

NANOTECHNOLOGIE IN DIENST VAN VEILIGHEID EN JUSTITIE

Verkenning van toepassingsmogelijkheden



Science, Technology and Policy Studies (STePS) in samenwerking met
prof. Pepijn Pinkse van de Complex Photonic Systems groep,
Universiteit Twente

Auteurs

dr. Verena Schulze Greiving
dr. ir. Haico te Kulve
dr. Kornelia Konrad
prof. Stefan Kuhlmann
prof. Pepijn Pinkse

In opdracht van

Wetenschappelijk Onderzoek- en Documentatiecentrum (WODC),
Ministerie van Veiligheid en Justitie

Leden Begeleidingscommissie

dr. ir. R. van Est (Rathenau Instituut, voorzitter van de begeleidingscommissie)
dr. ir. D.J. Maas (TNO)
drs. P. Arts (Ministerie van Veiligheid en Justitie / Innovatieteam)
mr. R.H. Hanoeman (Ministerie van Veiligheid en Justitie / Innovatieteam)
dr. mr. ir. B.H.M. Custers (Universiteit Leiden – eLaw, centrum voor recht en digitale technologie)
drs. C.S. van Nassau (Wetenschappelijk Onderzoek- en Documentatiecentrum)

Cover

Afbeeldingen zijn gebruikt met dank aan het Ministerie van Defensie, Schiphol, Ten Cate en Núria Taberner Carretero.

Voorwoord

Van beschermende kleding die zeer sterk en licht is, veilige en beveiligde identificatie tot het kunnen detecteren van gevaarlijke stoffen op een plaats delict. De ontwikkelingen van en met nanotechnologie gaan razendsnel. We zien deze ontwikkelingen en Veiligheid en Justitie (VenJ) wil weten wat dit betekent voor het ministerie én de uitvoeringsdiensten.

Het innovatieteam van VenJ is aanjager van innovatie voor de hele VenJ-organisatie. Dit team zorgt ervoor dat het ministerie aanhaakt op nieuwe technologische en maatschappelijke ontwikkelingen. Daar komt ook deze verkenning voor nanotechnologie voor het veiligheidsdomein uit voort. Het innovatieteam heeft aan het WODC gevraagd om dit verkennende onderzoek naar nanotechnologie in haar programmering op te nemen. Nanotechnologie past in een ruimer kader van WODC-onderzoek naar kansen van nieuwe technologieën voor VenJ, zoals het gebruik van drones, ANPR (Automatic Number Plate Recognition) en (grootschalig) DNA onderzoek. In opdracht van het WODC heeft de universiteit Twente vervolgens het onderzoek uitgevoerd.

Wij danken het WODC, de universiteit Twente en de begeleidingscommissie voor dit rapport. De grootste waarde van dit rapport is de concrete en heldere uiteenzetting van de (mogelijke) veiligheidstoepassingen van nanotechnologie voor VenJ.

Als u, geachte lezer, na het lezen van dit rapport kansen ziet voor innovatie bij uw uitvoerende organisatie van VenJ, dan horen wij graag van u via innovatie@minvenj.nl. Het innovatieteam ondersteunt u graag met haar innovatie-instrumenten om vervolgonderzoek te doen of om een vervolgtraject in te zetten. Op deze manier kunnen uitvoeringsdiensten samen met het innovatieteam kansen omzetten in concrete acties en resultaten.

Innovatieteam Veiligheid en Justitie¹

Juli 2016

¹<https://www.rijksoverheid.nl/ministeries/ministerie-van-veiligheid-en-justitie/inhoud/innovatie-veiligheid-en-justitie>

Samenvatting

In de afgelopen 15 jaar is nanotechnologie steeds meer onder de aandacht gekomen en heeft de financiering van nanotechnologisch onderzoek een grote vlucht genomen. Een aantal producten op basis van nanotechnologie is reeds op de markt verschenen. Over het algemeen is nanotechnologie nog steeds een opkomende technologie en zijn toepassingen nog in ontwikkeling. In dit rapport wordt de betekenis van nanotechnologie voor civiele veiligheidstoepassingen besproken en de studie geeft een breed overzicht van opkomende nanotechnologieën en toepassingsdomeinen. De focus in dit rapport ligt op de kansen die nanotechnologie biedt voor veiligheidstoepassingen. Mogelijke risico's op het gebied van bijvoorbeeld gezondheid en milieu worden niet besproken.

Op basis van een meta-literatuurstudie zijn verschillende toepassingsdomeinen geïdentificeerd en besproken in dit rapport: (i) detectie, (ii) bescherming, (iii) veilige identificatie en communicatie en (iv) defensie. Hiernaast zijn mogelijk interessante nanotechnologieën voor de veiligheidstoepassingen in deze domeinen beschreven en toegelicht. Deze resultaten zijn aangevuld met uitkomsten uit interviews (in totaal 27) met onderzoekers en experts op het gebied van nanotechnologie; bedrijven die producten leveren voor veiligheidstoepassingen; en met verwachte eindgebruikers en veiligheidspartners van het Ministerie VenJ zoals politie, brandweer, Nederlands Forensisch Instituut, Dienst Justitiële Inrichtingen, Openbaar Ministerie, Koninklijke Marechaussee en het Ministerie van Defensie. De interviews geven inzicht in de behoeftes en wensen van veiligheidspartners ten aanzien van mogelijke nanotechnologietoepassingen en in de unieke eigenschappen van nanotechnologieën voor een toepassingsgebied. In de interviews zijn eveneens verwachte uitdagingen en toekomstige ontwikkelingen voor deze toepassingsgebieden besproken.

Voor de politie, de Koninklijke Marechaussee en andere onderdelen van het Ministerie van Defensie is de detectie van chemische, biologische, radioactieve en explosieve stoffen van groot belang. De detectie van explosieven speelt hier een bijzondere rol en zou bijvoorbeeld op vliegvelden het liefst op afstand, met zo weinig mogelijk interventie en ongemak voor de passagiers moeten plaatsvinden. Voor de politie is op dit moment het detecteren van synthetische drugs en illegale drugslaboratoria een groot probleem waar nieuwe technologieën een alternatief kunnen bieden. Detectietechnologieën dienen efficiënt, effectief en betrouwbaar te zijn. Nanosensoren bieden een extra meerwaarde door op de lengteschaal van moleculen te meten, dus op enkele nanometers, waardoor zij een hoge sensitiviteit hebben en kleine concentraties tot enkele moleculen van een stof specifiek kunnen detecteren. Er wordt verwacht dat het gebruik van sensoren in de komende 5-10 jaar sterk zal toenemen, zeker voor gezondheidstoepassingen. Voor forensisch onderzoek is de detectie van biologische sporen zoals DNA, bloed, sperma, haar en huid van groot belang voor de reconstructie van strafbare feiten. Nieuwe technieken zouden gebruikt kunnen worden om sporen beter te kunnen detecteren en meer informatie te verkrijgen. Bij de politie en het Nederlands Forensisch Instituut bestaat behoefte aan draagbare detectiemethoden die kunnen worden gebruikt op de plaats delict om verdachte sporen ter plekke te analyseren. Door onderdelen van sensoren steeds kleiner te maken en te integreren wordt het mogelijk om meer detectieapparatuur draagbaar te maken. Er wordt verwacht dat in de toekomst digitale data steeds relevanter zullen worden voor de politie en het forensisch onderzoek om een misdaad op te helderen.

Beschermende kleding is van belang voor politie, brandweer, de Dienst Justitiële Inrichtingen, de Koninklijke Marechaussee en militairen. In veel gevallen is het wenselijk om relatief lichtgewicht beschermende kleding te hebben, omdat zware kleding tot verhoogde gezondheidsklachten bij gebruikers kan leiden. Ook de doorlaatbaarheid van beschermende kleding voor gevaarlijke en

kankerverwekkende stoffen in bijvoorbeeld rook is nu een belangrijk aandachtspunt waarvoor oplossingen worden gezocht. Veel onderzoek wordt gedaan naar nanomaterialen die nieuwe en verbeterde functionaliteiten hebben en hiervoor een oplossing zouden kunnen bieden. Nieuwe materialen en sensoren zouden de integratie van sensoren in kleding mogelijk kunnen maken met als doel de posities van brandweermensen en politieagenten te monitoren evenals hun fysieke gesteldheid. Belangrijke uitdagingen voor de implementatie van nieuwe materialen zijn behalve kosten ook gezondheids- en veiligheidsstandaarden.

Identificatie van personen en de verificatie van de echtheid van officiële documenten zoals (binnen- en buitenlandse) identiteitsbewijzen, visa en geld zijn van groot belang voor luchthavenbeveiliging, politie en het Openbaar Ministerie. De veiligheid van fraudegevoelige documenten zoals identiteitsbewijzen of toegangspassen voor gebouwen kan verbeterd worden met behulp van nanotechnologie. Door eigenschappen op de nanoschaal te benutten kunnen unieke identificatie en authenticatie kenmerken worden gemaakt die daardoor niet nagemaakt kunnen worden.

Ook op de gebieden opsporen en volgen van personen, authenticatie en bescherming van data bieden nanotechnologieën toepassingen. Opsporen en volgen (track and trace) is een belangrijk punt voor veel veiligheidstoepassingen zoals het volgen van politie of brandweermensen tijdens een inzet of het volgen van reizigers op verkeersknooppunten. Het beveiligingsniveau voor gevangenen zal binnen de komende 10 jaar veranderen waarin nieuwe technologieën een interessante rol zouden kunnen spelen in het traceren van gedetineerden. Ten aanzien van authenticatie wordt verwacht dat de markt voor veilige authenticatie binnen de komende 5-10 jaar sterk zal groeien. De bescherming van sensitieve communicatie is belangrijk voor de politie, nationale veiligheidsinstellingen, organisaties binnen de overheid, banken, financiële instellingen en voor een groot aantal bedrijven. Ook het toenemend gebruik van sensoren vereist beveiligde communicatie. Naast de beveiliging van dataverkeer is ook decryptie belangrijk, bijvoorbeeld voor het ophelderen van een misdaad en om communicatie van criminelen af te kunnen luisteren. Het decoderen van data is ook van belang voor de krijgsmacht om informatie over de vijand te krijgen. Encryptie en decryptie zullen dus een steeds grotere rol spelen in defensie en informatie zal steeds belangrijker worden vergeleken met conventionele wapens. Kwantumcommunicatie, dat een zeer hoge bescherming tegen afluisteren garandeert, is nu reeds commercieel beschikbaar.

Voor defensie zijn de technologieën voor civiele toepassingen ook van groot belang, waarbij deze veelal robuuster en onder andere omstandigheden toepasbaar moeten zijn. Autonome energievoorziening voor apparatuur bijvoorbeeld is hierbij erg belangrijk. Militairen moeten vaak lange afstanden afleggen en keren niet regelmatig terug naar hun basis. Met autonome energievoorzieningen zijn ze onafhankelijker van (vaste) infrastructuur. Zonnecellen, die gebruikt kunnen worden om batterijen op te laden, kunnen door nanomaterialen energie-efficiënter worden gemaakt. Nanomaterialen kunnen ook worden toegepast om wapens lichter en stabiel te maken of voor verbeterde camouflagepatronen.

De verscheidenheid van nanotechnologieën voor de hier gepresenteerde veiligheidstoepassingen is zeer breed. Het onderzoek biedt dus een overzicht van de technologieën die beschikbaar zijn dan wel in ontwikkeling zijn. Om de kansen die nanotechnologieën bieden goed te benutten is het van belang om de dialoog tussen eindgebruikers en wetenschappers te stimuleren en zo ervoor te zorgen dat technische ontwikkelingen nauw aansluiten bij huidige en toekomstige behoeftes in de operationele praktijksituaties van het Ministerie van VenJ en haar veiligheidspartners.

Inhoudsopgave

Voorwoord	3
Samenvatting	4
1. Introductie.....	8
1.1 Onderzoeksterreinen nanotechnologie.....	8
1.2 Rol van nanotechnologie in toepassingen	12
1.3 Maatschappelijke discussie over relevantie en impact van nanotechnologie	13
1.4 Toepassingsgebieden nanotechnologie en veiligheid	14
1.5 Leeswijzer.....	18
2. Onderzoeksopzet en -methoden	19
2.1 Onderzoeksopzet	19
2.1.1 Onderzoeksaanpak.....	19
2.2 Onderzoeksmethoden	22
2.2.1 Literatuurstudie – Meta-onderzoek.....	22
2.2.2 Interviews – Experts en veiligheidspartners	24
2.2.3 Indeling Technology Readiness Levels	24
3. Detectie	26
3.1 Detectie van gevaarlijke en ongewenste stoffen.....	26
3.1.1 Behoeftes, prioriteiten en wensen van detectie	27
3.1.2 Mogelijke detectiemethodes en belangrijke eisen.....	28
3.1.3 Overzicht van nano-gebaseerde meetprincipes en technologieën	29
3.1.4 Verwachte uitdagingen en ontwikkelingen	33
3.2 Forensisch onderzoek	34
3.2.1 Behoeftes en wensen voor forensisch onderzoek.....	34
3.2.2 Mogelijke methoden en belangrijke eisen.....	35
3.2.3 Overzicht van nanotechnologieën voor forensisch onderzoek	36
3.2.4 Verwachte uitdagingen en ontwikkelingen	37
4. Bescherming.....	39
4.1 Bescherming van personen en infrastructuur – behoeftes en wensen.....	39
4.2 Mogelijke technologieën en belangrijke eisen	41
4.3 Overzicht van nanotechnologieën voor bescherming	42
4.4 Overzicht van nanotechnologieën voor decontaminatie en medische interventie	44
4.5 Verwachte uitdagingen en ontwikkelingen	46
5. Veilige identificatie en communicatie.....	47

5.1	Identificatie, authenticatie en anti-counterfeiting	47
5.1.1	Behoeftes, wensen en belangrijke eisen	48
5.1.2	Nanotechnologieën voor identificatie, authenticatie en anticounterfeiting.....	50
5.1.3	Verwachte uitdagingen en ontwikkelingen	52
5.2	Veilige communicatie.....	53
5.2.1	Nanotechnologieën voor veilige communicatie	54
5.2.2	Verwachte uitdagingen en ontwikkelingen	54
6.	Defensie.....	56
6.1	Militaire toepassingen en belangrijke nanotechnologieën	56
6.2	Verwachte uitdagingen en ontwikkelingen	58
7.	Conclusies en aanbevelingen	59
7.1	Algemene bevindingen in de studie.....	59
7.2	Relevantie van nanotechnologie voor veiligheidstoepassingen.....	60
7.3	Richting geven aan nanotechnologieontwikkelingen voor VenJ toepassingen.....	62
8.	Referenties	63
9.	Bijlagen.....	65
9.1	Bijlage 1 – Overzicht nanotechnologieën voor veiligheidstoepassingen.....	65
9.2	Bijlage 2 - Lijst interviewpartners	66
9.3	Bijlage 3 – Interview schema experts	67

1. Introductie

“The principles of physics, as far as I can see, do not speak against the possibility of maneuvering things atom by atom.” December 1959, Pasadena in Californië.²

Met deze uitspraak tijdens zijn wereldberoemde lezing ‘There’s plenty of room at the bottom’ zet de Amerikaanse natuurkundige en Nobelprijswinnaar Richard Feynman in 1959 een veel geciteerde eerste stap in de ontwikkeling van nanotechnologie. In zijn presentatie beschrijft Feynman de grote hoeveelheid mogelijkheden die miniaturisering biedt en introduceert het concept van nanotechnologie - de manipulatie en controle van materie op de atomaire schaal. Rond 1982 lukt het de Duitse Fysicus Gert Binnig samen met zijn Zwitserse collega Heinrich Rohrer voor de eerste keer om atomen zichtbaar te maken door de ontwikkeling van de scanning-tunnelingmicroscop (STM) – een ontdekking waarvoor zij later met de Nobelprijs worden geëerd [3]. Don Eigler gebruikt de STM vervolgens om enkele atomen op een oppervlak te verplaatsen en hierdoor het IBM logo te vormen [4]. Deze demonstratie laat zien dat de controle en manipulatie op de atomaire schaal daadwerkelijk mogelijk is.

1.1 Onderzoeksterreinen nanotechnologie

De technische mogelijkheden rondom het begrijpen en manipuleren van verschijnselen op de atomaire schaal creëren hoge verwachtingen rondom nanotechnologie. Voorbeelden hiervan zijn beloftes over bijdragen van nanotechnologie aan domeinen zoals gezondheidszorg, energie, elektronica of voedsel en aan een enorme economische groei. Zo voorspelt bijvoorbeeld het adviesbureau RNCOS in 2020 een wereldwijde markt voor nanotechnologie van 76 miljard US\$.³ Deze hoge verwachtingen hebben bijgedragen aan een ‘funding race’ tussen landen. Met name sinds 2000 heeft de financiering van nanotechnologie onderzoek wereldwijd een grote vlucht genomen [5]. Na een beginfase, waar ontwikkeling veelal in het lab plaatsvond, zien we nu in toenemende mate de introductie van nanotechnologie in producten. Naast bekende toepassingen als nanodeeltjes in banden en diverse zilvernanodeeltjes toepassingen in bijvoorbeeld kleding en wasmachines, wordt nu ook geëxperimenteerd met concrete lab-on-a-chip toepassingen. Dat gezegd hebbende kan nanotechnologie nog steeds als een opkomende technologie worden gekarakteriseerd omdat er nog veel onderzoeks- en productontwikkelingswerk plaatsvindt.

Ook in Nederland wordt veel aandacht besteed aan nanotechnologie. Zo heeft de overheid samen met een consortium van 130 onderzoeksinstituten en industriële partners een onderzoeksprogramma van 250 miljoen euro opgezet dat nanotechnologie onderzoek in Nederland van 2011-2016 financierde. Het NanoNextNL programma stimuleert fundamenteel en toegepast onderzoek op de gebieden nanogeneeskunde, nanoelektronica, nanomaterialen en nanosensoren met een focus op toepassingen in gezondheid, energie, voedsel en water.⁴ Veiligheid is geen expliciet onderzoeksthema binnen NanoNextNL en vaak ook niet zichtbaar als specifiek toepassingsgebied binnen nanotechnologieonderzoek zoals uit interviews naar voren komt. Er is echter een aantal gebieden met relevantie voor veiligheidskwesties, zoals sensoren voor detectie, cryptografie of beschermende kleding, waar nanotechnologie een rol in kan spelen. Hier is duidelijk een behoefte om mogelijkheden waar nanotechnologie een verschil zou kunnen maken in kaart te brengen. Voordat wij deze

² http://www.pa.msu.edu/~yang/RFeynman_plentySpace.pdf, transcript van Richard Feynmans lezing ‘Plenty of room at the bottom’ in 1959.

³ <http://www.rncos.com/Market-Analysis-Reports/Nanotechnology-Market-Outlook-2020-IM687.htm>

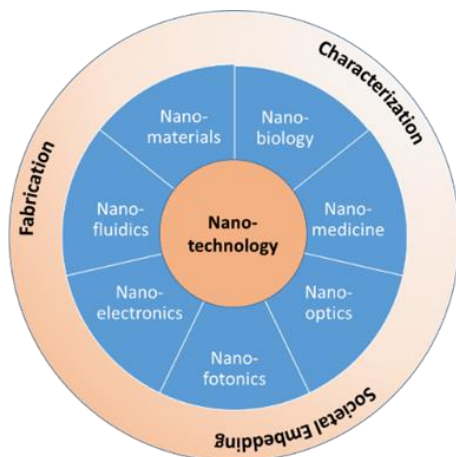
⁴ <http://www.nanonextnl.nl/>

mogelijkheden verder belichten, geven wij een korte toelichting over nanotechnologie en relevante onderzoeksterreinen in het algemeen.

Nanotechnologie, of beter gezegd nanotechnologieën gezien de grote verscheidenheid in dit domein, betreft zowel de materialen als producten die hierdoor mogelijk zijn of hier gebruik van maken, evenals de technieken en processen om deze en andere producten te maken. Er worden verschillende definities van nanotechnologie gebruikt zoals bijvoorbeeld die van het Amerikaanse Nationale Nanotechnologie Initiatief die nanotechnologie als volgt karakteriseert [6]:

*“Nanotechnology is the understanding and control of matter at **dimensions of roughly 1 to 100 nanometers**, where unique phenomena enable novel applications. A nanometer is one-billionth of a meter; a sheet of paper is about 100,000 nanometers thick. Encompassing nanoscale science, engineering, and technology, nanotechnology involves **imaging, measuring, modeling, and manipulating matter at this length scale.**”*

Voor deze studie hanteren wij bovenstaande definitie, waarbij wij aanmerken dat wij afmetingen tussen 100 en 1000 nanometer (nm) ook als nanotechnologie beschouwen. Zichtbaar licht heeft een golflengte van 380-750 nm en speelt een belangrijke rol in nano-fotonica toepassingen en zal dus ook inbegrepen zijn in deze (aangepaste) definitie. In veel vakgebieden zoals chemie, biologie en natuurkunde spelen kleine dimensies ook een belangrijke rol, maar niet exclusief. Het verschil tussen nanotechnologie en andere vakgebieden ligt in het opzettelijk en gecontroleerd afbeelden, meten, nabootsen en manipuleren van materie op deze lengteschaal. Op deze wijze kunnen verbeterde of nieuwe eigenschappen optreden die kunnen leiden tot snellere en sensitievere sensoren, interessante oppervlakte fenomenen zoals waterafstotende eigenschappen (Lotus-effect), nieuwe moleculaire structuren of materiaaleigenschappen. Vaak voorkomende nanostructuren en technieken voor karakterisering zijn beschreven in box 1.



Figuur 1. Onderzoeksterreinen binnen nanotechnologie

Zoals al duidelijk wordt bestaat nanotechnologie uit verschillende, overlappende onderzoeksterreinen. Hieronder vallen bijvoorbeeld nanobiotechnologie en nano-geneeskunde waar nanotechnologie overlapt met biologie en gebruikt wordt voor medische toepassingen. Het gebied van nano-optica en nano-fotonica houdt zich bezig met het bestuderen van het gedrag van licht op de nanometerschaal, terwijl nano-elektronica zich met het verkleinen maar ook revolutioneren van elektrische systemen op de nanometerschaal bezighoudt. Op het

gebied van nano-fluïdica wordt het gedrag, de manipulatie en controle van vloeistoffen in kleine structuren onderzocht. Nano-materialen met verbeterde of nieuwe functionaliteiten en eigenschappen spelen bij de meeste onderzoeksterreinen binnen nanotechnologie een belangrijke rol, net zoals de fabricage en karakterisering van nanostructuren en nanosystemen. Naast de technische aspecten zijn ook de maatschappelijke en ethische dimensies van nanotechnologie een belangrijk onderwerp (figuur 1).

Box 1. Nanostructuren en technieken voor karakterisering

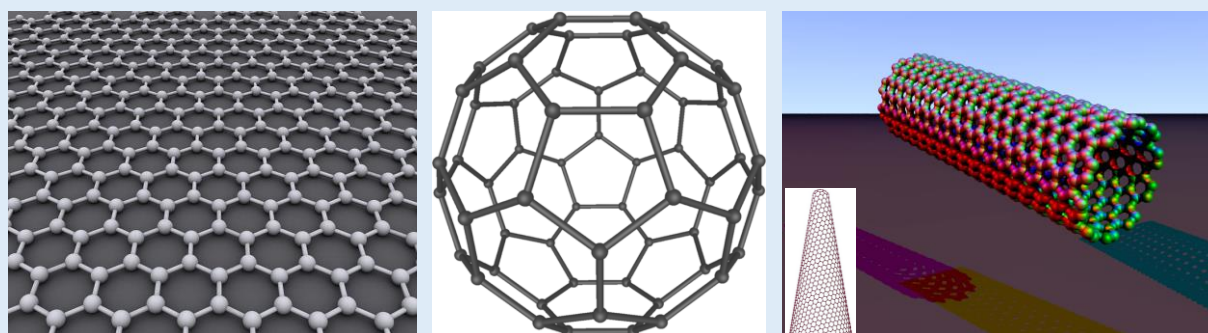
Nanotechnologie maakt de manipulatie van enkele atomen mogelijk en werkt dus op de nanometer schaal. In de wetenschappelijke wereld staat *nanometer* voor 10^{-9} m. De kleine dimensies van nanotechnologie kunnen duidelijk worden gemaakt door de grootte van een voetbal met de aarde te vergelijken: De grootte van een nanostructuur verhoudt zich tot een voetbal net zoals de grootte van een voetbal tot de aarde.



De aarde is 10^8 keer groter dan een voetbal. De voetbal wederom is 10^8 keer groter dan een nanostructuur (buckyball).

Nanodeeltjes, die afmetingen op de nanometerschaal hebben, komen in verschillende vormen en materialen voor. Zij kunnen worden gemaakt uit bijvoorbeeld metaal of plastic en ze kunnen worden gebruikt in oplossingen, als coating op een oppervlak of ze kunnen worden geïntegreerd in een matrix. Een coating die aangebracht wordt op het oppervlak van de deeltjes kan de eigenschappen van de deeltjes beïnvloeden [1].

Er bestaan verschillende soorten structuren uit koolstof die vaak worden genoemd binnen nanotechnologisch onderzoek en gebruikt kunnen worden voor bijvoorbeeld elektronische toepassingen of voor geheugens. *Fullerenen*, ook bekend als 'buckyballs', zijn moleculen bestaande uit 60 koolstofatomen (C_{60}) die gerangschikt zijn in de vorm van een voetbal. Het aantal koolstofatomen in deze structuren kan veranderd worden waardoor ook andere vormen kunnen ontstaan (C_{70} voor een rugby ball). De geleidbaarheid van het materiaal kan worden beïnvloed door metalen of organische componenten toe te voegen[1].

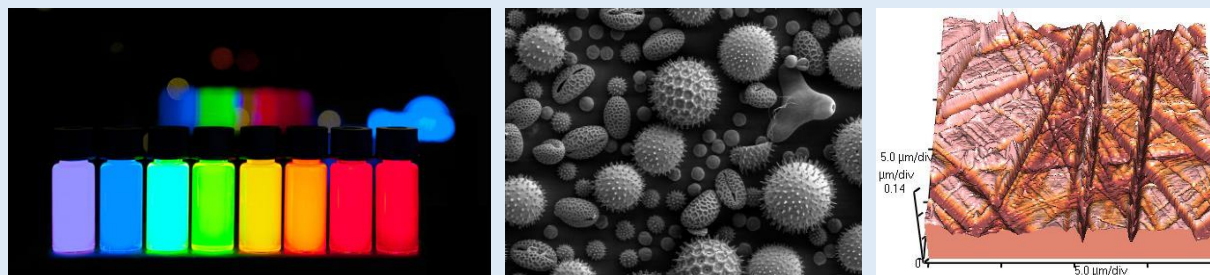


Links Een enkele laag grafeen bestaande uit koolstofatomen die gerangschikt zijn in een honingraat motief. Grafiet is een opeenstapeling van grafeenlagen. Bron: Michael Ströck. *Midden* Een buckyball die op een voetbal lijkt en gevormd is uit koolstofatomen. Bron: AlexanderAIUS. *Rechts* Opgerolde grafeenvellen vormen een enkelwandige koolstofbuis of een koolstofhoorn (klein plaatje). Bron: Arnero, Lengmartin.

Vervolg Box 1. Nanostructuren en technieken voor karakterisering

Carbon nanotubes lijken qua structuur op grafiet en bestaan uit een netwerk van hexagonale ringen uit koolstof. Opgerolde vellen van grafiet vormen buizen die carbon nanotubes worden genoemd. Enkele buizen die maar een wand hebben zijn bekend als single-walled nanotubes (SWNT) met diameters van enkele nanometers en lengtes van 100 nanometers tot micrometers [2]. Meerdere koolstofbuizen die in elkaar zijn geschoven worden multi-walled nanotubes (MWNT) genoemd en kunnen grotere diameters hebben. De manier waarop de grafietvellen zijn opgerold beïnvloedt de structuur van de carbon nanotubes en daardoor ook hun eigenschappen, zoals geleidbaarheid en dichtheid [1]. Kegelvormig opgerolde grafietvellen worden *carbon nanohorns* genoemd. Koolstof *nano-vezels* worden gevormd als gebogen grafietvellen oprollen tot kegels die dan stapels vormen uit deze nano-kegels. Nano-vezels kunnen diameters hebben variërend van enkele tot honderden nanometers en lengtes tot micrometers [2]. Draden uit metaal zoals koper, goud of zilver kunnen worden gebruikt als geleidende *nanodraden* tussen twee elektrodes en kunnen een doorsnede in de nanometer schaal hebben en lengtes van enkele micrometers. Nanodraden kunnen ook uit halfgeleidende, isolerende of organische materialen zoals DNA worden gemaakt [1].

Kwantumdots zijn halfgeleiders met nano-afmetingen in drie dimensies met diameters tussen 2-6 nm en hebben specifieke elektronische en optische eigenschappen waardoor zij toegepast kunnen worden in transistoren, zonnepanelen of lasers. De lichtgevendende eigenschappen van kwantumdots kunnen bijvoorbeeld voor specifieke golflengtes worden veranderd waardoor zij een nauwe emissie en absorptie spectrum hebben en daarom geschikt zijn als kleurstoffen maar ook voor LEDs en LCD displays.



Links Kwantumdots met verschillende kleuren. De grootte van de kwantumdots beïnvloedt de kleur van het geëmitteerde licht. Bron: PlasmaChem. *Midden* Pollen, gevisualiseerd met een rasterelektronenmicroscop. Bron: Dartmouth College Electron Microscope Facility. *Rechts* Topografische scan van een glas oppervlak met een atoomkrachtmicroscop. Bron: Nanorobotics Laboratory at Carnegie Mellon University.

Naast het fabriceren van nanostructuren is het karakteriseren van deze structuren belangrijk. Een aantal microscopen maken het mogelijk om kleine structuren en moleculen op de nanometerschaal zichtbaar te maken. De rasterelektronenmicroscop (Scanning Electron Microscope, SEM) bijvoorbeeld schiet een elektronenstraal op het oppervlak van het monster en de afbuigende en weerkaatsende elektronen worden met een detector opgevangen. De opgevangen elektronen kunnen worden vertaald in een twee-dimensionaal beeld met nanometerresolutie en aanvullende informatie over de materiaalsamenstelling. De atoomkrachtmicroscop (Atomic Force Microscope, AFM) kan ook kleine structuren op een oppervlak of in oplossing meten door met het scherpe eind van een cantilever het oppervlak af te tasten. Kleine ruwheden of structuren op het oppervlak resulteren in een buiging van de cantilever. De mate van buiging is een indicatie voor de grootte van de oneffenheden.

De overlap tussen verschillende onderzoeksterreinen binnen en buiten nanotechnologie, alsook de overlap tussen kennisgebieden op productniveau, maakt het uitdagend om de bijdrage van nanotechnologieën voor veiligheidstoepassingen te identificeren. In de praktijk betekent dit dat het vaak niet eenvoudig is om te bepalen wanneer er nu sprake is van nanotechnologie of nanotechnologisch onderzoek. Het gebruik van het label 'nano' kan worden ingegeven door eigenschappen en afmetingen die geassocieerd worden met de nanometerschaal, maar ook door strategische overwegingen of het aantrekkelijk of niet aantrekkelijk is om dit als 'nano' te labelen. Onderzoekstechnisch betekende dit dat hier expliciet aandacht aan is besteed tijdens de interviews.

1.2 Rol van nanotechnologie in toepassingen

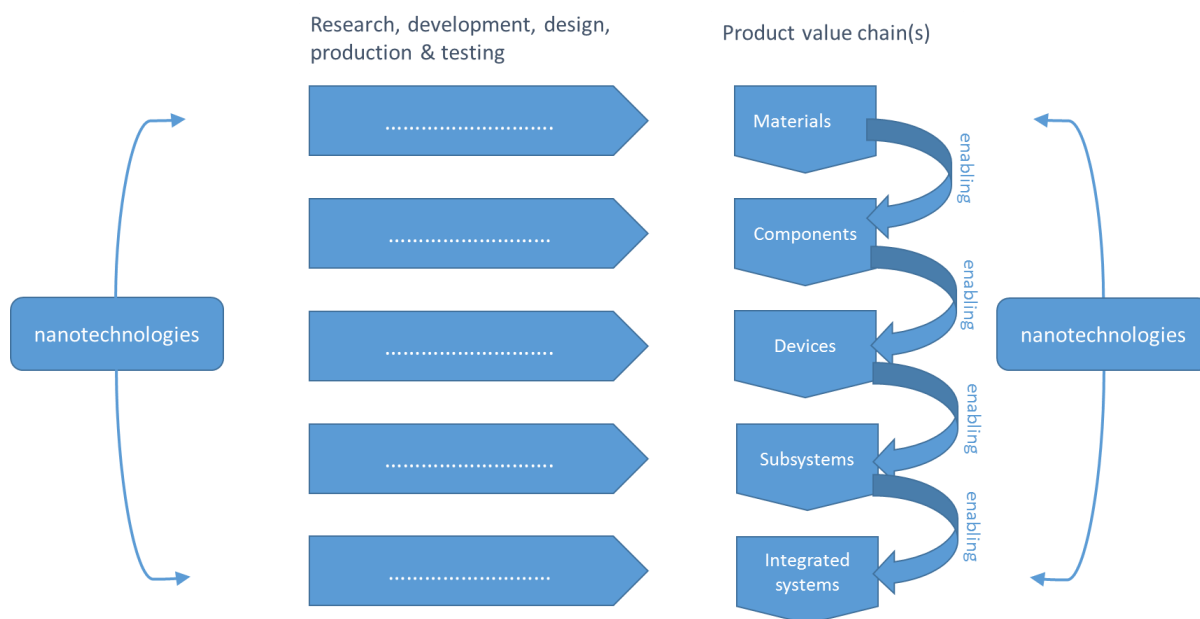
Nanotechnologieën kunnen op verschillende manieren worden toegepast. Om de relevantie van nanotechnologie voor veiligheidstoepassingen in te schatten is het van belang om aan te geven welke rollen nanotechnologieën kunnen spelen in producten, alsook in productie, ontwikkeling en dergelijke. In dit onderzoek richten wij ons vooral op producten, en niet op mogelijke toepassingen van nanotechnologie in onderzoek zoals bijvoorbeeld in geavanceerde meetinstrumenten, of in productietechnologie.

De rol die nanotechnologieën kunnen spelen, de toegevoegde waarde van haar toepassing, is mede afhankelijk van op welk niveau van productintegratie dit wordt geëvalueerd. Om een voorbeeld te geven: nanodeeltjes worden toegepast in autobanden om gripeigenschappen te verbeteren. Deze deeltjes verbeteren bestaande eigenschappen van autobanden, maar voegen in principe geen nieuwe functionaliteiten toe. Op een hoger productniveau, de auto, is deze verbetering in functionaliteit een relatief klein aspect en nagenoeg onzichtbaar als toegevoegde waarde.

Nanomaterialen kunnen ook nieuwe toepassingen creëren, zoals nanodeeltjes die gebruikt zouden kunnen worden om een sensor te maken die geplaatst kan worden op voedselverpakkingen. De sensor kan bijvoorbeeld aangeven of de verpakking open is geweest, waardoor het verpakte product, bijvoorbeeld vlees, een groter risico loopt op bederf. In dit voorbeeld maakt het gebruik van nanomaterialen een nieuwe sensor mogelijk, en uiteindelijk een nieuwe verpakking, namelijk een 'intelligente' verpakking.

Deze voorbeelden geven ook aan dat de relevantie van nanotechnologieën niet altijd meteen duidelijk of zichtbaar hoeft te zijn voor eindgebruikers, dan wel voor spelers (bedrijven) in de toeleveringsketen(s) van producten.

In figuur 2 hebben wij de verschillende rollen die nanotechnologieën kunnen spelen schematisch weergegeven. In dit onderzoek richten wij ons op het verkennen van nanotechnologieën die bijdragen aan een significante verbetering van prestaties van eindproducten, of bijdragen aan nieuwe functionaliteiten van eindproducten. Denk bijvoorbeeld aan de ontwikkeling van een nieuw detectiesysteem waar nanomaterialen voor een uitbreiding van meetfuncties zorgen. Wij realiseren ons dat dit de kansen en mogelijkheden van nanotechnologieën tekort doet en dat dit dus mogelijk een beperking oplevert voor dit rapport.



Figuur 2 Rollen van nanotechnologieën

1.3 Maatschappelijke discussie over relevantie en impact van nanotechnologie

Inschattingen over de relevantie van nanotechnologie door ontwikkelaars en gebruikers worden mede beïnvloed door bredere maatschappelijke discussies over nanotechnologie. Deze brede discussies vormen de achtergrond voor overwegingen van individuen en organisaties en geven ook richting aan gedachtesgangen en voorkeuren. Dit is bijvoorbeeld herkenbaar in de positieve inschattingen van nanotechnologietoepassingen, maar ook in geuite zorgen om risico's van nanodeeltjes die tijdens de interviews naar voren kwamen. Deze overwegingen zijn niet altijd specifiek voor de context van nanotechnologie voor veiligheidstoepassingen, maar koppelen aan bredere discussies rondom beloftes en risico's van nanotechnologie. Om discussies en inschattingen over de relevantie van nanotechnologie, in het algemeen en voor veiligheidstoepassingen in het bijzonder, beter te kunnen plaatsen geven wij hier een kort overzicht van belangrijke ontwikkelingen in discussies over nanotechnologie.

Voor een overzicht over belangrijke ontwikkelingen in maatschappelijke discussies over nanotechnologie is het zinvol om 2000 als startpunt te nemen. De start van het Amerikaanse National Nanotechnology Initiative markeert een belangrijk punt aangezien nanotechnologie op dat moment stevig op de politieke agenda komt te staan. Nanotechnologie wordt gepositioneerd als strategische wetenschap, en de US House Committee on Science benadrukte het belang van wetenschap en technologie voor economisch concurrerend vermogen. Dat wil nadrukkelijk niet zeggen dat er voorheen niet aan nanotechnologie gedaan werd, integendeel. Echter, het label 'nanotechnologie' wordt dan belangrijk, ook in politieke kringen. Niet alleen in de VS: op verschillende plaatsen in de wereld neemt de aandacht voor nanotechnologie toe, zowel op het gebied van media als onderzoeksfinanciering. Er ontwikkelt zich een heuse financieringsrace omdat landen niet voor elkaar willen onder doen – in de hoop de vruchten te plukken van nanotechnologie [7-10].

Nanotechnologie wordt ook belangrijk in bredere maatschappelijke discussies, mede vormgegeven door een publicatie van de oprichter van Sun Microsystems, Bill Joy. In dit artikel uit Joy zijn zorgen over zichzelf reproducerende 'nanobots' die de aarde zouden kunnen veranderen in een grijze massa, de zogenaamde 'grey goo'. Dit dystopische scenario was al in de jaren negentig geïntroduceerd door

Eric Drexler. In feite zijn er twee grote verhaallijnen op dat moment: een verhaal dat de grote voordelen van nanotechnologie voor economie en maatschappij benadrukt, tot en met haast utopische toekomstbeelden; en een verhaal dat zorgen uit over de mogelijkheid om nanotechnologie te beheersen, met dystopische ‘grey goo’ scenario’s [11]. De opkomst van deze twee verhaallijnen, tegenpolen eigenlijk, is niet uniek voor nanotechnologie. Discussies over opkomende technologieën verlopen vaak volgens dit patroon [12].

De discussie verschuift begin 2000 wanneer er meer aandacht komt voor gezondheids-, milieu en veiligheidsrisico’s van nanotechnologie. In het bijzonder onzekerheden over risico’s van nanodeeltjes krijgen veel aandacht. Dit trekt ook de aandacht van grote verzekeraars⁵ die zich vervolgens in de discussie hierover gaan mengen. Vanaf dat moment ontstaan er verschillende particuliere en overheidsinitiatieven om risico’s van nanotechnologie te gaan reguleren. In toenemende mate wordt er ook onderzoek gedaan naar risico’s van nanotechnologie. In onderzoeksprogramma’s worden aparte budgetten voor risico-onderzoek vastgesteld. Risico’s van nanotechnologie, in het bijzonder nanodeeltjes, maken sindsdien een belangrijk onderdeel uit van discussies over nanotechnologietoepassingen. Dit is dermate prominent dat risico’s van deeltjes de meest dominante zorgelijke kwestie lijken te worden in evaluaties van nanotechnologie.

De volgende, en vooralsnog laatste, grote ontwikkeling in discussies over nanotechnologie is de opkomst van het idee van verantwoord innoveren. Dit concept gaat over meer technologieën dan nanotechnologie alleen, maar is wel prominent zichtbaar bij discussies over nanotechnologie. Dit begrip is in beleidskringen in Amerika en Europa nu prominent aanwezig. Net zoals het begrip duurzaamheid is het een containerbegrip waaronder diverse interpretaties vallen. Vergeleken met discussies over risico’s van nanotechnologie en pogingen om deze te reguleren, is het begrip verantwoord innoveren niet of nauwelijks begrensd. Een vaak gebruikte definitie van verantwoord innoveren stimuleert het anticiperen en inschatten van maatschappelijke verwachtingen en implicaties vroeg in de technologieontwikkeling om op deze manier onderzoek en ontwikkeling af te stemmen met maatschappelijke wensen.⁶ Deze open definitie laat interpretatie toe hoe het concept van verantwoord innoveren moet worden ingevuld in de praktijk. Een van de concretere uitwerkingen van dit begrip is zichtbaar in richtlijnen voor onderzoeksactiviteiten, zoals gedragscodes. Een voorbeeld van zo’n gedragscode is de ‘code of conduct for responsible nanosciences and nanotechnologies research’ van de Europese Commissie in 2008. Deze code wordt ook gehanteerd in het onderzoeksprogramma NanoNextNL in Nederland [13].

1.4 Toepassingsgebieden nanotechnologie en veiligheid

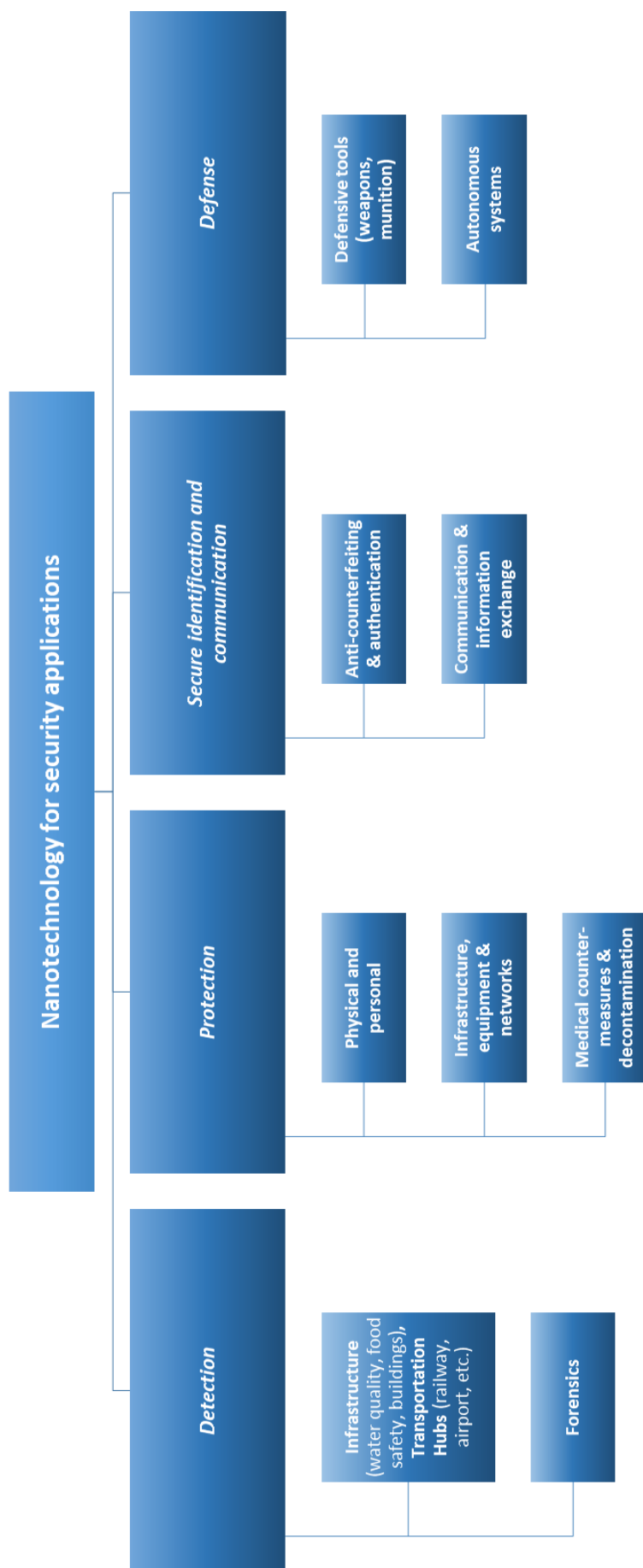
Het veiligheidsdomein, dat wil zeggen zowel civiele veiligheid (ook wel interne veiligheid genoemd) als defensie (ook wel externe veiligheid genoemd), is een van de vele toepassingsgebieden van nanotechnologie. Binnen Europa staat veiligheid, en specifiek ook onderzoek naar nanotechnologie voor veiligheidstoepassingen op de onderzoeksagenda [14]. In deze studie concentreren wij ons op civiele veiligheidstoepassingen die belangrijk zijn voor de veiligheidspartners van VenJ, zoals politie, brandweer, Nederlands Forensisch Instituut, Openbaar Ministerie, Dienst Justitiële Inrichtingen en Koninklijke Marechaussee. Uiteraard zijn veel van deze toepassingen ook interessant voor het Ministerie van Defensie, zoals persoonlijke bescherming door verbeterde uniformen en pakken, detectie van gevaarlijke stoffen of veilige communicatie en identificatie. De eisen waaraan deze

⁵ Herverzekeraars zijn verzekeraars die eigen risico’s laten verzekeren om zo de financiële gevolgen te verlagen.

⁶ <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/h2020-section/responsible-research-innovation>

toepassingen moeten voldoen kunnen wel verschillen als gevolg van verschillende gebruiksscenario's: terwijl brandweer en politie hun hoofdkantoor redelijk dichtbij hebben om batterijen op te laden of materiaal en kleding te wisselen is defensiepersoneel vaak dagen onderweg, ver van hun basis. Ook moeten toepassingen in defensiecontext vaak in extremere (verschillende) omstandigheden kunnen werken, bijvoorbeeld bij lage of hoge temperaturen, in de woestijn of tijdens slechte weersomstandigheden. In dit onderzoek richten wij ons voornamelijk op civiele toepassingen en geven wij alleen in enkele gevallen overlap met defensietoepassingen aan (dit noemen wij toepassingsgebied defensie, hoofdstuk 6).

Op basis van de literatuurstudie en aangevuld met informatie uit interviews met experts en veiligheidspartners hebben wij een overzicht gemaakt met verschillende veiligheidstoepassingen zoals weergegeven in figuur 3. De hoofdtoepassingsgebieden zoals detectie, bescherming, veilige identificatie en communicatie en defensie zijn elk weer opgesplitst in specifiekere toepassingen. Detectie wordt bijvoorbeeld onderverdeeld in detectie van stoffen relevant voor vitale infrastructuur of voor forensisch onderzoek. Bescherming wordt opgesplitst in persoonlijke bescherming en de bescherming van infrastructuur en equipment. Hierbij hoort ook de medische respons na een incident zoals bijvoorbeeld decontaminatie van personen, de omgeving of het milieu. Veilige communicatie en identificatie betreft anticounterfeiting, dus de bescherming tegen namaak, authenticatie en veilige communicatie. Het domein defensie verwijst naar defensieve hulpmiddelen en autonome systemen. Voor elk toepassingsgebied zijn verschillende nanotechnologieën geïdentificeerd die mogelijk een interessante meerwaarde kunnen bieden. De toepassingsgebieden en de geïdentificeerde nanotechnologieën zijn in detail beschreven in hoofdstukken 3 tot en met 6 waarbij elk hoofdstuk een toepassingsgebied behandelt. In het begin van elk hoofdstuk is een uitgebreide versie van figuur 3 beschreven die naast de toepassingsgebieden ook in detail de basistechnologieën aangeeft die een rol zouden kunnen spelen voor dit specifiek toepassingsgebied. Een overzicht van alle besproken nanotechnologieën voor de geïdentificeerde veiligheidstoepassingen kan worden gevonden in bijlage 1.



Figuur 3. Overzicht veiligheidstoepassingen voor nanotechnologieën

Veiligheidstoepassingen kunnen interessant zijn voor meerdere veiligheidspartners. Zo hebben bijvoorbeeld alle veiligheidspartners in deze studie interesse in detectietechnologieën. Decontaminatie methodes zijn van belang voor brandweer, het Nederlands Forensisch Instituut en het Ministerie van Defensie. Tabel 1 geeft een inschatting ten aanzien van welke veiligheidspartners geïnteresseerd zijn in bepaalde technologieën. Daarmee vervult tabel 1 ook een rol als leeswijzer voor vertegenwoordigers van veiligheidspartners geïnteresseerd in nanotechnologie toepassingen voor hun werkgebied:

- de toepassing detectie wordt beschreven vanaf p. 26,
- beschermende kleding vanaf p. 39,
- decontaminatie op p. 44,
- opsporen en volgen op p. 48,
- veilige identificatie en authenticatie vanaf p. 47,
- communicatie vanaf p. 53,
- niet-dodelijke wapens op p. 57.

Actoren	Detectie	Bescher- mende kleding	Deconta- minatie	Opsporen en volgen	Veilige identifica- tie / authenti- catie	Communi- catie (de/en- cryptie)	Niet- dodelijke wapens
<i>Brandweer</i>	x	x	x	x			
<i>Politie</i>	x	x		x	x	x	x
<i>Nederlands Forensisch Instituut</i>	x		x		x	x	
<i>Ministerie van Defensie</i>	x	x	x	x	x	x	x
<i>Luchthaven beveiliging</i>	x			x	x		x
<i>Koninklijke Marchaussee</i>	x	x		x	x		x
<i>Dienst Justitiële Inrichtingen</i>	x	x		x	x		x
<i>Openbaar Ministerie</i>	x			x	x	x	

Tabel 1. Relevantie van toepassingen voor veiligheidspartners.

1.5 Leeswijzer

Na een introductie van nanotechnologie in het algemeen en een schets van bijbehorende onderzoeksgebieden is in dit introducerende hoofdstuk de rol van nanotechnologie in (veiligheids)toepassingen beschreven gevolgd door een overzicht van de brede maatschappelijke discussie over de relevantie en impact van nanotechnologie. In dit hoofdstuk gaven wij aan welke toepassingsdomeinen er kunnen worden onderscheiden op het gebied van veiligheid en voor welke veiligheidspartners van VenJ deze toepassingsgebieden relevant zijn. In hoofdstuk 2 worden de doelstelling, probleemstelling en onderzoekopzet van dit onderzoek beschreven en wordt een toelichting gegeven op de gehanteerde onderzoeksmethoden voor de meta-literatuurstudie, de interviews en op de indeling van technologieën in Technology Readiness Levels. Om de leesbaarheid te bevorderen is ervoor gekozen om de bevindingen uit het onderzoek zoveel mogelijk te bundelen per toepassingsdomein. In hoofdstukken 3 tot en met 6 wordt daarom ieder toepassingsdomein afzonderlijk besproken. Per domein wordt aangegeven welke kwesties en vragen er spelen, aan welke nanotechnologieën er gewerkt wordt die relevant voor dit domein zouden kunnen zijn en welke ontwikkelingen en uitdagingen voor de toepassing van nanotechnologieën er zijn op dit gebied. Per toepassingsgebied worden enkele voorbeelden van nanotechnologieën beschreven en toegelicht. Vanwege de complexiteit van de technologieën en de scope van het onderzoek is een uitputtende beschrijving niet mogelijk. Ten slotte worden in hoofdstuk 7 algemene bevindingen besproken die relevant zijn voor alle toepassingsdomeinen en conclusies getrokken over de relevantie van nanotechnologie voor het Ministerie van VenJ en haar veiligheidspartners. Het rapport sluit af met een aantal aanbevelingen met als doel het Ministerie van VenJ en haar veiligheidspartners te ondersteunen in het anticiperen op mogelijke kansen die veiligheidstoepassingen van nanotechnologie kunnen bieden en hiervoor beleid te ontwikkelen of aan te passen.

In dit rapport zijn voetnoten gebruikt om aanvullende informatie te geven voor geïnteresseerde lezers, zoals technische details of uitleg van vaktermen. Links naar websites worden ook in voetnoten genoemd waar de lezer extra informatie kan vinden. De referenties in de tekst en voetnoten zijn opgenomen in de literatuurlijst na hoofdstuk 7.

2. Onderzoeksopzet en -methoden

De doelstelling en probleemstelling zoals de onderzoeksvragen en de onderzoeksanpak worden beschreven in het eerste deel van dit hoofdstuk. In sectie 2.2 worden de onderzoeksmethoden nader toegelicht.

2.1 Onderzoeksopzet

Dit onderzoek getiteld ‘Nanotechnologie in dienst van veiligheid en justitie’ is in opdracht gegeven door het Wetenschappelijk Onderzoek- en Documentatie Centrum (WODC) van het Ministerie van Veiligheid en Justitie (VenJ), Afdeling Externe Wetenschappelijke Betrekkingen. Het werk is uitgevoerd door leden van de vakgroep *Science, Technology & Policy Studies* in samenwerking met prof. Pepijn Pinkse van de Complex Photonic Systems groep aan de Universiteit Twente.

Aanleiding voor het onderzoek was de behoefte van het innovatieteam van het Ministerie van Veiligheid en Justitie om de toepassingen van nanotechnologie te verkennen en inzichten hieromtrent te delen met haar veiligheidspartners (zie sectie 1.4). Deze verkenning heeft als doel het Ministerie van VenJ en haar veiligheidspartners te ondersteunen in het anticiperen op mogelijke kansen die nanotechnologieën bieden voor civiele veiligheidstoepassingen. De volgende doelstelling en probleemstelling zijn geformuleerd voor het onderzoek.

Doelstelling: Doel van het onderzoek is het inzicht vergroten in de mogelijke toepassingen van nanotechnologie voor VenJ en de veiligheidspartners van VenJ.

Probleemstelling: Welke toepassingen kan nanotechnologie gaan bieden voor VenJ en de veiligheidspartners van VenJ?

Naast onderzoeks- en ontwikkelingsactiviteiten is nanotechnologie ook onderwerp van discussie voor regelgeving en beleid, mede vanwege onduidelijkheden omtrent risico's voor gezondheid, milieu en veiligheid (safety) als wel de maatschappelijke acceptatie en wenselijkheid van deze verzameling opkomende technologieën. In dit onderzoek ligt de nadruk op de kansen van nanotechnologie voor het Ministerie en haar veiligheidspartners en niet, of in minder mate op kwesties omtrent risico's en nadelige effecten van nanotechnologieën op bijvoorbeeld gezondheid of milieu. Onder kansen van nanotechnologie verstaan wij in dit onderzoek mogelijke toepassingen, producten en systemen die gebruik maken van nanotechnologieën. In het bijzonder richten wij ons op nanotechnologieën waarvan verwacht wordt dat deze bijdragen tot nieuwe functionaliteiten of verbeteringen in functionaliteiten die relevant zijn voor het veiligheidsdomein.

2.1.1 Onderzoeksaanpak

De onderzoeksvragen die wij willen beantwoorden in deze studie zijn beschreven en kort toegelicht in tabel 2.

	Onderzoeksvragen	Toelichting
<i>Technologie</i>	1. Wat is nanotechnologie?	Hieronder verstaan wij een duidelijke toelichting van nanotechnologie en bijbehorende definitie..
	2. Welke onderzoeksterreinen zijn er (op hoofdlijnen) te onderscheiden?	Hier gaat het om een, volgens literatuur, gangbare onderscheiding in deelgebieden van nanowetenschappen en nanotechnologieën.
<i>Toepassing</i>	3. Welke toepassingsgebieden zijn er (op hoofdlijnen) binnen deze onderzoeksterreinen te onderscheiden?	Hieronder verstaan wij de toepassingsgebieden van nanotechnologie voor civiele of interne veiligheidstoepassingen, met eventuele overlap voor defensie of externe veiligheidstoepassingen.
	4. Voor welke veiligheidspartners zijn deze toepassingsgebieden (mogelijk) relevant? En op welke wijze?	Onder veiligheidspartners verstaan wij de gebruikelijke organisaties waar VenJ haar taken en verantwoordelijkheden ten aanzien van veiligheid & justitie uitvoert (inclusief de organisaties onder verantwoordelijkheid van VenJ). Bij relevantie gaat het om toepassingen die volgens deze organisaties meerwaarde hebben in hun huidige of voorziene toekomstige activiteiten.
	5. Wat behelst nanotechnologie binnen deze voor de veiligheidspartners relevante toepassingsgebieden?	Hierbij gaat het om nieuwe functionaliteiten en unieke eigenschappen van nanotechnologieën die een specifieke toepassing mogelijk maken en om eisen die worden gesteld aan technologieën binnen een toepassingsgebied.
	6. Welke uitdagingen en ontwikkelingen zijn er de komende jaren (tot 5-10 jaar) binnen deze gebieden te verwachten?	Hierbij gaat het om verwachte problemen of dreigingen binnen een veiligheidsdomein en om ontwikkelingen in functionele prestaties van nanotechnologieën.
	7. Wat kan, op basis van de beantwoording van de vragen 1 t/m 6 geconcludeerd worden over de voor de veiligheidspartners van VenJ relevante toepassingsgebieden van nanotechnologie en de ontwikkelingen die zich hierbinnen de komende 5-10 jaar naar verwachting zullen voordoen?	Bij deze vraag gaat het om een synthese van de eerdere onderzoeksvragen en onze interpretaties daarvan.

Tabel 2 Onderzoeksvragen en toelichting

Voor de beantwoording van de probleemstelling en de bijbehorende onderzoeksvragen is gebruik gemaakt van een onderzoeksontwerp bestaande uit 4 van elkaar afhankelijke stappen. De onderlinge relaties zijn schematisch weergegeven in figuur 4. Hieronder beschrijven wij de stappen en gehanteerde onderzoeksmethoden. In sectie 2.2 worden de onderzoeksmethoden meer in detail beschreven.

Stap 1: Analyse en karakterisering huidige situatie.

De eerste stap had als doel om i) een breed overzicht te krijgen van nanotechnologische onderzoeksgebieden en veiligheidstoepassingen en ii) de toegevoegde waarde van nanotechnologische processen en producten in beeld te brengen. Hiervoor hebben wij gebruik gemaakt van de reeds aanwezige kennis binnen het projectteam en lokale partners zoals het MESA+ instituut voor nanotechnologie aan de Universiteit Twente. Daarnaast werd een literatuurstudie van bestaande rapportages over nanotechnologie en veiligheid uitgevoerd. De literatuurstudie had als kerntaak het categoriseren van nanotechnologische onderzoeksgebieden en toepassingsgebieden op het gebied van veiligheid. Een tweede taak was om scherper inzicht te krijgen in de rol van nanotechnologie, d.w.z. de toegevoegde waarde van nanotechnologische processen en producten ten aanzien van de functionaliteit van een bepaalde toepassing.

Stap 2 en stap 3: Inschatten ontwikkelingsdynamiek en relevantie nanotechnologie voor veiligheidstoepassingen

De karakterisering en karteringsactiviteiten in stap 1 leveren een goed overzicht van nanotechnologie en hoofdonderzoeksgebieden en veiligheidstoepassingen. De volgende twee stappen zijn sterk aan elkaar gerelateerd en bespreken we daarom hier gezamenlijk. In de tweede stap werd de fasering en technische haalbaarheid van de eerder geïdentificeerde veiligheidstoepassingen verkend, evenals de rol die nanotechnologie daarin speelt. Inzichten uit stap twee zijn gebruikt als input voor stap 3. Het doel van de derde stap was om de relevantie van verwachte nanotechnologietoepassingen te verkennen voor het Ministerie van Veiligheid en Justitie en haar veiligheidspartners. Hierbij gaat het om inschattingen over de relevantie voor de periode 2015-2025. Voor beide stappen zijn interviews uitgevoerd met experts op het gebied van onderzoek naar nanotechnologie, productontwikkeling en (operationeel) gebruik van veiligheidstechnologieën. Voor het inschatten van de relevantie van nanotechnologieën richtten wij ons in dit onderzoek op het verkennen van nanotechnologieën die bijdragen aan een significante verbetering van prestaties van (toekomstige) eindproducten, of bijdragen aan nieuwe functionaliteiten van eindproducten (zie ook paragraaf 1.2).

In sommige gevallen, zoals tijdens interviews met industriële partners, zijn vragen gesteld die relevant zijn voor beide stappen. Voor de interviews beoogden wij zoveel mogelijk een mix van experts te betrekken uit kennisinstellingen, industrie, en waar mogelijk ook experts op het gebied van innovatie bij het Ministerie van VenJ en haar veiligheidspartners. Van de experts verwachtten wij dat zij een breed overzicht hebben van relevante ontwikkelingen op het gebied van nanotechnologie of veiligheidstoepassingen in een specifiek toepassingsgebied, zoals bijvoorbeeld bescherming of detectie toepassingen.

Stap 4: Conclusies en eindrapportage

In de laatste stap worden de resultaten van de studie geanalyseerd en conclusies getrokken en verwerkt in een verslag. Het rapport is het voornaamste eindproduct van deze studie. Doel van het eindverslag is om de bevindingen en analyses van de diverse stappen te rapporteren en de onderzoeksvragen te beantwoorden. In het concluderende slothoofdstuk zullen ook algemene bevindingen aan bod komen die naar voren kwamen tijdens de analyse van de verschillende veiligheidstoepassingen.



Figuur 4. Overzicht onderzoeksontwerp

2.2 Onderzoeksmethoden

Voor het onderzoek werd eerst een literatuurstudie uitgevoerd om nanotechnologische onderzoeksgebieden en toepassingsgebieden op het gebied van veiligheid te categoriseren. Vervolgens werden interviews afgenomen om behoeftes en wensen van veiligheidspartners en de technische haalbaarheid van nanotechnologieën in kaart te brengen. De technologieën zijn ingedeeld op Technology Readiness Levels om een grove indicatie te geven in welk ontwikkelingsstadium ze zich bevinden.

2.2.1 Literatuurstudie – Meta-onderzoek

De literatuurstudie had als kerntaak het categoriseren van nanotechnologische onderzoeksgebieden en toepassingsgebieden op het gebied van veiligheid. Aangezien de studie een breed verkennend karakter heeft is ervoor gekozen om een overzicht te creëren met behulp van bestaande overzichtsstudies, in plaats van technische vakpublicaties in detail te verkennen. Een tweede taak in deze literatuurstudie was om scherper inzicht te krijgen in de rol van nanotechnologie. Nanotechnologie is veelal een ‘enabling technologie’, dat wil zeggen een technologie die bepaalde functies helpt mogelijk te maken en niet een eindproduct in zichzelf is. Voor de uiteindelijke functionaliteit van veiligheidstoepassingen zijn naast nanotechnologieën ook andere technologieën nodig, zie paragraaf 1.2.

Voor de literatuurstudie werden specifieke publicaties gezocht die nanotechnologieën voor veiligheidstoepassingen beschreven. Beide zoektermen werden gebruikt om rapporten te vinden op vooraanstaande wetenschappelijke databases zoals ‘Web of Science’ van Thomson Reuters of via Google Scholar. In de wetenschappelijke literatuur bleken weinig reviews te bestaan over nanotechnologie met betrekking tot veiligheid. Er bestaan wel een aantal rapportages over nanotechnologie en veiligheid, zoals bijvoorbeeld uitgevoerd door TNO en studies door het Europese

project ObservatoryNano. De meta-studie diende voor het identificeren van veiligheids-toepassingsgebieden en mogelijk interessante nanotechnologieën. Daarnaast werd de studie gebruikt voor een grove beschrijving van deze technologieën. Waar nodig zijn beschrijvingen aangevuld met technische details uit wetenschappelijke literatuur en interviews met experts. Beschrijvingen van de toepassingsgebieden zijn uitgebreid met inzichten uit de interviews met veiligheidspartners.

Voor de meta-studie is de volgende literatuur geïdentificeerd en verwerkt:

- Observatory Nano, Nanotechnology Landscape Report, 2011, section “Intelligent, connected & safe world”
- Observatory Nano, briefing no. 11, Nanosensors for explosives detection, February 2011
- Observatory Nano, briefing no. 19, Nanotechnologies for secure communication, August 2011
- Observatory Nano, briefing no. 8, Nanotechnologies for anti-counterfeiting applications, December 2010
- Observatory Nano, briefing no. 7, Nano-Enabled Protective Textiles, December 2010
- Observatory Nano, Security Technology Sector, First year progress report, Kshitij Aditeya Singh, Institute of Nanotechnology, May 2009
- Nanotechnology in Civil Security, report from Nanoforum workshop, March 2007
- Pinkse, Mosk, Multiple-scattering materials as physical unclonable functions, Roadmap article (not yet published), 2015
- Nanotechnology: innovation opportunities for tomorrow’s defence, TNO Science & Industry, Frank Simonis & Steven Schilthuizen, September 2005
- Nanotechnology: innovation opportunities for tomorrow’s defence, TNO Science & Industry, Frank Simonis & Steven Schilthuizen, March 2006
- Nanotechnology: innovation opportunities for tomorrow’s defence, TNO Science & Industry, Frank Simonis & Steven Schilthuizen, May 2009

Hierbij moet worden opgemerkt dat bovenstaande literatuur zelf een literatuurbespreking is en gebruik maakt van diverse bronnen zoals:

- Wetenschappelijke artikelen
- Boeken
- Conference proceedings en white papers
- Patenten
- Rapporten van de Europese commissie, instituten, bedrijven of projecten
- Websites van de Europese commissie, bedrijven, onderzoeksinstituten en groepen of online nieuwsberichten
- Persoonlijke communicatie en workshop resultaten

De literatuurstudie diende als basis voor het maken van een overzicht van verschillende toepassingsgebieden voor nanotechnologie voor veiligheid. Omdat de meta-studie is gebaseerd op bestaande rapporten worden interpretaties en insteken van de bestaande rapporten automatisch ook meegenomen in onze literatuurstudie. Om een breder perspectief te krijgen is het overzicht uit de literatuurstudie besproken tijdens de interviews. De uitkomsten van de literatuurstudie zijn aangevuld met interviewresultaten om een zo breed mogelijk perspectief te krijgen op nanotechnologieën en de toegevoegde waarde van nanotechnologie voor veiligheidstoepassingen (figuur 3).

2.2.2 Interviews – Experts en veiligheidspartners

Na de literatuurstudie werden interviews afgenomen (in totaal 27) met a) onderzoekers en experts op het gebied van nanotechnologie; b) bedrijven die producten leveren voor veiligheidstoepassingen; en c) met verwachte eindgebruikers en veiligheidspartners van het Ministerie VenJ. Bij de selectie van interviewkandidaten streefden wij er naar om zoveel mogelijk (internationaal georiënteerde) kandidaten te betrekken op basis van hun expertise in de verschillende toepassingsgebieden van nanotechnologie voor veiligheidstoepassingen uit stap 1. Experts hadden bijvoorbeeld een breed inzicht in gebieden van nanotechnologie en specifiek op relevante gebieden zoals nano-sensoren, nano-materialen of nano-fotonica. Dit stelde ons in staat een beter overzicht te krijgen van alle belangrijke toepassingsgebieden (op hoofdlijnen) van nanotechnologie voor veiligheid.

Om goede inschattingen te kunnen maken in de mogelijkheden en relevantie van nanotechnologie streefden wij ook naar een evenwichtige mix van experts uit wetenschap en andere kennisinstellingen, industrie, en waar mogelijk ook experts op het gebied van innovatie bij het Ministerie van VenJ en haar veiligheidspartners. De wetenschappelijke experts opereren veelal op groepsleider of hoogleraar niveau waardoor zij een breed overzicht hebben over ontwikkelingen in hun vakgebied. Experts uit de industrie zullen vooral verantwoordelijk zijn voor innovatie en ontwikkeling (bijvoorbeeld chieft technology officers). Veiligheidspartners van het Ministerie VenJ die zijn geïnterviewd zijn onder andere van de politie, brandweer, het Nederlands Forensisch Instituut, Koninklijke Marechaussee, het Ministerie van Defensie, het Openbaar Ministerie en de Dienst Justitiële Inrichtingen. Een overzicht van alle interviewpartners is te vinden in bijlage 2.

De interviews zijn gebruikt om het overzicht van nanotechnologieën en veiligheidstoepassingen (zie paragraaf 1.4) te verifiëren en aan te vullen. Tijdens de interviews met experts en veiligheidspartners werd gevraagd of zij de relevantie van nanotechnologie of veiligheid in hun specifiek werkgebied kunnen inschatten. Expliciete aandacht werd besteed aan de meerwaarde die nanotechnologie kan bieden. Experts lichtten kritieke factoren en onzekerheden in de technologieontwikkeling toe en inschattingen werden gedaan over mogelijke ontwikkelingen van nanotechnologieën. Mogelijke eindgebruikers of veiligheidspartners werden gevraagd om aan te geven aan welke eisen nieuwe technologieën moeten voldoen om mogelijk een oplossing te kunnen bieden voor huidige of toekomstige problemen in een specifiek veiligheidsdomein. Hiernaast werd een inschatting gemaakt van verwachte ontwikkelingen in dit veiligheidsdomein in de toekomst.

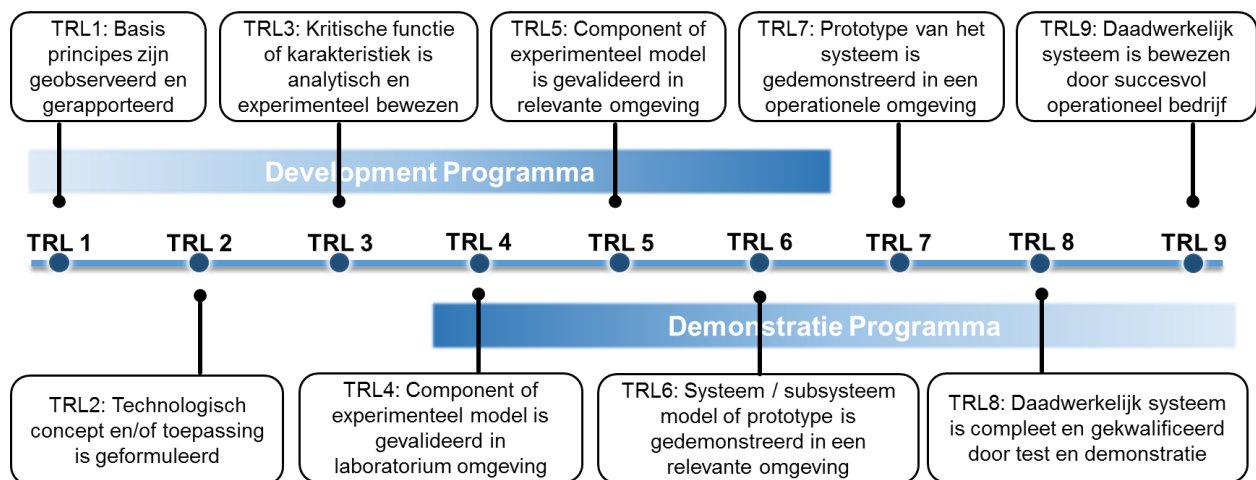
Een schema met vragen werd als richtlijn gebruikt voor de interviews om vergelijkbare vragen te stellen. Een overzicht van de gebruikte schema's voor experts en gebruikers kan gevonden worden in bijlage 3.

2.2.3 Indeling Technology Readiness Levels

Per toepassingsgebied is een inschatting gemaakt van de TRL (Technology Readiness Level) niveaus om aan te geven hoe ver de technologieën ontwikkeld zijn. De indeling van technologieën op TRL niveaus is een standaardmethode om de technische rijpheid van een technologie aan te geven en maakt gebruik van een schaal met 9 niveaus. In de indeling betekent schaal 1 dat de technologie nog in een heel vroeg ontwikkelingsstadium zit terwijl schaal 9 aangeeft dat de technologie (succesvol) gecommercialiseerd is. Een definitie van TRL niveaus zoals gebruikt door de Rijksoverheid Nederland is te vinden in figuur 5.

Door de brede scope van dit onderzoek en de vele mogelijke toepassingsmogelijkheden is het moeilijk om een TRL niveau aan een technologie te hechten, omdat het TRL stadium mede afhankelijk is van

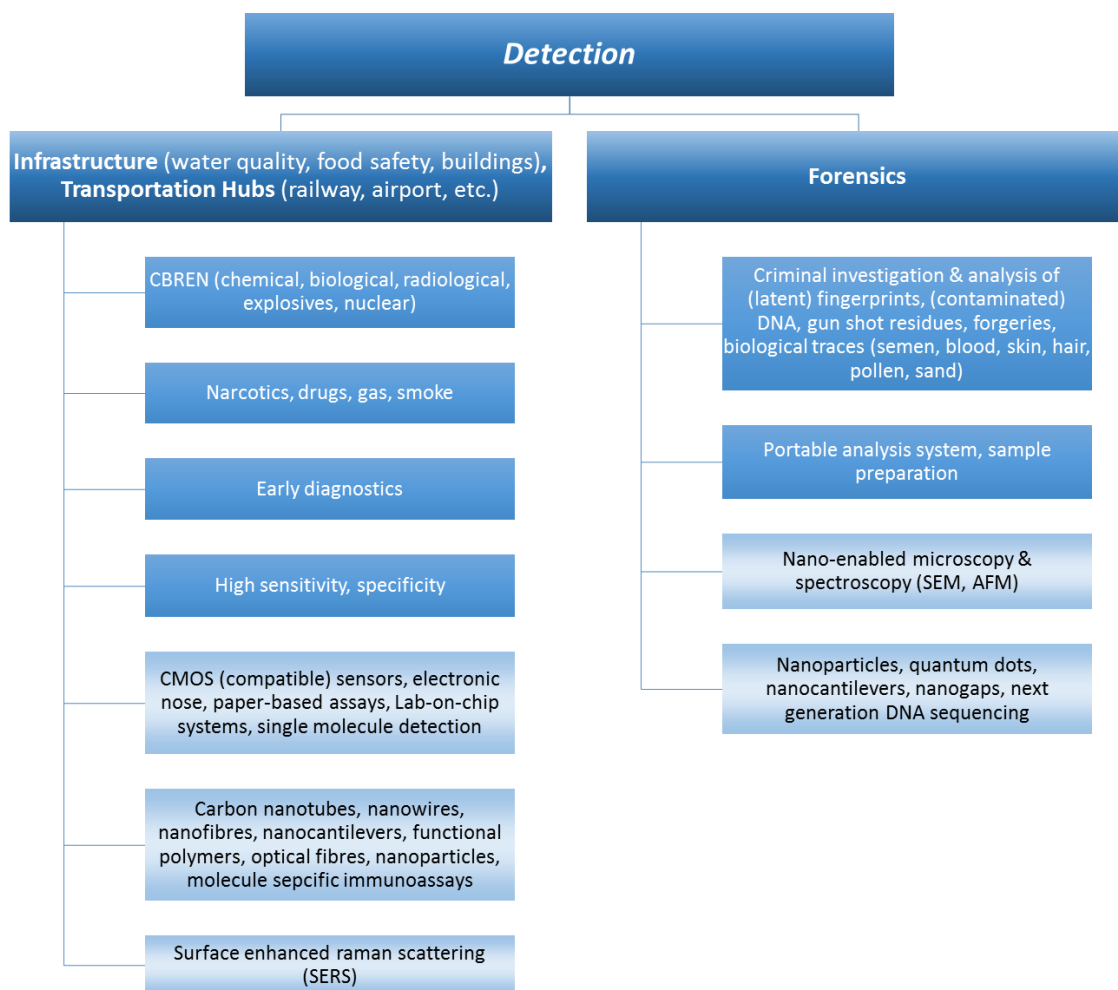
de toepassing. Profileren van DNA is bijvoorbeeld een standaardtechniek in labs voor forensisch onderzoek en dus in een hoog TRL niveau (TRL 9) terwijl draagbare DNA profilering nog in het onderzoeksstadium is (TRL niveau 2-4). Vanwege de complexiteit in het indelen in TRL niveaus wordt er in dit rapport gebruik gemaakt van het categoriseren van technologieën in onderzoeksfase (TRL 1-4), productontwikkelingsfase (TRL 5-8) en commerciële fase (TRL 9). De indeling in TRL niveaus is gemaakt op basis van literatuur en interviews en bevestigd door een aantal geïnterviewde technische experts. Hierbij moet worden opgemerkt dat het gaat om ruwe inschattingen en niet om diepgaande analyses ten aanzien van de indeling van technologieën in specifieke TRL niveaus. Een preciezere inschatting moet worden gekoppeld aan concrete toepassingen en specifieke technologieën. Dergelijke inschattingen vallen buiten de scope van dit onderzoek.



Figuur 5. Definitie TRL niveaus gebaseerd op schema Rijksoverheid Nederland.

3. Detectie

Behoeftes, wensen en eisen voor de detectie van gevaarlijke stoffen (sectie 3.1) en voor forensische toepassingen (sectie 3.2) worden in dit hoofdstuk nader beschreven. Daarnaast worden verwachte uitdagingen en ontwikkelingen genoemd. Nanotechnologieën die mogelijk interessant zouden kunnen zijn voor deze toepassingen worden toegelicht in secties 3.1.3 en 3.2.3. Een overzicht van nanotechnologieën voor detectie is hieronder weergegeven (figuur 6) waarbij de toepassingsgebieden in donkerblauw zijn aangegeven, specifieke eigenschappen en toepassingen in blauw en de basistechnologieën in lichtblauw.



Figuur 6. Overzicht van nanotechnologieën voor detectie.

3.1 Detectie van gevaarlijke en ongewenste stoffen

Brussel, 22 maart 2016 – “Al maanden werd gevreesd voor wat dinsdag werkelijkheid wordt: in de vroege ochtend tijdens spitsuur laten terroristen zien hoe kwetsbaar de Belgische hoofdstad is. Op het Brusselse vliegveld Zaventem vallen minstens 14 doden bij een zelfmoordaanslag. Nog meer doden, naar schatting 20, vallen een uur later op metrostation Maalbeek waar een bom tot ontploffing wordt gebracht in een metrowagon. Het totaal aantal gewonden is ruim 200.”⁷

⁷ <http://www.nrc.nl/next/2016/03/22/de-belgen-willenzich-niet-klein-laten-krijgen-1603383>, gelezen op 20.05.16

De recente gebeurtenissen in Brussel laten zien dat detectie van gevaarlijke stoffen belangrijke en actuele aspecten zijn op verkeersknooppunten zoals vliegvelden en treinstations. Detectie kan dus een belangrijke rol spelen bij het voorkomen van terroristische aanvallen op verkeersknooppunten en om andere vitale infrastructuur te beschermen, zoals het monitoren van de veiligheid van drinkwater of van levensmiddelen. CBRNE detectie, het herkennen van chemische (C), biologische (B), radioactieve (R), nucleaire (N) of explosieve (E) stoffen, is hiervoor het meest belangrijke. Dit geldt ook voor een brand in een fabriek of voor een gasalarm. Het meten van gevaarlijke stoffen in de lucht is essentieel om het risico van omstanders en hulpverleners beter in te kunnen schatten. De detectie van CBRNE is dus niet alleen een interessant onderwerp voor de beveiliging van de burgerluchtvaart en voor terrorismebestrijding, maar ook voor politie en brandweer. Naast CBRNE is ook de detectie van wapens interessant, evenals het opsporen van mensen en dieren om mensensmokkel tegen te gaan en illegaal geïmporteerde dieren te vinden. Daarnaast zijn ook drugs en verdovende middelen targets voor detectie bij de politie of de Dienst Justitiële Inrichtingen. Er zijn legio mogelijkheden voor het toepassen van detectiesystemen. Analyse van het rioolwater bijvoorbeeld rondom gevangenissen kan een indicatie geven over het gebruik van drugs en de aanwezigheid van nieuwe synthetische drugs.

3.1.1 Behoeftes, prioriteiten en wensen van detectie

Uit gesprekken met veiligheidspartners blijkt dat nucleaire en radioactieve stoffen op dit moment niet de grootste dreiging voor verkeersknooppunten zijn. Een aanval met deze stoffen kan uiteraard wel grote gevolgen hebben waarbij naast de vroege detectie ook ontsmetting van personen, de omgeving en het milieu een belangrijke rol speelt. Op vliegvelden is vooral de detectie van explosieven van groot belang. Dit geldt ook voor chemische aanvallen omdat chemische stoffen vaak verspreid worden door detonatie. De detectie van kleine hoeveelheden explosieven bij passagiers op vliegvelden en bij luchtvracht wordt nu vaak met honden uitgevoerd (zie figuur 7). De training van honden is duur, en hond en begeleider moeten beschikbaar zijn als een verdacht object wordt gevonden. Het nemen van monsters bij verdachte objecten is niet altijd eenvoudig omdat gevaar voor ontploffing groot is en aanraking met objecten bij voorkeur wordt voorkomen. Zo kan er vals alarm optreden tijdens het detecteren van explosieven door glycerine in handcrème of door kruidresten aan kleding of huid van iemand die een schot heeft gelost maar geen wapen bij zich draagt, bijvoorbeeld bij een jager. Sensoren die nauwkeurig explosieve stoffen zouden kunnen detecteren, het liefst op afstand en met zo weinig mogelijk interventie en ongemak voor de passagiers, zouden een interessant alternatief kunnen bieden voor de huidige methoden. Vooral op treinstations zijn veiligheidscontroles minder geaccepteerd terwijl hier ook een dreiging bestaat.

Voor de identificatie van gevaarlijke stoffen bij een brand wordt nu de concentratie van verwachte stoffen met meetbuisjes en explosie- of radioactiviteit-meters gedetecteerd, maar deze zijn specifiek voor een aantal stoffen zoals ammoniak of zoutzuur. Hier zou het van belang zijn om een groter aantal stoffen te kunnen detecteren. Ook de detectie van gas is moeilijk, zeker als buitenshuis wordt gemeten waardoor een inschatting van de gas concentratie in de woning moeilijk is. Gevoeligere explosieven-meters zouden hiervoor van grote waarde kunnen zijn.

Het detecteren van synthetische drugs en illegale drugslaboratoria is een grote uitdaging voor de politie. Detectie van specifieke wateroplosbare stoffen in het rioolwater zou een indicatie kunnen geven voor aanzienlijk drugsgebruik in een omgeving of voor een illegaal lab. Indicatieve stoffen en verhoogde concentraties hiervan zouden ook in de lucht kunnen worden gemeten. Productie van drugs vindt vaak in landelijke streken plaats waar ook veel boerderijen zijn, waardoor interferentie

met ammoniak mogelijk is. Naast illegale drugslaboratoria speelt ook het opsporen van zelfgemaakte explosieven een belangrijke rol. Bij de politie worden naast honden ook ratten gebruikt voor de detectie van explosieven en voor kruidresten. Ratten zijn echter angstig in nieuwe situaties, maar kunnen wel snel en eenduidig een respons geven. Een snelle bemonstering en detectie zou helpen om ter plekke mensen te kunnen identificeren, bijvoorbeeld bij een schietpartij.



Figuur 7. Voor de detectie van explosieven in bagage en (lucht)vracht worden honden gebruikt. Deze worden ook ingezet om mensen op te kunnen sporen die illegaal het land in proberen te komen (*links*). Bron: Ministerie van Defensie. Snelle tests om ziektes te kunnen detecteren zijn niet alleen van belang in de gezondheidszorg maar ook voor gevangenen om gedetineerden op bijvoorbeeld tuberculose te kunnen testen (*rechts*). Bron: Dienst Justitiële Inrichtingen

In de gevangenis worden gedetineerden, maar ook bezoekers en personeel, bij de toegang tot het gebouw gecontroleerd. Dit gebeurt door een snuffel-sluis of met honden, die ook worden gebruikt om de cellen naar illegale drugs te doorzoeken. Hiernaast worden urinetests gedaan maar deze zijn manipuleerbaar of vormen een grote inbreuk in de privacy als het monster moet worden afgeleverd in bijzijn van personeel. Alternatieve, betrouwbare en moeilijk manipuleerbare methoden zouden wenselijk zijn. Naast de detectie van drugs speelt ook het testen op tuberculose een grote rol in gevangenen om infectieziektes te voorkomen die door gedetineerden uit het buitenland of daklozen kunnen worden overgedragen. Nu wordt hiervoor geprikt, een methode geïllustreerd in figuur 6, die vaak vals positieve uitslagen geeft. Het alternatief is om longfoto's te maken – een methode die niet eenvoudig uitvoerbaar is. Makkelijke en betrouwbare alternatieven hiervoor zijn dus wenselijk.

3.1.2 Mogelijke detectiemethodes en belangrijke eisen

Nieuwe technologieën voor het vliegveld moeten passagiervriendelijk, efficiënt en effectief zijn. Ze moeten een grote doorstroom aankunnen en op grote schaal toepasbaar zijn, met een beperkte analysetijd (zie ook figuur 8). Passagiers fouilleren is aan de ene kant ongemakkelijk voor de passagiers en kost aan de andere kant veel tijd – idealiter zouden de passagiers zo door kunnen lopen en op afstand gescand worden. Verder zouden nieuwe technologieën flexibel moeten zijn zodat nieuwe dreigingen toegevoegd kunnen worden, of via de technologie of via de software. Het beperken van valse alarmen is een zeer belangrijk punt op vliegvelden, omdat de gevolgen hiervan, grootschalige ontruiming, grote impact hebben. Het meten van kleine hoeveelheden is een interessant onderwerp voor CBRNE detectie maar ook voor de detectie van brand in een vroeg stadium zodat de brandweer kan reageren voordat de brand echt is ontwikkeld. In situaties waar redelijk veel tijd is, bijvoorbeeld voor het opsporen van menselijke botten na bijvoorbeeld een bekenenis van een

moord, kan detectieapparatuur naar de plaats delict worden gebracht en zou de apparatuur mogelijk door een specialist bediend kunnen worden. Voor veel andere toepassingen zou apparatuur wel makkelijk beschikbaar en breed aanwezig moeten zijn, maar ook simpel te gebruiken. Detectie van drugs bij een verdachte op straat zou ter plekke, snel en eenduidig een resultaat op moeten leveren zonder specifieke kennis te vereisen van de agenten.



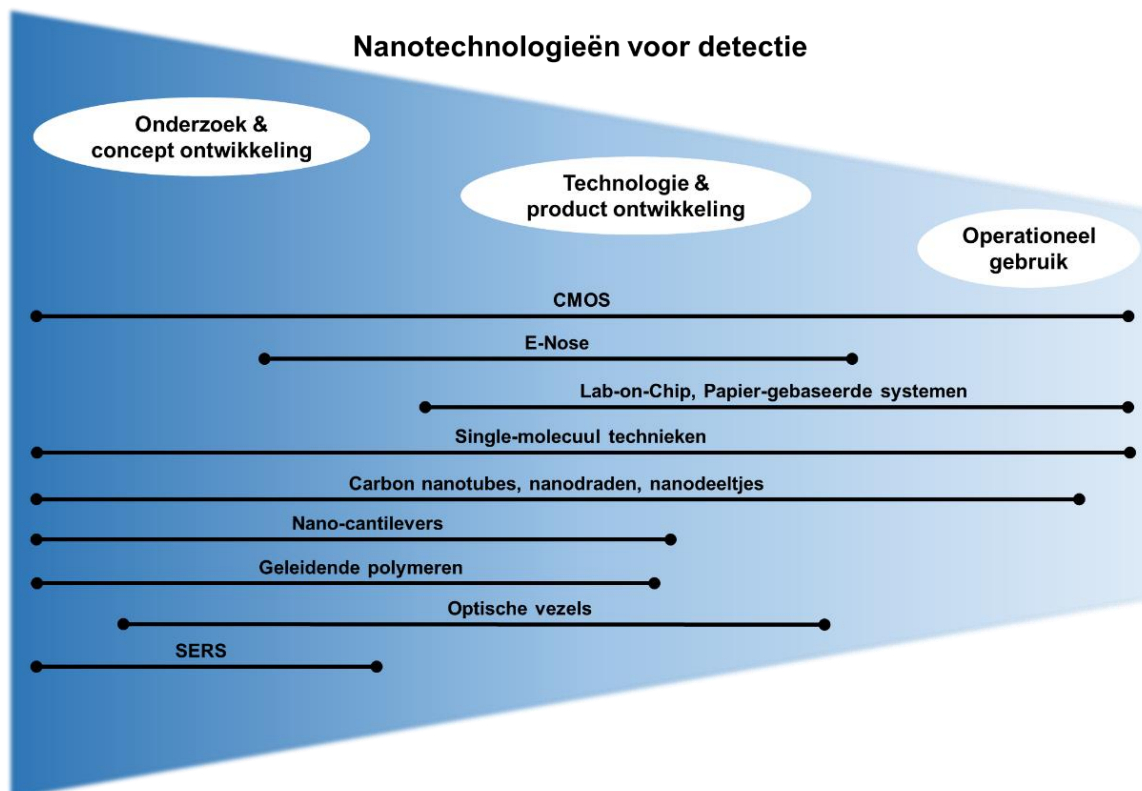
Figuur 8. Technologieën om de veiligheid op het vliegveld te waarborgen moeten een grote doorstroomcapaciteit hebben en niet te veel eisen van passagiers. Bron: Schiphol

Nano-sensoren zouden mogelijk een interessante meerwaarde kunnen bieden voor CBRNE en drugs detectie. Zoals opgemerkt tijdens de interviews is de grootste meerwaarde van nano-sensoren dat zij op de lengteschaal van moleculen meten, dus op enkele nanometers, waardoor zij een hoge sensitiviteit hebben en kleine concentraties tot enkele moleculen van een stof kunnen detecteren. Hierdoor zouden nano-sensoren enkele bouwstenen van het lichaam zoals DNA of virussen kunnen detecteren. De sensitiviteit hangt wel van de signaal-ruis verhouding af.⁸ Naast de hoge sensitiviteit worden vaak ook specifieke molecuul-molecuul interacties gebruikt om met bijvoorbeeld een receptor een bepaald virus te kunnen detecteren. Dit principe is gebaseerd op de affiniteit van twee moleculen met elkaar en heeft enkele voordelen vergeleken met enzymatische methodes die nu vaak worden gebruikt in sensoren om bijvoorbeeld glucose te meten: (i) de specifieke binding zelf levert het signaal dat gemeten wordt op en niet de omzetting van een molecuul door een enzymatische reactie en (ii) de meettechniek is toepasbaar voor een grote bandbreedte van moleculen. De lengteschaal speelt ook een rol bij optische detectie. Zichtbaar licht heeft een golflengte van enkele honderden nm en kan daarom kleiner gefocuseerd worden. Door kleine volumes te gebruiken kan de tijd van de metingen beperkt worden. Integratie van een grote aantal sensoren op een klein oppervlak maakt het mogelijk om tegelijkertijd te meten en zo de doorvoer te verhogen.

3.1.3 Overzicht van nano-gebaseerde meetprincipes en technologieën

Voor de detectie van verschillende soorten stoffen zijn een aantal meetprincipes en nano-gebaseerde sensortechnologieën ontwikkeld. Sommige van deze technologieën zijn al op de markt te vinden terwijl andere nog in het ontwikkelingsstadium zijn. Een grove inschatting van TRL niveaus voor deze technologieën wordt in figuur 9 gegeven. Een beschrijving van de TRL niveaus en de indeling is te vinden in sectie 2.2.3. Nano-gebaseerde meetprincipes en technologieën werden in deze sectie beschreven.

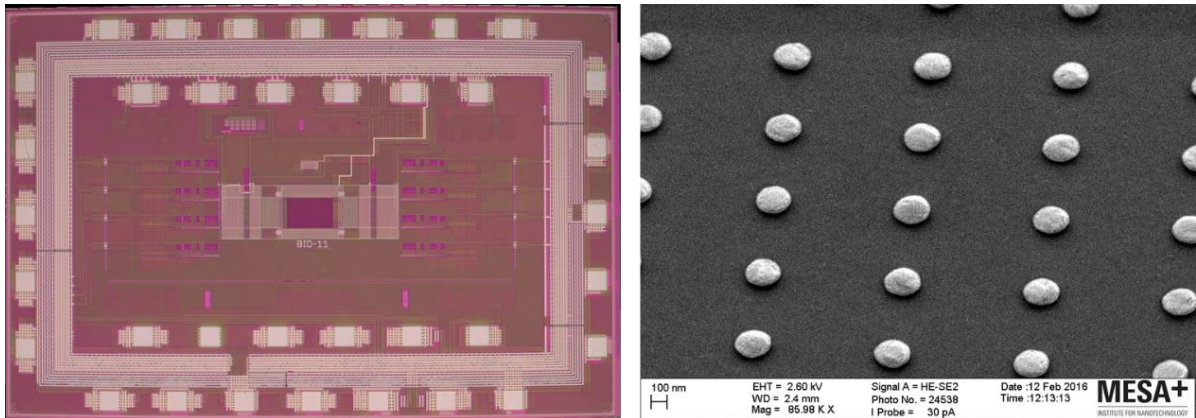
⁸ De signaal-ruis verhouding is een maat om de kwaliteit van het gemeten signaal te bepalen ten opzichte van de achtergrondruis. Als de achtergrondruis zo hoog is dat het signaal niet meer duidelijk zichtbaar is dan is er sprake van een slechte signaal-ruis verhouding.



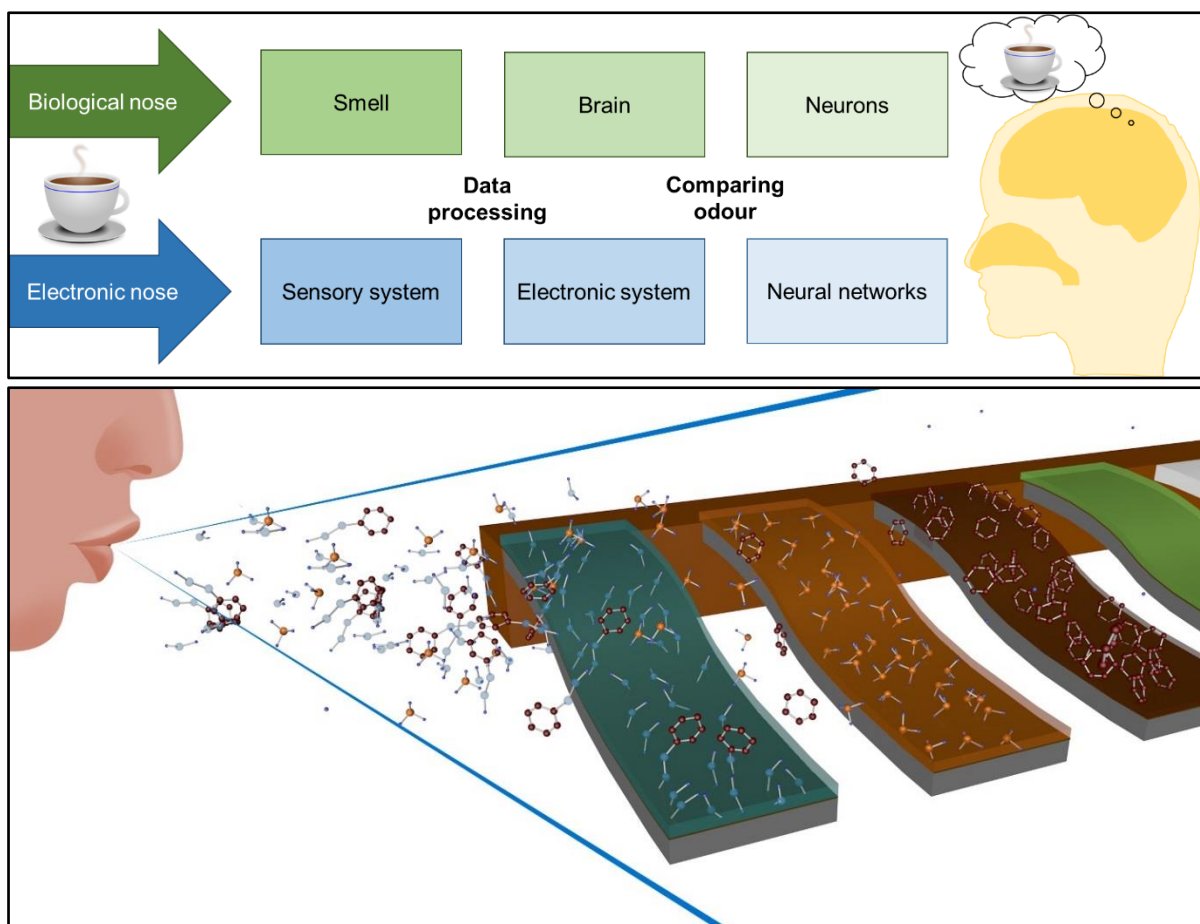
Figuur 9. Technologieën voor detectie ingedeeld in TRL niveaus.

In de huidige elektronica-industrie speelt **CMOS** (Complementary Metal–Oxide–Semiconductor) halfgeleidertechnologie een belangrijke rol en is waarschijnlijk een van de meest succesvolle nanotechnologieën. Ook al is CMOS een uitontwikkelde technologie, er worden steeds kleinere structuren gefabriceerd met afmetingen van tientallen nanometers waardoor een steeds hogere rekencapaciteit bereikt wordt. De rekencapaciteit is ook belangrijk voor nano-sensoren om de verzamelde data te kunnen verwerken. Hiernaast is de integratie van nano-materialen en vooral nano-sensoren met CMOS-technologie van groot belang om de verkregen informatie ook te kunnen verwerken. CMOS gebaseerde sensoren kunnen ook worden toegepast om enkele moleculen te detecteren (zie figuur 10). Door hun zeer lage stroomverbruik worden CMOS-schakelingen in de meeste elektronische apparaten gebruikt.

Een **elektronische neus** is een type nano-sensor die een speurhond nabootst en vluchtige stoffen uit chemicaliën en explosieve stoffen kan detecteren (figuur 11). Elke stof heeft een chemische compositie die een unieke vingerafdruk geeft. Een bekende stof wordt door het systeem gemeten en de vingerafdruk wordt door het systeem opgeslagen en gekoppeld aan deze stof. Vervolgens kan het systeem verschillende vingerafdrukken leren, zoals een kunstmatig neuronale netwerk, en een set van verschillende chemische en explosieve stoffen herkennen. Uitdagingen van de elektronische neus zijn de stabiliteit van de sensor en problemen met vervuiling door water of andere geuren en vluchtige stoffen die in de lucht zitten [15].



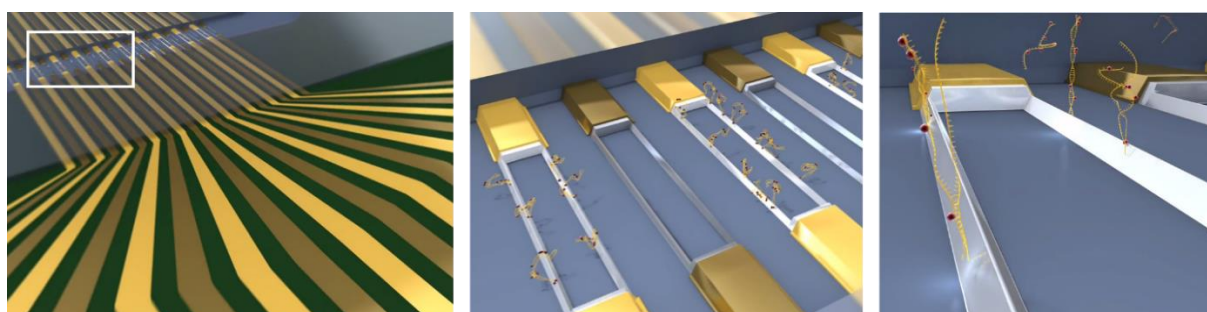
Figuur 10. Links: De donkere rechthoek in het midden van het plaatje is een array van 256×256 nanoelektroden (nanocondensatoren) die individueel kunnen worden gemeten. Biologisch materiaal kan worden ingevangen door antilichamen of DNA-fragmenten aan de elektrode te koppelen en de verandering in de capaciteit te meten. Bron: NXP Rechts: Detailopname van een kleine groep nanoelektroden uit de links afgebeelde array. De elektroden hebben een diameter van rond 200 nm en staan op een onderlinge afstand van $600 \text{ nm} \times 890 \text{ nm}$. Bron: NXP, foto gemaakt bij MESA+



Figuur 11. Meetprincipe van een elektronische neus vergeleken met een biologische neus (boven). Het meetprincipe van een elektronische neus kan ook worden gebruikt om adem te analyseren en met behulp van cantilever sensoren ziektes hierin te detecteren (beneden). Bron: MESA+ Instituut voor Nanotechnologie, Universiteit Twente

De integratie van verschillende laboratoriumfuncties in een chip is ook bekend als **Lab-on-Chip** technologie. Hier kunnen op een klein oppervlak van enkele vierkante millimeters vloeistoffen verdund, gemengd, gescheiden of geanalyseerd worden. Het voordeel van Lab-on-Chips is dat zij maar weinig monstermateriaal nodig hebben omdat kanalen worden gebruikt in de nanometer- tot micrometer-schaal en hierdoor de analyses ook snel kunnen worden uitgevoerd. Lab-on-Chips zijn sensoren die kunnen worden gebruikt om verschillende soorten moleculen te detecteren voor diagnostische toepassingen, DNA-analyses tot detectie van gevaarlijke stoffen.

Papier-gebaseerde sensoren worden gemaakt uit papier waarop een patroon geprint wordt uit een dunne waterafstotende (hydrofobe) polymeer laag [16]. Vloeistof kan door de capillaire structuren in het papier getransporteerd worden binnen de millimeter-grote kanalen die gedefinieerd zijn door het patroon. Deze papieren sensoren kunnen snel en tegelijkertijd verschillende monsters meten en zijn hierdoor geschikt om ziektes in lichamelijke vloeistoffen zoals bloed of urine te testen. Door de materiaalkeuze zijn de tests goedkoop, draagbaar en technisch eenvoudig en zijn daarom zeer geschikt voor diagnostiek in minder-ontwikkelde landen [17].



Figuur 12. Animatie van een array van nanodraden (links) voor de detectie van kanker-specifieke DNA-fragmenten die aan de nanodraden binden en hierdoor kunnen worden gemeten (midden, rechts). Deze nanodraden array is onderdeel van een pil die ingeslikt kan worden om darmkanker in een vroeg stadium te kunnen detecteren, waarnaar op dit moment onderzoek wordt gedaan. Bron: BIOS Lab on chip groep, Universiteit Twente

Sensoren met **carbon nanotubes of nanodraden** kunnen explosieve stoffen detecteren door de absorptie en de hieruit resulterende verandering in de elektrische weerstand te meten. Door een gefunctionaliseerde laag aan te brengen kan de selectiviteit van de sensor verhoogd worden⁹ [18]. Nanodraden en **carbon nano-vezels** kunnen ook worden gebruikt om biologische stoffen zoals Anthrax, smallpox, ricin en botuline te detecteren¹⁰ (zie figuur 12). De detectie van Anthrax met elektrische sensoren uit **carbon nano-vezels** is gedemonstreerd door NASA en gecommmercialiseerd door Early Warning Inc¹¹ en heeft naast de sensor ook nog geïntegreerde microfluidica voor field tests en detectie binnen 30 minuten [18]. Carbon nanotubes zijn ook gebruikt om bestaande röntgenapparatuur te verbeteren en zorgen voor een hogere resolutie, een lager stroomverbruik en een snellere meting. Antennes uit carbon nanotubes zouden gebruikt kunnen worden om opgesloten explosieve stoffen of wapens op te sporen en om mensen en bagage te scannen [19]. Een uitdaging voor de commercialisatie van carbon nanotube sensoren is de opschaling van de fabricage en de hoge

⁹ Eiwitten of toxinen kunnen bijvoorbeeld door specifieke interacties met respectievelijk aptameren of peptiden worden gemeten.

¹⁰ De nanodraden vezels kunnen worden bewerkt met een dunne laag van bijvoorbeeld zinkoxide, of met een coating uit goud-, zilver- of nikkel-nanodeeltjes en pathogeen-specifieke antilichamen. Verder kunnen cadmium-zinktelluride nanodraad arrays worden toegepast om gammastraling te detecteren terwijl lithium nanodeeltjes als neutronendetector getest zijn.

¹¹ <http://www.earlywarninginc.com/technologies.php>, gelezen op 27 Mei 2016

kosten voor laag volume producties. Nanodraad sensoren hebben op grotere schaal nog vaak defecten die de meting en de reproduceerbaarheid van de sensor beïnvloeden [15].

Verskillende soorten **nanodeeltjes** kunnen als sensor gebruikt worden om waterstof of DNA-moleculen elektrisch of optisch te detecteren. Zij worden ook toegepast voor de zuivering, scheiding en concentratie van een monster [19]. Magnetische nanodeeltjes met antilichamen worden in het Minicare systeem van Philips gebruikt om moleculen uit vingerprikbloed te selecteren die dan optisch kunnen worden gemeten. De test kan worden gebruikt om binnen enkele minuten vast te stellen of sprake is van een hartinfarct.¹²

Optische vezels kunnen als sensor gebruikt worden door een fluorescerende polymeercoating op de vezels aan te brengen. Het te detecteren molecuul leidt tot een verandering in de polariteit van de kleurstof die door een verschuiving in de golflengte gemeten kan worden. Hierdoor zouden explosieven zoals TNT gedetecteerd kunnen worden [19]. In het algemeen kunnen deze optische biosensoren veranderingen op de oppervlakte detecteren die direct resulteren uit een biochemische reactie van gevaarlijke stoffen (b.v. ricin, toxinen of enzymen) met moleculen die geïmmobiliseerd zijn op de oppervlak van de sensor, waardoor geen extra fluorescent label nodig is. Deze biosensoren hebben het voordeel dat zij snel meerdere componenten kunnen screenen, maar wel met een lagere sensitiviteit [18].

Nano-mechanische sensoren bestaan uit cantilevers met een gefunctionaliseerd oppervlak waaraan chemische of explosieve stoffen specifiek kunnen worden gebonden. Hierdoor verandert de oppervlaktespanning en de buiging van de cantilever, die gemeten kan worden [15]. Deze soort sensor kan bijvoorbeeld gebruikt worden om moleculen in lucht te detecteren, bijvoorbeeld om ziektes te bepalen door de adem van een patiënt te analyseren (zie figuur 11). Sensoren met **geleidende polymeren** verbinden twee elektroden met elkaar en kunnen gebruikt worden voor het detecteren van vluchtige stoffen en gasen. Carbon black kan bijvoorbeeld aan polystyreen toegevoegd worden om het polymeer geleidend te maken en kan dan gebruikt worden om explosieven en chemische stoffen zoals de zenuwgassen sarin en soman te detecteren [18].

SERS (Surface Enhanced Raman Scattering) is een detectie techniek die gevoelig kleine hoeveelheden van een molecuul kan detecteren. Door middel van sensitieve oppervlakken of nanodeeltjes op een oppervlak kan het signaal extra versterkt worden en kunnen drugs en verdovende stoffen gedetecteerd worden in fysiologische vloeistoffen zoals bloed, urine en speeksel [19].

3.1.4 Verwachte uitdagingen en ontwikkelingen

Één van de uitdagingen voor detectie is de integratie van alle CBRNE componenten in een sensor. Kleine hoeveelheden en specifieke stoffen te detecteren is mogelijk met nano-sensoren, maar tot nu toe is het nog niet mogelijk om met een enkele sensor C, B, R, N en E te detecteren [18]. Bij de detectie zijn over het algemeen nauwkeurigheid en reproduceerbaarheid belangrijke eisen. Een uitdaging voor het detecteren van explosieven is dat deze geen of weinig vluchtige stoffen bevatten waardoor het moeilijk is op afstand en in de lucht te meten [15]. Verder is er een grote hoeveelheid substanties die als explosieven gebruikt kunnen worden, waardoor de sensoren getraind moeten worden op een hele set van moleculen om specifiek explosieven te kunnen detecteren. De stabiliteit van de sensoren is ook een belangrijk aandachtspunt. Zoals uit interviews naar voren kwam moet vervuiling door water of andere vluchtige stoffen in de lucht, bijvoorbeeld parfum, voorkomen worden

¹² www.philips.com/minicare

om de werking van de sensor niet te beïnvloeden. Hiernaast is de keuze van de moleculen op het sensoroppervlak belangrijk zodat de specifieke interactie met het targetmolecuul gevoelig kan worden gemeten. Ontwikkelingen op het gebied van nano-sensoren zijn nu voornamelijk te zien voor medische toepassingen en nauwelijks voor veiligheidstoepassingen. De financieringsmogelijkheden en ook het belang voor onderzoek naar gezondheidstoepassingen is groter voor medische toepassingen, maar ontwikkelde sensoren op dit gebied zouden ook interessant kunnen zijn voor veiligheidstoepassingen.

Uit de interviews blijkt dat het gebruik van sensoren in de komende 5-10 jaar naar verwachting sterk zal toenemen, zeker voor gezondheidstoepassingen en met zicht op gebruiksgebieden zoals 'internet der dingen'¹³ waar sensoren een belangrijke rol zullen spelen. De volledige toepassing van affiniteits-gebaseerde continue metingen van een grote aantal moleculen zal wel nog 10-20 jaar duren. Verder wordt verwacht dat de draadloze communicatie van elektronica steeds meer toeneemt. Voor detectie op vliegvelden verwachten veiligheidspartners in de komende 5-10 jaar geen radicale veranderingen, alleen dat controles steeds passagiervriendelijker zullen worden. Nieuwe technologieën moeten voldoen aan een toenemend aantal reizigers en de hiermee verbonden hogere snelheid, terwijl kosten steeds verder verlaagd dienen te worden. Technologieën moeten ook kunnen omgaan met zelf-ontwikkelde explosieven: thuis geproduceerde drugs of explosieven zijn een uitdaging voor detectie.

3.2 Forensisch onderzoek

Een plaats delict moet grondig worden onderzocht, sporen moeten zichtbaar worden gemaakt, geselecteerd en veiliggesteld en de gebeurtenissen gereconstrueerd worden - dit is cruciaal voor strafrechtelijk onderzoek. Op het gebied van forensisch onderzoek is detectie en analyse van sporen zoals DNA, bloed, sperma, speeksel, urine, of haar van belang voor misdadonderzoek. Maar ook zaden, pollen of andere biologische sporen kunnen helpen om een misdaad op te lossen. Voor het Nederlands Forensisch Instituut en de politie is de detectie van gevaarlijke stoffen van belang, maar ook de bemonstering en identificatie van residuen na een incident, zoals een explosie, zijn belangrijk voor het forensisch onderzoek.

3.2.1 Behoeftes en wensen voor forensisch onderzoek

De detectie van biologische sporen zoals DNA, bloed, sperma, haar of huid is van groot belang voor de reconstructie van een misdaad. Monsters worden nu op logische plaatsen genomen, bijvoorbeeld huidcellen van een armleuning of een klink, waardoor sporen op onlogische plekken over het hoofd gezien kunnen worden. Nieuwe technieken om sporen te kunnen detecteren zouden behulpzaam zijn. Luminol kan bijvoorbeeld gebruikt worden om bloed op te sporen, maar deze techniek is destructief voor het DNA in het bloed en niet geschikt voor bemonstering.

Latente vingerafdrukken zijn moeilijk te detecteren maar kunnen zichtbaar worden gemaakt met behulp van nanodeeltjes of kwantumdots die aan de chemische residuen van de vingerafdrukken binden. Naast het zichtbaar maken is ook de bepaling van de ouderdom van de sporen heel erg belangrijk. Dit zou bijvoorbeeld behulpzaam zijn op plekken waar veel vingerafdrukken aanwezig zijn die niet allemaal met het delict te maken hebben. Hier zouden nanodeeltjes of kwantumdots kunnen worden toegepast die mogelijk aan stoffen binden die pas na een bepaalde tijd gevormd worden in

¹³ Het 'internet der dingen' of 'internet of things' beschrijft de verbinding van alledaagse voorwerpen met het internet waarbij gegevens kunnen worden uitgewisseld door een netwerk. Zie ook: <http://www.oxforddictionaries.com/definition/english/internet-of-things>

latente vingerafdrukken. Deze deeltjes zouden ook aan andere stoffen die door de huid worden afgescheiden kunnen binden, zoals drugsresiduen, nicotine of aspartaam (een zoetstof, veel gebruikt in licht frisdranken), waardoor extra informatie over de dader of een verdachte verkregen wordt die mogelijk belangrijk is voor de politie.



Figuur 13. Draagbare analyseapparatuur op de plaats delict zou het mogelijk maken om verdachte sporen ter plekke te identificeren en analyseren. Bron: Nederlands Forensisch Instituut

Chemische analyse en DNA-profilering buiten het lab zou interessant zijn voor het Nederlands Forensisch Instituut en de politie zoals aangegeven in figuur 13. De detectie van explosieven ter plekke zou direct een uitslag kunnen geven of explosieven wel of niet aanwezig zijn, bijvoorbeeld in het geval van een (nep)bom dreiging, om het gevaar adequaat in te kunnen schatten en hierop te kunnen reageren. Ook analyse van chemicaliën buiten het lab is waardvol. Zo is nu illegale drugsproductie een groot probleem in Nederland. In een illegaal lab staan allerlei vaten met chemicaliën die niet altijd (goed) gelabeld zijn waarvan het wel belangrijk is om te weten wat erin zit. Een ander voorbeeld betreft analyse op een plaats delict. Vaak is op een plaats delict veel materiaal aanwezig en moet de politie ter plekke een selectie maken voor de bemonstering. Nu worden verdachte sporen die belangrijk kunnen zijn om een misdaad op te helderen ter plekke bemonsterd en geanalyseerd in het lab. Door een mobiel analysesysteem zou deze selectie slimmer gemaakt kunnen worden.

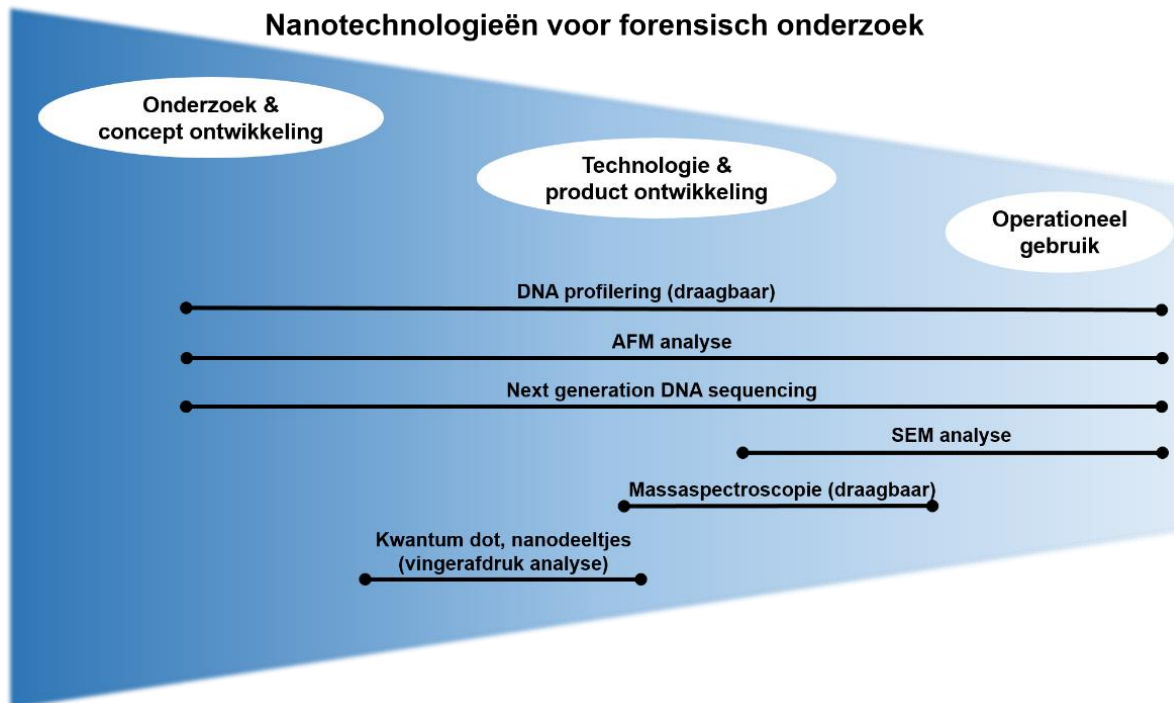
Tot slot is decontaminatie een belangrijk punt om besmet bewijsmateriaal te reinigen zonder sporen zoals vingerafdrukken te vernietigen. Decontaminatie is soms nodig bij chemische of biologische besmetting. Radiologische decontaminatie zal sommige sporen zoals DNA sneller laten verdwijnen, omdat DNA niet bestand is tegen hoge stralingsdoses.

3.2.2 Mogelijke methoden en belangrijke eisen

Zoals hierboven aangegeven bestaat bij de politie en het Nederlands Forensisch Instituut behoefte aan draagbare detectiemethoden die kunnen worden gebruikt op het plaats delict. Hierdoor kunnen metingen ter plekke uitgevoerd worden waardoor sporen meteen geanalyseerd kunnen worden, samples (achteraf) niet kwijtraken of verontreinigd worden tijdens het transport. De grootte van deze apparaten speelt wel een rol omdat het aantal mensen en technologieën op een plaats delict zo klein mogelijk wordt gehouden, maar ook de nodige deskundigheid is belangrijk. Om een analyse ter plekke uit te kunnen voeren moet idealiter geen expert nodig zijn omdat de meeste agenten op de crime scene uitvoerend bezig zijn. De gebruiksvriendelijkheid speelt dus ook een belangrijke rol. Hiernaast zijn hoge gevoeligheid en selectiviteit belangrijke aspecten voor forensisch onderzoek. Vals positieve metingen hebben een grote impact want dan geldt het bewijsstuk niet voor de rechter. Dus de technologie moet robuust zijn en de kwaliteit moet gewaarborgd zijn. Nieuwe technologieën moeten ook kunnen worden geïntegreerd in de 'chain of custody', de verslaglegging door middel van het nummeren van monsters, koppeling aan elektronica etc. wie waar wanneer welke bewijsstukken in handen heeft gehad.

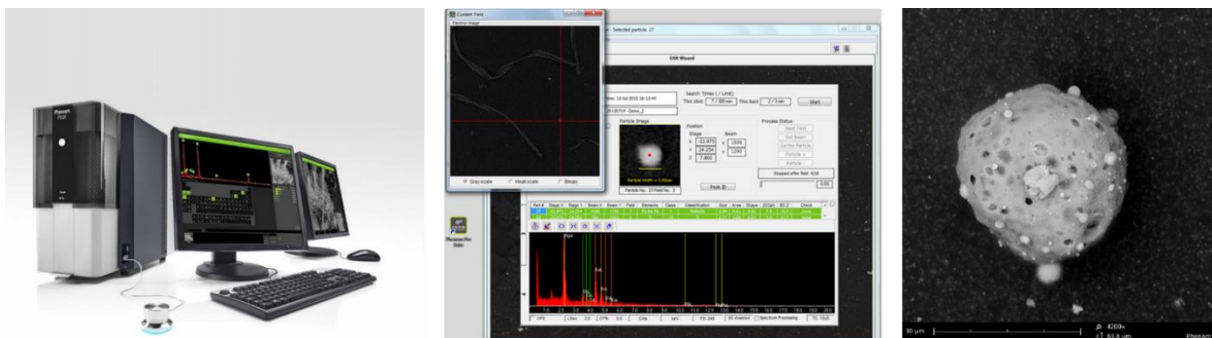
3.2.3 Overzicht van nanotechnologieën voor forensisch onderzoek

Verscheidende nanotechnologieën bieden interessante mogelijkheden voor forensisch onderzoek. Een grove inschatting van TRL niveaus voor deze technologieën kan in figuur 14 worden gevonden, gevolgd door een beschrijving van deze technologieën.



Figuur 14. Technologieën voor forensisch onderzoek ingedeeld in TRL niveaus.

SEM (Scanning Electron Microscope), een rasterelektronenmicroscop met nanometer resolutie, wordt reeds gebruikt in forensisch onderzoek om kogelresiduen (“gun shot residues”) te bepalen (figuur 15). Veel kogels bevatten een primer die uit zware elementen bestaat en die specifiek is voor bepaalde fabrikanten. Als een schot gelost wordt komt de primer en het kruid vrij. Dit kan door een SEM geanalyseerd worden en mogelijk met de casus in verbinding gebracht worden. **AFM** (Atomic Force Microscopy) is een microscopische techniek voor niet-destructieve detectie van biomoleculen, nanodeeltjes of voor de identificatie van vingerafdrukken [19].



Figuur 15. Analyse van kogelresiduen met een rasterelektronenmicroscop. Bron: Phenom-World¹⁴

Bij **DNA-profilering** wordt van bemonsterd DNA van een plaats delict een profiel gemaakt. Hierbij wordt eerst bepaald of het spoor biologisch materiaal is, welke soort het is (huid, bot etc.), dan wordt het DNA gekwantificeerd, de kenmerken geamplificeerd en door elektroforese gescheiden waardoor

¹⁴ <http://www.phenom-world.com/>

een soort barcode ontstaat die met databanken vergeleken kan worden¹⁵. Bench-top DNA analyse systemen voor DNA-profilering zijn beschikbaar bijvoorbeeld van Illumina¹⁶, maar ook draagbare DNA-gebaseerde lab-on-chip systemen zijn al op de markt gebracht, bijvoorbeeld door Veredus Laboratories. Deze draagbare systemen van Veredus Laboratories zijn ook geschikt voor de detectie van het Influenza virus en om biologische gevaarlijke stoffen te kunnen testen in lucht, water, aarde en voedsel¹⁷. Nader onderzoek wordt gedaan naar DNA analyse met cantilever sensoren die gefunctionaliseerd zijn met moleculen die specifiek DNA kunnen binden [18]. DNA kan ook worden gevangen door oligonucleotide strengen die gekoppeld zijn aan een nanometer gap en een binding met het juiste DNA molecuul zorgt voor een verbinding van de nanogap-sensor waardoor een stroom gemeten kan worden [19]. DNA kan ook optisch worden gedetecteerd door specifieke interacties tussen geïmmobiliseerde oligonucleotiden en DNA zichtbaar te maken met goud nanodeeltjes of met kwantumdots.

Next generation DNA sequencing heeft onder meer het doel om meer en gedetailleerdere informatie te verkrijgen bijvoorbeeld over uiterlijke kenmerken zoals huidskleur, haarkleur, genetische eigenschappen of afstand van neus en ogen, om het bij het DNA horende gezicht te reconstrueren. Een aantal bedrijven zijn bezig met next generation DNA sequencing, zoals Oxford Nanopore¹⁸ of PacBio¹⁹, maar er wordt ook nog veel onderzoek gedaan op dit gebied. Voor een overzicht van ontwikkelingen op het gebied van next generation DNA sequencing wordt naar andere literatuur verwezen [20].

Kwantumdots (bijvoorbeeld van cadmiumsulfide, cadmiumselenide of indiumphosphide) kunnen aan residuen van latente vingerafdrukken hechten waardoor deze zichtbaar gemaakt kunnen worden. Kwantumdots zijn makkelijk met een laser of een UV lamp uit te lezen en zouden geschikt kunnen zijn voor mobiele metingen [19]. Ook andere **nanodeeltjes** zijn geschikt om latente vingerafdrukken te detecteren door deze deeltjes te koppelen aan fluorescente kleurstoffen. Het voordeel van nanodeeltjes voor vingerafdrukanalyse, vergeleken met bestaande metaaldeeltjes, is dat nanodeeltjes beter de substructuur van de vingerafdruk weer kunnen geven waardoor de afdruk beter zichtbaar wordt en eenvoudiger geïdentificeerd kan worden. Naast nanodeeltjes kunnen ook kleurstoffen gebruikt worden die aan lipide residuen van de vingerafdruk hechten en hierdoor zichtbaar gemaakt kunnen worden [19].

3.2.4 Verwachte uitdagingen en ontwikkelingen

Door steeds kleinere structuren en integratie met andere functionaliteiten worden meetsystemen steeds compacter. De miniaturisatie naar een draagbaar systeem is niet voor alle sensoren even eenvoudig: DNA-profilering is technisch complex waardoor dit een uitdaging is. Hetzelfde geldt voor massaspectroscopie waar wel veel onderzoek naar wordt gedaan maar waar de miniaturisatie nog steeds een technische uitdaging is. Vooral de robuustheid van het systeem in een operationele omgeving is hierbij een belangrijk punt. Naast miniaturisatie zal voor analyses, bijvoorbeeld van kogelresiduen met elektronenmicroscopen, steeds meer geautomatiseerd kunnen worden waardoor

¹⁵ Bij de DNA profilering worden regio's in de DNA gebruikt die herhalende sequenties van 3-5 baseparen bevatten, Short Tandem Repeats (STR's). Deze sequenties zijn verschillend van persoon tot persoon en kunnen daardoor worden gebruikt voor vaderschapstests of om personen te identificeren.

¹⁶ <http://www.illumina.com/>

¹⁷ <http://vereduslabs.com/>, gelezen op 27 Mei 2016

¹⁸ <https://www.nanoporetech.com/>

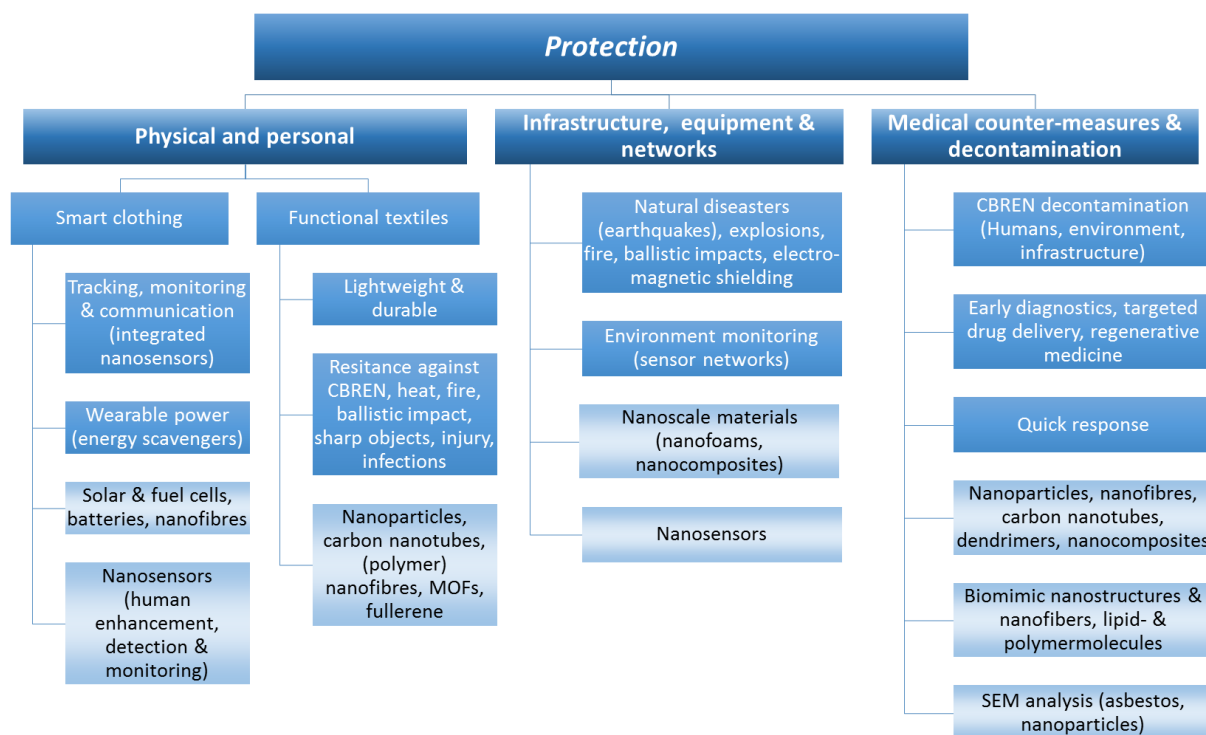
¹⁹ <http://www.pacb.com/>

analyses sneller kunnen worden gedaan. Het controleren van de analyses door een expert is echter nog steeds vereist.

Anders dan voor consumententoepassingen waar hoge volumes worden gerealiseerd, waardoor de kosten laag kunnen worden gehouden, gaat het bij forensische toepassingen vaak om lage volumes waardoor ook kostenbeheersing een belangrijk aspect zal zijn. In de toekomst zal de opkomst en hoeveelheid van digitaal bewijs een uitdaging worden. Een verschuiving naar het digitale domein zal gradueel gebeuren en is nu al gaande. Digitale data zal relevanter worden voor de reconstructie van een misdaad: steeds meer mensen dragen een polsband tijdens het sporten om hun lichaamsfuncties te meten en deze data zou informatie kunnen geven over bijvoorbeeld het tijdstip van overlijden. Er zullen ook meer chemische en biologische analyses beschikbaar zijn voor een breed publiek om hun eigen gezondheid te analyseren. Deze complexe apparatuur die door consumenten gebruikt kan worden is vaak gekoppeld aan een Cloud voor het opslaan van informatie. Dit biedt interessante mogelijkheden en zou ook gebruikt kunnen worden voor forensisch onderzoek en voor politieagenten op de plaats van delict. Voor deze ontwikkelingen bieden nanotechnologieën, met uitzondering van nanoelektronica en mogelijk kwantumcomputing, naar verwachting geen oplossingen.

4. Bescherming

In dit hoofdstuk worden behoeftes, wensen en eisen voor bescherming geïdentificeerd en beschreven (sectie 4.1 en 4.2). Nanotechnologieën die mogelijk interessant zouden kunnen zijn voor bescherming en voor decontaminatie en medische interventie worden toegelicht in secties 4.3 en 4.4 van dit hoofdstuk. Afsluitend worden verwachte uitdagingen en ontwikkelingen besproken (sectie 4.5). Een overzicht van nanotechnologieën voor bescherming is in figuur 16 weergegeven waarbij de toepassingsgebieden in donkerblauw zijn aangegeven, specifieke eigenschappen en toepassingen in blauw en de basistechnologieën in lichtblauw.



Figuur 16. Overzicht van nanotechnologieën voor bescherming.

4.1 Bescherming van personen en infrastructuur – behoeftes en wensen

Beschermende kleding is van belang voor mensen die in gevaarlijke of risicovolle omgevingen werken of aanwezig zijn. Hierbij kan worden gedacht aan veiligheidsdiensten en hulpverleners, zoals politie, brandweer of gevangenisbewakers, die in gevaarlijke situaties terecht komen; ziekenhuismedewerkers die beschermd moeten worden tegen bacteriële besmetting, maar ook aan patiënten die in een hygiënische en comfortabele omgeving willen zijn. Zulke kleding is ook interessant voor mensen die met een extreem klimaat of met extreme omstandigheden te maken hebben zoals defensiepersoneel, arrestatieteam of sporters. Extra beschermend textiel heeft als doel verwondingen, ongelukken en infecties te verminderen, te beschermen tegen chemische, biologische en nucleaire gevaren en bestendig te zijn tegen hoge temperaturen, vuur, scherpe objecten en kogels [21]. Beschermend materiaal is ook van belang om equipment of infrastructuur te beschermen. Naast de bescherming tegen gevaarlijke stoffen speelt de decontaminatie van mensen, infrastructuur en het milieu een belangrijke rol, maar ook medische reacties bij een incident met gevaarlijke stoffen hoort hierbij.

Bestaande beschermende kleding is vaak zwaar, omvangrijk en oncomfortabel waardoor in bepaalde situaties een afweging gemaakt moet worden tussen bescherming en bijvoorbeeld bewegingsvrijheid. Hier zouden de unieke eigenschappen van nanomaterialen een grote rol kunnen spelen door functies en prestaties te verbeteren, lichter textiel met een groter draagcomfort mogelijk te maken, nieuwe eigenschappen toe te voegen en productieprocessen milieuvriendelijker te maken. Er wordt vaak onderscheid gemaakt in de literatuur tussen functioneel beschermend textiel en smart textiel met geïntegreerde sensoren.

Behoeftes en wensen voor bescherming

Beschermende kleding is van belang voor politie, brandweer, de Dienst Justitiële Inrichtingen, de Koninklijke Marechaussee, en voor militairen (figuur 17). In veel gevallen is het gewenst om beschermende kleding te hebben die wel licht(er) is maar nog steeds goed beschermt. De Koninklijke Marechaussee bijvoorbeeld heeft nu beschermende kleding voor een hoog geweldsspectrum die 20-30 kg weegt. Uit interviews blijkt dat de effecten van de zware bescherming terug te zien zijn in het verhoogde ziekteverzuim bij het personeel door veel voorkomende heup- en knieklachten. Hetzelfde geldt voor de politie die te maken heeft met rugklachten van agenten, maar ook met gezondheidsproblemen van de paarden van de bereden politie. Bescherming is niet alleen interessant voor de kleding van personeel, maar ook om bijvoorbeeld de uitrusting van paarden bij de politie snij en steek werend te maken. Lichtere materialen zijn ook interessant voor gepantserde voertuigen. Door de extra bescherming zijn deze voertuigen momenteel heel zwaar en hebben verminderde rijeigenschappen.

Ook handschoenen, laarzen en helmen moeten goede beschermende werking hebben en licht zijn. Voor politie en brandweer geldt dat zij in verschillende situaties terecht komen. Een politieuniform is bijvoorbeeld niet beschermend tegen CBRNE stoffen, wat wel handig zou zijn op het moment dat zij een drugslab moeten ontruimen. Hetzelfde geldt voor een brandweerpak. Hier zouden verschillende uniformen een mogelijke optie kunnen zijn.



Figuur 17. Beschermende kleding is van groot belang voor veiligheidsdiensten. Bron: Ten Cate (*links, midden*), Ministerie van Defensie (*rechts*)

Nanotechnologietoepassingen in kleding en modificatie van oppervlaktes in het algemeen kunnen voor meer toepassingen zinvol zijn. Bijvoorbeeld antibacteriële lakens of zelfreinigende ramen zouden niet alleen in ziekenhuizen interessant kunnen zijn, maar ook voor gevangenis met hoge reinigingskosten die gereduceerd zouden kunnen worden door middel van deze toepassingen.

Uit interviews blijkt dat arbeidshygiëne op het moment een belangrijk thema is, vooral bij de brandweer. Brandweerpersoneel loopt een verhoogd risico op kanker. Dit is niet alleen een Nederlands probleem maar speelt ook breder in Europa. Kankerverwekkende stoffen zijn te vinden in rook, bijvoorbeeld door het verbranden van kunststoffen die in vrijwel alle gebouwen aanwezig zijn, maar ook door de verbranding van hars bij een bosbrand. Belangrijke vragen zijn: Zijn

kankerverwekkende stoffen aanwezig in een pak? Indien ja, wat is de concentratie van deze stoffen en hoe zouden ze kunnen worden verwijderd? Worden de stoffen door de huid opgenomen? Naast het beter begrijpen van het gedrag en de invloed van kankerverwekkende stoffen is ook de decontaminatie van belang. Na een 'gewone' brand met rook worden de pakken uitgetrokken, afgespoeld en naar de wasserij gebracht. Er wordt wel aanbevolen binnen de brandweer om meteen hierna te douchen en nieuwe kleding aan te trekken zodat de meeste rook-residuen afgewassen worden. Bij een incident met stoffen die geclassificeerd zijn als giftig en oxiderend, maar ook voor radioactieve aanvallen, 'wit poeder' incidenten, lekkage van tankwagens of fabrieken en terroristische aanslagen wordt ter plekke een decontaminatie unit opgebouwd waar mensen (burgers, hulpverleners) door moeten lopen om 'gereinigd' te worden en zo verdere besmetting te voorkomen. Het water van de douches in de decontaminatie units wordt opgevangen zodat het niet in het milieu terecht komt. Deze manier van decontaminatie is niet ideaal, maar alternatieven hiervoor zijn niet beschikbaar.

Geïntegreerde sensoren in brandweerpakken en politie-uniformen zouden gebruikt kunnen worden om de fysische of mentale weerbaarheid en het stressniveau van een agent kunnen meten zodat deze tijdig uit de gevaarlijke situatie kunnen worden gehaald. Om symptomen van oververmoeidheid zo vroeg mogelijk te herkennen zouden lichaamsfuncties zoals hartfrequentie, bloeddruk of vochthuishouding gemeten kunnen worden. Voor brandweermannen is de detectie van de lichaamstemperatuur van binnen belangrijk om oververhitting te voorkomen. Sensoren zouden ook een rol kunnen spelen om koolmonoxide vroeg te kunnen detecteren. Tijdens de trainings- en onderzoeksfase zouden sensoren geschikt zijn om extra kennis over gevaarlijke situaties op te doen en toekomstige bescherming te kunnen verbeteren. Het volgen van brandweermannen of politieagenten in het gebouw, bijvoorbeeld om aan te geven op welke verdieping iemand zit, zou ook helpen tijdens de inzet. Draagbare sensoren in wearables zijn ook interessant om emoties van de drager te meten en hierdoor agressie te voorspellen bijvoorbeeld in een gevangenis of tbs-kliniek.

4.2 Mogelijke technologieën en belangrijke eisen

Aan beschermende kleding voor verschillende toepassingen worden ook verschillende eisen gesteld, die daarnaast ook per land kunnen verschillen. Een belangrijke eis aan beschermende kleding is de veiligheid. Als nieuwe nanomaterialen worden gebruikt in een pak of uniform moet het veilig zijn voor de drager en mogen er geen gezondheidsrisico's mee verbonden zijn. Alle onderdelen van een pak of uniform moeten aan officiële standaards voldoen en gecertificeerd zijn. Hiernaast is het draagcomfort en de bewegingsvrijheid belangrijk waardoor lichte materialen wenselijk zijn die uiteraard wel voldoende bescherming moeten bieden. Algemene eisen die beschermende kleding zou moeten vervullen zijn: weinig slijtage door dragen en wassen, kleurvastheid, duurzaam- en betrouwbaarheid. Brandweerpakken moeten bestand zijn tegen temperaturen van 800-1000 °C en waterdicht zijn, maar wel kunnen ademen (figuur 18). De afvoer van lichaamsvocht is heel belangrijk omdat bij hoge temperaturen vocht binnen het pak verbranding kan veroorzaken. Om een materiaal waterafstotend te maken worden vaak coatings aangebracht. Een mogelijk alternatief voor de standaardtechnieken zou plasmatechnologie kunnen zijn waarbij het oppervlak van het doek moleculair geactiveerd wordt. Dit zou ook op industriële schaal toepasbaar zijn. Naast waterafstotende coatings wordt ook aan de ballistische verbetering van bescherming gewerkt. Traumaplaten hebben als functie om de energie die vrijkomt bij de inslag van een projectiel te reduceren en mogelijke complicaties, zoals inwendig letsel of hartritmestoornissen, die door de impact van een kogel kunnen ontstaan te voorkomen.



Figuur 18. Brandweerpakken moeten bestendig zijn tegen grote hitte en lichaamsvocht kunnen afvoeren. Naast de beschermende werking is ook de decontaminatie belangrijk. Bron: Ten Cate (*links, midden*), Wikipedia²⁰ (*rechts*)

Naast de beschermende eigenschappen van kleding is ook de zichtbaarheid van de bescherming belangrijk zoals opgemerkt tijdens de interviews. Soms kan zichtbare bescherming een extra afschrikkend effect hebben, bijvoorbeeld voor de bereden politie. Aan de andere kant zou een sterk zichtbare bescherming er ook minder menselijk uit kunnen zien waardoor mensen mogelijk agressiever kunnen reageren. Voor missies waar civiele kleding wordt gedragen, bijvoorbeeld bij het opsporen van terroristen in een woonwijk of voor de beveiliging van personen, bijvoorbeeld leden van het koninklijk huis, is beveiliging wel van groot belang maar zou het juist niet zichtbaar moeten zijn.

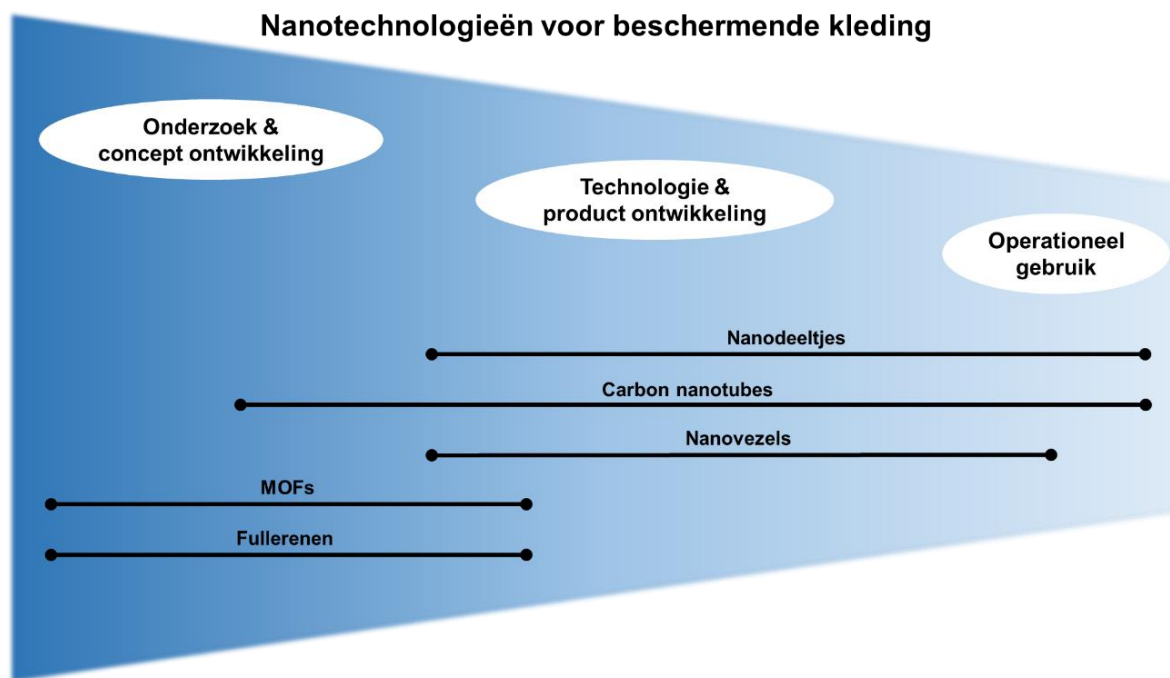
Nanomaterialen zouden ook alternatieve oplossingen kunnen bieden voor huidige vlamvertragers op meubels of voor alternatieve blusmiddelen die ook geschikt zijn voor elektrische apparatuur. Hier is de vervanging van huidige fluorkoolwaterstoffen interessant, aangezien deze stoffen niet of moeilijk afbreekbaar zijn in het milieu.

Voor de detectie van lichaamsfuncties in een pak zouden sensoren geïntegreerd kunnen worden in de stof binnen in het pak, waar ze dicht bij het lichaam zijn. De integratie van geleidende vezels in het doek vereist wel dat de sensoren wasbaar, flexibel en rekbaar moeten zijn. De richting van geïntegreerde vezels is door het productieproces gelimiteerd. Hierdoor kunnen de vezels in een doek alleen maar in een richting lopen. Dit heeft als nadeel dat de flexibiliteit van het design laag is. Stimuli op het doek printen zou flexibeler zijn. Hiermee zouden bijvoorbeeld kleurpatronen voor camouflage geprint kunnen worden of een finishing aangebracht kunnen worden om het doek extra functionaliteit te geven. Sensoren of camera's die geïntegreerd zijn in de beschermende kleding voor detectie van gevaarlijke stoffen of die gebruikt worden voor communicatie, zouden idealiter zo weinig mogelijk energie moeten gebruiken of gekoppeld zijn aan (lichte) batterijen of zonnecellen die voor de energievoorziening zorgen. Hiernaast is de reductie van kabels in een pak wenselijk en zou draadloze communicatie een voorkeur hebben. Hier zouden sensor-netwerksystemen een rol kunnen spelen. Smart dust is een voorbeeld hiervan waarbij sensoren, rekencapaciteit, wireless communicatie en energievoorziening aan elkaar gekoppeld zijn om een autonoom, klein en betaalbaar sensornetwerk te vormen [19]. De energievoorziening kan geregeld worden door batterijen of zonnepanelen met geïntegreerde condensatoren om energie op te slaan.

4.3 Overzicht van nanotechnologieën voor bescherming

Voor bescherming zijn een aantal nanotechnologieën beschreven en de meest voorkomende technologieën voor bescherming zijn grof ingedeeld in TRL niveaus zoals afgebeeld in figuur 19.

²⁰ <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Dekon-V.JPG>



Figuur 19. Technologieën voor bescherming ingedeeld in TRL niveaus.

Nanodeeltjes²¹ kunnen anti-microbiële en anti-bacteriële eigenschappen hebben en worden gebruikt in kleding voor patiënten en ziekenhuismedewerkers, wondverbanden, beddenlakens, maskers maar ook voor sportkleding zoals sokken [21].

Nano-vezels zoals **carbon nanotubes** of **polymeer-nano-vezels** zijn veelbelovend en kunnen in textiel geïntegreerd worden; ze zijn zacht, hebben een goede sterkte en een beperkt gewicht en zouden ook beschermend kunnen zijn tegen micro-organismen. Zonder het gewicht te beïnvloeden, zouden klei-nanodeeltjes in een polymeer matrix de materiaalstijfheid, treksterkte, thermische stabiliteit, gasbarrière en vlamvertragende eigenschappen van het textiel kunnen verbeteren [18]. Om textiel vlamvertragend en temperatuurrezistent te maken zouden additieven en coatings kunnen worden gebruikt.²² Aerogels en amorfe silica gel hebben isolerende eigenschappen en kunnen tegen hoge temperaturen beschermen. Dit zou mogelijk interessant kunnen zijn voor extreme werkcondities of voor outdoor en sport activiteiten[21]. **Nano-vezels** kunnen door elektrospinning worden verwerkt in papierachtig materiaal dat flexibel en licht is maar niet kan branden (zie figuur 20). Naast beschermende kleding is het materiaal interessant om elektronica van hitte af te schermen²³. **Nano-vezels** in textiel maken de integratie van sensoren en elektronische toestellen mogelijk waardoor chemische, elektrische en magnetische informatie en de temperatuur van de omgeving maar ook fysiologische parameter opgepikt kunnen worden om informatie te verzamelen en hierop te kunnen reageren. Nanofibers zouden ook gebruikt kunnen worden om energie op te slaan en communicatieapparatuur aan te sturen [22].

²¹ Zilver nanodeeltjes worden door hun anti-microbiële werking gebruikt in consumentenproducten. Hiernaast zijn ook koper en titaniumdioxide nanodeeltjes hierop getest.

²² Bijvoorbeeld titaniumdioxide, silicium dioxide, klei en anionische klei lagen.

²³ <http://www.eurekite.com/>



Figuur 20. Flexiramics is keramiek materiaal uit nano-vezels dat flexibel is maar niet brandt. Bron: <http://www.eurekite.com/>

MOFs, Metal Organic Frameworks, zijn materialen die metaal-organische verbindingen gebruiken en hierdoor toxische gassen uit de lucht kunnen opnemen en het textiel tegen gevaarlijke stoffen zoals mosterdgas en koolmonoxide kunnen beschermen op een effectievere manier dan met de huidige houtskooltechnologie [23].

Inorganisch fullereen en multi-walled **carbon nanotubes** hebben kogelbeschermende eigenschappen. Hiernaast zou een 3D tussenlaag uit silica nanodeeltjes als 'liquid armour' toegepast kunnen worden die onder normale omstandigheden zacht en flexibel is, maar meteen stijf wordt bij een botsing [19]. Het D3O[®] materiaal bijvoorbeeld benut de niet-Newtoniaanse eigenschappen van een polymeer en wordt gebruikt voor allerlei beschermende onderdelen, zoals helmen, knie, rug of lidmaat bescherming²⁴.

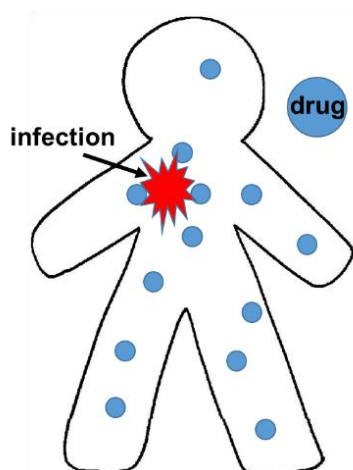
4.4 Overzicht van nanotechnologieën voor decontaminatie en medische interventie

SEM (Scanning Electron Microscope), een elektronen microscoop met nanometer resolutie, kan gebruikt worden bij een incident in een gebouw of fabriek om ter plekke en in korte tijd te analyseren of asbest of nanodeeltjes vrij zijn gekomen en om deze te karakteriseren.

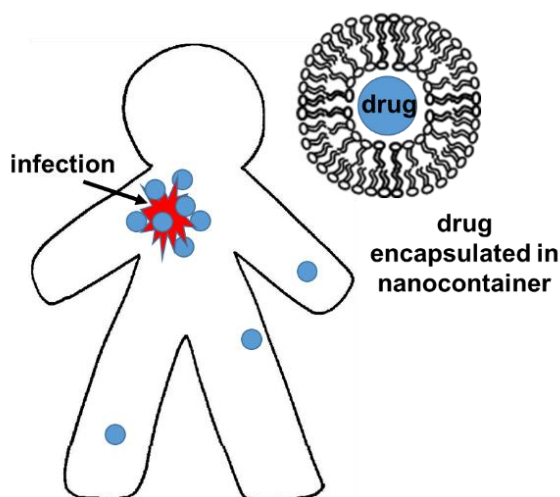
Voor de **toediening** van tegengif zou nanotechnologie mogelijk een rol kunnen spelen [18]. De hevigheid en snelheid van gevaarlijke stoffen zoals zenuwgas limiteert de toediening van therapeutische antigiften. De snelheid en specificiteit van de medische respons is dus essentieel om slachtoffers te kunnen helpen. Targeted drug delivery systemen zorgen ervoor dat het medicijn op een specifieke plek in het lichaam gebracht kan worden of worden losgelaten om ter plekke te kunnen werken zoals verduidelijkt in figuur 21. **Nanodeeltjes** worden in deze medicijn afgiftesystemen gebruikt om het transport en het vrijlatingsproces te verbeteren en omdat zij hydrofiele en hydrofobe moleculen kunnen transporteren. Verschillende soorten nanodeeltjes zouden gebruikt kunnen worden voor targeted drug delivery: nanodeeltjes met eiwitten (albumine, lectine), keramische nanodeeltjes en goud nanodeeltjes in de vorm van colloïden of met een silica coating. **Polymeren** zijn geschikt om antilichamen te transporteren. Verschillende structuren uit **lipiden**, **aptameren** en **dendrimeren** kunnen worden gebruikt als container om medicijnen toe te dienen. Carbon nanotubes en nanohorns met gefunctionaliseerde oppervlaktes worden ook onderzocht als mogelijk vehikel voor medicijnen [18].

²⁴ Een niet-Newtoniaanse vloeistof is onder normale omstandigheden flexibel of vloeibaar maar onder impact sluiten de moleculen zich samen om de energie te absorberen en te verspreiden voordat ze weer uit elkaar gaan en een flexibele vorm aannemen. Hoe hoger de impact hoe dichter de moleculen op elkaar zitten en hoe hoger de bescherming. Zie ook: <http://www.d3o.com/>

Conventional medicine



Targeted drug delivery



Figuur 21. Bij targeted drug delivery moeten nanocontainers, bijvoorbeeld uit lipiden, het medicijn op een specifieke plek in het lichaam brengen waardoor een infectie doelgericht behandeld kan worden dan met conventionele methoden.

Zoals al beschreven in de sectie 'detectie', zouden een aantal nanomaterialen en nano-sensoren gebruikt kunnen worden voor de **diagnose** van virusinfecties en voor de **detectie** van toxines na een aanval of incident. Hierbij zouden **kwantumdots**, **carbon nanotube sensoren** en **carbon nanofibers** een belangrijke rol kunnen spelen, maar ook molecuul-molecuul interactie om DNA, RNA, antilichamen, virussen of eiwitten te detecteren. MRI (Magnetic Resonance Imaging), tomografie of ultrasonografie zijn afbeeldende technieken die non-invasief zijn en waar nanodeeltjes of kwantumdots als contrast middel gebruikt kunnen worden om de afbeelding te verbeteren [18].

Verschillende **nanodeeltjes**, **nanocomposieten** of **nanostructuren** zouden gebruikt kunnen worden om radioactiviteit te absorberen bij stralingsarm materiaal of om selectief cesium of strontium ionen te verwijderen. Polymeergels in de vorm van een waterige spray kunnen radioactieve deeltjes absorberen door ze te binden aan nanodeeltjes die in de gel zijn gemengd. De gel kan na de decontaminatie worden opgeruimd.

Magnetische nanodeeltjes met een polyethyleenglycol en eiwitcoating kunnen in de bloedbaan geïnjecteerd worden waar zij selectief toxinen binden die bij een radiologische of nucleaire aanval vrij zijn gekomen. Hierdoor zou het lichaam sneller ontgift kunnen worden dan door het bloed te filtreren.

Peptiden zouden gebruikt kunnen worden om **nanofibers** te vormen die een extracellulaire matrix rond een wond maken om een bloeding te stoppen. Polymeren zijn ook toepasbaar als extracellulaire matrix bijvoorbeeld op botimplantaten die gebruikt kunnen worden om een verwonding te behandelen veroorzaakt door een explosie [18]. Biomoleculen of **nanostructuren** kunnen op het oppervlak van implantaten worden aangebracht om het sterker of de hechting met het weefsel te verbeteren. **Nanodeeltjes** zouden implantaten een betere mechanische weerstand kunnen geven waardoor ze langer mee zouden kunnen gaan.

Op het gebied van drug delivery, vroege diagnostiek en regeneratieve medicatie moet nog veel fundamenteel en toegepast onderzoek worden gedaan om onderliggende mechanismen te kunnen begrijpen. Daarnaast moet, zoals bij farmaceutisch onderzoek in het algemeen, onderzoek worden gedaan naar de veiligheid van nano-materialen en -structuren in het menselijk lichaam.

4.5 Verwachte uitdagingen en ontwikkelingen

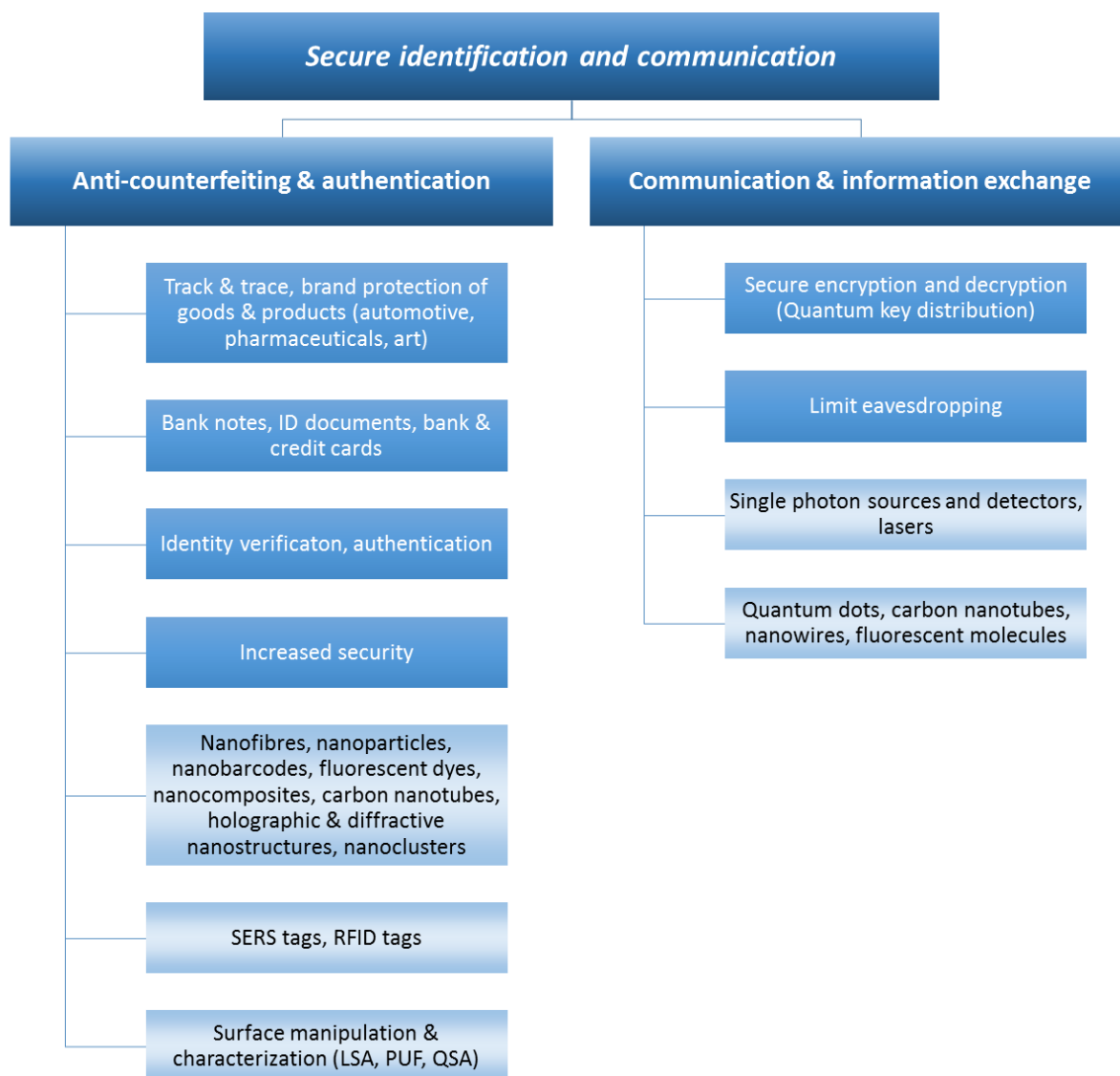
Mogelijke uitdagingen voor beschermende kleding zijn de hoge kosten voor productie en een relatief lage vraag vanuit de markt [24]. Zoals in interviews naar voren komt dragen nieuwe functionaliteiten of eigenschappen, zoals lichtere kleding, naar verwachting bij aan een hogere kostprijs voor uniformen. Echter, in verband met bezuinigingen bij veiligheidsorganisaties is het niet vanzelfsprekend dat deze organisaties budget hebben om een verbetering in functionaliteit in te kopen. Onzekerheden ten aanzien van verwachte kosten, behoefte en bereidheid bij klanten om hiervoor te betalen, spelen daarmee een belangrijke rol in het innovatieproces. Tegelijkertijd is ook de dialoog tussen veiligheidsdiensten en leveranciers van groot belang om duidelijk te articuleren waar prioriteiten en behoeftes liggen, welke mogelijkheden hiervoor geschikt zijn vanuit de technologie en welke kosten hiermee verbonden zijn. De duurzaamheid van de productie, dus de reductie van energieverbruik, chemisch recycling, etc., is op dit moment een relatief prominent onderwerp wat klanten belangrijk vinden en waar zij mogelijk bereid zijn om voor te betalen. Hiernaast zouden verbeterde eigenschappen zoals minder slijtage en betere reiniging de duurzaamheid van de kleding kunnen verhogen waardoor gebruikskosten zouden kunnen worden bespaard. Ook lichtere kleding zou uiteindelijk voor minder ziekteverzuim kunnen zorgen, waardoor ook kosten worden bespaard. De import van (goedkopere) kleding vanuit het buitenland maakt het echter moeilijk voor bedrijven om in nieuwe innovaties te investeren waardoor mogelijk minder ontwikkelingen op dit gebied plaatsvinden.

Daarnaast zijn gezondheids- en veiligheidsstandaarden en regulaties belangrijk bij het gebruik van beschermende kleding [21]. Mogelijke besmetting van mensen en het milieu met nanodeeltjes is een extra aandachtspunt. Hier zouden bestaande standaarden en normen moeten worden aangepast aan de nieuwe materialen maar ook nieuwe meetmethodes om de functies en prestaties van de materialen te kunnen verifiëren. Bij het integreren van sensoren in kleding voor de detectie van lichaamsfuncties maar ook om hulpverleners of veiligheidsdiensten te kunnen volgen, bijvoorbeeld in gebouwen, spelen ook vragen omtrent de wenselijkheid van zulke toepassingen, bijvoorbeeld op het gebied van privacy.

Door nieuwe materialen zouden gevaarlijke stoffen in vrachtwagens of fabrieken beter beschermd kunnen worden, wat een impact zou kunnen hebben op de infrastructuur zodat woningen mogelijk dichter bij fabrieken kunnen worden gebouwd. Vrachtwagens zouden beter beschermd kunnen worden bij routes door woongebieden. Alternatieve en betere vlamvertragers op meubels kunnen in de toekomst branden voorkomen, waardoor de brandweer minder vaak hoeft uit te rukken. In de verre toekomst (meer dan 10 jaar) zouden blusrobots of drones gebruikt kunnen worden om de brand in te gaan waardoor brandweermensen minder bloot gesteld zouden worden aan gevaarlijke stoffen. Brandweerpersoneel zal niet volledig worden vervangen door drones of blusrobots omdat ieder incident anders is. De brandweer blust daarnaast niet alleen een brand, maar redt ook personen uit een gevaarlijke situatie. De gezondheid van brandweermensen en andere veiligheidsdiensten speelt echter een steeds grotere rol en bescherming met behulp van nanotechnologie biedt derhalve nieuwe mogelijkheden.

5. Veilige identificatie en communicatie

Behoeftes, wensen en eisen voor identificatie, authenticatie en anticounterfeiting (bescherming tegen namaak, sectie 5.1) en voor veilige communicatie (sectie 5.2) worden in dit hoofdstuk nader beschreven. Hiernaast worden nanotechnologieën die mogelijk interessant zouden kunnen zijn voor deze toepassingen toegelicht. Aan het eind van elke sectie worden verwachte uitdagingen en ontwikkelingen besproken. Een overzicht van nanotechnologieën voor veilige identificatie en communicatie is hieronder weergegeven (figuur 22) waarbij de toepassingsgebieden in donkerblauw zijn aangegeven, specifieke eigenschappen en toepassingen in blauw en de basistechnologieën in lichtblauw.



Figuur 22. Overzicht van nanotechnologieën voor veilige identificatie en communicatie.

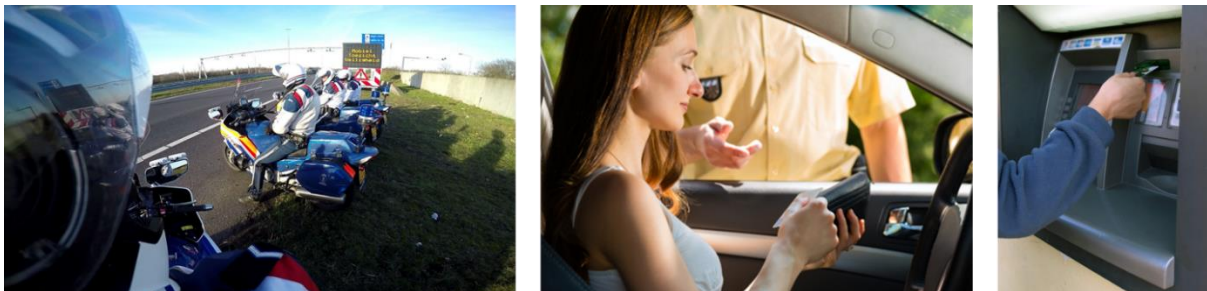
5.1 Identificatie, authenticatie en anti-counterfeiting

De identificatie van personen en officiële documenten is van groot belang voor de politie of Koninklijke Marechaussee tijdens controles maar ook om de authenticatie en veilige toegang tot gebouwen te waarborgen. Hiernaast speelt het opsporen en volgen van personen of voorwerpen een grote rol voor veiligheidsdiensten. De authenticatie van voorwerpen voor merkbescherming is belangrijk om

namaak tegen te gaan. Dit is een groot probleem voor medicijnen, vliegtuig- en auto onderdelen en dure producten zoals designer kleding, whisky, parfum of horloges [25].

5.1.1 Behoeftes, wensen en belangrijke eisen

Voor de grensbeveiliging op vliegvelden maar ook voor de politie en het OM is de identificatie van personen bijvoorbeeld door biometrische kenmerken (vingerafdruk, irisscan, etc.) van groot belang (figuur 23). Hiernaast speelt de verificatie van de echtheid van officiële documenten zoals (binnen- en buitenlandse) identiteitsbewijzen en visadocumenten maar ook van geld een grote rol om fraude en falsificatie te detecteren. De falsificatie van identiteitsdocumenten speelt ook een grote rol bij mensensmokkel. Door het moeilijker te maken om paspoorten na te kunnen maken, wordt mensenhandel preventief tegen gegaan.



Figuur 23. Identificatie van personen en het detecteren van vervalste identiteitsdocumenten en bankpassen is belangrijk voor de grensbeveiliging, politie en Openbaar Ministerie. Bron: Ministerie van Defensie (*links*), Dreamstime (Arne9001, *midden*; Viesturs Kalvans, *rechts*)

De koppeling van de identiteit aan een sleutel is van belang om de veiligheid van toegangsrechten voor gebouwen te verhogen (figuur 24). Dit geldt zowel voor politie en defensie alsook voor bedrijven en instellingen die aanslag-gevoelig zijn. In gevangenissen of tbs-klinieken krijgen sommige gedetineerden een eigen sleutel waardoor ze bijvoorbeeld zelf kunnen beslissen of ze hun kamer of cel op slot willen zetten of waarmee ze tot sommige delen wel toegang hebben. De koppeling van sleutels aan een persoon is dus van groot belang om te voorkomen dat onbevoegde personen het toegangsbewijs ontvreemden en zelf kunnen gebruiken.

Opsporen en volgen (track and trace) is een belangrijk punt voor veel veiligheidstoepassingen. Voor politie of brandweer is het volgen van eigen collega's tijdens een inzet van belang om in gevaarlijke situaties een overzicht te hebben waar elke agent of brandweermens is en om als nodig te kunnen reageren. Hier is een precieze positie van de persoon in het gebouw belangrijk, bijvoorbeeld op welke verdieping een agent zicht bevindt. Ook het volgen van verdachten tijdens een observatie zou makkelijker kunnen worden uitgevoerd met opsporingstechnieken dan met een groot observatieteam waar veel capaciteit voor nodig is zoals het nu vaak gedaan wordt.



Figuur 24. De toegangscontrole van gebouwen en instellingen kan er verschillend uitzien. Bron: Dienst Justitiële Inrichting (*links*), Dreamstime (Alfonsodetomas, *midden*), Ministerie van Defensie (*rechts*)

Het volgen van reizigers op treinstations zou het mogelijk maken om verdacht gedrag te herkennen, bijvoorbeeld als iemand een ticket koopt maar dan niet in de trein stapt. Op vliegvelden zou het opsporen en volgen kunnen helpen om de identiteit van niet gedocumenteerde vreemdelingen vast te stellen. Bij mensen die op het vliegveld aankomen en asiel zoeken maar geen identiteitsdocumenten hebben is het moeilijk om hun oorsprong en identiteit vast te stellen. Door te kunnen volgen van welk vliegtuig deze mensen komen zou het eventueel mogelijk zijn om met behulp van de passagierslijst hun nationaliteit te kunnen bepalen. Het volgen zou door cameratoezicht mogelijk zijn, maar ook door mensen met een label te voorzien die gekoppeld is aan bijvoorbeeld een gate. Zo'n soort label zou mogelijk ook aangebracht kunnen worden op hekken rond beveiligde gebouwen die aan een persoon blijft hechten die probeert over het hek te klimmen en zo makkelijker opgespoord kan worden. Een label uit DNA wordt al gebruikt om winkellovervallers te markeren. In verschillende regio's in Nederland zijn winkels uitgerust met een DNA-douche die kan worden geactiveerd bij een overval zodat de overvaller gelabeld wordt met DNA-houdende vloeistof die enkele dagen op de huid en kleding blijft zitten en makkelijk op te sporen is door de politie.²⁵

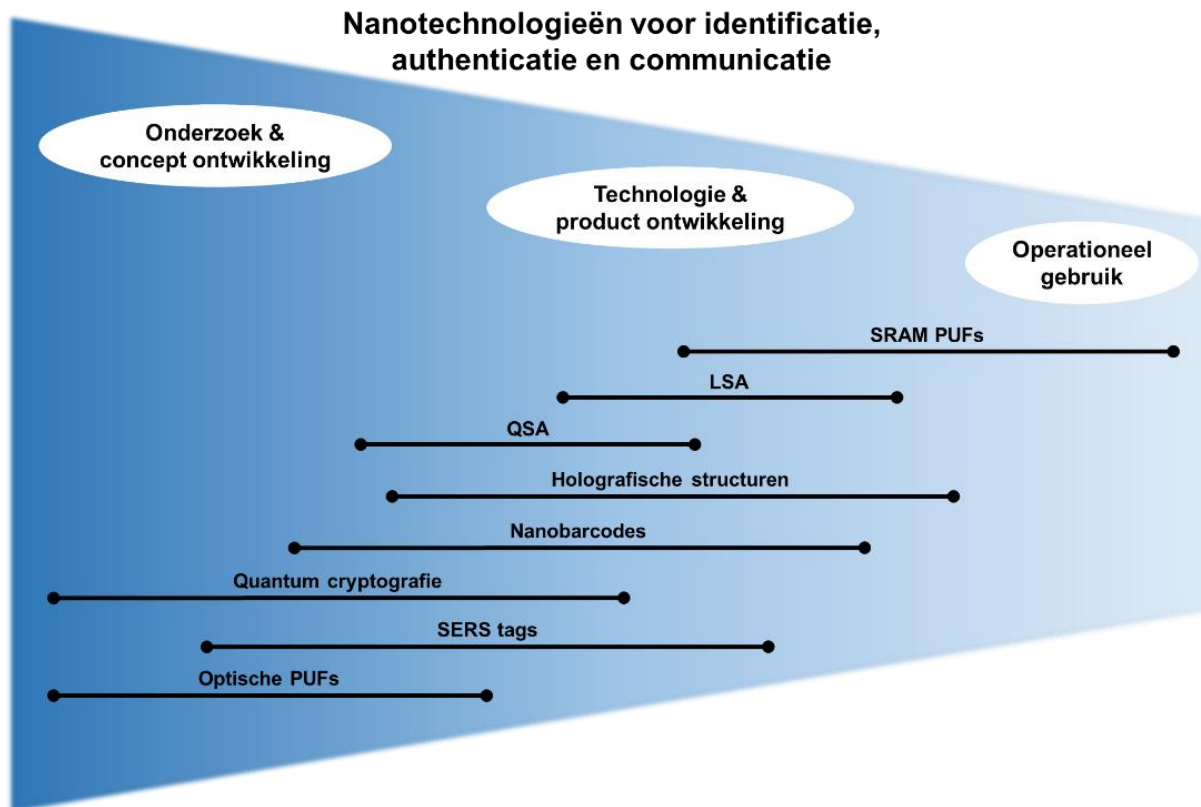
Naast het opsporen en volgen van personen is het aanbrengen van labels ook interessant voor voorwerpen, bijvoorbeeld om de interne handel in gevangenen te kunnen reduceren of om producten en onderdelen te kunnen volgen door de hele bevoorradingsketen, iets dat nu ook al met RFID tags gebeurt. De extra beveiliging van bestaande labels bijvoorbeeld door sleutels vereenvoudigt de authenticatie van producten en onderdelen in de bevoorradingsketen. Dit is van belang voor defensie om de veiligheid van reserveonderdelen en containers te waarborgen maar ook om piraterij en vervalsing van dure producten zoals whisky, parfum, horloges, medicijnen of passen voor betaaltelevisie te bestrijden.

Voor het bewaken en beveiligen zou het verkleinen van camera's nuttig zijn zodat deze aan een uniform gedragen kunnen worden maar ook minder energie gebruiken en een langere tijd mee gaan. Op vliegvelden moeten technieken om mensen op te sporen en te volgen op grote schaal toepasbaar zijn en controles mogen maar een korte tijd duren. Ook het vaststellen van de echtheid van belangrijke documenten moet laagdrempelig zijn en nieuwe technologieën moeten betrouwbaar zijn. Door eigenschappen op de nanoschaal te benutten wordt het namaken van identificatie- en authenticatiekenmerken onmogelijk waardoor de veiligheid sterk verbeterd is.

²⁵ <http://www.veiligondernemendoejesamen.nl/tips/overval/dna-spray> en http://vorige.nrc.nl//wetenschap/article2075175.ece/DNA-douche_brandmerkt_winkellovervaller, gelezen op 5 juni 2016

5.1.2 Nanotechnologieën voor identificatie, authenticatie en anticounterfeiting

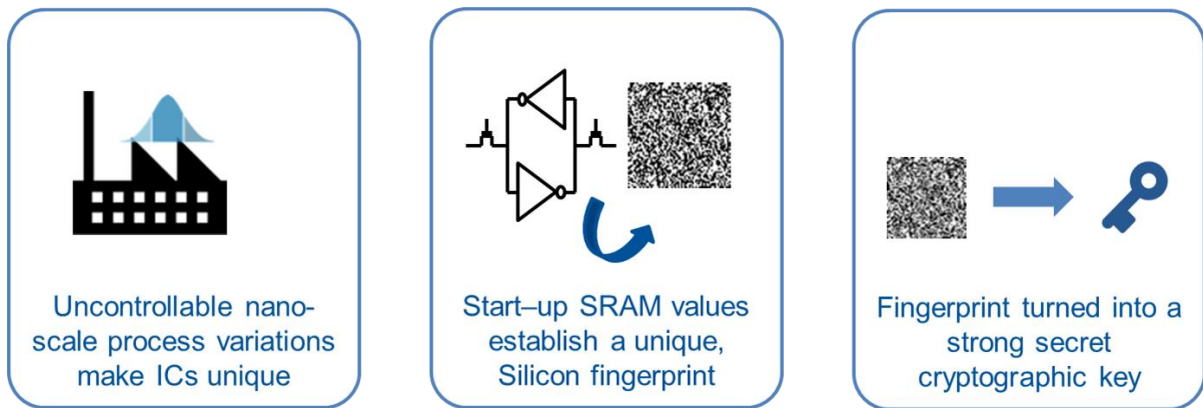
Voor identificatie, authenticatie en anti-counterfeiting zijn een aantal nanotechnologieën genoemd en de meest voorkomende zijn grof ingedeeld in TRL niveaus zoals beschreven in figuur 25. Verschillende technologieën worden in de volgende paragrafen genoemd en kort toegelicht.



Figuur 25. Technologieën voor identificatie, authenticatie en communicatie ingedeeld in TRL niveaus.

Physically Unclonable Functions, of kortweg **PUFs**, zijn fysieke “sleutels” waarvan de productie oncontroleerbare elementen bevat, zodat kopiëren praktisch kansloos is. Iedere PUF heeft een digitale signatuur die afgeleid wordt uit fysieke eigenschappen van de PUF. Bij authenticatie wordt de digitale signatuur vergeleken met (een deel van) de fysieke eigenschappen [19]. Zo vormen bijvoorbeeld de opstartwaarden van een SRAM geheugenchip een patroon van nullen en enen dat makkelijk gemeten kan worden. Dit specifieke patroon kan worden gebruikt als individuele vingerafdruk voor zo’n chip (figuur 26). Manipulatie van de opstartwaarden is zeer kostbaar en tijdsintensief, als het al kan. De unieke kenmerken van een PUF kunnen worden gebruikt om sleutels te genereren. Dit wordt al toegepast door bijvoorbeeld Intrinsic ID.²⁶ Een optische PUF is een veel verstrooiend random materiaal zoals bijvoorbeeld witte verf waarvan het interferentiepatroon onder laserbelichting wordt gebruikt als authenticatie. Het interferentiepatroon is zeer gevoelig voor de precieze ligging van miljoenen nanometergrote deeltjes in het random materiaal en afhankelijk van de golflengte, de positie en vorm van het belichtingspatroon [26]. Replicatie van optische PUFs is zeer moeilijk, als het al mogelijk is, en nog nooit gedemonstreerd. Optische PUFs zouden in bestaande sleutelsystemen geïntegreerd kunnen worden.

²⁶ Bij PUFs van Intrinsic ID wordt de sleutel opgeslagen in het SRAM geheugen dat verdwijnt zodra de spanning weg is. Het specifieke patroon tijdens het opstarten wordt gebruikt om de sleutel af te leiden. Zie ook: <https://www.intrinsic-id.com/>



Figuur 26. SRAM PUFs kunnen worden gebruikt om sleutels te genereren en op te slaan. Bron: Intrinsic ID

LSA (Laser Surface Authentication) maakt gebruik van de oppervlaktestructuur van materialen zoals papier of plastics die een natuurlijke ruwheid op de micro- tot nanometerschaal hebben. Als een gefocuste laserstraal op zo'n oppervlak wordt geschoten, verstrooit het licht door de oppervlakte ruwheid en ontstaat een interferentiepatroon dat opgeslagen kan worden. Het patroon is uniek voor dit oppervlak zoals biometrische informatie van een irisscan of een vingerafdruk. De waarschijnlijkheid dat twee patronen van verschillende objecten gelijk zijn is 10^{-72} voor papier en 10^{-20} voor plastics met een mat oppervlak. Het oppervlak van het materiaal is natuurlijk en de random structuren die ontstaan door de natuurlijke ruwheid zijn karakteristiek voor dit object en kunnen niet gerepliceerd worden. LSA zou direct toegepast kunnen worden voor producten, op de verpakking of tijdens transport. Een nadeel van LSA is dat het niet toepasbaar is voor transparante of reflecterende oppervlakten en de uitlijning kritisch is. Het scanapparaat en het design van de code database zijn de grootste uitdagingen voor ontwikkeling [19].

Bij Quantum Secure Authentication (**QSA**) wordt heel erg zwak licht op het oppervlak van een optische PUF gestraald en het interferentiepatroon gemeten (figuur 27). Het licht is zo zwak dat er ook met een gevoelige camera alleen onduidelijke plaatjes van gemaakt kunnen worden, gelimiteerd door de wetten van de kwantummechanica. De respons van het oppervlak hangt van het inkomend licht af en dat belichtingspatroon bevat te weinig lichtdeeltjes om uitgelezen te kunnen worden vanwege de kwantummechanische onzekerheid in zo'n meting. In QSA wordt het inkomende licht door een modulator gestuurd die een willekeurig gekozen patroon oplegt. Om het licht te analyseren wordt nog een tweede lichtmodulator gebruikt en de PUF wordt pas als authentiek aangenomen als de respons overeenkomt met de verwachting [27]. QSA is ook veilig tegen digitale aanvallen en zou gebruikt kunnen worden in authenticatie systemen in banken, regeringen en ziekenhuizen en bij hardware bedrijven (VASCO, EMC, Gemalto) omdat de technologie eenvoudig schaalbaar is [28].



Figuur 27. Plaatjes van een Quantum Secure Authentication systeem met een toegangspas die gebruik maakt van een natuurlijk licht-verstrooiend materiaal. Bron: COPS groep, Universiteit Twente²⁷

Hologrammen kunnen de illusie van diepte creëren en zijn moeilijk na te maken omdat ze speciale hoge resolutie druktechnieken vereisen. Tegelijkertijd kunnen hologrammen op allerlei materialen

²⁷ <https://vimeo.com/145129613>, animatie van het QSA systeem

worden gedrukt, zelfs op chocolade.²⁸ Holografische structuren vinden al toepassing bij de beveiliging van bankbiljetten en zijn commercieel beschikbaar als anti-counterfeiting labels [18].

Voor de bescherming van producten tegen namaak kunnen **nanobarcodes** toegepast worden. Bijvoorbeeld drie-dimensionale structuren met dimensies van tientallen nanometers zijn hiervoor geschikt.²⁹ Oxonica heeft metallische staven uit goud, zilver of platina gecommmercialiseerd die een verschillende reflectiviteit hebben en met een optische microscoop uitgelezen kunnen worden.

Magnetische **nanodeeltjes** kunnen worden ingebed in een niet-magnetische matrix uit plastic, metaal of glas en de spectra kunnen worden uitgelezen met een GMR (Giant Magneto-Resistance) kop zoals gebruikt in harddisks. De spectra zijn specifiek voor dit object en kunnen daardoor gebruikt worden als vingerafdruk voor merkbescherming [19]. Goud of zilver nanodeeltjes met een silica coating zijn ook toepasbaar als **SERS-tags**. Het signaal van deze deeltjes kan met Surface Enhanced Raman scattering (SERS) uitgelezen worden en geeft een uniek spectrum. Bij SERS-tags is het zwakke signaal het grootste nadeel, wat verbeterd kan worden met de keuze van het substraat [19]. **RFID-tags** (Radio-Frequency Identification Tags) maken het mogelijk om data draadloos over te dragen voor toezicht en logistieke toepassingen. Geleiders met een lage weerstand zijn belangrijke componenten in RFID-tags die door inkt uit zilver of koper nanodeeltjes geproduceerd kunnen worden. Carbon nanotubes zouden voor draadloze communicatie gebruikt kunnen worden [25].

Informatie zoals vingerafdrukken, foto's of handtekeningen kunnen in een dunne polymeer laag, die met verschillende fluorescerende kleurstoffen verrijkt is, ingeschreven worden door bepaalde plekken in het fluorescerend polymeer optisch te bestralen en te bleken. Hierdoor kunnen biometrische data worden opgeslagen [19].

Om de beveiliging van bankbiljetten te verbeteren zouden **nanoclusters** geïntegreerd kunnen worden. Nanoclusters zijn assemblies van (metaal) atomen of moleculen met nanoschaal dimensies die op een substraat gedeponeerd zijn. De resonerende nanoclusters kunnen als sensor gebruikt worden door hun karakteristieke kleurpatroon [18]. Organische **nano-vezels** met een specifieke fluorescentie in het UV kunnen worden gebruikt in bankbiljetten [18].

Diffraction nanostructures zijn een andere mogelijke technologie voor merkbescherming. Hier worden lijnen van een materiaal met een hoge brekingsindex (b.v. goud) gemaakt die meer dan 100 nm van elkaar gescheiden zijn door een materiaal met een lage refractie index (b.v. fibers van cellulose). Kwantumdots en metalen nanodeeltjes kunnen gebruikt worden om de kleur effecten te versterken [18].

5.1.3 Verwachte uitdagingen en ontwikkelingen

Uit interviews blijkt dat de markt voor veilige authenticatie in de komende 5 tot 10 jaar sterk zal groeien. Ook ontwikkeling van het 'internet der dingen' zal het gebruik van sensoren doen groeien

²⁸ https://www.newscientist.com/article/dn25557-chocolate-gets-a-rainbowy-holographic-makeover/#.U3lzkYhLr8U?utm_source=NSNS&utm_medium=SOC&utm_campaign=twitter&cmpid=SOC|NSNS|2012-GLOBAL-twitter

²⁹ Patronen hiervoor kunnen worden gemaakt uit PMMA (polymethylmethacrylaat). De polymeerstructuren worden geprint op silicium substraten met nanoimprint technieken en de reflectie kan gedetecteerd worden met een hoge resolutie CCD camera en een IR filter. Halfgeleider kwantumdots zouden vanwege hun karakteristieke fluorescente emissiespectrum ook gebruikt kunnen worden als nanobarcodes. Carbon nanotubes met tinoxide kunnen worden geprint op een oppervlak om een geleidende laag te vormen. De gestructureerde patronen kunnen worden uitgelezen door de geleidbaarheid te meten.

waardoor communicatie naar sensoren en sensor netwerken een steeds grotere rol gaat spelen. Hier zullen CMOS-compatible systemen van belang zijn en optische communicatie gebruikt worden waardoor minder warmte vrij komt en minder energie nodig is. De beveiliging van de sensoren om andere systemen of data te kunnen authenticiseren speelt ook een belangrijke rol. Er moet wel een afweging worden gemaakt tussen de kosten en de mate van beveiliging. Bij het 'internet der dingen' gaat het vaak om goedkope consumentenproducten terwijl een hoge beveiliging duur zal zijn. Hiernaast moet er een afweging worden gemaakt tussen beveiliging en gebruikersvriendelijkheid. Een telefoon kan extra beveiligd worden door in te loggen met een pincode, een vingerafdruk en verificatie van de stem van de eigenaar, maar dit is niet zeer gebruikersvriendelijk.

Extra cameratoezicht voor het bewaken en beveiligen van personen en plaatsen zal er ook voor zorgen dat meer personeel nodig is om de beelden te analyseren. Er wordt verwacht dat alle delicten opgevolgd worden. Niet op alle plekken is het vervangen van mensen door camera's gewenst: koninklijke paleizen worden nog steeds bewaakt door een wacht met een sabel; dit hoort bij het traditionele plaatje (figuur 24).

Voor gevangenen zal het beveiligingsniveau ook veranderen de komende 10 jaar. Het huidige niveau van gevangenen is niet nodig voor de meeste gedetineerden. Vernieuwde veiligheidssystemen zouden bevorderd kunnen worden door gevangenen opener te maken en gedetineerden door labels te volgen en op afstand te controleren zoals nu al wordt gedaan met enkelbanden.

5.2 Veilige communicatie

*"Anonymous wil de gevestigde financiële wereld op zijn kop gaan zetten. De komende maand gaat het hackerscollectief verschillende bankwebsites van over de hele wereld aanvallen. Dinsdag was de nationale bank van Griekenland al aan de beurt. De site van de bank was door de aanval enkele minuten offline."*³⁰

Hackeraanvallen op communicatie- en informatiesystemen nemen toe en beveiliging van deze systemen wordt steeds belangrijker. Versleuteling van informatie speelt hierbij een cruciale rol. Nieuwe ontwikkelingen op het gebied van quantumcomputing hebben het potentieel om de mathematische algoritmen van bestaande encryptietechnieken te omzeilen waardoor huidige encryptie gekraakt zou kunnen worden. Om hiervoor gewapend te zijn wordt onderzoek gedaan aan **kwantumcryptografie**, een emergente technologie die radicaal nieuwe bescherming biedt en de huidige communicatie voor de toekomst veilig zou maken.

Veilige communicatie is belangrijk voor de politie zodat haar communicatie niet kan worden afgeluisterd door criminelen. Encryptie om sensitieve informatie te beschermen is ook belangrijk voor het dataverkeer van nationale veiligheidsinstellingen, organisaties binnen de overheid, banken, financiële instellingen maar ook voor een groot aantal bedrijven [29]. De financiële schade die elk jaar door cyberaanvallen bij bedrijven wordt veroorzaakt is enorm.

Naast de beveiliging van dataverkeer is ook de decryptie belangrijk, bijvoorbeeld voor forensisch onderzoek en het Openbaar Ministerie om data uit chatomgevingen te kunnen ontcijferen voor het ophelderen van een misdaad. Decryptie is ook interessant voor het Openbaar Ministerie om communicatie van criminelen af te kunnen luisteren, iets dat steeds moeilijker wordt door het gebruik

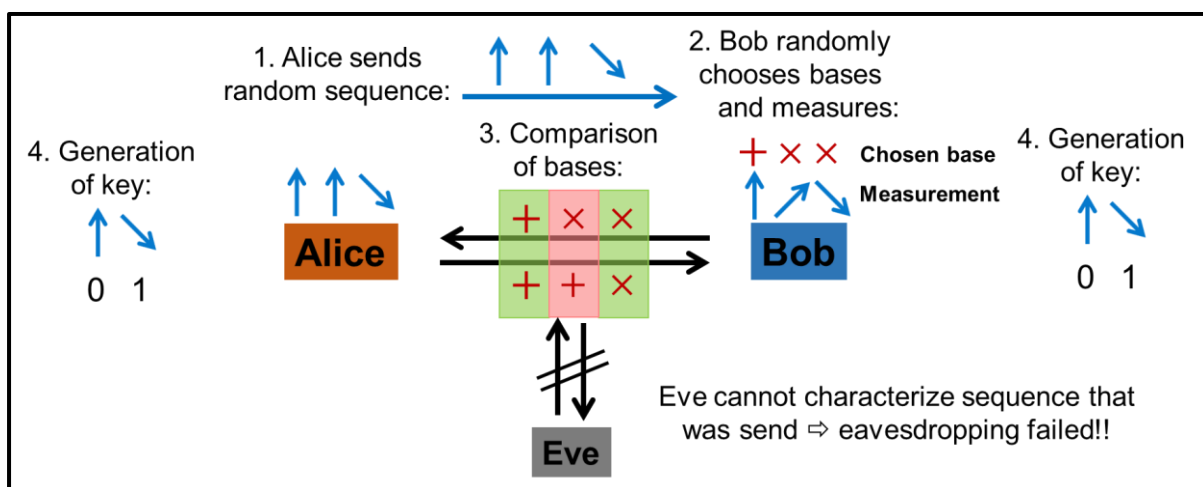
³⁰ <http://www.volkskrant.nl/media/-anonymous-start-nieuw-offensief-met-cyberaanval-op-griekse-bank~a4294800/>, gelezen op 5 juni 2016

van nieuwe communicatie middelen (mobiele telefoons, chats, whatsapp, etc.). Het decoderen van data is ook van belang voor het leger om informatie over de vijand te krijgen.

5.2.1 Nanotechnologieën voor veilige communicatie

Quantum Key Distribution (QKD) is de meest avanseerde techniek voor encryptie op het gebied van cryptografie op dit moment en maakt het mogelijk om een geheime sleutel tussen twee communicatiepartners uit te wisselen op een manier die gegarandeerd (“kwantum”) veilig is [29]. QKD is in essentie gebaseerd op het “quantum non-cloning” principe, dat zegt dat een kwantumtoestand niet gekopieerd kan worden. De zender, vaak aangeduid met Alice, communiceert daarom via kwantumtoestanden van licht met de ontvanger, Bob (zie figuur 28). Alice en Bob gebruiken een normaal klassiek communicatiekanaal om te verifiëren dat ze niet afgeluisterd zijn (door Eve), iets dat vanwege het non-cloning principe niet zonder gevolgen kan blijven en daarom te detecteren is. [19].

Om Qbits te verzenden zijn bij voorkeur bronnen nodig die enkele fotonen kunnen genereren. Hiervoor kunnen nano-structuren en nano-materialen gebruikt worden: Materialen die robuust zijn en individuele fotonen kunnen emitteren zijn **fluorescerende moleculen**, **kwantumdots**, **carbon nanotubes** en **diamant nanodraden**. Door hun goede stabiliteit, compatibiliteit met chiptechnologie, de breedte van het spectrum en hoge herhalingsfrequentie worden kwantumdots als de veelbelovendste materialen voor kwantuminformaticatechnieken genoemd [29]. De ontwikkeling van betere **lasers**, **glasvezels** en betrouwbare **enkele-fotonbronnen** zijn belangrijke aspecten om kwantumencryptie vooruit te brengen [24].



Figuur 28. Kwantumcommunicatie d.m.v. Quantum Key Distribution: Alice versleutelt Qbits in de polarisatie van enkele fotonen. Ze kiest daarvoor telkens een willekeurige basis: In bijvoorbeeld de “+” basis is een verticaal gepolariseerd foton een 0, een horizontaal gepolariseerd foton een 1. Bob kiest een willekeurige basis om de fotonen in te meten. Alice en Bob communiceren over een klassiek kanaal om hun basiskeuze (niet de uitkomst) te vergelijken en behouden alleen die uitkomsten waarbij ze dezelfde keuze gemaakt hebben. Door een fractie van deze zo gedeelde geheime bits te vergelijken kan vastgesteld worden of er afgeluisterd is.

5.2.2 Verwachte uitdagingen en ontwikkelingen

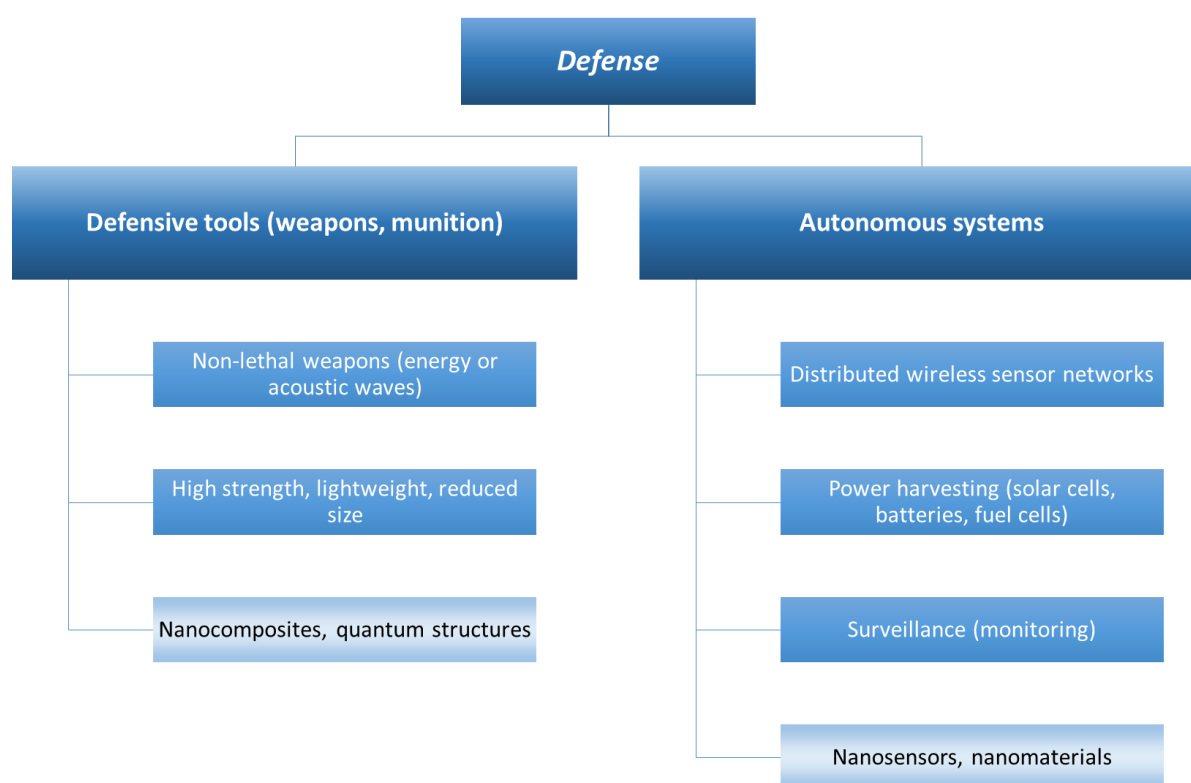
Encryptie en decryptie zullen dus naar verwachting een steeds grotere rol spelen voor defensieactiviteiten en informatie zal steeds belangrijker worden vergeleken met conventionele wapens. Het bombarderen van een bank zal niet per se de geldstroom van een terroristische

organisatie opdrogen maar wel veel civiele slachtoffers eisen. Mogelijkheden in het cyberdomein zouden gebruikt kunnen worden om politieke effecten te bereiken. De keerzijde is dat doordat deze technologieën steeds beter toegankelijk worden, zij ook gebruikt kunnen worden door de vijand: andere landen, maar ook terroristische groeperingen zonder overheid en internationale standaarden.

Er wordt veel onderzoek gedaan naar kwantumcommunicatie. Kwantumcryptografie, dus de versleuteling van data gebaseerd op kwantumprincipes, wordt al gebruikt om data te versturen. Tot heden is de limiterende factor de beperkte afstand van 100-200 km - idealiter zou data naar elke plek op de wereld gecommuniceerd kunnen worden [30]. Zoals in interviews wordt aangegeven zou kwantumcommunicatie over 10-20 jaar breed toegankelijk kunnen zijn. Om de afstanden en ook de snelheid te vergroten wordt onderzoek gedaan aan zogenaamde quantum repeaters maar die worden pas over meer dan 5 jaar verwacht. De kosten voor kwantumcryptografie zijn op het moment heel hoog en daarom alleen interessant voor instellingen die veel geld uit kunnen geven aan veilige communicatie.

6. Defensie

De focus van dit onderzoek richt zich voornamelijk op civiele veiligheid. Een overlap van technologieën en ontwikkelingen die relevant zijn voor defensie en overlappen met relevante toepassingen voor het Ministerie van VenJ en haar andere veiligheidspartners zijn wel aanwezig en worden in een beknopte vorm toegelicht in dit hoofdstuk. Een overzicht van nanotechnologieën voor defensie is in figuur 29 weergegeven waarbij de toepassingsgebieden in donkerblauw zijn aangegeven, specifieke eigenschappen en toepassingen in blauw en de basistechnologieën in lichtblauw.



Figuur 29. Overzicht van nanotechnologieën voor defensie.

6.1 Militaire toepassingen en belangrijke nanotechnologieën

Voor defensie zijn de technologieën voor civiele toepassingen die in de eerdere hoofdstukken werden genoemd ook van groot belang. Technologieën die door het leger worden gebruikt moeten veelal wel aan aanvullende eisen voldoen (zie figuur 30). Materialen en apparaten moeten tegen een groot bereik aan temperaturen kunnen, tegen mogelijke vervuiling door bijvoorbeeld zand, en ze moeten beschermd zijn tegen trillen, schokken en kogels. Naast bescherming moet militaire kleding en materiaal ook gebruik maken van camouflage. Hiernaast is het belangrijk dat zij licht zijn en alle apparatuur een goede (autonome) energievoorziening heeft omdat soldaten vaak lange afstanden moeten afleggen en niet regelmatig terugkomen naar hun basis. Ook is de onafhankelijkheid van de algemene infrastructuur in een land tijdens een missie heel belangrijk. Ontwikkelingen van wapens die mogelijk gepersonaliseerd zijn zodat zij niet zouden kunnen worden gebruikt door de vijand en slimme munitie die gestuurd zou kunnen worden zijn ook interessant voor defensiepersoneel. Daarnaast kunnen niet-dodelijke wapens relevant zijn.



Figuur 30. Technologieën voor defensie moeten geschikt zijn voor veel verschillende omstandigheden. Bron: Ministerie van Defensie

Niet-dodelijke wapens zijn met name ook relevant voor andere diensten zoals bijvoorbeeld voor Dienst Justitiële Inrichtingen en de Interne Bijstand Teams of arrestatieteams. De Koninklijke Marechaussee komt vaker situaties tegen waarbij niet-dodelijke wapens van nut zouden kunnen zijn, bijvoorbeeld voor het onderhandelen met personen om deze op afstand te houden en tijdelijk uit te schakelen. Nu worden ook al niet-dodelijke wapens zoals peper spray gebruikt, maar bij gebruik van deze spray lopen agenten ook risico hieraan blootgesteld te worden. Peper spray werkt ook niet altijd even goed, bijvoorbeeld bij personen die drugs hebben genomen of ongevoelig zijn voor Capsaïcine. Elektrische Tasers kunnen als alternatief worden gebruikt maar hierbij kunnen mensen hard vallen of problemen krijgen met hun hart waardoor het gebruik ook dodelijk kan aflopen. Voor grote groepen wordt traangas gebruikt maar agenten moeten al tijdig een ademmasker opdoen om zelf geen schade op te lopen. Daarnaast is traangas gevoelig voor de wind en daardoor niet op alle plekken inzetbaar. Alternatieven voor de bestaande niet-dodelijke wapens zijn dus waardevol. Niet-dodelijke wapens zouden ook interessant zijn voor vluchtbegeleiders (airmarshals).

Nanocomposieten en **plastics** zouden gebruikt kunnen worden om wapens lichter en stabiel te maken. Het aanbrengen van camouflage patronen op een pak, bijvoorbeeld door kleine structuren te printen, zou geschikt kunnen zijn om de radarzichtbaarheid te verlagen (stealth). Kwantumdots en fotonische kristallen kunnen in kleur veranderen en zouden interessant zijn om camouflage patronen aan de omgeving aan te passen, zoals gebruikt in de natuur van de octopus die zijn kleur kan veranderen door pigment bevattende cellen in de opperhuid te bewegen en hun reflectiviteit te veranderen door spiercontractie. **Nanostructuren** zouden kogels zodanig kunnen veranderen dat zij extra schade kunnen verrichten door een scherpe structuur te krijgen of extra drijfkracht door bijvoorbeeld nano-verspreidend aluminium te gebruiken [31, 32].

Naast dodelijke wapens zijn ook **niet-dodelijke wapens** die de vijand tijdelijk buiten gevecht stellen een belangrijk thema. Hiervoor zouden verschillende soorten energiegolven gebruikt kunnen worden zoals microgolven, hoge-energie lasers, radio frequente of akoestische golven [32]. Met een energie puls van een hoge intensiteit zouden bijvoorbeeld elektronische control systemen uitgeschakeld kunnen worden. Dit kan interessant zijn om de auto van een zelfmoord terrorist te stoppen of om drones uit de lucht te halen.³¹ Nanotechnologie zou een bijdrage kunnen leveren om deze wapens kleiner en lichter te maken waardoor zij als persoonlijke wapens gebruikt kunnen worden [31].

Kleine, lichte en draagbare energievoorziening is een belangrijke factor voor soldaten in het veld om draagbare elektronische systemen, sensoren, communicatie en GPS systemen te kunnen besturen en om batterijen op te laden. Hier zouden flexibele **zonnepanelen** en **micro-brandstof cellen** gebruikt kunnen worden om batterijen op te laden. Nanomaterialen kunnen helpen om zonnecellen energie efficiënter te maken door een coating aan te brengen om licht beter in te kunnen vangen. Het

³¹ <https://www.youtube.com/watch?v=56veH8-KbEM>, demonstratie van een hoge energie puls en de effecten op een auto of drone, NATO youtube kanaal, gezien op 1 juli 2016.

nanomateriaal zou als een dunne laag van honderden nanometers op de zonnepanelen aangebracht kunnen worden waardoor ze dunner, flexibeler en goedkoper zouden kunnen worden. Apparaten die **energie oogsten** van vibraties of door het omzetten van bewegingsenergie of lichaamswarmte zijn ook een optie [32]. Autonome systemen maken een militaire basis onafhankelijk en dit is van belang tijdens een missie omdat bevoorrading duur, en in sommige gebieden ook niet of nauwelijks mogelijk is in verband met de dreigingssituatie daar.

6.2 Verwachte uitdagingen en ontwikkelingen

In de toekomst zal naar verwachting de manier van oorlogsvoering verder veranderen. Zoals uit interviews blijkt zal cyberverdediging van kwetsbare systemen (navigatie- en wapensystemen van bijvoorbeeld vliegtuigen, schepen en voertuigen) een steeds grotere rol spelen. Ook offensieve cyberaanvallen worden steeds belangrijker (zie ook sectie 5.2.1).

Verder is de verwachting dat robots en kunstmatige intelligentie steeds vaker gebruikt kan gaan worden bij militaire missies. Killer robots worden echter in de komende 15 jaar nog niet verwacht. Hiernaast wordt verwacht dat de dreiging met biologische stoffen in de komende 5 jaar toeneemt. Voor autonome systemen zouden zonnecellen interessant kunnen zijn voor de energieopwekking. Er wordt veel onderzoek gedaan naar het verbeteren van de efficiëntie en kosten van zonnecellen. Een belangrijke uitdaging is het opschalen naar grote oppervlakten van nieuwe efficiënte zonnecellen en de integratie hiervan in elektrische systemen.

7. Conclusies en aanbevelingen

Dit rapport geeft een breed overzicht van onderzoeksterreinen binnen nanotechnologie en gebieden voor civiele veiligheid waar nanotechnologieën mogelijk toepasbaar zouden kunnen zijn (onderzoeksvragen 1 t/m 3, zie hoofdstuk 2). Op basis van een meta-literatuur studie is er een indeling gemaakt in toepassingsgebieden waar nanotechnologieën een rol spelen: (i) detectie, (ii) bescherming, (iii) veilige identificatie en communicatie, en (iv) defensie. De relevantie van verschillende toepassingsgebieden voor veiligheidspartners is in kaart gebracht in tabel 1 (onderzoeksvraag 4). Met behulp van interviews is aanvullende informatie verzameld over ontwikkelingen op het gebied van nanotechnologie, over de behoeftes en wensen van veiligheidspartners en over verwachte uitdagingen en ontwikkelingen in een specifiek veiligheidsdomein. De interviews geven inzicht in de rol die nanotechnologie zou kunnen spelen, in de karakteristieke eigenschappen van de genoemde technologieën en geven inzicht in belangrijke eisen die worden gesteld aan veiligheidstoepassingen. De uitkomsten hiervan worden in dit rapport voor ieder afzonderlijk toepassingsgebied besproken en bieden antwoorden aan de onderzoeksvragen 5 en 6.

In dit concluderende hoofdstuk bespreken wij eerst een aantal algemene bevindingen van deze studie (sectie 7.1). Behoeftes en wensen per toepassingsgebied en belangrijke technologische ontwikkelingen zijn samengevat in sectie 7.2. Deze sectie trekt vervolgens een aantal conclusies over de relevantie van nanotechnologie voor verschillende veiligheidstoepassingen. Tot slot worden op basis van de bevindingen in deze studie enkele aanbevelingen besproken in sectie 7.3.

7.1 Algemene bevindingen in de studie

Sinds het begin van de jaren 2000 heeft nanotechnologie veel aandacht gekregen in onderzoeksprogramma's, in de politiek en in de media. Inmiddels is nanotechnologie steeds meer ingeburgerd en maken onderzoekers gebruik van de grote gereedschapskist aan technologieën die in het nano-onderzoek zijn ontwikkeld. Onderzoek wordt in het algemeen steeds meer multidisciplinair en nanotechnologie vormt hierop geen uitzondering. Vaak is nanotechnologie een onderdeel van een groter systeem. De rol van nanotechnologie is hierdoor ook niet meteen zichtbaar. Enerzijds komt dit omdat de rol die nanotechnologie speelt in een samengesteld eindproduct niet eenvoudig is aan te geven. Anderzijds heeft dit te maken met de fluïde grenzen van het vakgebied nanotechnologie, voor zover er überhaupt kan worden gesproken van een vakgebied. Wat nanotechnologie is, en waarin het zich onderscheidt van andere kennisgebieden, heeft vaak enige toelichting nodig – ook in de gehouden interviews in deze studie. Dit onderzoek richtte zich vooral op toepassingen waar de rol van nanotechnologie relatief zichtbaar en als zodanig herkenbaar is.

Tijdens het onderzoek kwam naar voren dat voor de geïnterviewde veiligheidsgerelateerde bedrijven nanotechnologie op dit moment geen groot thema is, maar eerder één optie uit verschillende technologische mogelijkheden. Bij veiligheidsgebruikers in dit onderzoek is nanotechnologie weinig bekend en het onderwerp speelt zelden een rol in lopende projecten. Opvallend is dat ook voor de verschillende onderzoeksgebieden binnen nanotechnologie het veiligheidsdomein geen groot thema is. Nanotechnologisch onderzoek richt zich op meer thema's zoals bijvoorbeeld energie of gezondheid. Op het gebied van nano-sensoren worden de meeste technologieën voor de gezondheidszorg ontwikkeld, omdat daarvoor een grote markt beschikbaar is. Voor veiligheidstoepassingen, bijvoorbeeld voor detectie en bescherming, is de markt relatief klein vergeleken met de

gezondheidssector of de consumentenmarkt. Ontwikkelingen in andere gebieden zoals gezondheid zouden echter ook toepassingen kunnen vinden in het veiligheidsdomein door gemeenschappelijke platformtechnologieën te benutten en specifiek te maken voor veiligheidstoepassingen (zie ook paragraaf 7.2).

Mogelijke gezondheidsrisico's van nanotechnologieën spelen een grote rol in overwegingen van eindgebruikers. Uiteindelijke producten moeten veilig zijn om geaccepteerd te kunnen worden door eindgebruikers en om draagvlak te creëren voor investeringen. Uit het onderzoek blijkt dat de ontwikkeling van nieuwe standaarden een belangrijke eis is voor de certificering en inbedding van nanotechnologieën.

7.2 Relevantie van nanotechnologie voor veiligheidstoepassingen

Op het gebied van detectie stellen eindgebruikers de eis dat nieuwe technologieën betrouwbaar zijn en weinig vals positieve en vals negatieve uitslagen geven omdat deze vaak een grote impact hebben – bijvoorbeeld bij het detecteren van explosieven op luchthavens of stations. Hiernaast is het gewenst dat met een hoge selectiviteit en sensitiviteit gemeten kan worden om bijvoorbeeld eenduidig een specifiek molecuul te kunnen detecteren en kleine concentraties te kunnen meten. Ook moet de uitslag in korte tijd verkregen worden omdat vaak weinig tijd beschikbaar is. Detectietechnologieën zouden idealiter draagbaar en eenvoudig handhaafbaar moeten zijn om in het veld gebruikt te kunnen worden. Tot slot moeten zij ook voldoen aan interne operationele werkprocessen.

De nanosensoren en meetmethoden die in dit rapport werden besproken beloven door molecuul-molecuul interacties kleine hoeveelheden van een stof specifiek te kunnen meten. Door detectie op de nanometer schaal worden niet alleen de volumes maar ook de meetsystemen steeds kleiner, waardoor componenten beter geïntegreerd kunnen worden en draagbare systemen mogelijk zijn. Naast nanotechnologie spelen ook andere onderzoeksgebieden, zoals bio-moleculaire technieken, scheikunde, natuurkunde, en medische biologie, een belangrijke rol in de ontwikkeling van nanosensoren. Op dit moment vinden veel onderzoeken en ontwikkelingen plaats voor de gezondheidssector en steeds meer gezondheidstechnologieën komen op de markt. Toepassingen voor de gezondheidssector zouden mogelijk kunnen worden aangepast voor het detecteren van gevaarlijke stoffen voor veiligheidstoepassingen. Voor het toepassingsspecifiek maken is het van belang dat eindgebruikers eisen en wensen ten aanzien van het gebruik van deze sensoren nader specificeren: welke concentraties moeten gemeten kunnen worden, welke stoffen en moleculen zijn interessant voor veiligheidstoepassingen, wat is de minimale tijd voor detectie? Een uitdaging voor het toepassingsgebied detectie is de kleine markt voor sensoren voor veiligheidstoepassingen en de daarmee verwachte (relatief) hoge kosten voor productie.

Op het gebied van bescherming zijn gebruikers geïnteresseerd in nieuwe functionaliteiten en verbeterde eigenschappen van bestaande materialen. Een goede beveiliging tegen invloeden van buitenaf wordt gezien als het belangrijkste aspect van beschermende materialen. Gebruikers zouden ook graag zien dat kleding en beschermende apparatuur lichter zouden worden om gezondheidsklachten te voorkomen. Extra functionaliteiten zoals vlamwerend, CBRNE beschermend, snij- en steekwerend zijn afhankelijk van de toepassing en verschillen per gebruiker. Zorgen over gezondheidsrisico's van nanotechnologie spelen voor beschermende kleding een extra belangrijke rol, net zoals de certificatie van deze materialen. Bij de brandweer is arbeidshygiëne op dit moment een groot thema. Nader onderzoek zou moeten worden verricht om de doorlaatbaarheid van gevaarlijke stoffen door het pak en opname in het lichaam beter te begrijpen.

Een groot aantal nieuwe nanomaterialen zijn ontwikkeld met nieuwe functionaliteiten en verbeterde eigenschappen die interessant kunnen zijn voor veiligheidstoepassingen op het gebied van bescherming. Zo zouden bijvoorbeeld nanodeeltjes of nano-vezels in textiel geïntegreerd kunnen worden waardoor de sterkte of flexibiliteit van het materiaal verhoogd wordt, zonder het gewicht te beïnvloeden. Tegelijkertijd vindt er veel onderzoek plaats naar alternatieve en verbeterde functionaliteiten. De ontwikkeling van nieuwe materialen voor beschermende kleding en hun integratie is wel verbonden met extra kosten.

Op het gebied van identificatie en communicatie is het opsporen en volgen van personen interessant tijdens observaties van verdachte personen door de politie of om op vliegvelden reizigers te kunnen identificeren. Hier is ook het herkennen van valse documenten zoals identiteitsbewijzen en visadocumenten belangrijk om de echtheid van documenten te verifiëren en hierdoor mensensmokkel tegen te gaan. Nieuwe technologieën moeten wel op grote schaal toepasbaar zijn om de grote doorstroom van mensen op bijvoorbeeld vliegvelden aan te kunnen. Het vaststellen van de echtheid van documenten moet laagdrempelig zijn, weinig tijd kosten en betrouwbaar zijn.

Nanotechnologieën kunnen een extra beveiligingsniveau toevoegen door gebruik te maken van natuurlijke oppervlaktes, optische eigenschappen en kwantumverschijnselen. Structuren op de nanometerschaal die niet nageemaakt kunnen worden zijn bijvoorbeeld geschikte verificatie kenmerken. Voor authenticatie en identificatie zijn al enkele technologieën commercieel beschikbaar. Hiernaast is de koppeling van een identiteit aan een sleutel van belang om de toegangsrechten voor gebouwen te beveiligen. Dit is interessant voor nationale en financiële instellingen, de politie maar ook voor de Dienst Justitiële Inrichtingen om gedetineerden doelgericht toegang tot specifieke delen in een gebouw te kunnen geven. De beveiliging van communicatie en dataverkeer voor hackeraanvallen is momenteel ook een groot thema voor een aantal veiligheidspartners. Hier bieden kwantumeigenschappen een radicaal nieuwe bescherming tegen afluisteren. De markt voor veilige authenticatie en communicatie zal in de komende jaren naar verwachting sterk groeien. Er worden steeds meer sensoren gebruikt die moeten worden beveiligd evenals de hiermee verbonden communicatie. Hierbij moet wel de afweging worden gemaakt tussen gewenst beveiligingsniveau, kosten en de gebruikersvriendelijkheid.

Op het gebied van defensie zijn toepassingen zoals draagbare en sensitieve detectiesystemen, lichtere beschermende kleding en veilige communicatie, die beschreven zijn in de vorige alinea's, ook relevant. Voor defensie toepassingen moeten technologieën vaak aan aanvullende eisen voldoen: materialen en apparaten moeten tegen een groot bereik aan temperaturen kunnen, bestand zijn tegen vervuiling en beschermd zijn tegen trillen, schokken en munitie. Bij defensie wordt extra aandacht besteed aan het gebruik van autonome systemen en zelfvoorzienende energieopwekking om onafhankelijk te zijn van de algemene infrastructuur.

Op dit moment wordt veel onderzoek gedaan naar goedkopere en efficiëntere zonnepanelen waar nanotechnologie een rol in zou kunnen spelen om de efficiëntie te verhogen. Het gebruik van nieuwe nanomaterialen en -structuren kan ook een bijdrage leveren om camouflagepatronen te verbeteren of om wapens sterker en lichter te maken. Naast gewone wapens worden ook ontwikkelingen op het gebied van niet-dodelijke wapens besproken. Deze zijn niet alleen interessant voor het Ministerie van Defensie maar ook voor een aantal veiligheidspartners van het Ministerie van VenJ.

7.3 Richting geven aan nanotechnologieontwikkelingen voor VenJ toepassingen

In de bespreking van de verschillende toepassingsgebieden van nanotechnologie voor veiligheid zijn behoeftes en mogelijke oplossingen die nanotechnologieën kunnen bieden op een hoog abstractieniveau geformuleerd. Om de relevantie van nanotechnologie voor veiligheidstoepassingen en eindgebruikers preciezer te kunnen aangeven is het van belang om huidige en toekomstige problemen waar veiligheidspartners tegen aanlopen te articuleren en de wensen en behoeftes te vertalen naar concrete eisen voor nieuwe technologieën. Deze wensen en eisen kunnen dan vergeleken worden met de functionaliteiten die huidige en toekomstige nanotechnologieën kunnen bieden met inachtneming van andere onderzoeksgebieden die ook een meerwaarde kunnen leveren.

Van groot belang is het organiseren van interacties tussen eindgebruikers en wetenschappers om er voor te zorgen dat technische ontwikkelingen nauw aansluiten bij de behoeftes van gebruikers. Uit de interviews bleek dat er nu nog weinig interactie plaatsvindt tussen de ontwikkelaars in de 'nanowereld' en het Ministerie van VenJ en haar veiligheidspartners. Om deze interacties productief te maken bieden interactieve methodes zoals constructief technologisch aspectenonderzoek (Constructive Technology Assessment) geschikte handvatten. Kern van deze aanpak is om via zorgvuldig ontworpen en voorbereide workshops productieve leerprocessen te stimuleren met als doel vragen en behoeftes naar nieuwe technologieën scherper te formuleren en deze terug te koppelen aan innovatiestrategieën. Deze interactieve workshops kunnen zich richten op van te voren geselecteerde veiligheidstoepassingen met focus op verschillende (nano)technologieën.

De toepassingen die werden beschreven in dit onderzoek zijn vaak van belang voor meerdere veiligheidspartners (zie ook tabel 1 voor een overzicht van veiligheidspartners en relevante nanotechnologie toepassingen). Nader onderzoek naar eisen en wensen ten aanzien van relevante technologieën kunnen dus voor meerdere potentiële eindgebruikers tegelijkertijd uitgevoerd worden. Overeenkomsten en verschillen zouden wel in detail moeten worden besproken voor specifieke toepassingen en de gebruiksomgeving van de veiligheidspartners.

Nanotechnologie toepassingen zijn niet alleen relevant voor diverse veiligheidspartners, maar ook voor toepassingsgebieden buiten veiligheid zoals bijvoorbeeld de gezondheidssector. De potentiële overlap tussen deze domeinen wordt op dit moment nog niet geëxploiteerd. Een van de mogelijke redenen hiervoor is dat de link tussen nanotechnologie en veiligheid niet altijd sterk aanwezig is, zoals uit de interviews blijkt. Hiernaast werd in interviews opgemerkt dat de markt voor veiligheidstoepassingen niet altijd even groot is vergeleken met andere sectoren en daarmee mogelijk minder aantrekkelijk voor wetenschappers en bedrijven. Het actief volgen van ontwikkelingen in beide toepassingsgebieden zou het mogelijk maken om nieuwe product-markt combinaties te ontdekken en zodoende aan te sluiten bij bestaande producten of technologieontwikkelingen. Interactie en coördinatie met verschillende veiligheidspartners die gemeenschappelijke belangen hebben (gedeelde interesses in toepassingen) is hierbij zinvol.

Het algemeen gebruik en 'enabling' karakter van nanotechnologieën biedt in principe een veelvoud van mogelijke toepassingen op het gebied van veiligheid. In dat opzicht is er in de woorden van de fysicus Richard Feynman inderdaad 'plenty of room at the bottom' voor veiligheidstoepassingen. Om deze ruimte goed te benutten is het van belang om richting te geven aan nanotechnologie innovaties. Bijvoorbeeld door het delen van actuele analyses van de huidige en toekomstige behoeftes in operationele praktijksituaties van het Ministerie van VenJ en haar veiligheidspartners met wetenschappers en bedrijven die zoeken naar nieuwe toepassingen van hun kennis en technologie.

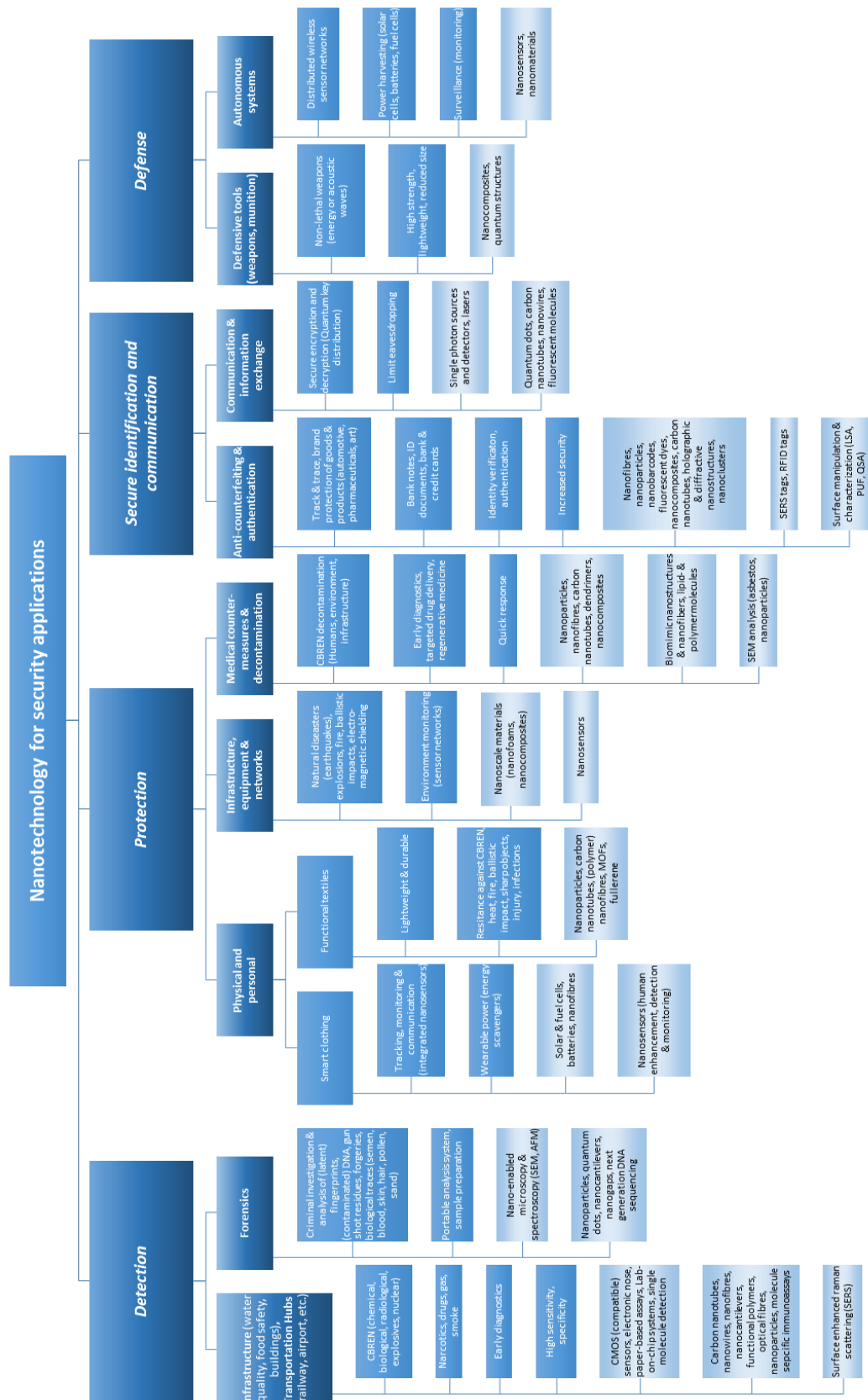
8. Referenties

1. Wilson, M., et al., *Nanotechnology: Basic Science and Emerging Technologies*. 2002: Chapman and Hall / CRC Press.
2. Tran, P.A., L. Zhang, and T.J. Webster, *Carbon nanofibers and carbon nanotubes in regenerative medicine*. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2009. **61**(12): p. 1097-1114.
3. Binnig, G., et al., *Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy*. *Physical Review Letters*, 1982. **49**(1): p. 57-61.
4. Eigler, D.M. and E.K. Schweizer, *Positioning single atoms with a scanning tunnelling microscope*. *Nature*, 1990. **344**(6266): p. 524-526.
5. Roco, M.C., *International perspective on government nanotechnology funding in 2005*. *Journal of Nanoparticle Research*, 2005. **7**: p. 707-712.
6. *The National Nanotechnology Initiative, Strategic Plan*, 2004, National Science and Technology Council, Committee on Technology, Subcommittee Nanoscale Science, Engineering and Technology p. 1-48.
7. Bennett, I. and D. Sarewitz, *Too Little, Too Late? Research Policies on the Societal Implications of Nanotechnology in the United States*. *Science as Culture*, 2006. **15**(4): p. 309-325.
8. McCray, W.P., *Will Small be Beautiful? Making Policies for our Nanotech Future*. *History and Technology*, 2005. **21**(2): p. 177-203.
9. Schmidt Kjærgaard, R., *Making a small country count: nanotechnology in Danish newspapers from 1996 to 2006*. *Public Understanding of Science*, 2010. **19**(1): p. 80-97.
10. Te Kulve, H., *Evolving Repertoires: Nanotechnology in Daily Newspapers in the Netherlands*. *Science as Culture*, 2006. **15**(4): p. 367-382.
11. Rip, A. and M. Van Amerom, *Emerging De Facto Agendas Surrounding Nanotechnology: Two Cases Full of Contingencies, Lock-outs, and Lock-ins*, in *Governing Future Technologies: Nanotechnology and the Rise of an Assessment Regime*, M. Kaiser, et al., Editors. 2009, Springer. p. 131-155.
12. Rip, A. and S. Talma, *Antagonistic Patterns and New Technologies*, in *Getting New Technologies Together. Studies in Making Sociotechnical Order*, C. Disco and B.J.V.d. Meulen, Editors. 1998, Walter de Gruyter: Berlin. p. 299-322.
13. Walhout, B., Konrad, K., *Practicing Responsible Innovation in Nanonextnl.*, in *Practices of Innovation, Governance and Action - Insights from Methods, Governance and Action*, A.D. D. Bowman, C. Fautz, J. Guivant, K. Konrad, H. van Lente and S. Woll, Editor. 2015, AKA / IOS Press: Berlin. p. 53-68.
14. European Commission, *Successful European Nanotechnology Research. Outstanding science and technology to match the needs of future society.*, 2011, Publications Office of the European Union: Luxembourg. p. 1-120.
15. *Nanosensors for explosives detection (briefing)*, February 2011, ObservatoryNANO. p. 1-4.
16. Martinez, A.W., et al., *Patterned Paper as a Platform for Inexpensive, Low Volume, Portable Bioassays*. *Angewandte Chemie (International ed. in English)*, 2007. **46**(8): p. 1318-1320.
17. Kumar, A.A., et al., *From the Bench to the Field in Low-Cost Diagnostics: Two Case Studies*. *Angewandte Chemie International Edition*, 2015. **54**(20): p. 5836-5853.
18. Singh, K.A., *Security Technology Sector - first year progress report*, 2009, ObservatoryNANO. p. 1-200.
19. Charpentier, A., et al., *Nanotechnology in Civil Security (workshop report)*, M. Morrison, Editor June 2007, NanoForum p. 1-71.
20. Yang, Y., B. Xie, and J. Yan, *Application of Next-generation Sequencing Technology in Forensic Science*. *Genomics, Proteomics & Bioinformatics*, 2014. **12**(5): p. 190-197.
21. *Nano-Enabled Protective Textiles (briefing)*, December 2010, ObservatoryNANO. p. 1-4.
22. Schilthuizen, S. and F. Simonis, *Nanotechnology: innovation opportunities for tomorrow's defence*, 2005, TNO Science & Industry. p. 1-57.

23. Kaskel, S., et al., *Verfahren zur Herstellung von Partikeln enthaltend Metall-organische Gerüstverbindungen*, 2012, Google Patents.
24. O'Rourke, E., et al., *European Nanotechnology Landscape Report*, 2011, ObservatoryNANO.
25. *Nanotechnologies for anti-counterfeiting applications (briefing)*, December 2010, ObservatoryNANO. p. 1-4.
26. Pinkse, P.W.H. and A.P. Mosk, *Multiple-scattering materials as physical unclonable functions*, 2015, University of Twente (The Netherlands).
27. Goorden, S.A., et al., *Quantum-Secure Authentication of a Physical Unclonable Key*. *Optica* 2014. **1**(6): p. 421-424.
28. Goorden, S.A., *Reversible scattering of light exploited for quantum-secure authentication*, 2015, University of Twente: Enschede, The Netherlands.
29. *Nanotechnologies for secure communication (briefing)*, August 2011, ObservatoryNANO. p. 1-4.
30. Huang, D., et al., *Long-distance continuous-variable quantum key distribution by controlling excess noise*. *Scientific Reports*, 2016. **6**: p. 19201.
31. Schilthuizen, S. and F. Simonis, *Nanotechnology: innovation opportunities for tomorrow's defence*, 2006, TNO Science & Industry. p. 1-112.
32. Schilthuizen, S. and F. Simonis, *Nanotechnology: innovation opportunities for tomorrow's defence*, 2009, TNO Science & Industry. p. 1-89.

9. Bijlagen

9.1 Bijlage 1 – Overzicht nanotechnologieën voor veiligheidstoepassingen



9.2 Bijlage 2 - Lijst interviewpartners

- Anoniem, directie bewaking, beveiliging, burgerluchtvaart, Ministerie Veiligheid en Justitie
- Anoniem, R&D manager, chemische industrie
- De heer Albert Polman, hoogleraar en vakgroep voorzitter Photonic Materials Groep, AMOLF
- De heer Albert van den Berg, hoogleraar en vakgroep voorzitter BIOS Lab-on-chip groep, Universiteit Twente
- De heer Arian van Asten, bijzonder hoogleraar forensische analytische chemie, Universiteit van Amsterdam en Nederlands Forensisch Instituut
- De heer Dave Blank, Chief Scientific Ambassador en Universiteitshoogleraar, Universiteit Twente
- De heer Frans Widdershoven, Fellow, NXP Semiconductors – Discovery Labs
- De heer Eddie Flohr, Adviseur Kennis & Innovatie, Ministerie van Defensie
- Mevrouw Ellen Buskens, specialiste vakbekwaamheid, brandweer Nederland, Veiligheids- en Gezondheidsregio Gelderland-Midden (VGGM)
- De heer Eric Hendriks, Managing Director, Safety Masters B.V.
- De heer Geert-Jan Schrijen, VP Engineering, Intrinsic-ID B.V.
- De heer Gerrit Isselman, Sales Coördinator Armour / Sales Manager, TenCate Advanced Armour
- De heer Gert Veurink, Senior Officier van Justitie / Teamleider, Openbaar Ministerie
- De heer Guus Rijnders, hoogleraar en vakgroep voorzitter Inorganic Materials Science, Universiteit Twente
- Mevrouw Ilse Tuinman, wetenschappelijk onderzoeker Defence, Security and Safety, TNO
- Mevrouw Janine Jansen, Product Development Chemist, TenCate Protect B.V.
- De heer Kees Weijers, stafadviseur beveiliging burgerluchtvaart – kennis en innovatie, Koninklijke Marchaussee, Ministerie van Defensie
- De heer Henk Ras, Chef Staf, Defensie Cyber Commando, Ministerie van Defensie
- De heer Leo Beijleveld, ICT Architect, Ministerie van Veiligheid en Justitie - Dienst Justitiële Inrichtingen
- Mevrouw Lyda Kistemaker, Projectleider Kenniscentrum Arbeidsveiligheid, Instituut Fysieke Veiligheid
- De heer Mark Wiebes, Commissaris van Politie, Landelijke Eenheid, Innovatiemanager, Politie
- De heer Maurice Kemmeren, Projectleider Ontwikkeling en Realisatie, cluster FDC bij Instituut Fysieke Veiligheid
- De heer Menno Prins, hoogleraar Moleculaire Biosensoren voor Medische Diagnostiek, Technische Universiteit Eindhoven
- Mevrouw Monique Eijkenboom, senior adviseur strategie, Dienst Justitiële Inrichtingen
- De heer Pepijn Pinkse, adjunct hoogleraar Complex Photonic Systems, Universiteit Twente
- De heer Ron Boelsma, Innovatie en kennismakelaar, Landelijke Eenheid, Politie
- De heer Ruud Bernsen, Technical Sales, Phenom - World
- De heer Steven Schilthuizen, eigenaar, CEO, SCINT B.V.
- De heer Wik Jongsma, Director Future Technologies, Thales Nederland B.V.
- De heer Willem Duvalois, Research Scientist Analytical Chemistry, Department Energetic Materials, TNO

9.3 Bijlage 3 – Interview schema experts

Schema dat is gebruikt tijdens interviews met technische experts aan universiteiten, kennisinstellingen en bedrijven.

INTERVIEW SCHEMA			
Onderzoeksvragen	Interview thema	Interview vragen	Follow-up vragen
Wat zijn relevante ontwikkelingen op het gebied van nanotechnologie voor veiligheidstoepassingen in een specifiek toepassingsgebied?	Nanotechnologie ontwikkelingen in een specifiek toepassingsgebied	<i>Korte introductie WOCD onderzoek en doel van het interview.</i> 1) Hoe belangrijk of prominent is veiligheid als een toepassingsgebied voor deze technologie? <i>Wij hebben een overzicht gemaakt van verschillende toepassingsgebieden op het gebied van veiligheid waar nanotechnologie mogelijk een rol zou kunnen spelen.</i> 2) Als u naar het overzicht kijkt, ben u eens met deze indeling van [nanosensoren / LOC systemen, nano-optica / nano-fotonica, nanomaterialen]? Ontbreken er nano-enabled veiligheidstoepassingen?	Denkt u dat deze technologieën ook voor andere toepassingsvelden gebruikt zouden kunnen worden?
	Meerwaarde van nanotechnologie voor een specifieke toepassing	3) Waarin bestaat de meerwaarde (b.v. verbetering van functionaliteiten, nieuwe functionaliteiten) van deze nanotechnologieën vergeleken met bestaande technologieën? Wat voegt het gebruik van nanotechnologieën toe voor deze veiligheidstoepassingen?	Wat is de rol van nanotechnologie precies? Wat kan nanotechnologie beter dan andere technologieën?
Wat is de fasering en haalbaarheid van deze nanotechnologie ontwikkeling?	Status van ontwikkeling, verwachting verloop van ontwikkeling	4) Op het gebied van [nanosensoren / LOC systemen, nano-optica / nano-fotonica, nanomaterialen], welke technologieën zouden in de volgende 5 jaar op de markt kunnen komen? Welke technologieën zouden over 5-10 jaar op de markt kunnen komen?	Hoe ver zijn de meeste technologieën tot nu toe ontwikkeld (b.v. fundamenteel of toepassingsgericht onderzoek, prototype, veldverzoeken, commercialisatie of massaproductie)? Kunt u een inschatting maken in TRL niveaus? Wat zijn kritieke factoren en onzekerheden in de ontwikkeling van technologie die nog opgelost moeten worden?

Schema dat is gebruikt tijdens interviews met veiligheidspartners en voor bedrijven.

INTERVIEW SCHEMA			
Onderzoeksvragen	Interview thema	Interview vragen	Follow-up vragen
Zou nanotechnologie een rol kunnen spelen in specifieke veiligheidstoepassingen?	Recente problemen in dit specifiek toepassingsgebied	<i>Korte introductie WOCD onderzoek en doel van het interview.</i> 1) Hoe aanwezig is het thema nanotechnologie als u aan nieuwe technologieën voor veiligheidstoepassingen denkt? <i>Toelichting van verwachte functies van nanotechnologieën voor een bepaalde veiligheidstoepassing zoals beschreven in de overzicht.</i> 2) Welke van de reeds in kaart gebrachte toepassingen en functies van nanotechnologie zijn voor u als gebruiker relevant en waarom?	Ontbreken er toepassingsgebieden die voor u wel van belang zouden zijn?
	Inschatting of bepaalde functies (door nanotechnologie mogelijk gemaakt) een meerwaarde kunnen leveren aan deze veiligheidstoepassing	3) Welke meerwaarde moeten (nano-enabled) oplossingen bieden om interessant te zijn? 4) Wat zijn huidige problemen voor u als gebruiker waar nieuwe technologieën (met of zonder nano) wenselijk zouden kunnen zijn en wat zijn de eisen hiervoor?	
Hoe zal zich het veiligheidsdomein in de toekomst ontwikkelen?	Verwachte uitdagingen en veranderingen in het veiligheidsdomein en verwachte eisen	5) Wat voor nieuwe uitdagingen/problemen verwacht u in dit domein in de komende 5 jaar? Verwacht u dat er veranderingen komen in u werkgebied op het gebied van veiligheid waardoor er andere toepassingen belangrijker worden in de komende 5-10 jaar? Verschuiving in prioriteit?	Zal het snel gaan duren of nog een langere tijd duren? Wat voor (technologische) oplossingen zouden daaraan tegemoet kunnen komen?