



# **Verkenning van de blootstelling aan elektromagnetische velden afkomstig van 5G-systemen**

Small cells en massive MIMO

RIVM Rapport 2019-0214

R. Stam et al.





# **Verkenning van de blootstelling aan elektromagnetische velden afkomstig van 5G-systemen**

Small cells en massive MIMO

RIVM Rapport 2019-0214

## Colofon

© RIVM en Agentschap Telecom 2019

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) en Agentschap Telecom (AT), de titel van de publicatie en het jaar van uitgave.

DOI 10.21945/RIVM-2019-0214

R. Stam (auteur), RIVM  
J.F.B. Bolte (auteur), RIVM  
M.J.M. Pruppers (auteur), RIVM  
J.J. Robijns (auteur), AT  
J. Kamer (auteur), AT  
L.C. Colussi (auteur), AT

Contact:  
Mathieu Pruppers  
Centrum Duurzaamheid, Milieu en Gezondheid  
mathieu.pruppers@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van en in samenwerking met Agentschap Telecom in het kader van AT-EZK Ordernummer 30000959 en RIVM opdrachtnummer E/121054.

Dit is een gezamenlijke uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid  
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven  
Nederland  
www.rivm.nl

en

**Agentschap Telecom**

Ministerie van Economische Zaken  
Emmasingel 1 | 9726 AH Groningen  
Postbus 450 | 9700 AL Groningen  
www.agentschaptelecom.nl



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



Agentschap Telecom  
*Ministerie van Economische Zaken  
en Klimaat*

## Publiekssamenvatting

### **Verkenning van de blootstelling aan elektromagnetische velden afkomstig van 5G-systemen**

#### Small cells en massive MIMO

5G-systemen gaan de nieuwe generatie mobiele netwerken vormen, na 2G, 3G en 4G. Uit de eerste metingen en berekeningen aan 5G-systemen blijkt dat de blootstelling aan de elektromagnetische velden van losse antennes en gebruikerstoestellen lager is dan de limieten die de Europese Unie aanbeveelt. De verwachting vanuit de bestudeerde literatuur is dat het aantal bronnen zal toenemen. Ook is er sprake van toenemend gebruik van datacommunicatie. In welke mate de blootstelling ten opzichte van de limieten wijzigt, is nu niet met zekerheid te voorspellen. Fabrikanten en operators houden bij het ontwerp rekening met de blootstellingslimieten.

Het is belangrijk om de ontwikkelingen te blijven volgen om duidelijk te krijgen wat de veldsterkte is als 5G-systemen in gebruik zijn genomen. Ook moet duidelijk worden hoe de variabele blootstelling bij meerdere zenders en gebruikers moet worden gemeten, en of er geen verstoring van elektronische apparatuur optreedt.

5G-systemen verschillen op een aantal punten van eerdere generaties telecommunicatiesystemen. Met de 5G-technologie kan met ongeveer dezelfde hoeveelheid energie als de huidige systemen sneller en meer informatie worden verstuurd. Daarnaast komen er op langere termijn op meer plekken antennes te staan (meer zenders per vierkante kilometer). Verder kunnen de bundels in verschillende richtingen worden uitgezonden en zo de gebruiker 'volgen'. Hierdoor wisselt de blootstelling in plaats en tijd. Ook zullen in de toekomst frequenties worden gebruikt die hoger zijn dan de nu al gebruikte frequenties.

In de samenleving zijn er zorgen over gezondheidseffecten door blootstelling aan elektromagnetische velden van telecommunicatiesystemen. Hoewel sommige onderzoeken naar de huidige generaties mobiele telecommunicatie aanwijzingen voor gezondheidseffecten leveren, geven alle wetenschappelijke onderzoeken samen geen bewijs dat blootstelling onder de limieten schadelijk is. Of inzichten over gezondheidseffecten veranderen, zal nog moeten blijken.

Voor dit onderzoek heeft het RIVM in opdracht van Agentschap Telecom de peer-reviewed wetenschappelijke literatuur onderzocht op de blootstelling en eventuele gezondheidseffecten van 5G-systemen. Daarnaast hebben Agentschap Telecom en het RIVM bij 5G-testopstellingen veldsterktemetingen uitgevoerd.

Kernwoorden: 5G, antennes, veldsterkte, gezondheidseffecten, blootstelling, blootstellingslimieten



## Synopsis

### **Exploration of the exposure to electromagnetic fields from 5G systems**

#### Small cells and massive MIMO

5G systems will form the basis for the new generation of mobile networks after 2G, 3G, and 4G. The initial measurements and calculations for 5G systems indicate that the exposure to the electromagnetic fields from individual antennas and user devices is less than the limits recommended by the European Union. Based on the literature studied, the number of sources is expected to increase. There will also be an increasing use of data communication. It is not yet possible to predict to what extent the exposure will change relative to the limits. Manufacturers and operators take the exposure limits into account in the design phase.

It is important to continue monitoring the developments in order to obtain a clear idea of what the field strength will be when 5G systems are operational. It is also important to determine how the variable exposure in relation to multiple transmitters and users should be measured and whether any interference of electronic equipment will occur.

5G systems differ from previous generations of telecommunication systems in several ways. 5G technology makes it possible to send more information and do so more quickly than with the present systems while using approximately the same amount of energy. In addition, antennas will be placed in the longer term in more locations (more transmitters per square kilometre). The beams can also be transmitted in various directions and thus "follow" the user. Consequently, the exposure varies with time and location. Some of the frequencies used in future will also be higher than those presently in use.

There are concerns in society about the health effects of exposure to electromagnetic fields from telecommunication systems. Some of the research studies carried out into the present generation of mobile telecommunication systems provide indications of health effects. However, taken together, all the scientific research has not proved that exposure below the limits is harmful. It remains to be seen whether or not insights with regard to health effects will change.

For this investigation, RIVM, acting at the request of the Radiocommunications Agency, studied the peer-reviewed scientific literature on the exposure to and potential health effects of 5G systems. In addition, the Radiocommunications Agency and RIVM carried out field strength measurements on 5G test systems.

Keywords: 5G, antennas, field strength, health effects, exposure, exposure limits





## Inhoudsopgave

### **Samenvatting – 9**

#### **1 Inleiding – 11**

- 1.1 Aanleiding – 11
- 1.2 Doel en centrale vraag – 11
- 1.3 Introductie elektromagnetische velden – 11
- 1.4 Introductie 5G-systemen – 13
- 1.5 Onderzoeksvragen en leeswijzer – 17

#### **2 Onderzoeksmethoden – 19**

- 2.1 Literatuuronderzoek – 19
- 2.2 Praktijkmetingen – 19

#### **3 Resultaten literatuuronderzoek – 23**

- 3.1 Algemeen – 23
- 3.2 Literatuur over metingen van de blootstelling – 24
  - 3.2.1 Small cells – 24
  - 3.2.2 Massive MIMO en overige basisstations – 25
- 3.3 Literatuur over berekeningen van de blootstelling – 25
  - 3.3.1 Small cells – 25
  - 3.3.2 Massive MIMO en overige basisstations – 25
  - 3.3.3 Gebruikerstoestellen – 26
- 3.4 Rapporten – 27

#### **4 Resultaten praktijkmetingen – 29**

- 4.1 Algemeen – 29
- 4.2 Meetresultaten – 29
  - 4.2.1 Small cells (4G) – 29
  - 4.2.2 Massive MIMO – 30
- 4.3 Informatie van buitenlandse experts – 31

#### **5 Gevolgen voor elektromagnetische compatibiliteit – 33**

- 5.1 Algemeen – 33
- 5.2 Overwegingen voor 5G-zendapparatuur – 33

#### **6 Duiding van de resultaten – 35**

- 6.1 Dit onderzoek – 35
- 6.2 De bredere context – 37

#### **7 Conclusies – 39**

#### **Referenties – 41**

#### **Bijlage Zoekstrategie literatuur – 49**



## Samenvatting

In de aanloop naar de uitrol van 5G-technologie in Nederland heeft Agentschap Telecom het RIVM gevraagd om literatuuronderzoek te doen naar de mogelijke toekomstige blootstelling aan elektromagnetische velden (EMV) afkomstig van 5G-systemen. In het bijzonder zijn de blootstelling aan EMV van *small cells* en *massive MIMO*-antennes en de informatie over mogelijke effecten op de gezondheid onderzocht. Ook hebben het RIVM en Agentschap Telecom gezamenlijk onderzocht hoe sterk de velden zijn bij testopstellingen voor 5G-systemen en heeft Agentschap Telecom informatie toegevoegd over de mogelijke verstoring van andere elektronische apparatuur, de elektromagnetische compatibiliteit (EMC).

De introductie van 5G-systemen brengt nieuwe aspecten met zich mee in vergelijking met eerdere generaties telecommunicatiesystemen. Er zullen op langere termijn verdichtingen van de netwerken optreden (meer zenders per vierkante kilometer), afhankelijk van de maatschappelijke behoefte aan datacommunicatie (bijvoorbeeld het *Internet of Things*). Doordat *massive MIMO*-antennes meerdere bewegende bundels in verschillende richtingen kunnen gaan uitzenden, die bovendien van het gedrag van de gebruiker gaan afhangen, krijgt de blootstelling aan EMV een dynamischer karakter (wisselend in plaats en tijd). Een derde aspect is dat 5G-systemen van extra frequentiebanden gebruik kunnen maken: 700 megahertz, 3,5 gigahertz, 26 gigahertz en 66 gigahertz.

De in het literatuuronderzoek gevonden publicaties richtten zich vooral op het meten of berekenen van de blootstelling aan EMV van 5G-apparatuur. Er zijn geen peer-reviewed publicaties gevonden waarin gezondheidseffecten zijn onderzocht na specifieke blootstelling aan EMV door 5G-apparatuur. Het is op dit moment niet mogelijk om uitspraken te doen over veranderingen in de blootstelling van individuele gebruikers door de invoering van 5G-gerelateerde technologieën. Wel is het zo dat de fabrikanten en operators bij het ontwerp van 5G-systemen rekening houden met de blootstellingslimieten in EU-aanbeveling 1999/519/EG. Uit sommige gevonden publicaties blijkt dat de gecombineerde blootstelling aan EMV van 5G-systemen en van bestaande zenders zou kunnen toenemen, mede als gevolg van de toenemende maatschappelijke behoefte aan mobiele datacommunicatie. Uit de berekeningen in de literatuur blijkt dat de blootstelling aan de velden van losse antennes en gebruikerstoestellen lager is dan de door de Europese Unie aanbevolen limieten.

Uit de eerste metingen die in Nederland aan *massive MIMO*-antennes zijn uitgevoerd, blijkt dat de blootstellingslimieten op publiek toegankelijke plaatsen niet worden overschreden. Hoewel bij elke testopstelling een verschillend uitgestraald zendvermogen en een andere opstelling en instelling, zoals antennehoogte en *down tilt* gebruikt werden, geeft dit een eerste indicatie van de mogelijke veldsterktes in één bundel bij maximaal dataverkeer. Deze veldsterktes zijn 2 tot 5% van de referentieniveaus in de EU-aanbeveling en

ongeveer even groot als de veldsterktes die door Agentschap Telecom worden gemeten op verschillende plaatsen in het land voor de huidige mobiele netwerken (2G, 3G en 4G).

Voor elektronische apparatuur in het algemeen is de 'EMC-beleidsregel' van Agentschap Telecom het uitgangspunt voor de aanpak van een mogelijk stoorprobleem. Die houdt in dat apparatuur bestand moet zijn tegen elektrische velden van 5,4 V/m. Op basis van de eerste metingen aan 5G-zenders die in 2019 zijn gedaan wordt geen verstoring door één *small cell* of *massive MIMO*-antenne verwacht. Mogelijke verstoring bij de definitieve zendvermogens en gecombineerde veldsterkte van bij het gericht aanstralen door meerdere zenders moet nog worden onderzocht.

Dit rapport geeft een overzicht van de wetenschappelijke publicaties over de blootstelling aan EMV van 5G-bronnen tot nu toe en van de eerste resultaten van praktijkmetingen in Nederland. Vervolgmetingen zullen moeten uitwijzen hoe de blootstelling zich daadwerkelijk ontwikkelt bij bredere ingebruikname van 5G-systemen en hoe die blootstelling moet worden gemeten als meerdere gebruikers tegelijk contact hebben met een zender. Of de bestaande wetenschappelijke inzichten over gezondheidseffecten nog veranderen, zal nog moeten blijken.

Kennis over 5G-systemen en de toekomstige ontwikkelingen en toepassingen daarvan zal groeien naarmate er meer systemen in gebruik zullen komen. Dat hangt mede samen met de nog onbekende ontwikkelingen in de maatschappelijke behoefte aan datacommunicatie. Het is daarom van belang om actief de vinger aan de pols te blijven houden en de methodologie voor het bepalen van de dynamische blootstelling van zowel netwerken als gebruikerstoestellen aan te laten sluiten op de ontwikkelingen. Ook ontbreekt het nog aan (meet)gegevens van complexe, realistische blootstellingssituaties waarin er in de publieke ruimte vele zendinstallaties en gebruikerstoestellen tegelijk zenden. Vervolgmetingen zullen hierin moeten voorzien.

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

In de aanloop naar de uitrol van 5G-technologie in Nederland heeft Agentschap Telecom (AT) behoefte aan aanvullende kennis over de elektromagnetische velden (EMV) afkomstig van 5G-antennes. AT wil met die – op feiten gebaseerde – kennis objectieve antwoorden kunnen blijven geven op nieuwe vragen over 5G-antennes, in het bijzonder vragen over *small cells* en *massive MIMO-antennes*. Daarnaast wil AT waarborgen dat de meetmethodiek ook voor 5G actueel is en in lijn is met de huidige wetenschappelijke inzichten over het meten van sterktes van EMV.

Het onderzoeksbureau Stratix heeft in opdracht van AT de technische eigenschappen van 5G-antennes in kaart gebracht. Het heeft enerzijds technische aspecten van *small cells* omschreven en gedefinieerd, en anderzijds de technische ontwikkelingen van *small cells* in Nederland en daarbuiten onderzocht (Stratix, 2019).

## 1.2 Doel en centrale vraag

Mede uitgaande van de informatie in het Stratix-rapport, heeft het RIVM verkennend literatuuronderzoek uitgevoerd en meegewerkt aan praktijkmetingen die door de afdeling Markttoezicht van AT zijn uitgevoerd.

De centrale vraag van het onderzoek is wat de verwachte blootstelling aan EMV afkomstig van 5G-systemen is (in de nabije toekomst), met de nadruk op *small cell*-antennes en *massive MIMO*-antennes met *beam-forming*.

## 1.3 Introductie elektromagnetische velden

Elektromagnetische velden (EMV) bestaan uit elektrische en magnetische velden. Elektrische velden ontstaan door een elektrische lading of door veranderende magnetische velden. Magnetische velden ontstaan door een bewegende lading of door veranderende elektrische velden, zoals die bij een geleider waar wisselstroom door loopt. In de natuurwetenschappen, in het bijzonder bij golfverschijnselen zoals elektrische, magnetische en elektromagnetische velden, noemt men het aantal gebeurtenissen per tijdseenheid de frequentie. De eenheid van frequentie is 'hertz' (afkorting: Hz), het aantal golftoppen (of -dalen) per seconde.

De geleider, het apparaat of de zender die de velden produceert, wordt 'de bron' genoemd. Op een bepaalde afstand van de bron zijn het elektrische en magnetische veld volledig gekoppeld en in fase en spreekt men van het elektromagnetische verre veld. Deze afstand hangt af van de frequentie en van de afmetingen van de bron. Op kortere afstand is de koppeling niet volledig en spreekt men van het elektromagnetische nabije veld.

Daar waar in dit rapport wordt gesproken over 'radiofrequente' EMV, worden velden met frequenties tussen 100 kilohertz (kHz) en 300 gigahertz (GHz) bedoeld. EMV met frequenties tussen 30 en 300 GHz

worden ook wel aangeduid met 'millimetergolven', omdat de golflengte in dat frequentiegebied varieert van 1 cm tot 1 mm (zie Figuur 3).

De sterkte van elektrische velden wordt gemeten in de grootheid 'elektrische veldsterkte' (eenheid: volt per meter, afkorting V/m). De sterkte van magnetische velden wordt gemeten in de grootheden 'magnetische veldsterkte' (eenheid: ampère per meter, afkorting A/m) of 'magnetische fluxdichtheid' (eenheid: tesla, afkorting T), die in elkaar zijn om te rekenen. Voor het meten van de sterkte van EMV met frequenties tussen 10 gigahertz en 300 gigahertz wordt de grootheid 'vermogensdichtheid' gebruikt (eenheid: watt per vierkante meter, afkorting W/m<sup>2</sup>). De vermogensdichtheid en de elektrische veldsterkte zijn in het verre veld in lucht eenvoudig in elkaar om te rekenen.

De sterkte van EMV buiten het lichaam bepaalt de grootte van de effecten in het lichaam. De EMV buiten het lichaam kunnen elektrische velden in het lichaam opwekken en op die manier energie afzetten. Bij radiofrequent EMV is opwarming van weefsels en organen het gevolg van die in het lichaam afgezette energie. De doordringing in het lichaam van EMV neemt af met toenemende frequentie. Bij 700 MHz is de diepte van doordringing 5 cm, bij 3,5 GHz 2 cm, bij 26 GHz 1 mm en bij 60 GHz 0,5 mm (Italian National Research Council, 2018). Bij frequenties lager dan 10 GHz wordt voor het kwantificeren van de energieafzetting in het lichaam de grootheid 'specifiek absorptietempo' (Engels: '*specific absorption rate*', SAR) gebruikt. De eenheid voor SAR is watt per kilogram (W/kg). Voor frequenties hoger dan 10 GHz, waarbij de energieafzetting vooral aan het lichaamsoppervlak plaatsvindt, wordt de grootheid 'vermogensdichtheid' gehanteerd.

### **Regelgeving ter bescherming tegen EMV**

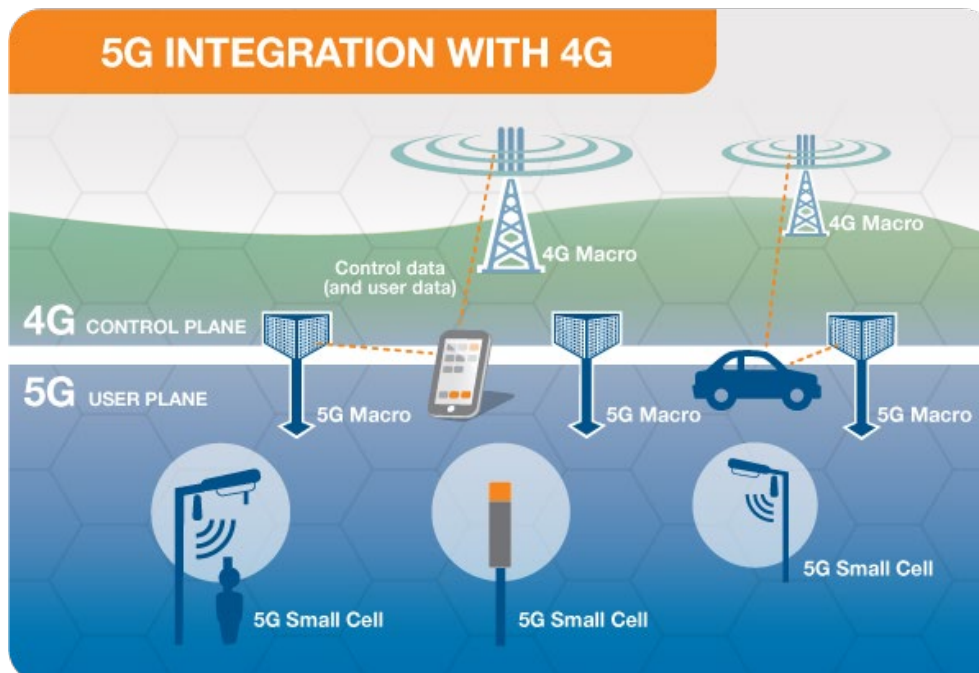
Voor wat betreft de blootstelling van leden van de bevolking aan radiofrequente EMV van zendinstallaties hanteren de Nederlandse overheid en de mobiele providers de blootstellingslimieten in EU-aanbeveling 1999/519/EG (Rijksoverheid, 2010; Raad van de Europese Unie, 1999). Het Europees wetboek voor elektronische communicatie (Telecomcode), dat het beleid voor elektronische communicatienetwerken in de Europese Unie harmoniseert, bepaalt dat lidstaten beperkingen kunnen opleggen aan de gebruikte technologie om de volksgezondheid te beschermen tegen EMV, terdege rekening houdend met EU-aanbeveling 1999/519/EG (Europees Parlement en Raad van de Europese Unie, 2018). Overeenstemming met de blootstellingslimieten in de EU-aanbeveling voorkomt die gezondheidseffecten die wetenschappelijk bewezen zijn, en die voor radiofrequente velden het gevolg zijn van opwarming van het lichaam of delen daarvan. Deze limieten zijn gebaseerd op de aanbevelingen van de 'International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection' (ICNIRP, 1998). ICNIRP maakt onderscheid tussen basisrestricties en referentieniveaus. De basisrestricties zijn limieten voor de effecten van EMV in het lichaam (interne stroomdichtheid, SAR-waarde en vermogensdichtheid). Uit deze basisrestricties zijn met worst-case aannames referentieniveaus afgeleid in termen van de sterkte van de EMV in de omgeving. Als deze referentieniveaus worden overschreden, kunnen de basisrestricties worden overschreden. Wanneer referentieniveaus niet worden overschreden, kan men ervan uitgaan dat de basisrestricties ook niet worden overschreden. In Nederland zijn er nog

geen wettelijke limieten voor blootstelling van leden van de bevolking aan EMV. Wel hebben de overheid en mobiele providers in Nederland een Antenneconvenant gesloten, waarin onder andere is afgesproken dat op vrij toegankelijke plaatsen de blootstellingslimieten in de EU-aanbeveling niet worden overschreden (Rijksoverheid, 2010). Het ministerie van Economische Zaken en Klimaat is van plan om blootstellingslimieten wettelijk vast te leggen (Ministerie EZK, 2018).

Voor blootstelling van werknemers aan EMV gelden de bepalingen in het Arbobesluit, dat verwijst naar blootstellingslimieten in richtlijn 2013/35/EU (Europees Parlement en Raad van de Europese Unie, 2013). Daarin staan actieniveaus en grenswaarden voor beroepsmatige blootstelling, die gelijk zijn aan de referentieniveaus en actiewaarden voor werknemers van ICNIRP. Deze zijn hoger (minder streng) dan de referentieniveaus en basisrestricties voor leden van de bevolking in de EU-aanbeveling. Met referentieniveaus en basisrestricties worden in dit rapport de waarden voor de bevolking in de EU-aanbeveling bedoeld.

#### **1.4 Introductie 5G-systemen**

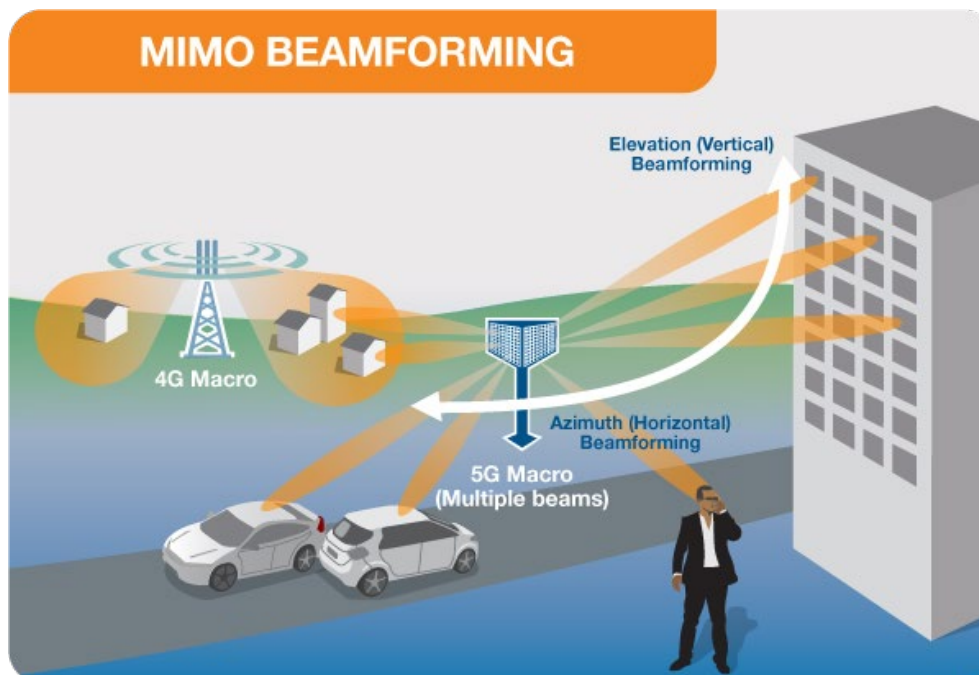
Voor een uitgebreide beschrijving van de technische ontwikkeling van 5G-systemen wordt verwezen naar het rapport van Stratix in opdracht van Agentschap Telecom (Stratix, 2019). 5G-systemen gaan de nieuwe generatie mobiele netwerken vormen na 2G (GSM), 3G (UMTS) en 4G (LTE). De nieuwe mogelijkheden van 5G concentreren zich in drie categorieën: verbeterd mobiel breedband, betrouwbare communicatie tussen toestellen met een kortere latentietijd (responstijd tussen draadloze apparaten) en gelijktijdige communicatie over een groter aantal kanalen en toestellen (bijvoorbeeld bij *massive MIMO* en directe communicatie tussen gebruikerstoestellen – het *Internet of Things*). Voorbeelden van toepassingen die gebruikmaken van deze nieuwe mogelijkheden zijn 'streaming' van video's met hogere snelheid, netwerken van sensoren en geautomatiseerde processen in steden, landbouw en industrie en onderling verbonden autonome voertuigen (ITU, 2018a). Het 5G-netwerk zal geleidelijk worden uitgerold en het 4G-netwerk zal er deels in worden opgenomen. Daarbij zal het 5G-deel vooral voor het transport van grotere hoeveelheden data zorgen (zie ook Figuur 1).



Figuur 1 Weergave van de integratie van 5G-netwerken met bestaande 4G-netwerken (met toestemming overgenomen uit <http://www.emfexplained.info/>).

Naast het toestel van de gebruiker spelen twee soorten antennes in de omgeving van de gebruiker een belangrijke rol bij het transport van grote hoeveelheden data. De eerste soort antenne zijn de *small cells*, kleinere antennes in gebouwen en op drukke plaatsen buiten, die zorgen voor extra dekking en voor communicatie met hogere frequenties op kortere afstand van de gebruiker. Hierbij worden, net als bij 4G, afhankelijk van de plaatsingsdichtheid en afstand tot de gebruiker microcellen, picocellen, femtocellen en attocellen onderscheiden. De tweede soort antennes zijn de zogenaamde *massive multiple-input multiple-output (massive MIMO)*-systemen. *Massive MIMO*-antennes zijn zogenaamde tweedimensionale array antennes. Hierbij zijn meerdere, digitaal afzonderlijk aanstuurbare, antenne-elementen in een rooster geplaatst. Op deze manier kunnen er tegelijkertijd verschillende bundels gevormd worden die een gebruiker dynamisch kunnen volgen (*beam-forming*). Dit betekent dat de EMV niet in een brede waaier door de antenne worden uitgezonden, maar rechtstreeks naar de gebruiker wordt gebundeld (ITU, 2017; Stratix, 2019; zie ook Figuur 2).



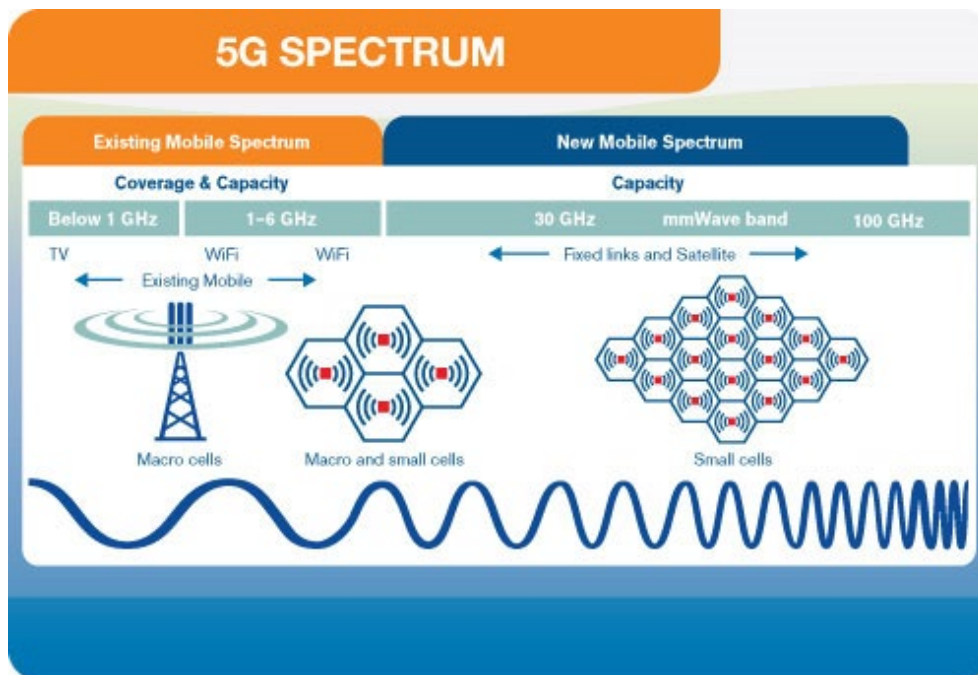


Figuur 2 Met behulp van stilstaande en bewegende bundels van MIMO-systemen kunnen gebruikerstoestellen rechtstreeks worden aangestraald en gevolgd (met toestemming overgenomen uit <http://www.emfexplained.info/>).

### Frequentiebanden en vergunning

5G-systemen zullen naast bestaande banden gebruikmaken van nog drie frequentiebanden: de 700 megahertz (MHz)-band voor brede dekking bij lage datasnelheden, de 3,5 gigahertz (GHz)-band voor een mengeling van de voordelen van een hogere dekkingsgraad en de voordelen van hogere datasnelheden en de 26 GHz-band voor hogere datasnelheden in directe nabijheid van de antenne (Chiaraviglio et al., 2018). Het gebruik van deze frequentiebanden wordt binnen de EU geharmoniseerd (Europees Parlement en Raad van de Europese Unie, 2017; Europese Commissie, 2019a; Europese Commissie, 2019b).

In het Actieplan digitale connectiviteit is voorzien dat deze frequentiebanden ook in Nederland voor mobiele communicatie beschikbaar komen. In de toekomst kan ook de 66 GHz-band in aanmerking komen voor lokaal, vergunningsvrij gebruik (Ministerie EZK, 2018; zie ook Figuur 3). In de Nota mobiele communicatie is voorzien dat de 3,5 GHz-band vanaf september 2022 (deels) in Nederland beschikbaar zal worden gesteld via landelijke vergunningen. De 700 MHz-band wordt al in 2020 landelijk vergund. Het is ook de bedoeling om de 26 GHz-band in 2020 beschikbaar te stellen voor vergunningsvrij gebruik of gebruik via lokale of regionale vergunningen (Ministerie EZK, 2019). In het voorjaar van 2020 zullen in Nederland 700, 1400 en 2100 MHz-frequenties worden geveild (Rijksoverheid, 2019).



Figuur 3 Het frequentiespectrum voor 5G omvat de nu al voor 2G, 3G en 4G gebruikte frequentiebanden. In de toekomst komen daar banden met frequenties hoger dan 6 GHz bij (met toestemming overgenomen uit [www.emfexplained.info/](http://www.emfexplained.info/)).

Communicatie via 5G maakt niet alleen gebruik van nieuwe frequentiebanden, maar ook nieuwe modulaties van het signaal, andere zendprotocollen en antennes die digitaal tegelijkertijd meerdere smalle bundels in verschillende richtingen kunnen produceren. Dat vereist ook andere meet- en modelleervoorschriften om de maximale blootstelling op een publiek toegankelijke plaats te kunnen bepalen.

### Verschil 4G en 5G

Waar 4G vooral met *Frequency Division Duplex* (FDD) werkt, zal 5G, in ieder geval voor *massive MIMO*, met *Time Division Duplex* (TDD) gaan werken. Dat betekent dat er een scheiding in tijd is tussen het zenden van het signaal door het basistation naar de gebruiker (*downlink*) en het ontvangen van het signaal van de gebruiker (*uplink*).

Vooral bij de *massive MIMO*-zenders die in de 3,5 GHz-band met het 5G 'New Radio'-protocol gaan zenden, zijn er verschillen met de 4G-zenders. Een 4G-zender zendt vanaf een mast in een vaste hoofdstraalrichting en bestrijkt een sector van meestal 120 graden. De openingshoek, die wordt begrensd door het 3 dB-punt waar het vermogen gehalveerd is ten opzichte van het vermogen in de hoofdstraalrichting, is meestal tussen 60 en 90 graden. Deze hoofdstraalrichting heeft doorgaans een vaste hoek (*tilt*) tussen +3 (omhoog) en -5 graden (naar beneden). De plaats met de maximale veldsterkte is in de hoofdstraalrichting. In 5G met *massive MIMO* worden er tweedimensionale antenne-arrays (antenneroosters) gebruikt, waarbij ieder antenne-element digitaal afzonderlijk is aan te sturen. Daardoor kan zowel de breedte als de richting van de bundels dynamisch worden veranderd. Daarnaast is er een zogenaamde broadcastbundel, die met een signaal het verzorgingsgebied bestrijkt. Zodra een gebruiker binnen het

verzorgingsgebied komt, wordt aan deze gebruiker een trafficbundel toegekend die de gebruiker dynamisch binnen het verzorgingsgebied blijft volgen. In de toekomst kunnen meerdere bundels tegelijkertijd meerdere gebruikers individueel volgen en hun vermogen dynamisch aanpassen. Het maximale vermogen dat de antenne gebruikt, wordt over die bundels verdeeld. Ook zal door gebruik te maken van weerkaatsingen om obstakels heen gezonden kunnen worden. Er is dan dus geen sprake meer van een enkele bundel die de gebruiker in zijn zichtlijn volgt, maar van diverse golven die via meerdere routes bij de gebruiker bijeenkomen om het totale signaal over te brengen.

## 1.5 Onderzoeksvragen en leeswijzer

In deze verkenning is informatie verzameld over de blootstelling aan EMV, ofwel over de sterkte en vermogensdichtheid van de EMV die kunnen voorkomen op verschillende afstanden van diverse typen *small cell*-antennes en van antennes die gebruikmaken van *massive MIMO*. De gewenste informatie is verkregen door bestuderen van wetenschappelijke literatuur en andere relevante documenten, door interviews met experts en door uitvoeren van praktijkmetingen bij proefopstellingen met *small cell*-antennes en antennes die gebruikmaken van *massive MIMO*.

In het literatuuronderzoek is vooral gezocht naar informatie over de verwachte veldsterkte of vermogensdichtheid voor leden van de bevolking op voor publiek toegankelijke plaatsen in de directe nabijheid van een *small cell*-antenne die gebruikmaakt van het 5G-protocol, (uitgaand van realistisch gebruik in een stedelijke omgeving) en voor *beam-forming* door *massive MIMO*-antennes. De resultaten betreffen uitkomsten van metingen en berekeningen die in de literatuur worden gemeld (zie paragrafen 3.2 en 3.3). In het literatuuronderzoek is ook getracht antwoord te vinden op de vraag wat, volgens de huidige wetenschappelijke inzichten, de mogelijke negatieve effecten op de gezondheid kunnen zijn bij deze veldsterktes (zie paragraaf 3.1 en de discussie daarover in hoofdstuk 6).

Aanvullend zijn door Agentschap Telecom, in samenwerking met het RIVM, praktijkmetingen in Nederland uitgevoerd aan experimentele 5G-systemen. Deze metingen waren bedoeld om een eerste indruk te krijgen van de veldsterkte en vermogensdichtheid in een bundel van een *massive MIMO*-antenne ter plaatse van een gebruikerstoestel dat verbinding met de antenne maakt. Omdat er in Nederland nog nauwelijks gebruikerstoestellen op de markt zijn, is er naar metingen of berekeningen aan gebruikerstoestellen in de literatuur gezocht (zie paragraaf 3.3.3).

Tot slot is Agentschap Telecom nagegaan wat, gezien de meetresultaten uit de praktijkmetingen, de gevolgen zijn voor de elektromagnetische compatibiliteit (EMC) en welke veiligheidsrisico's er daardoor te onderkennen zijn (zie hoofdstuk 5).

In het huidige onderzoek is alleen gekeken naar blootstelling door apparatuur die gebruikt wordt of gaat worden in 5G-systemen voor draadloze communicatie. De nadruk ligt op de blootstelling aan EMV in

de 'nieuwe' frequentiebanden voor mobiele communicatie van 3,5 GHz en 26 GHz.

Eerdere toepassingen in dezelfde of lagere frequentiegebieden (2G-, 3G- en 4G-systemen voor draadloze communicatie), toepassingen van millimetergolven voor radar en overige wetenschappelijke en medische toepassingen behoorden niet tot het onderzoek. De gevolgen van blootstelling door EMV van dergelijke toepassingen zijn onderdeel geweest van eerdere risicoanalyses door internationale wetenschappelijke organisaties zoals ICNIRP, de Wereldgezondheidsorganisatie (*World Health Organization, WHO*) en een wetenschappelijke commissie van de Europese Unie (*Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks, SCENIHR*). In hoofdstuk 6 wordt het huidige onderzoek in een bredere context geplaatst.

## 2 Onderzoeksmethoden

### 2.1 Literatuuronderzoek

Voor het literatuuronderzoek is in eerste instantie gezocht naar 'peer-reviewed' onderzoekspublicaties (beschrijvingen van individuele onderzoeken) en reviews (samenvattingen van literatuur) die gepubliceerd zijn in wetenschappelijke tijdschriften; 'peer-reviewed' betekent dat de kwaliteit van een wetenschappelijk artikel vóór publicatie door andere onderzoekers is getoetst en door de auteurs waar nodig gecorrigeerd en aangevuld. In twee internationale databases (Pubmed en Scopus) is gezocht met een combinatie van zoektermen gerelateerd aan EMV en aan 5G-technologieën (zie Bijlage in dit rapport). De uitkomstmaten van de publicaties (blootstelling, gezondheid) zijn niet aan deze zoektermen toegevoegd, om de vangst zo breed mogelijk te maken. De zoekperiode is beperkt tot de periode januari 2009 – april 2019, omdat de ontwikkeling van 5G-apparatuur en netwerken in 2008 van start is gegaan (NASA, 2008) en de internationale ontwikkelingsprojecten daarvoor rond 2012 op gang kwamen (Liu en Jiang, 2016).

Ter ondersteuning van de resultaten uit de 'peer-reviewed' onderzoekspublicaties is ook gezocht naar 'grijze literatuur' (rapporten, webpublicaties) in het Engels, Duits of Frans op de websites van overheidsinstanties, nationale en internationale organisaties die zich bezighouden met telecommunicatie en gezondheidsbescherming. Hieronder vallen websites van de ministeries, inspecties en onderzoeksinstituten van de EU-lidstaten, Australië, Japan, Korea en de Verenigde Staten en de Europese Commissie, Electronic Communications Committee (ECC/CEPT), European Telecommunications Standards Institute (ETSI), International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), Internationaal Elektrotechnisch Comité (IEC), International Telecommunications Union (ITU) en Wereldgezondheidsorganisatie (World Health Organization, WHO).

Congresabstracts over recent onderzoek zijn soms meegenomen. Zulke abstracts zijn meestal niet peer-reviewed en bevatten onvoldoende informatie om de kwaliteit ervan te beoordelen. Bevindingen uit bezoeken aan twee recente wetenschappelijke bijeenkomsten (workshop in Parijs en congres in Montpellier) zijn opgenomen in paragraaf 4.3.

### 2.2 Praktijkmetingen

Op dit moment zijn er in Nederland experimenteervergunningen voor testopstellingen van 5G uitgegeven (zie voor een overzicht: <https://www.antennebureau.nl/antennes-en-techniek/5g-en-antennes>). Daarnaast is het mogelijk dat testen worden uitgevoerd binnen een bestaande zendvergunning.

De simpelste manier om de hoogste blootstelling te vinden, is om een *massive MIMO*-antenne op maximaal vermogen binnen de vergunning een enkele, smalle bundel te laten maken, die op een zo kort mogelijke afstand de grond raakt. Dat kan alleen met medewerking van de provider en als de zender geen onderdeel van een operationeel netwerk is. Als in

een toekomstige situatie de zender wel operationeel in gebruik is, zijn er verschillende manieren om langdurig, bijvoorbeeld een volle week per configuratie, op plekken waar veel mensen komen te gaan meten. Zo zou voldoende informatie kunnen worden verzameld om de gemeten verdeling van veldsterktes te extrapoleren en het waarschijnlijke maximum te bepalen. Als er meer dan één *massive MIMO*-mast hetzelfde gebied bestrijkt, is het niet eenvoudig om de veldsterkte per mast te bepalen. Hoe dan ook zullen dergelijke metingen – om de maximaal mogelijke veldsterkte op een bepaalde plek aan *massive MIMO* te bepalen – een overschatting geven van de tijdsgemiddelde maximale blootstelling door die zender, zoals ICNIRP die voorschrijft (Baracca et al., 2018; Thors et al., 2017). Immers, de kans dat een gebruiker op een plek gedurende de voorgeschreven middelingstijd van zes minuten voortdurend de maximale blootstelling ervaart, vereist dat de persoon stilstaat en maximaal datatransport vraagt, en dat er geen medegebruikers van de mast zijn. Hoewel het kan, is het niet waarschijnlijk dat iemand maximaal datatransport gedurende zes minuten nodig heeft, omdat dat genoeg zou zijn om bijvoorbeeld 11.000 MP3's te downloaden.

In 2019 is in het kader van dit onderzoek op drie locaties gemeten: een tweedimensionale array-antenne die met LTE-protocol en 2,5 GHz zendt in Groningen en zowel in Maastricht als in Rotterdam aan een 5G *massive MIMO*-antenne die met *New Radio*-protocol in de 3,5 GHz band zendt (Agentschap Telecom, 2019a). Deze zenders hebben tijdens de metingen in overleg met de providers met maximaal dataverkeer in een enkele smalle bundel gezonden om zo de hoogste veldsterkte te bepalen bij het gebruikte vermogen. In dit onderzoek is er samengewerkt met providers, die de zender op verzoek een bepaald vermogen en een vastgestelde hoofdstraalrichting en tilt hebben gegeven waarbij alle energie naar een enkele (denkbeeldige) gebruiker wordt gezonden.

Het doel van de praktijkmetingen was vooral om te bepalen wat de theoretisch maximaal mogelijke veldsterkte bij 5G-zenders op publiek toegankelijke plaatsen kan zijn. Daarnaast was deze pilotmeting bedoeld om te kijken wat de juiste instellingen van de meetinstrumenten zijn voor de nieuwe 5G-zendprotocollen en met welke nauwkeurigheid metingen en berekeningen kunnen worden uitgevoerd.

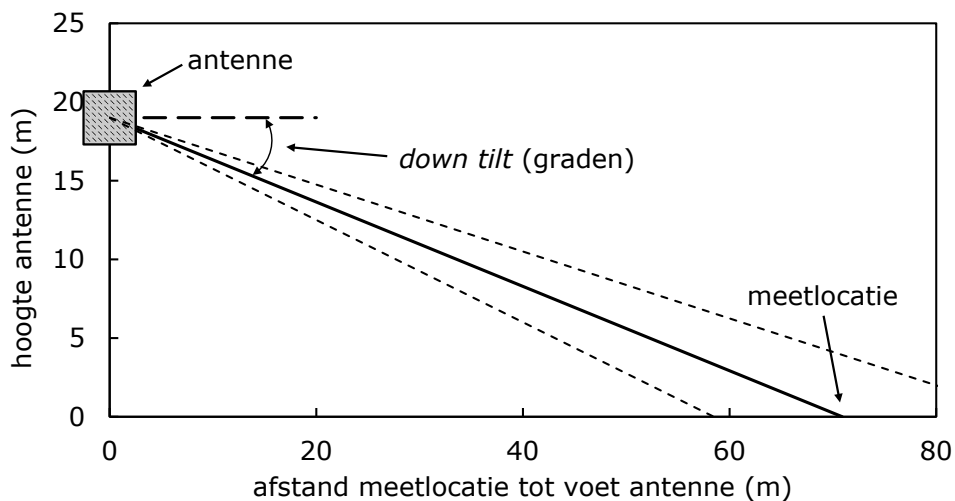
Tijdens de metingen zijn de volgende frequentie-selectieve meetinstrumenten gebruikt (Agentschap Telecom, 2019a):

- NARDA SRM3006 in verschillende '*modes*' waarvan is gebleken dat de '*max average*'-mode de meest nauwkeurige meting leverde;
- Tektronix RSA306A *real time spectrum analyzer* in combinatie met een EMCO3115 hoorn-antenne; en
- FSV *spectrum analyzer* in '*max hold*' en '*average*'-mode in combinatie met een EMCO3115 hoorn-antenne.

In het algemeen geldt dat bij het vergelijken van meetresultaten van verschillende meetinstrumenten rekening wordt gehouden met een meetonzekerheid van 2 tot 3 dB in vermogensdichtheid. Dat betekent dat de gemeten veldsterkte in werkelijkheid maximaal een factor 0,7 lager tot maximaal een factor 1,4 hoger kan liggen (vermogensdichtheid een factor 0,5 lager en een factor 2 hoger).

Er is gecorrigeerd voor de gevallen dat de bandbreedte van de frequentie-selectieve meetinstrumenten smaller is dan de bandbreedte van het te meten signaal. Bijvoorbeeld: in het geval dat de meting van een signaal met een bandbreedte van 40 MHz bij een bandbreedte van het meetinstrument van 20 MHz een niveau van 1,9 V/m oplevert, wordt gecorrigeerd door te veronderstellen dat maar de helft van het werkelijk uitgezonden vermogen is gemeten en er in werkelijkheid twee keer zoveel vermogen is, ofwel 'wortel twee' keer zo hoge veldsterkte, ofwel 2,6 V/m.

De locatie van de meting is op de grond in het centrum van de bundel: zie Figuur 4. De afstand tussen de voet van de antenne en de meetlocatie is bepaald door rekening te houden met de hoogte waarop de antenne zich bevindt en de door de operator opgegeven *down tilt*.



Figuur 4 Meetlocatie ten opzichte van de antenne (voorbeeldsituatie voor een statische bundel).

Voor het bepalen van het maximum van de 5G-antenne wordt ervan uitgegaan dat er in de broadcastbundel (zie paragraaf 1.4) korte, voor het meetinstrument herkenbare, blokken zitten die op maximaal vermogen worden uitgezonden. Door dit signaal te meten en vervolgens te meten hoeveel tijdsblokken een trafficsignaal heeft, kan het theoretische maximum bepaald worden door een signaal te veronderstellen dat in ieder blok met maximaal vermogen zendt en dat ook over de volledige middelingstijd van ICNIRP (zes minuten) doet. Vervolgens kan dan voor iedere positie een correctie worden gemaakt voor padlengte. Keller (2019) beschrijft deze methode in detail. Hierbij geldt wel de aanname dat de versterkingsfactor voor de broadcastbundel en de trafficbundel gelijk zijn. Dat laatste is echter niet altijd het geval, wat betekent dat deze informatie toch van de provider gevraagd moet worden. Een andere kanttekening is dat het broadcastsignaal ook moet worden gemeten op een zo klein mogelijke afstand van de mast en op een zo steil mogelijk naar beneden gerichte downlink; ook deze informatie zal via de provider verkregen moeten worden.

Dit leidt tot een meetwaarde die berust op een theoretisch maximale blootstelling; de in de praktijk optredende tijdgemiddelde blootstellingen zullen over het algemeen (veel) lager uitvallen.

Het meten van de maximale blootstelling terwijl een *massive MIMO*-zender operationeel is, is gecompliceerder omdat onder andere het aantal gebruikers dat de zender bedient varieert, de hoeveelheid datatransport per gebruiker verschilt en in de tijd varieert, en de energieverdeling over een variërend aantal dynamische trafficbundels van moment tot moment zal verschillen. Hiervoor zijn dan ook langdurige metingen op vaste plekken nodig waaruit met behulp van statistische analyses de maximale veldsterkte op die plekken kan worden afgeleid (Thors et al., 2017).



## 3 Resultaten literatuuronderzoek

### 3.1 Algemeen

In het literatuuronderzoek (januari 2009 – april 2019) zijn geen peer-reviewed publicaties gevonden die gezondheidsuitkomsten onderzochten na specifieke blootstelling aan EMV van 5G-apparatuur. De gevonden publicaties richtten zich vooral op het meten of berekenen van de blootstelling aan EMV van (experimentele) 5G-apparatuur.

Het is lastig om op theoretische gronden te voorspellen welke gevolgen de invoering van 5G gerelateerde technologieën zullen hebben op de blootstelling van individuele gebruikers. Bij het gebruik van hogere frequenties dan die van 2G, 3G en 4G wordt het bereik korter en is een grotere dichtheid van 'basisstations' (*small cells*) nodig, maar deze hebben dan een lager vermogen (European Parliament, 2019). Als 5G-zenders voorlopig naast eerdere generaties zenders blijven functioneren, kan dat tot een toename in de totale blootstelling leiden (BIPT, 2018; ITU, 2018a). Met toenemend gebruik van toepassingen zoals streaming video en *Internet of Things* zal het dataverkeer toenemen. Het 5G-protocol zal voor het verzenden van dezelfde hoeveelheid data naar verwachting minder energie nodig hebben dan het 4G-protocol (ITU, 2018b). Doordat er echter meer toepassingen komen die data versturen kan de totale blootstelling toch toenemen, zoals dat ook bij 4G het geval was (Bolte en Eikelboom, 2012; Urbinello et al., 2014; Tomitsch en Dechant, 2015).

Uiteindelijk zullen *massive MIMO*-installaties niet alleen gerichte bundels in *line-of-sight* uitzenden, maar ook bundels in verschillende richtingen zenden, die dan constructief interfereren op de plaats van de gebruiker. Deze *beam-forming* (in plaats van een sectorantenne die in een openingshoek zendt, zoals bij traditionele basisstations) kan leiden tot een afname in de gemiddelde veldsterkte in de omgeving, maar ook tot grotere lokale variatie en een toename op de plaats van de gebruiker. Ook kan de blootstelling hoger zijn dicht in de buurt van een *small cell* (Chiaraviglio et al., 2018). Het kan daarom voor grote assemblages van antennes, zoals die van *massive MIMO*, voorkomen dat de hoogste blootstelling niet het dichtst bij de antenne optreedt, maar op een grotere afstand waar de energie geconcentreerd wordt (Thors et al., 2016). Bij schattingen van de maximale blootstelling zal men ook rekening moeten houden met variatie in het totale aantal gebruikers op verschillende locaties en in de tijd. Het is dus nodig om metingen en berekeningen te doen in realistische gebruiksomstandigheden (Neufeld et al., 2018a).

Een complicerende factor bij *massive MIMO*-antennes met *beam-forming* is dat de gecombineerde blootstelling van alle zendelementen moet worden beschouwd, waarin de bijdragen van individuele zendelementen over korte tijd kunnen variëren en in fase van de golf kunnen verschillen. Een eerste methode is een scenario waarin de bijdrage van alle zendelementen gemaximaliseerd is (Degirmenci et al., 2016). Omdat die methode kan leiden tot een onrealistisch hoge blootstelling, zijn er alternatieve analysemethoden ontwikkeld die gebruikmaken van

middeling over de tijd, reconstructie van de blootstelling op basis van de veldsterkte op grotere afstand van de antenne, of schatting van de blootstelling op basis van de meest waarschijnlijke blootstellingsscenario's (Le et al., 2014; Thors et al., 2017; Sasaki et al., 2019; Xu et al., 2019). Uit deze methoden volgt dat de ruimtelijk en over de tijd gemiddelde veldsterkte 25% van de maximaal mogelijke veldsterkte zal zijn (ITU, 2018b).

Een andere complicerende factor is dat breedband draadloze toestellen en microcellen bij frequenties hoger dan 10 GHz data kunnen verzenden in pulsen van enkele milliseconden tot seconden. Als de velden sterk genoeg zijn, kunnen deze leiden tot korte lokale temperatuurstijgingen in de huid als er nog geen herverdeling van warmte over het lichaam is opgetreden (Laakso et al., 2017; Carrasco et al., 2018; Neufeld en Kuster, 2018b). Dit probleem wordt vergroot doordat de energieafzetting bij frequenties hoger dan 10 GHz vooral aan het oppervlak van het lichaam plaatsvindt. De doordringing is bij 3,5 GHz ongeveer 20 mm, bij 26 GHz 1 mm en bij 60 GHz 0,5 mm (Italian National Research Council, 2018). ICNIRP heeft in zijn concept-aanbevelingen voor radiofrequente velden nieuwe beperkingen opgenomen voor kortdurende blootstelling (minder dan zes minuten), om deze kortdurende lokale temperatuurstijgingen te voorkomen (ICNIRP, 2018). Naar verwachting kan aan deze beperkingen worden voldaan bij het uitgezonden vermogen dat voor gebruikerstoestellen in de 26 GHz-band is voorzien (Xu et al., 2019).

## 3.2 Literatuur over metingen van de blootstelling

### 3.2.1 *Small cells*

Omdat 5G-systemen nog niet breed zijn uitgerold, worden metingen vooral gedaan in laboratoriumopstellingen of op experimentele testlocaties. Er is één wetenschappelijke publicatie gevonden met praktijkmetingen aan een experimentele opstelling met *small cells* (Thielens et al., 2017). De metingen werden gedaan op korte afstand (1 cm) van attocellen die in de vloer waren ingebouwd om een hoge datasnelheid naar 5G-compatibele mobiele apparaten te bereiken binnen een oppervlak van enkele vierkante decimeter. De maximale gemeten elektrische veldsterkte, 1 centimeter boven de vloer, was 6 V/m (10% van het referentieniveau voor de betreffende frequentie in de EU-aanbeveling). Omdat het lichaam zich in deze situatie in het nabije veld van de antenne bevindt, mag de veldsterkte officieel niet vergeleken worden met de referentieniveaus, maar moet de SAR in het lichaam vergeleken worden met de basisrestricties. Hier wordt nader op ingegaan in paragraaf 3.3.1.

Wel zijn er metingen gedaan aan *small cells* in 4G-LTE-netwerken, die een idee geven van de mogelijke blootstellingen in 5G-netwerken (Mazloum et al., 2019). De eerste vernieuwde netwerken zullen heterogene netwerken (*HetNets*) zijn, waarbij *small cell*-basisstations met hogere dichtheid worden geïnstalleerd binnen macrocellen, mede om te voorzien in een soepele aanloop naar volledig 5G. Dit soort dichte netwerken van 4G, zoals nu al in Amsterdam getest wordt, leidde in het onderzoek van Mazloum et al. (2019) tot lagere *uplink* blootstellingen (factor 5 tot 17), maar hogere *downlink* blootstellingen (met een factor van 7 tot 46) in verhouding tot eerdere systemen met alleen

macrocellen. De auteurs maken geen melding van overschrijding van blootstellingslimieten.

### 3.2.2 *Massive MIMO en overige basisstations*

Er zijn geen peer-reviewed onderzoekspublicaties gevonden over uitgevoerde metingen aan EMV van *massive MIMO*-antennes of overige basisstations voor 5G. Omdat er inmiddels wel uitkomsten van dergelijke metingen in voorlopige vorm zijn gerapporteerd op recente wetenschappelijke bijeenkomsten (ANFR, 2019; BioEM, 2019), is de verwachting dat hierover de komende jaren wel zal worden gepubliceerd. De praktijkmetingen aan proefopstellingen voor *small cells*, *massive MIMO* LTE en *massive MIMO* 5G die in het kader van het huidige onderzoek zijn gedaan, worden samengevat in hoofdstuk 4 van dit rapport.

## 3.3 **Literatuur over berekeningen van de blootstelling**

### 3.3.1 *Small cells*

Voor de bepalingen van de blootstelling aan EMV van attocellen in de vloer met een frequentie van 3,5 GHz (zie paragraaf 3.2) is ook de SAR in het lichaam met computermodellen berekend. Bij een realistisch uitgestraald vermogen voor één attocel van 1 mW werd een SAR berekend van 0,003 W/kg in het hoofd (0,2% van de basisrestrictie in de EU-aanbeveling) en 0,001 W/kg in het been (0,03% van de basisrestrictie) (Thielens et al., 2017). Hierbij bevond het hoofd of been zich op 1 cm afstand van de vloer met de attocel. Die situatie is voor het hoofd weinig realistisch, maar is gebruikt als scenario met de hoogste blootstelling. In een vervolgpublishatie van dezelfde onderzoeksgroep is berekend wat de blootstelling is aan een combinatie van 16 attocellen in de vloer als alle antennes gelijktijdig en constant zenden met een uitgestraald vermogen van 1 mW per cel. In dat geval was de maximale SAR in het been 0,021 W/kg (1% van de basisrestrictie) (Shikhantsov et al., 2019a).

Er is één publicatie gevonden met een computersimulatie van een netwerk van 19 *small cells* met een onderlinge afstand van 200 m en een uitgestraald vermogen van 125 mW elk, die EMV uitzenden met een frequentie van 28 GHz (Nasim en Kim, 2019). De uitkomsten suggereren dat in dit scenario 10% van de gebruikers zich in het gebied kan bevinden op een plek waar de vermogensdichtheid hoger is dan het referentieniveau (10 W/m<sup>2</sup>). Er is niet berekend of in die situatie ook de basisrestrictie overschreden kan worden. De auteurs stellen voor het zendprotocol voor een dergelijk netwerk zodanig aan te passen, dat het de aangesproken *small cell* selecteert die zorgt voor een vermogensdichtheid lager dan het referentieniveau maar met een voldoende hoge datasnelheid.

### 3.3.2 *Massive MIMO en overige basisstations*

In computersimulaties is de blootstelling binnen in een fabriekshal aan EMV met een frequentie van 3,5 GHz van een *massive MIMO*-antenne met 36 zendelementen berekend. De kortste afstand tot de gebruiker was 8 meter. Bij een (genormaliseerd) vermogen van 1 W en rechtstreekse blootstelling (gezichtslijn naar de antenne) werd voor een hoogste vermogensdichtheid van 0,05 W/m<sup>2</sup> een SAR in het hoofd van

0,002 W/kg berekend (0,1% van de basisrestrictie). Bij indirecte blootstelling via weerkaatsingen was de SAR in het hoofd lager. De auteurs berekenden dat de basisrestrictie pas werd overschreden als het uitgezonden vermogen werd opgevoerd tot 35 W per antenne (Shikhantsov et al., 2019b).

Er zijn ook berekeningen gepubliceerd van de blootstelling bij een niet nader gespecificeerd basisstation dat een (sinusoïde) vlakke golf met een frequentie van 3,5 GHz uitzendt. Deze situatie is niet direct vergelijkbaar met realistische blootstelling door *massive MIMO* (draaggolf met modulatie), maar geeft wel theoretische kaders. Bij een realistische maximale vermogensdichtheid van 0,42 W/m<sup>2</sup> was de SAR voor het gehele lichaam 10% van de basisrestrictie, voor zowel een volwassen vrouw als een kind van één jaar. Als de vermogensdichtheid werd opgevoerd tot het referentieniveau van 10 W/m<sup>2</sup>, kon voor het kind de SAR voor het hele lichaam 25% hoger worden dan de basisrestrictie (Liu et al., 2017). ICNIRP heeft aangegeven dat een dergelijke overschrijding niet tot gezondheidseffecten door opwarming kan leiden, omdat de basisrestricties een veiligheidsmarge voor dosimetrische onzekerheid hebben en omdat een verhoging in lichaamstemperatuur in een kind kleiner is dan in volwassenen bij dezelfde blootstelling (Croft, 2018). In een ander onderzoek is alleen de specifieke situatie bekeken waarin de equivalente vermogensdichtheid op de plaats van de gebruiker gelijk is aan het referentieniveau. Bij blootstelling aan EMV in de 3,5 GHz-band met verschillende invalshoeken was de berekende maximale SAR in het hoofd van een volwassene in dat geval 51% van de basisrestrictie (Kaburcuk en Elsherbeni, 2018).

### 3.3.3

#### *Gebruikerstoestellen*

Met 'gebruikerstoestellen' wordt in dit rapport bedoeld: alle toestellen waarmee de gebruiker signalen ontvangt van of verzendt naar *small cells*, *massive MIMO*-antennes of overige basisstations. Gebruikerstoestellen die onder 5G-protocollen informatie uitwisselen met antennes of met andere gebruikerstoestellen zullen voor de benodigde datasnelheid gebruikmaken van meerdere antennes. Dit kan ook als voordeel hebben dat de blootstelling aan EMV lager wordt dan bij één antenne het geval zou zijn (Ishak et al., 2018). Kaburcuk (2019) berekende een maximale SAR van 1,6 W/kg voor de blootstelling aan een gebruikerstoestel dat tegen het hoofd wordt gehouden. Het toestel had een gangbaar ingangsvermogen van 125 mW en zond met een (sinusoïde) vlakke golf in de 3,5 GHz-band naar een niet nader gespecificeerd basisstation. De gevonden SAR-waarde van 1,6 W/kg is 80% van de basisrestrictie (Kaburcuk, 2019). Deze waarde ligt in dezelfde orde grootte als die voor de mobiele telefoons van de 2G-, 3G- en 4G-generatie. Berekeningen aan een prototype gebruikerstoestel voor communicatie met *massive MIMO*-antennes gaven een maximale SAR in het hoofd van 1,4 W/kg (70% van de basisrestrictie), maar het is onduidelijk welk vermogen daarbij werd gehanteerd (Parchin et al., 2019a; Parchin et al., 2019c).

Berekeningen aan een gebruikerstoestel voor *massive MIMO* bij 28 GHz gaven een vermogensdichtheid op het hoofd van 1,2 tot 3,8 W/m<sup>2</sup>, voor uitgangsvermogens van 1,2 tot 2,5 mW. Dit is 12 tot 38% van de basisrestrictie (Yazdandoost en Laakso, 2018). Berekeningen aan andere gebruikerstoestellen voor communicatie met *massive MIMO* gaven aan

dat voordat de basisrestrictie wordt overschreden het uitgangsvermogen mag toenemen tot 10 mW wanneer het toestel tegen het hoofd wordt gehouden en tot 32 mW wanneer het op een afstand van 2 centimeter wordt gehouden (Zhao et al., 2016; He et al., 2017). Berekeningen aan een prototype gebruikerstoestel voor communicatie met *massive MIMO* bij 26 GHz gaven een maximale SAR in het hoofd van 1,7 W/kg (85% van de basisrestrictie), maar het is onduidelijk welk vermogen daarbij werd gehanteerd (Parchin et al., 2019b). Er zijn ook berekeningen gedaan aan een *virtual reality*-bril die via een mobiele telefoon communiceert met een 5G-netwerk bij een frequentie van 28 GHz. De maximale SAR in het oog bij een gangbaar uitgangsvermogen van 1 W was 1,4 W/kg (70% van de basisrestrictie) (Cvetković et al., 2018).

De 5G-gebruikerstoestellen die in de 26 GHz-band kunnen zenden, zullen ook op de gebruikelijke manier op de Europese markt komen. De standaard EN 62311 is een generieke EMV-meetstandaard tot 300 GHz en kan gebruikt worden voor dit gehele frequentiegebied.

Berekeningen aan een gebruikerstoestel voor communicatie met een *small cell* bij een frequentie van 60 GHz gaven voor een ingangsvermogen van 10 mW een maximale vermogensdichtheid op het hoofd van 1,7 W/m<sup>2</sup> (17% van de basisrestrictie). Het toestel werd daarbij direct tegen het hoofd gehouden. Het ingangsvermogen zou onder die omstandigheden tot 85 mW kunnen stijgen voor de basisrestrictie werd overschreden. Voor blootstelling van de hand bij het browsen werd een maximale vermogensdichtheid gemeten van 15% van de basisrestrictie (Guraliuc et al., 2017). Voor een *wearable* antenne afgesteld op 60 GHz bij het maximaal toegestane ingangsvermogen van de antenne van 500 mW werd een vermogensdichtheid van 4,6 W/m<sup>2</sup> berekend (46% van de basisrestrictie). Als de antenne niet voorzien was van een metalen afscherming om te voorkomen dat richting het lichaam wordt gezonden (*ground plane*), kon de basisrestrictie worden overschreden (Leduc en Zhadobov, 2017). De auteurs verwachten dat in de praktijk lagere vermogens worden toegepast.

### 3.4 Rapporten

Een rapport van de International Electrotechnical Commission (IEC) bevat enkele *case studies* met metingen en berekeningen aan 5G-systemen (NPR-IEC/TR 62669, IEC, 2019). Voor een *massive MIMO*-basisstation van 3,5 GHz werden metingen gedaan voor een ruimtelijk en over de tijd gemiddelde veldsterkte bij 25% van het maximaal mogelijke vermogen (zie voor verdere toelichting van deze keuze paragraaf 3.1). De gemeten veldsterkte aan de voorkant van de antenne kon binnen een afstand van 11,6 meter hoger zijn dan de referentieniveaus in de EU-aanbeveling. Er zijn ook berekeningen gedaan bij 25% van het maximale vermogen voor een locatie met drie *massive MIMO*-basisstations van 3,5 GHz en een antenne voor lokale dekking van 28 GHz. Op plaatsen waar leden van de bevolking konden komen, was de veldsterkte alleen hoger dan de referentieniveaus op een hoogte boven de 2,6 meter ten opzichte van het looppad. Verder werden metingen gerapporteerd voor *small cells* van 27 GHz binnen een gebouw of buiten op een toren. De maximale blootstelling binnen bedroeg 0,01% en buiten 0,002% van de referentieniveaus in de EU-aanbeveling.

Een rapport van de International Telecommunication Union (ITU) bevat twee *case studies* met bepalingen van de blootstelling (ITU, 2018b). Voor een *massive MIMO*-basisstation van 3,5 GHz op een dak werd bij 25% van het maximaal mogelijke vermogen berekend dat de veldsterkte op het dak alleen hoger dan de referentieniveaus in de EU-aanbeveling was op een hoogte boven de 2,6 meter ten opzichte van het looppad. De veldsterkte in horizontale richting aan de voorkant kon hoger zijn dan de referentieniveaus op een afstand korter dan 9,6 meter. De tweede *case study* was identiek aan die voor *small cells* binnen een gebouw in (NPR-IEC/TR 62669, IEC, 2019).

Een rapport gepubliceerd door de Europese Commissie bevat een analyse van het (toekomstig) gebruik van millimetergolven voor 5G in de Europese Unie (European Commission, 2019). Dit rapport is geschreven door externe adviesbureaus uit Frankrijk en het Verenigd Koninkrijk. Het grootste deel beschrijft de voorziene diensten in de frequentieband van 26 GHz, de daaraan gerelateerde normalisatie-activiteiten en de mogelijkheden voor toekenning van frequentiegebieden binnen deze band. Eén hoofdstuk richt zich op de 'gevolgen voor blootstelling aan elektromagnetische velden'. Daarin wordt geen literatuur geciteerd die specifiek blootstelling aan 5G-bronnen heeft onderzocht. Er wordt één wetenschappelijke review geciteerd die aangeeft dat voor millimetergolven in algemene zin geen andere gezondheidseffecten zijn aangetoond dan die door overmatige opwarming als de EMV sterk genoeg zijn. Het rapport bevat geen beschrijving van de methoden die zijn gebruikt voor het zoeken naar en analyseren van relevante literatuur. De auteurs geven aan dat ze de blootstelling aan *small cells* en *massive MIMO*-basisstations hebben 'gemodelleerd', maar de precieze methode daarvoor wordt niet beschreven. Er is gekeken naar een model voor maximale blootstelling in een statische bundel en een 'probabilistisch' model waarin rekening wordt gehouden met meerdere zendmasten en zendbundels waarvan de sterkte varieert in plaats en tijd door *beam-forming* en reflecties. In het statische model werd voor een *massive MIMO*-antenne berekend dat bij maximaal uitgestraald vermogen van 63 W en een tijdsduur langer dan zes minuten het referentieniveau in de EU-aanbeveling alleen wordt overschreden op minder dan 0,72 meter van de antenne. Voor een *small cell* hing de afstand waar het referentieniveau kon worden overschreden af van het vermogen (0,29 meter bij 10 W en 2,8 meter bij 100 W). Naar verwachting kunnen leden van de bevolking niet op dergelijke korte afstanden van een *massive MIMO*-antenne komen. In het probabilistische model met meerdere zendmasten op een plein was de vermogensdichtheid minder dan 1% van het referentieniveau in de EU-aanbeveling. Het rapport sluit af met aanbevelingen voor het standaardiseren binnen de EU van methoden om EMV van 5G-bronnen te meten en om te verifiëren dat de blootstellingslimieten niet worden overschreden.

## 4 Resultaten praktijkmetingen

### 4.1 Algemeen

Het is nodig om het elektrische of het magnetische veld te meten om te beoordelen of op een specifieke plaats en gedurende een specifieke periode aan de blootstellingslimieten wordt voldaan. Volgens de aanbevelingen van ICNIRP (ICNIRP, 1998) moet eerst de elektrische veldsterkte (*root mean square*-waarde) worden gemeten, en wel voor elke frequentie die op die specifieke plaats voorkomt. Die waarde moet vervolgens voor elke frequentie worden gedeeld door de waarde van het referentieniveau dat bij elke specifieke frequentie hoort. De ontstane verhoudingen moeten ten slotte worden gekwadraterd en opgeteld. Als deze uiteindelijke waarde kleiner is dan 1, dan worden de referentieniveaus voor het elektrische veld niet overschreden.

Voor de hierboven uiteengezette beoordeling kunnen generieke technische normen of, wanneer het om specifieke producten gaat, productnormen worden gebruikt (ITU, 2018b). De technische norm IEC 62232 specificeert beoordelingsmethoden voor basisstations en draadloze netwerken met frequenties tot 100 GHz. Het bevat ook methoden die toepasbaar zijn op 5G-antennes (IEC, 2017). Het technische rapport IEC TR 62669 (in Nederland gepubliceerd als 'Nederlandse praktijkrichtlijn') bevat voorbeelden van metingen en berekeningen voor de uitvoering van IEC 62232, waaronder voorbeelden voor beoordeling van de blootstelling door 5G-basisstations (*small cells* en *massive MIMO*) (IEC, 2019).

Mobiele telefoons met 5G-functionaliteit zijn in Nederland nog nauwelijks op de markt. Voor het beoordelen van de blootstelling van gebruikers ten opzichte van de basisrestricties in de EU-aanbeveling kunnen de technische normen IEC 62209-1 en IEC 62209-2 worden gebruikt voor frequenties tot 6 GHz. Voor frequenties van 6 tot 100 GHz beschrijft het technische rapport IEC TR 63170 meetmethoden voor de vermogensdichtheid dicht bij het lichaam. Voor metingen en berekeningen in dit frequentiegebied worden ook nog technische normen ontwikkeld (IEC 63195, IEC 62704-5). Deze methoden worden naar verwachting ook opgenomen in een nieuwe editie van de norm IEC 62232 (ITU, 2018b).

### 4.2 Meetresultaten

#### 4.2.1 *Small cells (4G)*

Tot halverwege 2019 waren er in Nederland nog geen *small cells* die van het 5G-protocol gebruikmaken. Wel heeft Agentschap Telecom al eerder metingen uitgevoerd aan *small cells* die niet van 5G gebruikmaken. De hoogst frequentiespecifiek gemeten veldsterktes bedroegen 2,7 V/m bij 1,835 GHz en 3,6 V/m bij 2,663 GHz (Agentschap Telecom, 2016a; Agentschap Telecom, 2016b). In Heerenveen heeft Agentschap Telecom in 2016 een breedbandmeting (gedurende zes minuten tussen 100 kHz en 3 GHz) uitgevoerd; de hoogst gemeten veldsterkte bedroeg daar 3,2 V/m (Agentschap Telecom, 2017). Recenter bedroegen de hoogste frequentiespecifiek gemeten veldsterktes 1,9 V/m bij 1,841 GHz (GSM);

1,9 V/m bij 1,834 GHz (LTE); 2,0 V/m bij 2,638 GHz (LTE) en 2,4 V/m bij 2,122 GHz (UMTS) (Agentschap Telecom, 2019b).

Daarnaast heeft Agentschap Telecom op 23 september 2019 twee metingen uitgevoerd aan experimentele zendapparatuur in de 26 GHz-band (Agentschap Telecom, 2019c). De apparatuur maakte gebruik van het 5G *New Radio*-protocol. De zendapparatuur bestond bij de ene meting uit een *point-to-point*-verbinding (richtantenne) en bij de andere meting uit een sectorantenne. De gebruikte apparatuur in deze testopstelling is niet vergelijkbaar met *small cell*-apparatuur. Alleen de gebruikte frequentie zal in de toekomst door *small cell*-apparatuur gebruikt kunnen worden. Voor de resultaten wordt verwezen naar het rapport van Agentschap Telecom (Agentschap Telecom, 2019c).

#### 4.2.2 *Massive MIMO*

Om een indicatie te krijgen van de te verwachten veldsterktes bij 5G-antennes, heeft Agentschap Telecom in overleg met het RIVM metingen gedaan bij enkele 5G-testopstellingen waarbij gebruik wordt gemaakt van *massive MIMO* met *beam-forming*-techniek (Agentschap Telecom, 2019a). Het Agentschap was daarbij afhankelijk van de mogelijkheden die operators konden bieden. Zo waren niet altijd alle gewenste hardware of mogelijkheden op het moment van de meting beschikbaar. Er is gemeten aan *massive MIMO*-antenneconfiguraties in de 2,6 en 3,5 GHz-band. Twee van de drie installaties werkten met het 5G *New Radio* (5G NR)-protocol.

Voor de tijdsduur van elke meting is uitgegaan van een in de tijd stabiel signaal. De zendvermogens en bandbreedtes tijdens de metingen waren afhankelijk van de 5G-testopstelling en de verleende experimenteervergunning. Bij experimenten met testopstellingen worden de resultaten van de metingen beïnvloed door de instellingen van de installaties zoals op dat moment gekozen door de operators. Bij elke testopstelling is een verschillend uitgestraald zendvermogen gebruikt. De metingen zijn niet representatief voor de verwachte 5G-praktijk wat betreft zendvermogen en dataverkeer en geven alleen een indicatie van de veldsterkte van een *massive MIMO*-antenne.

Op 21 juni 2018 en 1 april 2019 is gemeten aan de *massive MIMO*-antenne met *beam-forming* in het 5G-lab van 5Groningen. Er werd gezonden met het LTE (4G) TDD-signaal met een frequentie van 2,605 GHz met een antenne op 19 meter hoogte. In de hoofdbundel werd met een NARDA SRM3006 op 53 meter afstand een elektrische veldsterkte van 3 V/m gemeten.

Op 28 februari, 11 maart en 28 augustus 2019 zijn metingen uitgevoerd aan een *massive MIMO*-antenne opgesteld in Maastricht. Op 28 augustus zond het basisstation een 5G *New Radio*-signaal uit op 3,465 GHz. Bij maximaal dataverkeer werd er met een Tektronix RSA306A real-time spectrum analyzer in combinatie met een EMCO3115 hoornantenne een elektrische veldsterkte van maximaal 1,1 V/m gemeten.

Op 20 mei en 11 september zijn metingen uitgevoerd aan de *massive MIMO*-antenne opgesteld op een bedrijfsterrein in Rotterdam. Het basisstation zond op 3,675 GHz met het 5G *New Radio*-protocol. Tijdens



het uitvoeren van de metingen is er ook gecontroleerd kortstondig met meer vermogen uitgezonden (200 W). Aangezien het volgens de vergunning maximaal toegestane vermogen in de praktijk 20 W is, zijn de gerapporteerde metingen al gecorrigeerd alsof er met 20 W gezonden werd. Op 20 mei werd in de hoofdbundel op 170 meter afstand met een NARDA SRM 3006 een elektrische veldsterkte van 1,9 V/m gemeten. Aangezien de NARDA maar de helft van de bandbreedte meet, levert dat na correctie met een factor 1,4 een elektrische veldsterkte van 2,6 V/m. Op 11 september werd het meetvoorschrift dat bedoeld was om een voorspelling te doen van het maximaal te verwachten vermogen in de trafficbundel, op basis van een meting in de broadcastbundel, getest voor verschillende meetinstrumenten (Keller et al., 2019). Dit bleek in de praktijk niet voor alle meetinstrumenten uitvoerbaar.

Nadere technische details van de metingen zijn te vinden in het onlangs verschenen rapport van Agentschap Telecom (Agentschap Telecom, 2019a). AT heeft het voornemen gecommuniceerd om op meer locaties aan systemen met het 5G *New Radio*-protocol te gaan meten.

### 4.3 Informatie van buitenlandse experts

Er zijn diverse metingen aan 5G-systemen gerapporteerd tijdens twee recente bijeenkomsten in Frankrijk: van de ANFR op 17 april 2019 in Parijs (ANFR, 2019) en de BioEM 2019 van 23 tot 28 juni in Montpellier (BioEM, 2019). De BioEM 2019 is de jaarlijkse, gezamenlijke bijeenkomst van de Bioelectromagnetics Society (BEMS) en de European Bioelectromagnetics Association (EBEA). Er zijn 5G-metingen gedaan in Zuid-Korea, Australië, België, Duitsland en Frankrijk. Er is een peer-reviewed paper over de manier van meten van 5G *massive MIMO* (Keller, 2019). Ook staan er algemene meet- en modelleervoorschriften in NPR-IEC/TR 62232:2017 en voorbeelden van metingen en berekeningen in de Nederlandse Praktijkrichtlijn NPR-IEC/TR 62669:2019. Op dit moment bestaan er nog geen officiële meetvoorschriften die specifiek voor 5G gelden. Er zijn in 2019 5G-netwerken operationeel in onder andere Australië en in Zuid-Korea. In een aantal Europese landen zijn er ook testopstellingen van 5G-zenders. Op de BioEM 2019 werden er diverse presentaties gehouden over eerste metingen, en over reken- en modelleervoorschriften, voornamelijk aan *massive MIMO* 5G en *massive MIMO* LTE. De relevante presentaties zijn van Al Hajj et al. (PA-33), Bornkessel et al. (S13-4), Schwarz en Duerr (PB-138), Gangreat (P3-5), Joseph (P3-1), Kopacz et al. (PA-27), Tornevik (P3-4), Werner en Knipe (S09-5) en Wiart (P3-3); deze presentaties zijn te vinden op de website [www.bioem2019.org](http://www.bioem2019.org) (BioEM, 2019). Bij *massive MIMO* is niet alleen het zendprotocol anders, namelijk TDD en NR in plaats van FDD en GSM, maar vooral de dynamische bundelvorming met *sweeping*-bundels. Deze *sweeping*-bundelvorming maakt het meten van de hoogst mogelijke blootstelling met een middelingstijd zoals ICNIRP aanbeveelt niet eenvoudig, omdat er in de praktijk geen vaste hoofdstraalrichting is waarin de bundel langdurig zal staan. Daarnaast zal de energie over meerdere bundels tegelijk verdeeld zijn. Omdat door verdeling over de bundels en het verplaatsen van de bundels de maximale blootstelling doorgaans niet langdurig op dezelfde plek optreedt, levert berekening of meting van een scenario waarbij het maximale vermogen in een enkele bundel die langdurig naar dezelfde plek 'wijst' een overschatting op van

het werkelijke maximale vermogen (Keller, 2019; Thors et al., 2017); zo'n situatie zal in de praktijk hoogstwaarschijnlijk niet voorkomen. Het werkelijke tijdsgemiddelde maximum blijkt uit statistische analyses doorgaans minder dan 25% van het theoretisch maximum te zijn (zie ook Thors et al., 2017). Dit blijkt ook uit verkennende metingen bij een *massive MIMO* 4G-installatie in Portugal (BioEM, 2019: Joshi et al. (PA-47); Tornevik (P3-4)) waar het inderdaad onder de 25% bleef en uit een meting bij een netwerk in bedrijf in Australië waar het op 7,3% bleef (BioEM, 2019: Werner en Knipe (S09-5)).

## 5 Gevolgen voor elektromagnetische compatibiliteit

### 5.1 Algemeen

Naast effecten op het lichaam kunnen EMV ook elektronische apparatuur verstoren. Deze verstoringen kunnen optreden bij een veldsterkte die aanzienlijk lager is dan de limieten in de EU-aanbeveling. Met name bij elektronische apparatuur met medische doeleinden, zoals apparatuur in ziekenhuizen of in medische hulpmiddelen zoals pacemakers, is het van belang om te bepalen hoe gevoelig die apparatuur is voor storing door EMV en hoe de gemeten veldsterktes zich daarmee verhouden. De veldsterkte waaronder geen verstoring meer optreedt, wordt het 'immunitetsniveau' genoemd. Het immunitetsniveau van elektronische apparatuur voor radiofrequente EMV wordt wereldwijd getest bij een elektrische veldsterkte van 3 V/m voor de woonomgeving en openbare ruimten en 10 V/m voor industriële omgevingen.

#### EMC-beleidsregel

Uit de immunitetsniveaus van 3 V/m en 10 V/m met 80% AM-modulatie die geldt voor elektronische apparatuur, heeft Agentschap Telecom zijn 'EMC-beleidsregel' voor elektromagnetische compatibiliteit afgeleid. Deze beleidsregel geldt voor alle zenders die frequentievergunningplichtig zijn (Staatssecretaris van Economische Zaken, 2009). De wettelijke niveaus waaraan wordt getoetst zijn 5,4 V/m en 18 V/m. Dit komt overeen met het AM-signaal in de top van het gemoduleerde signaal. Als er verstoring optreedt op elektronische apparatuur door het gewenste signaal van een zender met vergunning, kan de laatst bijgekomen zender (operator) op een site worden aangesproken. Op deze manier wordt een operator verplicht rekening te houden met de minimale robuustheid van elektronische apparaten. In de rest van Europa bestaat een dergelijke regeling niet.

#### Medische apparatuur

Voor het testen van de elektromagnetische compatibiliteit van medische elektronische apparatuur kan de Europese norm EN 60601-1-2 worden gebruikt. Daarin worden elektrische velden van 0,3 V/m tot 30 V/m gehanteerd, afgeleid van omgevingen van bedoeld gebruik. Voor specifieke apparaten zal men deze gegevens uit de technische dossiers moeten halen. De fabrikant heeft enige vrijheid om de immunitetsniveaus in te stellen. Actieve geïmplanteerde medische hulpmiddelen, zoals pacemakers, zijn een categorie op zich. Hiervoor gelden de bepalingen in de Europese richtlijn 2007/47/EC (en vanaf 2020 de richtlijn Medische hulpmiddelen). Voor het aantonen van overeenstemming van het hulpmiddel met die Richtlijn kan de Europese normenserie EN 45502 worden gebruikt. Voor de beoordeling van storing van actieve geïmplanteerde medische hulpmiddelen bij werknemers kan de Europese normenserie EN 50527 worden gebruikt.

### 5.2 Overwegingen voor 5G-zendapparatuur

Mobiele communicatiezenders, ook die voor 5G, gebruiken een complexe digitale modulatie-techniek. Zowel in het frequentiedomein als in het tijdsdomein vinden vaak abrupte overgangen plaats. Desondanks blijkt dat

de reguliere immuniteitsbeproevingen een redelijk werkend model zijn voor de beïnvloeding van elektronica door het complexe digitale radiosignaal van 5G. Het is daarbij wel essentieel dat aan de eisen van de EU voor normalisatie de frequentiebanden worden toegevoegd die 5G gebruikt. Hier wordt aan gewerkt door de EMC-normalisatie in internationaal verband (CISPR en IEC TC 77), in eerste instantie door voor alle relevante beproevingen de bovengrens naar 6 GHz op te trekken. Een volgende stap naar 40 GHz wordt op langere termijn verwacht.

### **Massive MIMO en small cells**

Voor elektronische apparatuur in het algemeen is de 'EMC-beleidsregel' van Agentschap Telecom het uitgangspunt voor de aanpak van een mogelijk stoornisprobleem door 5G-zendapparatuur. Allerlei algemene apparatuur en medische elektronische apparaten kunnen in die beschouwing worden meegenomen. Dat betekent dat apparatuur bestand moet zijn tegen elektrische velden van 5,4 V/m. De eerste metingen aan 5G-zenders die in 2019 zijn gedaan, waren aan *massive MIMO*-antennes. De hoogst gemeten gemiddelde elektrische veldsterkte lag rond de 3 V/m (Agentschap Telecom, 2019a). De metingen geven een indicatie van de veldsterkte van 5G *massive MIMO*-antennes in het gebundelde signaal. Onder aanname dat een apparaat voldoende robuust is en voldoet aan de EMC-eis, zijn er geen aanwijzingen dat door het signaal van *massive MIMO*-antennes verstoring optreedt. Op basis van eerdere meetresultaten van individuele 3G- en 4G-*small cells* (Agentschap Telecom, 2016a; Agentschap Telecom, 2017; Agentschap Telecom, 2019b) wordt niet verwacht dat apparatuur verstoord raakt door één enkele *small cell*.

In paragraaf 3.3.1 wordt gerefereerd aan een onderzoek van Nasim en Kim (2019), waarbij een mogelijkheid werd gesuggereerd waarbij 10% van de gebruikers in het gebied zich kan bevinden op een plek waar de vermogensdichtheid hoger is dan het referentieniveau (10 W/m<sup>2</sup>). Dit zou dan ook betekenen dat er een kans bestaat tot verstoring van apparatuur. De vraag is in hoeverre een dergelijk scenario realistisch is, aangezien het gaat om een computersimulatie en operators verplicht zijn de EMC-beleidsregel te respecteren.

Voor actieve geïmplanteerde medische hulpmiddelen kan geen algemene uitspraak over immuniteitsniveaus worden gedaan. Of een EMV-bron voor een specifiek medisch hulpmiddel risico's kan geven, kan het beste worden bepaald door de behandelend arts in het ziekenhuis waar het hulpmiddel is aangebracht en door de fabrikant van het hulpmiddel.

De definitieve zendvermogens bij de uitrol van 5G kunnen het beeld over verstoring beïnvloeden. In lijn met de EMC-beleidsregel zal verder moeten worden onderzocht of de gecombineerde veldsterkte van verschillende 5G-zenders tezamen, en van 5G-zenders en eerdere generaties zenders in bepaalde gevallen tot verstoringen kan leiden.

## 6 Duiding van de resultaten

### 6.1 Dit onderzoek

#### Metingen en berekeningen

In het literatuuronderzoek zijn nog vrijwel geen resultaten van praktijkmetingen aan EMV van 5G-systemen gevonden. In de eigen praktijkmetingen in Nederland die in het kader van het huidige onderzoek zijn uitgevoerd, is gemeten aan *massive MIMO*-antennes in de 2,6 en 3,5 GHz-band, waarvan twee van het 5G *New Radio* (5G NR)-protocol gebruikmaakten. Hoewel bij elke testopstelling een verschillend uitgestraald zendvermogen gebruikt werd en een andere opstelling en instelling, zoals antennehoogte en *down tilt* gebruikt werden, geeft dit een eerste indicatie van de mogelijke veldsterktes in één bundel bij maximaal dataverkeer. Deze veldsterktes in de eigen praktijkmetingen zijn 2 tot 5% van de referentieniveaus in de EU-aanbeveling.

#### Literatuuronderzoek

In het literatuuronderzoek is een beperkt aantal wetenschappelijke artikelen gevonden waarin de blootstelling door 5G-*small cells* (drie artikelen) of *massive MIMO*-antennes (drie artikelen) werd berekend. Voor *small cells* in de vloer van gebouwen werden bij een frequentie van 3,5 GHz-blootstellingen van minder dan 1% van de basisrestrictie in de EU-aanbeveling gevonden. Voor groepen *small cells* buiten gaf één theoretische berekening in de literatuur bij een frequentie van 28 GHz aan dat overschrijding van het referentieniveau op bepaalde plekken kan voorkomen, maar ook dat het zendprotocol aangepast kan worden om dit te voorkomen. Voor *massive MIMO*-antennes bij een frequentie van 3,5 GHz werd bij (door de onderzoekers) realistisch geachte gebruiksscenario's een blootstelling van minder dan 1% van de basisrestrictie gevonden.

Voor 5G-gebruikerstoestellen bij frequenties van 3,5 GHz, 28 GHz en 60 GHz gaven berekeningen voor realistische gebruikssituaties aan dat voor individuele apparaten de blootstelling in dezelfde orde grootte kan liggen als mobiele telefoons van de 2G-, 3G- en 4G-generatie (met als maximum 85% van de basisrestrictie). Informatie over de blootstelling door meerdere toestellen tegelijkertijd en meerdere vormen van gebruik was nog niet beschikbaar.

De algemene tendens in de wetenschappelijke literatuur tot nu toe is dat de blootstelling bij nieuwe 5G-systemen lager is dan de blootstellingslimieten in de EU-aanbeveling, omdat daar bij het ontwerp al rekening mee wordt gehouden. In de meeste EU-lidstaten zijn voor radiofrequente EMV van zendinstallaties de blootstellingslimieten in de EU-aanbeveling van toepassing. Er zijn ook landen met strengere limieten dan die in de EU-aanbeveling (bijvoorbeeld België, Italië en Polen) (Stam, 2018). Bij inachtneming van de blootstellingslimieten moet niet alleen gekeken worden naar de toekomstige bijdrage van 5G, maar ook naar bijdragen van eerdere en nu nog bestaande generaties mobiele netwerken (2G, 3G, 4G), zolang die niet buiten gebruik worden genomen. De verwachting van Chiaraviglio et al. (2018) is dat de

gecombineerde blootstelling kan leiden tot overschrijding van blootstellingslimieten die strenger zijn dan die in de EU-aanbeveling.

In hoofdstuk 3 werd gesignaleerd dat breedband draadloze toestellen en microcellen bij frequenties hoger dan 10 GHz data kunnen verzenden in pulsen van enkele milliseconden tot seconden. Deze kunnen potentieel leiden tot korte lokale temperatuurstijgingen in de huid als er nog geen herverdeling van warmte is opgetreden. De nieuwe beperkingen voor kortdurende blootstelling in de concept-aanbevelingen van ICNIRP voor radiofrequente velden zijn bedoeld om deze kortdurende opwarming en eventuele gezondheidseffecten daarvan te voorkomen (ICNIRP, 2018). Het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat heeft aangegeven te overwegen om wettelijke blootstellingslimieten vast te leggen (Ministerie EZK, 2018). Daarbij kan worden overwogen om rekening te houden met de meest recente aanbevelingen voor radiofrequente EMV van ICNIRP, omdat die beter rekening houden met kortdurende (gepulseerde) blootstelling.

### **Biologische en gezondheidseffecten**

In het literatuuronderzoek zijn geen publicaties gevonden over biologische of gezondheidseffecten waarin specifiek is gekeken naar effecten van EMV van 5G-apparatuur. Nationale en internationale wetenschappelijke organisaties geven aan dat systematische analyses van de wetenschappelijke literatuur als geheel geen risico's voor de gezondheid hebben aangetoond als de radiofrequente EMV zwakker zijn dan de blootstellingslimieten voor opwarming. Zij attenderen erop dat de frequenties van 5G-systemen ook zijn meegenomen in eerdere analyses (ARPANSA, 2019; Bundesamt für Strahlenschutz, 2019; Public Health England, 2019; ICNIRP, 2018). De 5G-toepassingen maken ook gebruik van frequenties die ook al in 3G- en 4G- of andere draadloze toepassingen worden gebruikt. Er is dus al informatie beschikbaar over de mogelijke gezondheidseffecten van EMV met frequenties die door 5G-toepassingen zullen worden gebruikt. Wel geven de nationale en internationale wetenschappelijke organisaties aan dat er nog onvoldoende kennis is over eventuele langetermijneffecten na langdurige blootstelling en over de precieze blootstellingspatronen door nieuwe technologieën. Er lopen nog epidemiologische onderzoeken naar deze langetermijneffecten, zoals het COSMOS-onderzoek (<http://www.thecosmosproject.org/>). Ook geven de nationale en internationale wetenschappelijke organisaties aan dat de effecten van millimetergolven (waaronder de 5G-frequenties van 26 en 60 GHz vallen) minder zijn onderzocht dan die van lagere frequenties. Er worden daarom in diverse landen onderzoeksprogramma's opgezet om deze effecten nader te bestuderen, met name in de hogere frequentiebanden van 26 en 60 GHz (Bundesamt für Strahlenschutz, 2019; Ohkubo, 2019).

Er is ook een groep wetenschappers, artsen en burgers die aangeeft dat op grond van mogelijke schadelijke effecten in sommige onderzoeken naar EMV van 2G-, 3G- en 4G-apparatuur en de hogere frequenties, bij nieuwe technologieën en wijdere verspreiding van 5G-systemen voorzichtigheid is geboden. Zij roepen op tot een voorlopige stop van de uitrol van 5G-systemen en meer onderzoek naar de risico's (5G Appeal, 2017; International Appeal, 2018).

Dit rapport geeft een overzicht van de wetenschappelijke publicaties over de blootstelling aan EMV van 5G-bronnen tot nu toe en van de eerste resultaten van praktijkmetingen in Nederland. Vervolgonderzoek zal moeten uitwijzen hoe de blootstelling zich daadwerkelijk ontwikkelt bij bredere ingebruikname van 5G-systemen en of de bestaande wetenschappelijke inzichten over gezondheidseffecten bij EMV met frequenties van 3,5 GHz en hoger nog veranderen.

## 6.2 De bredere context

In het voorgaande zijn de resultaten van het literatuuronderzoek en de praktijkmetingen uiteengezet en nader geduid. Deze resultaten zijn relevant voor het doel waarvoor ze zijn verzameld, namelijk de behoefte aan kennis over EMV afkomstig van 5G-antennes om objectieve antwoorden op nieuwe vragen te kunnen blijven geven. In het resterende deel van dit hoofdstuk wordt ingegaan op een aantal bredere ontwikkelingen, waarin (kennis van en vragen over) blootstelling aan en mogelijke gezondheidseffecten van EMV van 5G-antennes een rol spelen.

### A Ontwikkeling van 5G in de (nabije) toekomst

De ontwikkeling van 5G wordt voor een deel overgelaten aan marktpartijen, zoals de telecomproviders met hun draadloze netwerken en de ontwikkelaars en fabrikanten van gebruikerstoestellen. Het is moeilijk te overzien welke netwerken met welke antennedichtheid en vermogens van antennes in de leefomgeving terecht zullen komen. Ook zijn de aantallen gebruikerstoestellen en de maximale vermogens die zij zullen gaan gebruiken nog onbekend. Door deze onduidelijkheden is de vraag welke sterktes van de EMV er in de leefomgeving zullen kunnen optreden nu moeilijk te beantwoorden. Daarnaast zijn de meetprotocollen voor de maximaal mogelijke blootstelling complexer en tijdrovender geworden en vereisen extra informatie van de provider. Dit hangt mede samen met het dynamische karakter van de blootstelling en heeft mogelijk gevolgen voor het toezicht en de handhaving in de toekomst.

### B 5G als onderdeel van maatschappelijke transitie

De antennes voor 5G zijn een onderdeel van de totale maatschappelijke uitdaging op het gebied van de digitale connectiviteit. Zonder digitale connectiviteit worden andere maatschappelijke transitie, zoals de energietransitie en de algehele digitale transitie, bemoeilijkt.

### C Maatschappelijke ongerustheid

Er is sprake van maatschappelijke ongerustheid rond de introductie van 5G. Die ongerustheid betreft de mogelijke toename van de sterkte van de EMV na introductie van 5G en de daarmee samenhangende zorgen over mogelijk ongewenste gezondheidseffecten.

In bredere zin is er discussie over de blootstellingslimieten (in de EU-aanbeveling): zijn deze wel voldoende streng om alle gezondheidsschade te voorkomen? Volgens sommigen zijn er wel aanwijzingen voor nadelige effecten op de gezondheid bij blootstelling onder de limieten, maar zijn deze aanwijzingen onvoldoende om te kunnen spreken van bewezen oorzakelijke verbanden. Volgens anderen zijn deze aanwijzingen wel voldoende en zouden volgens hen op basis van het voorzorgprincipe de limieten strenger moeten worden. Dit is deels een kennisvraag en deels

een politieke vraag. De laatste vraag blijft hier buiten beschouwing, op de kennisvraag wordt hierna ingegaan. Tot slot worden rond de introductie van 5G-systemen vragen gesteld over de veiligheid, nut en noodzaak en de ethische aspecten (*cyber security* en privacybescherming), mede vanwege de verwevenheid met andere maatschappelijke processen; ook daarop wordt in dit rapport niet ingegaan.

## **D Kennisbehoeften**

De vraag is waar zich in de keten van de bron tot de eventuele gezondheidseffecten de belangrijkste behoeften aan kennis bevinden en wat gedaan zou kunnen worden om deze kennis te verzamelen.

De eerste vraag is welke bronnen van EMV er op welke momenten in de toekomst zullen zijn: hoeveel van welk type en welke zendvermogens. Dat hangt samen met de nog onbekende ontwikkelingen in de maatschappelijke behoefte aan datacommunicatie. Er zouden diverse scenario's kunnen worden gekozen en doorgerekend.

De volgende vragen betreffen welke veldsterktes op publiek toegankelijke plaatsen kunnen optreden en welke blootstelling (SAR of vermogensdichtheid) mensen dan zullen ontvangen. Voor deze deelvragen kunnen berekeningen en metingen helpen. Daarbij hebben de fabrikanten van zendapparatuur (antennes en gebruikerstoestellen) en mobiele providers de verplichting om al in de ontwerpfase rekening te houden met blootstellingslimieten ter voorkoming van overmatige opwarming.

De laatste vraag is in hoeverre ongewenste gezondheidseffecten kunnen optreden, anders dan de bekende nadelige effecten als gevolg van overmatige opwarming. Onderzoek ter beantwoording van deze vraag zal aansluiten bij gedegen onderzoek uit het verleden (waaronder 'Interphone' en 'NTP') en mogelijk zal lopend cohortonderzoek (zoals 'COSMOS') aanvullende informatie leveren. Wat in ieder geval voor 5G relevant is, zijn onderzoeken bij hogere frequenties (millimetergolven). Overigens zijn operators verplicht ervoor te zorgen dat de blootstellingslimieten ook bij deze frequenties niet worden overschreden.

Daarnaast is nieuw voor 5G welke wijze van meten of berekenen moet worden toegepast. Hiervoor kunnen en zullen wetenschappelijke normalisatie-organisaties gestandaardiseerde methoden vaststellen.



## 7 Conclusies

De centrale vraag van het onderzoek is wat de verwachte blootstelling aan EMV afkomstig van 5G-systemen is (in de nabije toekomst), met de nadruk op *small cell*-antennes en *massive MIMO*-antennes met *beam-forming*.

De introductie van 5G-systemen brengt nieuwe aspecten met zich mee. Er zullen op langere termijn verdichtingen van de netwerken optreden (meer zenders per vierkante kilometer), afhankelijk van de maatschappelijke behoefte aan datacommunicatie. Daarnaast krijgt de blootstelling aan elektromagnetische velden van deze systemen een dynamischer karakter (wisselend in plaats en tijd). Een derde aspect is dat er ook hogere frequenties zullen worden gebruikt, naast de al door de huidige systemen gebruikte frequenties.

Uit de eerste metingen die in Nederland aan *massive MIMO*-antennes zijn uitgevoerd, blijkt dat de blootstellingslimieten op publiek toegankelijke plaatsen niet worden overschreden. Op basis van de literatuur over berekeningen aan individuele zendinstallaties en gebruikerstoestellen is de verwachting dat de blootstellingslimieten in de EU-aanbevelingen daarvoor niet zullen worden overschreden. Het ontbreekt echter nog aan (meet)gegevens van complexe, realistische blootstellingssituaties waarin er in de publieke ruimte vele zendinstallaties en gebruikerstoestellen tegelijk zenden.

Op basis van de eerste metingen aan 5G-zenders die in 2019 zijn gedaan, wordt geen verstoring door één *small cell* of *massive MIMO*-antenne verwacht. Mogelijke verstoring bij de definitieve zendvermogens en gecombineerde veldsterkte van bij het gericht aanstralen door meerdere zenders moet nog worden onderzocht.

Specifieke kennis over 5G-systemen en de toekomstige ontwikkelingen en toepassingen daarvan zal groeien naarmate er meer systemen in gebruik komen. Daarom is het van belang om de vinger aan de pols te blijven houden en de methodologie voor het bepalen van de dynamische blootstelling van zowel netwerken als gebruikerstoestellen aan te laten sluiten op die ontwikkelingen.



## Referenties

- 5G Appeal, G. (2017) Scientists and doctors warn of potential serious health effects of 5G [Online]. <http://www.5gappeal.eu/scientists-and-doctors-warn-of-potential-serious-health-effects-of-5g/> [laatst bezocht 19 juni 2019].
- Agentschap Telecom (2016a) Rapport Veldsterktemeting (aan een small cell te Amsterdam, Rembrandtplein, 4 april 2016). <https://www.antennebureau.nl/documenten/rapporten/2017/januari/3/rapport-veldsterktemeting-amsterdam> [laatst bezocht 18 juli 2019].
- Agentschap Telecom (2016b) Rapport Veldsterktemeting (aan een small cell te Amsterdam, Rokin, 25 juli 2016). <https://www.antennebureau.nl/documenten/rapporten/2017/januari/3/rapport-veldsterktemeting-amsterdam-g> [laatst bezocht 18 juli 2019].
- Agentschap Telecom (2017) Rapport project EMV. <https://www.antennebureau.nl/documenten/rapporten/2018/januari/15/rapport-veldsterktemetingen-project-emv> [laatst bezocht 2 augustus 2019].
- Agentschap Telecom (2019a) Rapport Veldsterktemetingen op 5G-testlocaties, 23 september 2019. <https://www.antennebureau.nl/actueel/nieuws/2019/september/24/veldsterkte-bij-5g-testlocaties-onder-de-limiet> [laatst bezocht 24 september 2019].
- Agentschap Telecom (2019b) Rapport Veldsterktemeting Amsterdam (small cells), 1 november 2019. <https://www.antennebureau.nl/straling-en-gezondheid/documenten/rapporten/2019/november/1/rapport-veldsterktemeting-amsterdam-small-cells-2019> [laatst bezocht 7 november 2019].
- Agentschap Telecom (2019c) Rapport Veldsterktemetingen aan installaties in de 26 GHz-band, 20 november 2019. <https://www.antennebureau.nl/straling-en-gezondheid/documenten/rapporten/2019/november/19/veldsterktemetingen-aan-installaties-in-de-26-ghz-band> [laatst bezocht 25 november 2019].
- ANFR (2019) Colloque international sur la 5G et l'exposition du public aux ondes électromagnétiques à l'ANFR, Paris, 17 April 2019. <https://www.anfr.fr/controle-des-frequences/exposition-du-public-aux-ondes/actualites/actualite/actualites/colloque-international-sur-la-5g-et-l'exposition-du-public-aux-ondes-electromagnetiques-a-lanfr/> [laatst bezocht 15 juli 2019].
- ARPANSA (2019) 5G: the new generation of the mobile phone network and health [Online]. <https://www.arpansa.gov.au/news/5g-new-generation-mobile-phone-network-and-health> [laatst bezocht 19 juni 2019].

- Baracca, P., Weber, A., Wild, T. & Gringeat, C. (2018) A Statistical Approach for RF Exposure Compliance Boundary Assessment in Massive MIMO Systems. Proc. 22nd Int. ITG Workshop Smart Antennas (WSA), Bochum (Germany), Mar. 2018, pp. 16. <https://arxiv.org/abs/1801.08351v1> [laatst bezocht 16 oktober 2019].
- BioEM (2019) Abstract Collection of The joint Meeting of the Bioelectromagnetics Society and the European BioElectromagnetics Association, June 23-28, 2019, Montpellier, France. <http://www.bioem2019.org/>.
- BIPT (Belgisch Instituut voor Postdiensten en Telecommunicatie) (2018) Studie van 15 september 2018 betreffende de impact van de Brusselse stralingsnormen op de uitrol van de mobiele netwerken. Belgisch Instituut voor postdiensten en telecommunicatie, Brussel.
- Bolte, J.F., Eikelboom, T. (2012) Personal radiofrequency electromagnetic field measurements in The Netherlands: exposure level and variability for everyday activities, times of day and types of area. *Environ. Int.* 48, 133–142. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2012.07.006>
- Bundesamt für Strahlenschutz (2019) 5G [Online]. <http://www.bfs.de/DE/themen/emf/mobilfunk/basiswissen/5g/5g.html> [laatst bezocht 19 juni 2019].
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BVI) (2017) 5G-Strategie für Deutschland - Eine Offensive für die Entwicklung Deutschlands zum Leitmarkt für 5G-Netze und -Anwendungen, Referat Z 32, Druckvorstufe, Hausdruckerei, Berlin.
- Carrasco, E., Colombi, D., Foster, K.R., Ziskin, M. & Balzano, Q. (2018) Exposure assessment of portable wireless devices above 6 GHz. *Radiat Prot Dosimetry*, in press, doi: 10.1093/rpd/ncy177.
- Chiaraviglio, L., Cacciapuoti, A.S., Martino, G. D., Fiore, M., Montesano, M., Trucchi, D. & Melazzi, N.B. (2018) Planning 5G Networks under EMF Constraints: State of the Art and Vision. *IEEE Access*, 6, 51021-51037.
- Croft, R. (2018) The International Commission of Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) draft radiofrequency (100 kHz - 300 GHz) guidelines. BioEM 2018. Portoroz, Slovenia. <http://www.bioem2019.org/> [laatst bezocht 19 juni 2019].
- Cvetkovič, N., Krstič, D., Stankovič, V. & Jovanovič, D. (2018) Electric field distribution and SAR inside a human eye exposed to VR glasses. *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, 12, 2234-2240.
- Degirmenci, E., Thors, B. & Törnevik, C. (2016) Assessment of Compliance with RF EMF Exposure Limits: Approximate Methods for Radio Base Station Products Utilizing Array Antennas with Beam-Forming Capabilities. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 58, 1110-1117.
- European Commission (2019) Study on using millimetre waves bands for the deployment of the 5G ecosystem in the Union. European Commission, Brussels. <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/879e7718-af4e-11e9-9d01-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-search> [laatst bezocht 6 augustus 2019].
- European Parliament (2019) 5G Deployment. State of Play in Europe, USA and Asia. European Parliament, Brussels.

- Europees Parlement en Raad van de Europese Unie (2013) Richtlijn 2013/35/EU van het Europees Parlement en de Raad van 26 juni 2013 betreffende de minimumvoorschriften inzake gezondheid en veiligheid met betrekking tot de blootstelling van werknemers aan de risico's van fysieke agentia (elektromagnetische velden) (twintigste bijzondere richtlijn in de zin van artikel 16, lid 1, van Richtlijn 89/391/EEG) en tot intrekking van Richtlijn 2004/40/EG. Publicatieblad van de Europese Unie, L 179, 1-21.
- Europees Parlement en Raad van de Europese Unie (2017) Besluit (EU) 2017/899 van het Europees Parlement en de Raad van 17 mei 2017 betreffende het gebruik van de 470-790 MHz-frequentieband in de Unie. Publicatieblad van de Europese Unie, L 138, 131-137.
- Europees Parlement en Raad van de Europese Unie (2018) Richtlijn (EU) 2018/1972 van het Europees Parlement en de Raad van 11 december 2018 tot vaststelling van het Europees wetboek voor elektronische communicatie (herschikking). Publicatieblad van de Europese Unie, L 321, 36-214.
- Europese Commissie (2019a) Uitvoeringsbesluit (EU) 2019/235 van de Commissie van 24 januari 2019 tot wijziging van Beschikking 2008/411/EG wat betreft een actualisering van relevante technische voorwaarden voor de 3 400-3 800 MHz-frequentieband. Publicatieblad van de Europese Unie, L 37, 135-143.
- Europese Commissie (2019b) Uitvoeringsbesluit (EU) 2019/784 van de Commissie van 14 mei 2019 inzake de harmonisatie van de frequentieband 24,25-27,5 GHz voor terrestrische systemen die draadloze breedbanddiensten voor elektronische communicatie kunnen leveren in de Unie. Publicatieblad van de Europese Unie, L 127, 13-22.
- Guraliuc, A.R., Zhadobov, M., Sauleau, R., Marnat, L. & Dussopt, L. (2017) Near-Field User Exposure in Forthcoming 5G Scenarios in the 60 GHz Band. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65, 6606-6615.
- He, W., Xu, B., Gustafsson, M., Ying, Z. & He, S. (2017) RF Compliance Study of Temperature Elevation in Human Head Model Around 28 GHz for 5G User Equipment Application: Simulation Analysis. *IEEE Access*, 6, 830-838.
- ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) (1998) Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Phys*, 74, 494-522.
- ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) (2018) High frequency - 100 kHz - 300 GHz [Online]. <https://www.icnirp.org/en/frequencies/high-frequency/index.html> [laatst bezocht 19 juni 2019].
- IEC (International Electrotechnical Commission) (2017) Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure. IEC, Geneva. Uitgegeven als Nederlandse norm NEN-EN-IEC 62232 door NEN, Delft.

- IEC (International Electrotechnical Commission) (2019) Case studies supporting IEC 62232 – Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure. IEC, Geneva. Uitgegeven als Nederlandse Praktijkrichtlijn NPR-IEC/TR 62669 door NEN, Delft.
- International Appeal (2018) International appeal: stop 5G on earth and in space [Online]. <https://www.5gspaceappeal.org/the-appeal> [laatst bezocht 19 juni 2019].
- Ishak, N.I.A., Seman, N. & Samsuri, N.A. (2018) Specific absorption rate assessment of multiple microstrip patch antenna array. *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 16, 1500-1507.
- Italian National Research Council (2018) An Internet resource for the calculation of the dielectric properties of body tissues [Online]. <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/> [laatst bezocht 22 mei 2019].
- ITU (International Telecommunication Union) (2017) 5G technology and human exposure to RF EMF. ITU, Geneva.
- ITU (International Telecommunication Union) (2018a) Setting the scene for 5G: opportunities & challenges. ITU, Geneva.
- ITU (International Telecommunication Union) (2018b) Electromagnetic field compliance assessments for 5G wireless networks. ITU, Geneva.
- Kaburcuk, F. & Elsherbeni, A.Z. (2018) Efficient computation of SAR and temperature rise distributions in a human head at wide range of frequencies due to 5G RF field exposure. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 33, 1236-1242.
- Kaburcuk, F. (2019) Effects of a brain tumor in a dispersive human head on SAR and temperature rise distributions due to RF sources at 4G and 5G frequencies. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 38, 168-176.
- Keller, H. (2019) On the assessment of human exposure to electromagnetic fields transmitted by 5G NR base stations. *Health Physics*, 117, 541-545.
- Laakso, I., Morimoto, R., Heinonen, J., Jokela, K. & Hirata, A. (2017) Human exposure to pulsed fields in the frequency range from 6 to 100 GHz. *Physics in Medicine and Biology*, 62, 6980-6992.
- Le, D. T., Iyama, T., Hamada, L., Watanabe, S. & Onishi, T. (2014) Averaging time required for measuring the specific absorption rate of a MIMO transmitter. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 3, 57-64.
- Leduc, C. & Zhadobov, M. (2017) Impact of Antenna Topology and Feeding Technique on Coupling With Human Body: Application to 60-GHz Antenna Arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65, 6779-6787.
- Liu, D., Li, C., Kang, Y., Zhou, Z., Xie, Y. & Wu, T. (2017) Numerical analysis for infant's unintentional exposure to 3.5 GHz plane wave radiofrequency electromagnetic fields by field test of fifth generation wireless technologies. *Radio Science*, 52, 1140-1148.
- Liu, G. & Jiang, D. (2016) 5G: Vision and Requirements for Mobile Communication System towards Year 2020. *Chinese Journal of Engineering*, 2016.

- Mazloun, T., Aerts, S., Joseph W., Wiart, J. (2019) RF-EMF exposure induced by mobile phones operating in LTE small cells in two different urban cities. *Annals of Telecommunications* 74:35–42. <https://doi.org/10.1007/s12243-018-0680-1> [laatst bezocht 24 september 2019].
- Melia, G.C.R. (2013) Electromagnetic Absorption by the Human Body from 1 to 15 GHz. Ph.D., University of York.
- Ministerie EZK (Ministerie van Economische Zaken en Klimaat) (2018) Actieplan digitale connectiviteit. Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, Den Haag. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2018/07/03/actieplan-digitale-connectiviteit> [laatst bezocht 2 augustus 2019]
- Ministerie EZK (Ministerie van Economische Zaken en Klimaat) (2019) Nota mobiele communicatie 2019. Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, Den Haag. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/beleidsnota-s/2019/06/11/nota-mobiele-communicatie-2019> [laatst bezocht 2 augustus 2019]
- NASA (2008) NASA Ames Partners With M2MI For Small Satellite Development [Online]. [https://www.nasa.gov/home/hqnews/2008/apr/HQ\\_08107\\_Ames\\_nanosat.html](https://www.nasa.gov/home/hqnews/2008/apr/HQ_08107_Ames_nanosat.html) [laatst bezocht 20 mei 2019].
- Nasim, I. & Kim, S. (2019) Mitigation of human EMF exposure in downlink of 5G. *Annales des Telecommunications/Annals of Telecommunications*, 74, 45-52.
- Neufeld, E., Carrasco, E., Murbach, M., Balzano, Q., Christ, A. & Kuster, N. (2018a) Theoretical and numerical assessment of maximally allowable power-density averaging area for conservative electromagnetic exposure assessment above 6 GHz. *Bioelectromagnetics*, 39, 617-630.
- Neufeld, E. & Kuster, N. (2018b) Systematic Derivation of Safety Limits for Time-Varying 5G Radiofrequency Exposure Based on Analytical Models and Thermal Dose. *Health Physics*, 115, 705-711.
- Ofcom (2017) Update on 5G spectrum in the UK [https://www.ofcom.org.uk/data/assets/pdf\\_file/0021/97023/5G-update-08022017.pdf](https://www.ofcom.org.uk/data/assets/pdf_file/0021/97023/5G-update-08022017.pdf) [laatst bezocht 15 juli 2019].
- Ohkubu, Dr. C. (2019) Director of Japan EMF Information Center (persoonlijke communicatie, 10 juli 2019).
- Parchin, N.O., Al-Yasir, Y.I.A., Ali, A.H., Elfergani, I., Noras, J.M., Rodriguez, J. & Abd-Alhameed, R.A. (2019a) Eight-Element Dual-Polarized MIMO Slot Antenna System for 5G Smartphone Applications. *IEEE Access*, 7, 15612-15622.
- Parchin, N.O., Alibakhshikenari, M., Basherlou, H.J., Abd-Alhameed, R.A., Rodriguez, J. & Limiti, E. (2019b) MM-Wave phased array Quasi-Yagi antenna for the upcoming 5G cellular communications. *Applied Sciences*, 9, 978.
- Parchin, N.O., Jahanbakhsh Basherlou, H., Al-Yasir, Y.I.A., Ullah, A., Abd-Alhameed, R.A. & Noras, J.M. (2019c) Multi-Band MIMO Antenna Design with User-Impact Investigation for 4G and 5G Mobile Terminals. *Sensors*, 19, 456.

- Public Health England (2019) Mobile phone base stations: radio waves and health [Online].  
<https://www.gov.uk/government/publications/mobile-phone-base-stations-radio-waves-and-health/mobile-phone-base-stations-radio-waves-and-health> [laatst bezocht 19 juni 2019].
- Raad van de Europese Unie (1999) Aanbeveling van de Raad van 12 juli 1999 betreffende de beperking van blootstelling van de bevolking aan elektromagnetische velden van 0 Hz – 300 GHz (1999/519/EG). Publicatieblad van de Europese Gemeenschappen, L199, 59-70.
- Rijksoverheid (2010) Convenant in het kader van het Nationaal Antennebeleid inzake de plaatsing van vergunningvrije antenne-installaties voor mobiele communicatie. Rijksoverheid, Den Haag.
- Rijksoverheid (2019) Plannen voor 5G.  
<https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/telecommunicatie/plannen-voor-5g> [laatst bezocht 15 oktober 2019].
- Sasaki, K., Li, K., Chakarothai, J., Iyama, T., Onishi, T. & Watanabe, S. (2019) Error Analysis of a Near-Field Reconstruction Technique Based on Plane Wave Spectrum Expansion for Power Density Assessment above 6 GHz. *IEEE Access*, 7, 11591-11598.
- Shikhantsov, S., Thielens, A., Vermeeren, G., Demeester, P., Martens, L., Torfs, G. & Joseph, W. (2019a) Statistical approach for human electromagnetic exposure assessment in future wireless attocell networks. *Radiat Prot Dosimetry*, 183, 326-331.
- Shikhantsov, S., Thielens, A., Vermeeren, G., Tanghe, E., Demeester, P., Martens, L., Torfs, G. & Joseph, W. (2019b) Hybrid Ray-Tracing/FDTD Method for Human Exposure Evaluation of a Massive MIMO Technology in an Industrial Indoor Environment. *IEEE Access*, 7, 21020-21031.
- Staatssecretaris van Economische Zaken (2009) Besluit van de Staatssecretaris van Economische Zaken van 24 april 2009, nr. AT-EZ/6279718.JZ, houdende vaststelling van een beleidsregel met betrekking tot het voorkomen van ontoelaatbare belemmeringen door het gewenste signaal (Beleidsregel storing door het gewenste signaal van radiozendapparaten). *Staatscourant* nr. 87, 13-5-2009, 1-15.
- Stam, R. (2018) Comparison of international policies on electromagnetic fields (power frequency and radiofrequency fields), National Institute for Public Health and the Environment, Bilthoven.
- Stratix (2019) Small cells en massive MIMO, een verkenning (desk research). Stratix, Hilversum.  
<https://www.agentschaptelecom.nl/documenten/rapporten/2019/05/09/small-cells-en-massive-mimo-antennes> [laatst bezocht 18 juli 2019].
- Thielens, A., Vermeeren, G., Caytan, O., Torfs, G., Demeester, P., Bauwelinck, J., Rogier, H., Martens, L. & Joseph, W. (2017) Radiofrequency exposure near an attocell as part of an ultra-high density access network. *Bioelectromagnetics*, 38, 295-306.
- Thors, B., Colombi, D., Ying, Z., Bolin, T. & Tornevik, C. (2016) Exposure to RF EMF from Array Antennas in 5G Mobile Communication Equipment. *IEEE Access*, 4, 7469-7478.
- Thors, B., Furuskar, A., Colombi, D. & Tornevik, C. (2017) Time-Averaged Realistic Maximum Power Levels for the Assessment of Radio Frequency Exposure for 5G Radio Base Stations Using Massive MIMO. *IEEE Access*, 5, 19711-19719.



- Tomitsch, J., Dechant, E., 2015. Exposure to electromagnetic fields in households-trends from 2006 to 2012. *Bioelectromagnetics* 36 (1), 77–85.
- Urbiniello, D., Joseph, W., Verloock, L., Martens, L., Rösli, M., 2014. Temporal trends of radio-frequency electromagnetic field (RF-EMF) exposure in everyday environments across European cities. *Environ. Res.* 134, 134–142.
- Wu, T., Rappaport, T.S. & Collins, C.M. (2015) Safe for Generations to Come. *IEEE Microw Mag*, 16, 65-84.
- Xu, B., Zhao, K., Ying, Z., Sjoberg, D., He, W. & He, S. (2019) Analysis of Impacts of Expected RF EMF Exposure Restrictions on Peak EIRP of 5G User Equipment at 28 GHz and 39 GHz Bands. *IEEE Access*, 7, 20996-21005.
- Yazdandoost, K.Y. & Laakso, I. (2018) EMF exposure analysis for a compact multi-band 5G antenna. *Progress In Electromagnetics Research M*, 68, 193-201.
- Zhao, K., Ying, Z. & He, S. (2016) EMF Exposure Study Concerning mmWave Phased Array in Mobile Devices for 5G Communication. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 15, 1132-1135.



## Bijlage Zoekstrategie literatuur

### A. Zoektermen PUBMED

(<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez/>)

(magnetic OR electric OR electromagnetic OR emf OR radio frequ\* OR radio-frequ\* OR radiofrequ\* OR rf OR microwave\* OR millimeter wave\* OR millimetre wave\* OR mm wave\* OR mmwave\* OR microwave\* OR non-ioni\* OR non ioni\* OR nonioni\*) AND (field\* OR radiat\*) AND (5g OR "5 g" OR 3gpp OR "new radio" OR small cell\* OR \*mimo OR "multiple input multiple output" OR beamforming OR beam-forming OR "beam forming" OR "beam division" OR "beam steering" OR bdma OR microcell OR micro cell\* OR picocell OR pico cell\* OR femtocell OR femto cell\* OR attocell OR atto cell\*) NOT ("small cell lung cancer" OR "small cell tumour" OR "small cell tumour" OR "cone beam" OR imaging)

Alleen engelstalige publicaties vanaf 1 januari 2009 zijn meegenomen.

### B. Zoektermen SCOPUS

(<https://www.scopus.com/>)

TITLE-ABS-KEY ( ( magnetic OR electric OR electromagnetic OR emf OR "radio frequ\*" OR "radio-frequ\*" OR radiofrequ\* OR rf OR "millimeter wave" OR "millimetre wave" OR "mm wave" OR mmwave\* OR microwave\* OR "non-ioni\*" OR "non ioni\*" OR nonioni\* ) AND ( field\* OR radiat\* ) AND ( 5g OR "5 g" OR 3gpp OR "new radio" OR "small cell\*" OR \*mimo OR "multiple input multiple output" OR beamforming OR "beam-forming" OR "beam forming" OR "beam division" OR "beam steering" OR bdma OR microcell OR "micro cell\*" OR picocell OR "pico cell\*" OR femtocell OR "femto cell\*" OR attocell OR "atto cell\*" ) AND NOT ( "small cell lung cancer" OR "small cell tumor" OR "small cell tumour" OR "cone beam" OR imaging ) ) AND ( LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2019 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2018 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2017 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2016 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2015 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2014 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2013 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2012 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2011 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2010 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2009 ) ) AND ( LIMIT-TO ( DOCTYPE , "ar" ) OR LIMIT-TO ( DOCTYPE , "re" ) ) AND ( LIMIT-TO ( LANGUAGE , "English" ) )

.....  
R. Stam, RIVM | J.F.B. Bolte, RIVM | M.J.M. Pruppers, RIVM |  
J.J. Robijns, AT | J. Kamer, AT | L.C. Colussi, AT  
.....

RIVM Rapport 2019-0214

Dit is een gezamenlijke uitgave van:



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



Agentschap Telecom  
*Ministerie van Economische Zaken  
en Klimaat*

december 2019

*De zorg voor morgen*  
begint vandaag