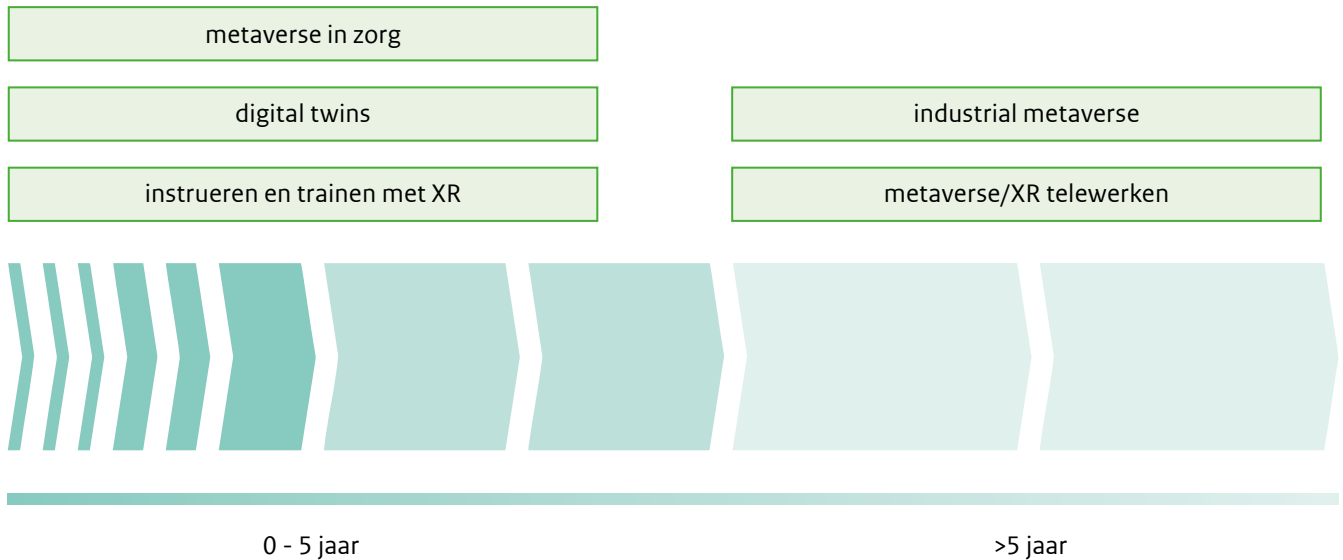
Recenter zijn de ontwikkelingen van industrial metaverses, waar industriële complexen worden nagebouwd in een virtuele wereld. Essentieel hier zijn de digitale representaties van de faciliteiten en infrastructuur. Het nabootsen van complexe systemen kan voor een enorme efficiëntieslag zorgen in het realiseren van industriële complexen, alsook de operationele efficiëntie vergroten. Het risico bestaat dat de werkende wordt gezien als onderdeel van het systeem en daarmee wordt ontmenselijkt. Gezond en veilig werken wordt vooralsnog niet genoemd in het simuleren van industriële complexen. De toekomst van de industriële metaverse hangt sterk af van het succes van de ontwikkelingen op het gebied van digital twins en ondersteunende technieken die de connectiviteit verbeteren (MIT technology review insights, 2024).

### Telewerken wordt gestimuleerd door technologische ontwikkelingen

Het telewerken is een ontwikkeling die al gaande was voor de komst van toepassingen van extended reality en de metaverse voor de werkomgeving. De technologieën kunnen wel bijdragen aan bredere acceptatie en adoptie van het telewerken. Verschillende bronnen RIVM&TNO 2023; FTI, 2023; WEF, 2023 en Gartner, 2023) hebben de verwachting uitgesproken dat de metaverse en extended reality technieken belangrijk konden worden voor het telewerken<sup>22</sup>. Voor veel beroepen is het thuiswerken verankerd in het hedendaagse werk. Geïnterviewde techexperts geven aan dat de gebruiker van de technologieën, de werkgevers en werknemers, de metaverse nog niet geaccepteerd hebben als vervanger van de kantooromgeving voor de dagelijkse omgang. Dit beeld wordt ook geschetst door MIT technology review insights (2024). Voor de sociale omgang tijdens meetings lijkt de metaverse wel voordelen te kunnen bieden, bijvoorbeeld op het gebied van het gevoel van samen zijn (Held et al., 2024) ten opzichte van thuiswerken.

<sup>22</sup> Het aantal uren dat thuisgewerkt wordt, is sinds de COVID-pandemie gestegen van gemiddeld 2,6 uur per week in 2019 tot bijna 7 uur medio 2023 (Oude Hengel et al., 2023).

**Figuur 8** Inschatting van de tijdshorizon van brede toepassing van extended reality en de metaverse



## 7.4 Impact op gezond en veilig werken

### 7.4.1 Algemeen

De impact op gezond en veilig werken van extended reality en de metaverse komt voort uit de mogelijkheden die de technieken bieden in relatie tot telewerken enerzijds en anderzijds uit de directe gevolgen van het toepassen van de technieken bij het werken ermee; training en instructie op afstand. Hieronder wordt de impact van extended reality op gezond en veilig werk aan de hand van vier domeinen beschreven: mentale (cognitieve en psychosociale) belasting, fysieke belasting, veiligheid en blootstelling aan stoffen.

Omdat het op het gebied van de mentale belasting vooral gaat om impact van de technologie bij de toepassing voor telewerken, is om die reden specifiek naar telewerken gekeken. De overige kopjes over veiligheid en fysieke belasting gaan vooral over de impact van extended reality en de metaverse zelf.

### 7.4.2 Mentale belasting

#### Telewerken

Waar extended reality en de metaverse worden gebruikt voor telewerken, is er vooral impact te verwachten op mentale belasting. Die impact kan zowel positieve uitwerkingen hebben als negatieve. Positieve impact is bijvoorbeeld de verhoogde mate van regie (autonomie) over het indelen van het werk thuis (RIVM & TNO,

2024) terwijl men alsnog verbonden is met het werk via technologie. Aan het begin van de coronacrisis zorgde het thuiswerken voor meer autonomie en ging de productiviteit zelfs omhoog (Zoomer et al., 2021). Een ander voordeel is dat reistijd wegvalt en anders besteed kan worden. Ook is er een afname in ongewenst gedrag (RIVM & TNO;2024). Een keerzijde op het mentale vlak is dat de virtuele omgeving altijd aanwezig en makkelijk bereikbaar is. Hierdoor kan er druk ontstaan om meer te werken en dit kan de werk-privébalans verstoren. Ook het afschakelen na het werk is lastiger, omdat men gelijk doorgaat met het privéleven en het reizen voor velen een rustmoment was. Ten slotte kan er ook intensivering van werk plaatsvinden, omdat mensen achter elkaar digitale afspraken hebben en natuurlijke rustmomentjes (verplaatsen naar andere locaties, praatjes bij de koffieautomaat) verdwijnen. Het werken op afstand leek voorheen de risico's op het psychosociale vlak te doen afnemen. Maar het lijkt erop dat de trend gekenterd is en dat werken vanuit huis, of samenwerken op afstand door te beeldbellen, deze risico's juist vergroten (EU OSHA 2024). Het blijft onzeker hoe de impact op de mentale belasting precies gaat uitpakken.

Bovenstaande aspecten zijn algemene impacts van telewerken. Wanneer wordt ingezoomd op de technologie, geven experts aan dat een realistischere omgeving de mentale belasting kan verlagen en sociale contact en cohesie verhogen, wanneer bijvoorbeeld ook non-verbale communicatie gevangen kan worden in een metaverse. Dit ziet men ook al bij videobellen ten opzichte van

‘gewoon’ bellen. Of dat ook geldt voor de avatar<sup>23</sup> is dubbelzinnig. Het kijkend naar jezelf als avatar kan voor een verstoord zelfbeeld zorgen (identificeer ik mij wel met mijn avatar of identificeer ik mij alleen met mijn avatar). Anderzijds kan het gebruik van avatars ervoor zorgen dat onderscheidende (discriminerende) kenmerken tussen mensen wegvallen. Dat kan zorgen voor een eerlijke behandeling op het werk, totdat men elkaar in persoon treft.

Het aansturen van werkenden op afstand brengt in beginsel risico's met zich mee. Het sociale aspect van de arbeidsverhouding wordt minder en er wordt meer op data, dan op gevoel gestuurd. Dit wordt ook mogelijk gemaakt doordat steeds meer elementen van het werk worden gemonitord (zie ook digitalisering en sensoren/monitoren). Anderzijds kan het de afstand tot het werk verkleinen en geschikt maken voor mensen, die anders door beperkte mobiliteit of fysieke of mentale beperkingen op afstand van de arbeidsmarkt blijven staan.

#### **Extended reality en metaverse**

Het werken met extended reality en de metaverse biedt kansen om mensen te trainen en te instrueren. Zo werkt TNO aan operator supportsystemen waar instructies worden geprojecteerd op werkplekken, die mensen met een afstand tot de arbeidsmarkt gebruiken. Dit kan hen, zoals eerder vermeld, toegang bieden tot de arbeidsmarkt, maar het kan ook de autonomie en flexibiliteit aantasten van de werknemer die geïnstrueerd wordt. In het algemeen kunnen ‘voorschrijvende’ technologieën mogelijk het observatie- en leervermogen verminderen, vergelijkbaar met de routeplanner in de auto.

Via Extended reality en metaverse kunnen grote informatiestromen ook leiden tot een mentale overbelasting wanneer die niet voldoende worden gereguleerd. Informatie ‘overload’ kan ook te veel afleiden van het werk.

Zoals een artikel in The Guardian<sup>24</sup> benoemt, is het gevaar van metaverse toepassingen in het algemeen, maar ook op de werkvloer, dat iedere werknemer een andere versie van de werkelijkheid voorgeschoteld kan krijgen. Personificatie van virtuele werelden, in games gemeengoed, kan ertoe leiden dat er verschillende percepties ontstaan. De controleerbaarheid hiervan is lastig.

Bij de metaverse kan isolatie van de realiteit plaatsvinden als men zich veel in een virtuele wereld bevindt. In drukke omgevingen kan dit ook positief uitwerken. In het verlengde hiervan kan bijvoorbeeld VR ook worden ingezet om mensen in een rustgevende omgeving te brengen, en kan deze afleiding zorgen voor ontspanning. Daarvoor zijn al apps op de markt.

#### **7.4.3 Fysieke belasting**

Hoewel de technologieën en hulpmiddelen in snel tempo lichter worden, is de huidige generatie VR- en AR-headsets nog steeds niet echt comfortabel om te dragen (fysieke belasting). De vraag om beelden met hoge resolutie heeft als gevolg dat schermen relatief zwaar zijn. Er zijn daarom zorgen om de ergonomie in relatie tot de hulpmiddelen (Bérestégui, 2024; EU OSHA, 2024). De vraag is nog niet beantwoord of een werkgever kan verplichten gedurende langere tijd een dergelijk hulpmiddel te dragen, dat geen persoonlijk beschermingsmiddel is en door de werknemer oncomfortabel wordt gevonden.

Toenemend schermgebruik, schermgebruik op zeer korte afstand van de ogen wat kan leiden tot bijziendheid (myopia) en gehoorschade door veelvuldig gebruik van koptelefoons, zijn gezondheidsklachten die genoemd worden als gevolg van XR. Bij VR-brillen is het beeld juist ingesteld om de focus ‘ver’ weg te houden en zo bijziendheid tegen te gaan. Er is ook sprake van virtual reality sickness (ook wel cybersickness of motion sickness) wanneer de beelden niet vloeiend genoeg zijn op het scherm. In sommige gevallen hebben head-up displays of see-through displays zoals smart glasses het nadeel dat de informatie ‘ver weg’ wordt geprojecteerd, maar de handelingen juist dichtbij moeten worden uitgevoerd. Het kan vermoeiend zijn voor de ogen om hiermee te werken.

Als laatste, maar niet de minst relevante, impact op arbeidsomstandigheden noemen we de verwachting dat extended reality en de metaverse tot fysieke onderbelasting kunnen leiden en het zittend werk bevorderen, mede doordat ook het reizen naar werk minder wordt.

<sup>23</sup> De avatar is een virtuele representatie van een persoon.

<sup>24</sup> [www.theguardian.com/commentisfree/2024/feb/15/i-tried-out-an-apple-vision-pro-it-frightened-me](https://www.theguardian.com/commentisfree/2024/feb/15/i-tried-out-an-apple-vision-pro-it-frightened-me)

## 7.4.4 Veiligheid

Het virtueel kunnen instrueren en trainen van werkkenden, is een van de belangrijkste kansen om de veiligheid te vergroten tijdens het werk. De verwachting is dat AR en VR hierdoor veiligheidsrisico's kunnen verminderen. Met behulp van VR of AR worden nu al processen (bijvoorbeeld bij onderhoudsmonteurs) en situaties (bijvoorbeeld bij militairen) geoefend in virtuele omgevingen of kunnen robots worden aangestuurd vanuit die virtuele omgeving. Oefeningen, instructies en trainingen kunnen 'levensecht' worden gemaakt. Door deze manier van leren – niet vanuit een schoolboek, maar door virtueel ervaren – kunnen werkkenden de veiligheid van situaties op de werkplek beter inschatten, waardoor naar verwachting er minder ongevallen plaatsvinden. AR en VR kunnen werkkenden ook *realtime*, tijdens uitvoering van werkzaamheden, attenderen op fouten en gevaren. Zodoende dragen ze bij aan een betere veiligheid en kwaliteit (Future Today Institute, 2022; Future Today Institute, 2023). Het gebruik van XR en industriële metaverses biedt een kans om een positieve impact te hebben op het vergroten van de veiligheid, door virtueel de praktijk in de industrie te doorlopen.

Risico's bij falende technologie zijn altijd aanwezig. Zoals de Apple Vision Pro laat zien, lijkt er een trend te zijn om AR-brillen gebaseerd op *see-through*-technologie (zoals Microsofts HoloLens) te vervangen door VR-brillen die de omgeving via een camera tonen. Wanneer dergelijke brillen gemeengoed worden op de werkvloer, bestaat het risico dat bij een lege batterij of storing, het beeld op de omgeving wegvalt, waardoor er veiligheidsrisico's ontstaan.




Naast fysieke veiligheid is er ook zorg over cybersecurity. Cybersecurity is belangrijk in het borgen van de virtuele identiteit en privacy op de werkplek. Ook kan er sprake zijn van seksueel en ander grensoverschrijdend gedrag (pesten, intimidatie, agressie en/of discriminatie) in de virtuele wereld.

## 7.4.5 Blootstelling aan stoffen

Blootstelling aan chemische stoffen kan verminderen, wanneer systemen op afstand gecontroleerd kunnen worden met digitalisering en extended reality-technieken. Daarbij kunnen deze technieken kunnen worden ingezet om werkkenden te instrueren, te trainen en te begeleiden in het gezond en veilig werken met gevaarlijke stoffen. Zo worden lassers al met VR-brillen getraind om te lassen, zonder blootgesteld te worden aan lasrook.

Tabel 5 toont een overzicht van de verschillende kansen en uitdagingen op de deelgebieden van gezond en veilig werken.

**Tabel 5** Overzicht van de verschillende kansen en uitdagingen op de deelgebieden van gezond en veilig werken voor metaverse en extended reality.

Metaverse en extended reality	 Subcluster	 Kansen	 Uitdagingen
<b>Mentale belasting</b>	Telewerken Metaverse & Extended reality	Verhoogde autonomie door flexibele invulling werktijden. Ondersteuning van werkende met relevante informatie, ook voor mensen met afstand tot de arbeidsmarkt, vergroot autonomie.	Vereenzaming Verstoorde sociale verhoudingen. Verlies van autonomie, leervermogen door digitaal voorschrijven van handelingen. Vervreemding van realiteit wanneer lange tijd in virtuele werelden.
<b>Fysieke belasting</b>	Metaverse & Extended reality		Onderbelasting door zittend werk. Fysieke belasting door dragen van (zware) VR-brillen. Kans op gehoorschade en VR- of motion sickness.
<b>Veiligheid</b>	Metaverse & Extended reality	Instrueren en trainen op het gebied van veiligheid. In de industriële metaverse kan het thema veiligheid vroegtijdig virtueel worden geanalyseerd.	Gevaar voor ontvreemding persoonsgegevens (Cyber security). Falende technieken, storing, kunnen zorgen voor onveilige situaties.
<b>Blootstelling aan stoffen</b>	Metaverse & Extended reality	Instrueren en trainen over werken met gevaarlijke stoffen leidt tot lagere blootstellingen.	Overprikkeling van de ogen door VR-brillen.

# 8 Samenvattende conclusies en aanbevelingen

De aanleiding voor de technologieradar was de verwachting dat toekomstige technologische ontwikkelingen een belangrijke drijvende kracht zullen zijn achter veranderingen op het gebied van gezond en veilig werken. De geïnterviewde experts en auteurs van bestudeerde literatuur delen die verwachting. Ze verwachten veel impact van (Generatieve) AI. De ontwikkelingen op dat gebied gaan momenteel ontzettend snel. Tegelijkertijd is de toekomstige ontwikkeling en de impact op gezond en veilig werken nog heel onzeker. Of de impact van nieuwe technologie op gezond en veilig werken positief of negatief gaat zijn, hangt voor een groot deel af van de manier waarop specifieke toepassingen worden ontwikkeld en ingezet. Ook de maatschappelijke acceptatie en de nieuwe wet- en regelgeving, zoals de AI-act, zijn van groot belang.

De technologieradar kijkt specifiek naar de thema's Mentale belasting, Fysieke belasting, Veiligheid en blootstelling aan stoffen. De verwachting is dat we langzaam een positieve impact gaan zien op het gebied van fysieke belasting (zwaar werk), veiligheid op het werk (ongevallen) en de blootstelling aan stoffen. Bepaalde technologieën zijn mede ontwikkeld om gezonder en veiliger te kunnen werken. Aan de andere wordt verwacht dat de mentale belasting toeneemt door de snelle technologische ontwikkelingen. Hierna volgt per technologische ontwikkeling een korte samenvatting van de impact op gezond en veilig werken.

## 8.1 Digitalisering

Voor de beschrijving van de impact van digitalisering op gezond en veilig werken wordt met name gekeken naar de gevolgen van sensor- en monitoringtechnologie, in combinatie met mogelijkheden om op afstand te kunnen werken door advanced connectivity. Sensor- en monitoringtechnologieën en advanced connectivity hebben een duidelijke positieve impact door het vroegtijdig signaleren van ongewenste arbeidsomstandigheden en incidenten, het verminderen van fysieke belasting en het stimuleren van gedragsverandering. Deze technologieën bieden ook de mogelijkheid om de gezondheid van werkenden over de tijd te monitoren en risico's zoals blootstelling aan gevaarlijke stoffen te detecteren. Dit kan leiden tot minder ongevallen en een veiligere werkomgeving. Constante monitoring echter beïnvloedt de

autonomie en privacy van werkenden negatief en dat kan mentale belasting verhogen. Tot slot zorgt digitalisering, als neveneffect, voor een toenemend risico op cyberaanvallen.

## 8.2 Artificiële intelligentie (AI)

Over het geheel genomen is vooral bij AI de belangrijkste conclusie dat de impact op gezond en veilig werken nog verschillende kanten kan opgaan, afhankelijk is van de specifieke toepassing en mede bepaald wordt door de manier waarop het geïmplementeerd en ingezet wordt. De verwachting is dat de arbeidsproductiviteit op veel plekken kan toenemen via de automatisering van cognitieve taken. Arbeidsproductiviteit is slechts indirect gerelateerd aan gezond en veilig werken, maar via de verandering van takenpakketten is er ook een direct effect van AI. De verwachting is dat AI een grote impact heeft op veel verschillende werkprocessen in veel verschillende sectoren en op zowel eenvoudige als complexe taken. De snelle ontwikkelingen in AI vereisen een groot aanpassings- en leervermogen van werkenden, waarin mogelijk niet iedereen kan meekomen. Aan de andere kant kan AI de afstand tot de arbeidsmarkt voor anderen weer verkleinen, doordat werkenden functioneel ondersteuning kunnen krijgen van AI (inclusieve technologie). AI kan verder de autonomie van werkenden beperken door gedetailleerde werkprocessen voor te schrijven en meer controle uit te oefenen, zoals bij algoritmisch management. Aan de andere kant kan algoritmisch management werkenden ook functioneel ondersteunen en hun autonomie vergroten, wanneer het wordt gebruikt om werkenden van feedback te voorzien of als het hen de juiste informatie kan geven. Verder kan AI leiden tot een intensivering van werk en een toename van de werkdruk. Wanneer eenvoudige taken, zoals verslaglegging, geautomatiseerd worden, verdwijnt 'de lucht' uit functies en wordt het takenpakket intensiever. Uiteraard gaat het om de balans in takenpakketten en de aansluiting op de behoeften en competenties van mensen, want te veel eenvoudige (routinematige) taken is ook onwenselijk in het kader van gezond en veilig werken. AI biedt ook mogelijkheden om de functionele steun (inhoudelijke hulpvragen) te vergroten. Aan de andere kant kunnen daardoor de sociale contacten (met managers) en sociale steun beperkt worden, want bij mensen gaat functionele en sociale steun vaak hand in hand. Verder kan AI ongevallen

voorkomen door bijvoorbeeld via beeldherkenning onveilige situaties vroegtijdig waar te nemen. AI kan ook helpen menselijke discriminatie te voorkomen door meer objectieve aansturing. Aan de andere kant is het belangrijk alert te zijn dat AI ongewild ook kan leiden tot nieuwe vormen van discriminatie door geautomatiseerde systemen.

### 8.3 Robots, cobots, autonome voertuigen en drones

Robotisering kan een grote impact hebben op de gezondheid en veiligheid op de werkvloer, maar de impact betreft een kleinere populatie dan de populatie waar digitalisering en AI een rol gaan spelen. De integratie van geavanceerde technologieën, zoals AI en beeldherkenning, maakt robots steeds capabeler. Hierdoor zijn ze in staat om zware en potentieel gevaarlijke taken over te nemen. Dit vermindert de fysieke belasting voor werkkenden en de blootstelling aan stoffen (of andere soorten blootstelling), wat bijdraagt aan een veiligere werkomgeving. Transport door autonome voertuigen in magazijnen kan het aantal ongevallen verminderen, aangezien veel ongevallen door menselijke bestuurders worden veroorzaakt. Wel blijft aandacht nodig voor werkzaamheden aan en rond robots wanneer deze bijvoorbeeld in storting zijn. Over het algemeen is de verwachting dat robotisering de fysieke belasting, veiligheid en blootstelling aan stoffen op de werkplek gaat verbeteren. Met de toename van automatisering en inzet van robots is er wel een risico dat het sociale contact en de onderlinge steun tussen collega's afneemt, bijvoorbeeld doordat er minder mensen op de werkvloer zijn en de afstanden tussen werkplekken groter zijn. Met meer robots op de werkvloer en meer samenwerking tussen mens en robot, bestaat eveneens het risico dat werkkenden minder controle en autonomie krijgen in de uitvoering van hun werkzaamheden.

### 8.4 Nieuwe materialen

Nieuwe materialen hebben een duidelijke impact op gezond en veilig werken, hoewel deze impact vaak indirect is en dikwijls pas via de latere toepassing van deze materialen plaatsvindt. Veel toepassingen zijn er in de digitalisering en energietransitie, maar ook in het maken van sterkere, lichtere en/of flexibele gebouwen, apparaten en persoonlijke beschermingsmiddelen. Een belangrijk deel van de impact van nieuwe materialen uit zich door toepassingen bij digitalisering. Denk bijvoorbeeld aan

nieuwe batterijtechnologie in wearables. Toepassingen van nieuwe materialen dragen daarnaast vooral bij aan verbeteringen op het gebied van veiligheid en blootstelling aan stoffen vanwege de intrinsieke eigenschappen van de nieuwe materialen. Ze zijn vaak kleiner, lichter, sterker en/of flexibeler, kunnen minder schadelijk zijn voor mens en milieu en kunnen gebruikt worden om werkkenden te beschermen. Er zijn ook zorgen over de risico's van het werken met nieuwe materialen. Er is onduidelijkheid over de intrinsieke gezondheidsrisico's van een nieuw materiaal dat tijdens het verwerken of bewerken van nieuwe materialen, bijvoorbeeld in de afvalverwerking, kan vrijkomen. Het safe-and-sustainable-by-design (SSbD) -concept is een kans om aan de voorkant ervoor te zorgen dat er met nieuwe materialen gezonder en veiliger gewerkt wordt.

### 8.5 Extended reality en de metaverse

Met name waar het gaat om veiligheid en mentale belasting hebben Extended Reality (XR) en de metaverse impact op gezond en veilig werken. De verwachting is dat XR veiligheidsrisico's en fysieke belasting vermindert, doordat werkkenden met realistische simulaties virtueel trainingen en instructies kunnen volgen. Het biedt daarnaast ook voordelen, zoals de verhoogde mate van regie over het (remote) indelen van werk. Het brengt echter ook uitdagingen met zich mee, zoals mentale belasting door een verstoorde werk-privébalans, intensivering van werk, privacy-kwesties en het risico op isolatie (verminderd sociaal contact). Bovendien kan het gebruik van XR-apparatuur leiden tot fysieke klachten, zoals VR-ziekte en bijziendheid. De metaverse wordt in verband gebracht met telewerken en de impacts die daarmee gepaard gaan, zoals verhoogde autonomie en flexibiliteit in indelen van de werktijd, maar ook met meer vereenzaming thuis. De industriële metaverse, die gebruikt kan worden om de opzet van industriële complexen vooraf te ontwerpen en testen, biedt een kans om het thema Gezond en veilig werken al in een vroeg stadium mee te nemen.

### 8.6 Samenvattend

Hieronder staat een tabel met de belangrijkste impactgebieden per technologie. Hoe donkerder de kleur, hoe meer impact verwacht wordt, waarbij de impact zowel positief of negatief zijn. Daarbij geldt de kanttekening dat de technologieën aan elkaar gerelateerd zijn. AI is bijvoorbeeld een belangrijk onderdeel van robotica.



**Tabel 6** Impactgebieden gezond en veilig werken

	Digitalisering	Artificiële intelligentie	Robotica	Nieuwe materialen	Extended reality /metaverse
Mentale belasting	Dark Green	Dark Green	Light Green	Light Green	Light Green
Fysieke belasting	Light Green	Light Green	Dark Green	Light Green	Light Green
Veiligheid	Light Green	Light Green	Light Green	Light Green	Light Green
Blootstelling	Light Green	Light Green	Light Green	Dark Green	Light Green

Geredeneerd vanuit de technologieën zien we in de tabel dat digitalisering en artificiële intelligentie de manier waarop we werken in grote mate veranderen. De impact van deze technologieën is groot, wijdverspreid, zowel positief als negatief, en betreft vooral mentale belasting. Robotica heeft een sterk effect op het verminderen van de fysieke belasting en veiligheid doordat zwaar werk kan worden geautomatiseerd. Risico's van nieuwe materialen worden vaak pas op langere termijn waarneembaar, maar het concept van SSbD (safe-and-sustainable-by-design) biedt kansen om negatieve impact op gezond en veilig werken te minimaliseren, mits het concept op goede wijze wordt geïntroduceerd. De opkomst van de metaverse/extended reality biedt nieuwe positieve mogelijkheden voor veiligheid en blootstelling aan stoffen, maar vormt een risico voor mentale belasting.

Meer specifiek en geredeneerd vanuit de impactgebieden, verwachten we dat de mentale belasting een risico vormt door intensivering van werk (meer complexere taken en verdwijnen van 'rustmomentjes'), afname van autonomie in bepaalde beroepen, minder sociaal contact en (baan)onzekerheid in de context van snelle veranderingen. Aan de andere kant zien we ook dat technologieën medewerkers juist kunnen ondersteunen (bijvoorbeeld met relevante informatie), de autonomie kunnen vergroten en het werk makkelijker kunnen maken (minder intensief werk). Bij mentale belasting gaat het om de juiste balans in het werk (intensieve taken en minder intensieve taken) en goede aansluiting op de competenties van de werkenden. Daarnaast verwachten we dat de fysieke belasting afneemt, door onder meer zwaar werk te automatiseren. Dit betekent wel een groter risico op onderbelasting (te weinig bewegen).

Op het gebied van veiligheid en blootstelling is de verwachting dat nieuwe technologieën deze risico's beperken, via automatisering, aansturing op afstand, sensoren, safe-and-sustainable-by-design, betere beschermingsmiddelen, en betere trainingsmogelijkheden (door bijvoorbeeld VR). Hoewel de veiligheid en blootstelling naar verwachting in positieve zin worden beïnvloed, blijven er risico's bestaan door onvoorziene risico's rondom nieuwe materialen, meer technologische toepassingen die vragen om meer onderhoud (wat altijd bepaalde risico's met zich meebrengt), meer storingen en kans op ongelukken in implementatie en vervangingsperiodes.

## 8.7 Aanbevelingen

Technologische ontwikkelingen zijn een belangrijke drijvende kracht achter veel maatschappelijke veranderingen. De belangrijkste redenen om in technologie te investeren, zijn betere producten en diensten en efficiëntere werkprocessen. Daarvan kan de samenleving profiteren, bijvoorbeeld in het licht van een krappe arbeidsmarkt, een toenemende zorgvraag en de opgave rondom de klimaatverandering. De impact op gezond en veilig werken is slechts een onderdeel in de discussie over het belang en de impact van technologische ontwikkelingen. Het is wat ons betreft ook niet de vraag of we technologische ontwikkelingen moeten stimuleren of niet, maar de vraag hoe we deze technologische ontwikkelingen zo kunnen beïnvloeden dat ze een positieve impact hebben op zowel organisatieprestaties als de kwaliteit van werk (waaronder de arbeidsinhoud en arbeidsomstandigheden).

Technologische ontwikkelingen betekenen veel voor gezond en veilig werken. Met name de ontwikkelingen op het gebied van AI gaan momenteel heel snel. Tegelijkertijd zijn die ontwikkelingen en hun impact heel onzeker. Hoewel de technologische ontwikkelingen onafhankelijk zijn besproken, komen onderlinge verbanden op verschillende plaatsen in de tekst naar voren. We willen deze relaties echter nogmaals benadrukken, onder meer omdat het de inschatting van de toekomstige ontwikkelingen en impact nog complexer maakt. Digitalisering is bijvoorbeeld een noodzakelijke voorwaarde voor AI en met AI ontstaan er weer allerlei nieuwe mogelijkheden op het gebied van robotica. Maar ook sensortechnologie is onmisbaar voor toepassingsgebieden van AI en robotica. Nieuwe materialen, zoals betere en lichtere batterijtechnologie, bieden mogelijkheden voor VR-brillen en exoskeletten en (andere) digitale wearables en sensoren. Een doorbraak binnen een technologiecluster, zoals AI, kan weer voor veel nieuwe toepassingen zorgen en ook voor versnelling binnen andere technologieclusters. Vanwege deze complexiteit en onvoorspelbaarheid, maar ook vanwege de snelheid van veel technologische ontwikkelingen, adviseren we om deze technologieradar niet eenmalig, maar periodiek uit te voeren. Daarmee zijn de kansen die de technologieën bieden, te verzilveren en de risico's tijdig te ondervangen.

Deze radar is een eerste inventarisatie van een breed palet aan technologieën en we maken een eerste globale inschatting van de impact. We benadrukken dat dit geen compleet beeld, mede omdat een systematische literatuurstudie niet heeft plaatsgevonden. We adviseren beleidsmakers, sociale partners, toezichhouders, sectororganisaties en onderzoeksinstellingen om naar aanleiding van deze eerste inschattingen verdiepende impact assessments uit te voeren op specifieke technologische toepassingen. Impact assessments naar algoritmisch management en generatieve AI worden momenteel uitgevoerd om deels hierin te voorzien (zie bijvoorbeeld Das et al., 2024). Zeker op het gebied van AI zijn deze specifieke impact assessments van groot belang gezien de snelle ontwikkelingen en grote mate van onzekerheid.

Daarnaast adviseren we beleidsmakers, sociale partners, toezichhouders, sectororganisaties en onderzoeksinstellingen om de mogelijkheden te verkennen om technologische toepassingen te stimuleren die beogen de kwaliteit van werk te verbeteren (veiliger, minder fysiek belastend et cetera). Ook technologieën die niet primair gericht zijn op gezond en veilig werken, zijn zodanig te ontwikkelen en te implementeren, dat ze een positieve impact hebben op gezond en veilig werken. In de ontwikkelfase van de nieuwe technologieën

moet dus voldoende aandacht zijn voor de impact op werkenden (denk aan safe-and-sustainable-by-design). Zo is er bij de groeifondsaanvraag voor de ontwikkeling van netwerktechnologieën (6G) ook een werkpakket om na te denken over de gevolgen voor werkenden en de kwaliteit van werk. Maar de aandacht voor de gevolgen van technologie voor het menselijk kapitaal is momenteel nog beperkt en staat vaak niet in verhouding tot de investeringen in de technologieën zelf. Hoewel AI-toepassingen momenteel veel aandacht verdienen gezien de grote potentiële impact en snelle ontwikkelingen, is hiervoor aandacht nodig bij de ontwikkeling van alle clusters van technologieën.

Ook is het belangrijk om regelmatig te evalueren of het huidige beleid (waaronder de wet- en regelgeving) nog voldoende in staat is om de negatieve effecten van toekomstige technologische ontwikkelingen te beperken. De technologische ontwikkelingen gaan heel snel en beleidswijzigingen kosten vaak tijd. Het is belangrijk om het beleid tijdig te toetsen aan mogelijke toekomstige risico's. Het is onhaalbaar om huidige wet- en regelgeving en overige beleidsinitiatieven te toetsen aan alle mogelijke toekomstige risico's. Toch zijn de belangrijkste verwachte risico's, zoals de intensivering van werk en de verwachte toename van de mentale belasting in bredere zin, aanleiding om in te schatten of het huidige beleid toereikend zal zijn. Beleidsmakers doen dat regelmatig, maar zouden daarbij beter ondersteund kunnen worden door inzichten uit (ex ante) impact assessments, waarbij het huidige beleid centraal staat. Dit zou een belangrijke stap kunnen zijn in het kader van preventie (zie ook Arbovisie 2040). Ook is het belangrijk te evalueren of het huidige beleid voldoende inspeelt op de mogelijkheden van nieuwe technologieën (zoals nieuwe sensoren rondom blootstelling) om werkers optimaal te beschermen tegen risico's.

Daarnaast zou ook op de werkvloer meer toekomstgericht gehandeld kunnen worden. Bijvoorbeeld via een prospectieve risico-inventarisatie waarbij bedrijven bij veranderprocessen, zoals de invoering van robotica, vooraf nadenken over de mogelijke consequenties voor gezond en veilig werken. Hoewel de huidige wetgeving bedrijven al verplicht zijn om de RI&E bij te werken wanneer de omstandigheden veranderen, leidt dit vooral tot het achteraf (na invoering van de nieuwe technologie) aanpassen van de RI&E in plaats van een proactieve houding voor gezond en veilig werken bij verandertrajecten. Dit vraagt ook om een andere expertise bij arbo-kerndeskundigen, die in staat moeten zijn om over technologische ontwikkelingen te adviseren en deze indien nodig te toetsen.

Technologische ontwikkelingen kunnen veel bijdragen aan onder meer de productiviteitsverbeteringen en daarmee onze welvaart. Tegelijkertijd moeten we ook de bredere gevolgen van deze technologische ontwikkelingen tijdig onderkennen, waaronder de mogelijke gevolgen op het gebied van gezond en veilig werken. Dat is niet de hoogste prioriteit van technologieontwikkelaars of de organisaties die deze technologieën implementeren (TNO/RIVM, 2024; Hulsegge et al., 2023; Van der Beek et al., 2023). En als gezond en veilig werken expliciet onderdeel is van de businesscase voor een technologische toepassing in organisaties, dan gaat de aandacht vaak allereerst uit naar meer concrete aspecten zoals ergonomie of veiligheid, en minder naar aspecten zoals autonomie, variatie van takenpakketten en mentale belasting (Van der Beek et al, 2023). Dit staat in contrast met onderzoek waaruit blijkt dat mentale belasting en toenemende controle (en daarmee minder autonomie) volgens werknemers de belangrijkste risico's zijn van de implementatie van nieuwe technologieën (Kraan et al., 2024).

Tot slot willen we benadrukken dat het van groot belang blijft om de potentiële kansen en uitdagingen van technologische ontwikkelingen goed in kaart te brengen, te begrijpen en de ontwikkelingen in de tijd te blijven volgen, aangezien ze de gezondheid en veiligheid op het werk sterk kunnen beïnvloeden. De manier waarop en de randvoorwaarden waarbinnen de technologieën op het werk geïntroduceerd worden, zijn cruciaal om kansen te benutten en risico's te beperken.



# 9 Referenties

- Acemoglu, D., & Restrepo, P. (2020). The wrong kind of AI? Artificial intelligence and the future of labour demand. *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, 13(1), 25-35.
- Arabshahi, M., Wang, D., Sun, J., Rahnamayiezekavat, P., Tang, W., Wang, Y., & Wang, X. (2021). Review on sensing technology adoption in the construction industry. *Sensors*, 21(24), 8307.
- Arana-Landín, G., Laskurain-Iturbe, I., Iturrate, M., & Landeta-Manzano, B. (2023). Assessing the influence of industry 4.0 technologies on occupational health and safety. *Heliyon*, 9(3).
- Braakhuis, H. & Fransman, W. (2024). The future of chemicals is Safe and Sustainable by Design. TNO, Zeist.
- Balje, J. (2021). Opgave AI. De nieuwe systeemtechnologie.
- Belkom, R van. (2019). Duikboten zwemmen niet: de zoektocht naar intelligente machines. Stichting Toekomstbeeld der Techniek, Den Haag.
- Bérastégui, P. (2024). Working in the metaverse: what are the risks?
- Breque, M., De Nul, L., & Petridis, A. (2021). *Industry 5 - Towards a Sustainable, Human-Centric and Resilient European Industry*.
- Bronzwaer, S. (2024a). De chatbot is nu bijna een mens. NRC.
- Bronzwaer, S. (2024b). Good morning, zegt de auto zonder chauffeur. Gaat de zelfrijdende auto doorbreken. [NRC.nl](https://www.nrc.nl).
- Canedo, D., Fonseca, P., Georgieva, P., & Neves, A. J. (2021). A deep learning-based dirt detection computer vision system for floor-cleaning robots with improved data collection. *Technologies*, 9(4), 94.
- Chui, M., Hazan, E., Roberts, R., Singla, A., & Smaje, K. (2023). The economic potential of generative AI.
- Das, D., Kool, L., Zoomer, T., Van Dam, L., Preenen, P., & Van der Torre, W. (2024). Eigen ritme of algoritme?: Een verkenning van algoritmisch management voorbij de platformeconomie.
- Dean, J. (2022). AI isn't as smart as you think it is, but it could be. Ted Talk. Jeff Dean: AI isn't as smart as you think -- but it could be | TED - YouTube
- Digitale Overheid (2024). *Europese AI Act goedgekeurd*. [www.digitaleoverheid.nl/nieuws/europese-ai-act-goedgekeurd/](https://www.digitaleoverheid.nl/nieuws/europese-ai-act-goedgekeurd/)
- EU-OSHA (2019). OSH and the future of work: benefits and risks of artificial intelligence tools in workplaces. Discussion paper. OSH and the Future of Work: benefits and risks of artificial intelligence tools in workplaces | Safety and health at work EU-OSHA ([europa.eu](https://europe.eu))
- EU OSHA (2024). Worker exposure to virtual and augmented reality and metaverse technologies: How much do we know? [osha.europa.eu/sites/default/files/documents/worker-exposure-virtual-reality\\_discussion\\_paper\\_EN.pdf](https://osha.europa.eu/sites/default/files/documents/worker-exposure-virtual-reality_discussion_paper_EN.pdf)
- Ex, L., Nieuwenhuizen, W., Hijstek, B., Roolvink, S., & Van Huijstee, M. (2023). *Immersieve technologieën*. [www.rathenau.nl/nl/digitalisering/immersieve-technologieen](https://www.rathenau.nl/nl/digitalisering/immersieve-technologieen)
- Farcas, L., Pineiro, A. M., Sintés, J. R., Rauscher, H., & Rasmussen, K. (2022). Advanced materials foresight: research and innovation indicators related to advanced and smart nanomaterials. *F1000Research*, 11.
- Farinha, J., Vesnic Alujevic, L., Alvarenga, A. and Polvora, A., Everybody is looking into the Future! A literature review of reports on emerging technologies and disruptive innovation, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023, doi:10.2760/144730, JRC134319.
- Fransman, W., Pronk, A., Schelvis, R. Moons, A. (2017). Werkgerelateerde kanker uitbannen. TNO, Zeist.
- Fisher, E.; Flynn, M.A.; Pratap, P.; Vietas, J.A. Occupational Safety and Health Equity Impacts of Artificial Intelligence: A Scoping Review. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2023, 20, 6221. [doi.org/10.3390/ijerph20136221](https://doi.org/10.3390/ijerph20136221)
- Future Today Institute (2022). *The Future Today Institute's 15<sup>th</sup> Annual Tech Trends Report*.
- Future Today Institute (2023). *2023 Tech Trends Report. 16<sup>th</sup> edition*.
- Future Today Institute (2024). *Tech Trends Report, 17<sup>th</sup> Edition*.

- Gartner (2023) Gartner Top 10 Strategic Technology Trends 2023
- Get-into gear. (2009). Industrial Vehicle Technology International, 32–37.
- Gmyrek, P., Berg, J., & Bescond, D. (2023). Generative AI and jobs: A global analysis of potential effects on job quantity and quality. *ILO Working Paper*, 96.
- Grampp, M., Laude, D., & Rohr, D. (2022). TrendRadar: The Future of Health. [www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ch/Documents/life-sciences-health-care/deloitte-ch-en-trendradar-future-of-health.pdf](http://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ch/Documents/life-sciences-health-care/deloitte-ch-en-trendradar-future-of-health.pdf)
- Held, N., Soeter, M., Van Gent, S., Wiezer, N., Loots, G., & Niamut, O. (2024). Immersive gathering: insights into virtual workplace meetings. *Frontiers in Virtual Reality*, 5, 1391662.
- Howard J, Schulte P. (2024). Managing workplace AI risks and the future of work. *American Journal of Industrial Medicine*. 2024; 67 (980 993). doi:10.1002/ajim.23653
- Hulsegge, G., van der Torre, W., Verbiest, S., & Oeij, P. (2022). De impact van technologie op de taken, skills en kwaliteit van de arbeid: Hoe verandert het werk van een elektro-en onderhoudsmonteur?. *Tijdschrift voor Arbeidsvraagstukken*, 38(2). doi: <https://doi.org/10.5117/TVA2022.2.004.HULS>
- International Electrotechnical Commission (IEC) (2020). Safety in the future. Safety in the future | IEC
- Joao, F., Lucia, V. A., Antonio, A., & Alexandre, P. (2023). Everybody is looking into the Future! A literature review of reports on emerging technologies and disruptive innovation.
- Karstens, B., Hijstek, B., & Kool, L. (2023). *Quantum technologie in de samenleving*. [www.rathenau.nl/sites/default/files/2023-05/Scan\\_Quantumtechnologie\\_in\\_de\\_samenleving\\_Rathenau%20Instituut.pdf](http://www.rathenau.nl/sites/default/files/2023-05/Scan_Quantumtechnologie_in_de_samenleving_Rathenau%20Instituut.pdf)
- Kim, D. W., Lee, J. H., Kim, J. K., & Jeong, U. (2020). Material aspects of triboelectric energy generation and sensors. *NPG Asia Materials*, 12(1), 6.
- Kok, B. (2021). Top 5 toepassingen van kunstmatige intelligentie (AI): juli. [mediaperspectives.nl/top-5-toepassingen-van-ai-juli-2021/](http://mediaperspectives.nl/top-5-toepassingen-van-ai-juli-2021/)
- Kool, L., Hijstek, B., Van Eeden, Q., & Das, D. (2023). *Generatieve AI*. [www.rathenau.nl/nl/digitalisering/generatieve-ai](http://www.rathenau.nl/nl/digitalisering/generatieve-ai)
- Krause, F., & Douwes, M. (2022). *Fysieke belasting reduceren: De factor mens in procesverandering (vertrouwelijk)*.
- Krom, A., Ter Burg, W., Van de Weijger, V. P. L., & Palmén, N. G. M. (2018). Het gebruik van biomonitoring en sensing binnen de arbeidsomstandigheden - praktische en ethische overwegingen. RIVM, Bilthoven.
- Lin, H., Buerki-Thurnherr, T., Kaur, J., Wick, P., Pelin, M., Tubaro, A., Carniel, F. C., Tretlach, M., Flahaut, E., & Iglesias, D. (2024). Environmental and Health Impacts of Graphene and Other Two-Dimensional Materials: A Graphene Flagship Perspective. *ACS nano*, 18(8), 6038–6094.
- Linturi, R., & Kuusi, O. (2019). Societal transformation 2018–2037: 100 anticipated radical technologies, 20 regimes, case Finland. Helsinki: Committee for the Future
- Marassi, S., & Bolte, J., 2024. Leveraging Data Protection Law for Protecting Workers’ Fundamental Right to Health and Safety in the Workplace: the Amazon Case. *International Labor Rights Case Law*, 10(2), 263–268. [doi.org/10.1163/24056901-10020021](https://doi.org/10.1163/24056901-10020021)
- Mc Kinsey (2023). Technology trends outlook 2023.
- Ministerie van Binnenlandse Zaken (2024). *Overheidsbrede visie Generatieve AI*. [open.overheid.nl/documenten/9aa7b64a-be51-4e6a-ad34-26050b8a67ef/file](https://open.overheid.nl/documenten/9aa7b64a-be51-4e6a-ad34-26050b8a67ef/file)
- Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (2021). *Blockchain Brzo – Leren van HiPo's*. [crisislab.nl/wordpress/wp-content/uploads/Praktijkproef-Brzo-Blockchain-CGI.pdf](https://crisislab.nl/wordpress/wp-content/uploads/Praktijkproef-Brzo-Blockchain-CGI.pdf)
- MIT technology review insights (2024). *The emergent industrial metaverse*.
- Noponen, N., Feshchenko, P., Auvinen, T., Luoma-Aho, V., & Abrahamsson, P. (2023). *Taylorism on steroids or enabling autonomy? A systematic review of algorithmic management*. *Management Review Quarterly*. [doi.org/10.1007/s11301-023-00345-5](https://doi.org/10.1007/s11301-023-00345-5)
- Overstegen, R. (2024). Google heeft eigen chatbot niet onder controle. [FD.nl. fd.nl/tech-en-innovatie/1509068/google-heeft-eigen-chatbot-niet-onder-controle](https://fd.nl/tech-en-innovatie/1509068/google-heeft-eigen-chatbot-niet-onder-controle)

Palmen, Krom, van Deurssen en Godderis, Professioneel handelen in de arbeidshygiëne; (naar) een nadere invulling van het concept, Tijdschrift voor Toegepaste Arbeidwetenschap, geaccepteerd voor publicatie

Parent-Rocheleau, X., & S.K. Parker (2022). Algorithms as work designers: How algorithmic management influences the design of jobs. *Human resource management review*, 32(3), 100838.

Pavlovska, I., Akūlova, L., Lece, A., Martinsone, Ž., Paegle, L., Kļaviņa, A., Sprūdža, K. L., & Mārtiņšone, I. (2023). Assessment of occupational exposures in the 3D printing: current status and future prospects. *Advances in 3D Printing*.

Piasna, A. (2024). Job quality and digitalisation. *ETUI Research Paper-Working paper*.

Pot, F. (2024). AI for good work. A. Ponce Del Castillo (Red.), *Artificial intelligence, labour and society*, 183-196.

Pronk, A., Stierum, R. (2018). Exposome: connecting the dots for effective prevention of disease. Zeist, TNO.

Ramos, T., & Glaeser, R. (2024). *The EU AI Act and general-purpose AI*. [www.taylorwessing.com/en/insights-and-events/insights/2024/03/the-eu-ai-act-and-general-purpose-ai](http://www.taylorwessing.com/en/insights-and-events/insights/2024/03/the-eu-ai-act-and-general-purpose-ai)

RIVM&TNO (2023). *De Toekomst van Gezond en Veilig Werken, Een brede horizon*.

RIVM&TNO (2024). *De impact van maatschappelijke ontwikkelingen op de psychosociale arbeidsbelasting van werkenden*

Robbins H, Stone T., Bolte JFB, Van den Hoven J, 2021 - Legibility as a Design Principle: Surfacing Values in Sensing Technologies, *Science, Technology and Human Values* 46(5): 1104-1135, [doi.org/10.1177/0162243920975488](https://doi.org/10.1177/0162243920975488)

Rosen, P., Heinold, E., Fries-Tersch, E., & Wischniewski, S. (2022). Advanced robotics and automation: implications for occupational safety and health. *Brussel: European Agency for Safety and Health at Work*. doi, 10, 789276.

SBB (2023). *Trendverkenning kunstmatige intelligentie*. [trendrapportage.s-bb.nl/trendverkenningen/kunstmatige-intelligentie/ki-algemeen/?tab=inleiding&item=definitie](https://trendrapportage.s-bb.nl/trendverkenningen/kunstmatige-intelligentie/ki-algemeen/?tab=inleiding&item=definitie)

Sociaal-Economische Raad (SER 2020). Biomonitoring en sensing - Gezondheid en privacy op de werkvloer centraal. Den Haag, SER. VERKENNING & ADVIES 20/04 Biomonitoring en sensing - Gezondheid en privacy op de werkvloer centraal ([ser.nl](http://ser.nl))

Soeteman-Hernandez LG., Margarita D. Apostolova, Cindy Bekker, Susan Dekkers, Roland C. Grafström, Monique Groenewold, Yordan Handzhiyski, Petra Herbeck-Engel, Karl Hoehener, Varvara Karagkiozaki, Sean Kelly, Annette Kraegeloh, Stergios Logothetidis, Christian Micheletti, Penny Nymark, Agnes Oomen, Thies Oosterwijk, Isabel Rodríguez-Llopis, Stefania Sabella, Araceli Sanchez Jiménez, Adriënné J.A.M. Sips, Blanca Suarez- Merino, Isabella Tavernaro, Jacqueline van Engelen, Susan W.P. Wijnhoven, Cornelle W. Noorlander, Safe innovation approach: Towards an agile system for dealing with innovations, *Materials Today Communications*, Volume 20, 2019, [doi.org/10.1016/j.mtcomm.2019.100548](https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2019.100548).

Steijn, W.M.P.; Van Gulijk, C.; Van der Beek, D.; Sluijs, T. A System-Dynamic Model for Human-Robot Interaction; Solving the Puzzle of Complex Interactions. *Safety* 2023, 9, 1. [doi.org/10.3390/safety9010001](https://doi.org/10.3390/safety9010001)

Swan, M. (2016). The future of brain-computer interfaces: blockchaining your way into a cloudmind. *Journal of Ethics and Emerging Technologies*, 26(2), 60-81.

TNO (2024). Quantumtechnologie in ontwikkeling. [www.tno.nl/nl/digitaal/semicon-quantum/quantumtechnologie/](http://www.tno.nl/nl/digitaal/semicon-quantum/quantumtechnologie/)

Vahabi, H., Laoutid, F., Mehrpouya M., RezaSaeb, M., Dubois, P. (2021). Flame retardant polymer materials: An update and the future for 3D printing developments. *Materials Science and Engineering: R: Reports* Volume 144, April 2021.

Van Bree, T., Gijsbers, G., Otto, D., Janssen, V., Winkels, E., Goes, M., Gielgens, L., & Van der Horst, T. (2024). *Herijking sleuteltechnologieën 2023*. [www.tno.nl/publish/pages/8843/tno\\_herijking\\_sleuteltechnologie\\_2023\\_v4.pdf](http://www.tno.nl/publish/pages/8843/tno_herijking_sleuteltechnologie_2023_v4.pdf)

Van Gulijk, C., Bowdler, M., & Harkema, D. (2023). *Verkenning op de risico's en kansen voor werkenden ten gevolge van Algoritmisch Management*. [arbeidsveiligheid.tno.nl/wp-content/uploads/sites/7/2024/04/TNO-2023-P12402-Algorithmisch-Management\\_opgemaakt-v4.pdf](https://arbeidsveiligheid.tno.nl/wp-content/uploads/sites/7/2024/04/TNO-2023-P12402-Algorithmisch-Management_opgemaakt-v4.pdf)

Van Roosmalen, R. (2022). AI veroverd de komende jaren de logistieke sector'. [www.transportlogistiek.nl/branche/ai-veroverd-de-komende-jaren-de-logistieke-sector/](http://www.transportlogistiek.nl/branche/ai-veroverd-de-komende-jaren-de-logistieke-sector/)

Van de Ven, H., Van den Bergh, R., Verbiest, S. (2021). Eerste Meting Platformarbeid. TNO, Leiden.

Van den Heuvel. S.G., Fernandez Beiro, L. & Van Dam, L. M. C. (2023). Nationale Enquête Arbeidsomstandigheden 2022: Resultaten in vogelvlucht

Van der Beek, D, Van Oosterhout, J., Van der Torre, W., Douwes, M. D., Van Gulijk, C. (2023). AGV's en AMR's in de logistiek: risico's en kansen voor werknemers in distributiecentra en magazijnen. Leiden, TNO.

Van der Beek, D. en Van Gulijk. C. (2021). Veiligheid van geavanceerde mens-robot interactie vraagt om grondige herziening risicobeheersing op diversie systeemniveau. Tijdschrift voor toegepaste Arbowetenschap 2021;34 (3).

Workplace vitality hub (2022). Geraadpleegd op 14 september 2022, van [workplacevitalityhub.nl/nieuws/deep-dive-expert-sessionbroedplaats-voor-vitale-innovaties/](http://workplacevitalityhub.nl/nieuws/deep-dive-expert-sessionbroedplaats-voor-vitale-innovaties/)

World Economic Forum (WEF) 2023. Future of Jobs. Insight report May 2023. ISBN-13: 978-2-940631-96-4

Zoomer, T., Bouwens, L., Van de Ven, H., Beckers, D., Hooftman, W., & Oude Hengel, K. (2021). Thuiswerkers in tijden van de COVID-19-pandemie: Inzichten in verandering in gezondheid en arbeidsomstandigheden, en de rol van persoonskenmerken. Tijdschrift voor Arbeidsvraagstukken, 37(1), 51-74.



# Bijlage 1: Overzicht met geraadpleegde experts

Birgitte Blatter, hoofd afdeling Toekomstverkennen Volksgezondheid, RIVM

Daan Huizer, arbeidshygiënist CSO, Chemrade Software BV

Djurre Das, onderzoeker Technologie en arbeid, *Rathenau Instituut*

Dolf van der Beek, onderzoeker Arbeidsveiligheid, TNO

Frank Pot, onderzoeker Kwaliteit van de arbeid, *emeritus-hoogleraar Radboud Universiteit*

Freek Bomhof, consultant AI, TNO

Jakko van Kampen, onderzoeker Arbeidsveiligheid, RIVM

Joost van Rooij, consultant Toxicologie en arbeidshygiëne, Caesar Consult.

Karin Proper, CSO Arbeid en gezondheid, *bijzonder hoogleraar Amsterdam UMC en RIVM*

Marjolein Douwes, onderzoeker Fysieke belasting, TNO

Nicole Palmen, onderzoeker Arbeidshygiëne en toxicoloog, RIVM

Noortje Wiezer, onderzoeker Mentale gezondheid, TNO

Thijmen van Bree, onderzoeker Technologie en maatschappelijke impact, TNO

Wouter Fransman, onderzoeker Arbeidshygiëne, TNO

Dit is een uitgave van:

**TNO**  
**Healthy Living & Work**  
Postbus 2215 | 2333 BE Leiden  
[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid  
en Milieu**  
Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven  
[www.rivm.nl](http://www.rivm.nl)

januari 2025

De zorg voor morgen  
begint vandaag