

TNO PUBLIEK

Oude Waalsdorperweg 63
2597 AK Den Haag
Postbus 96864
2509 JG Den Haag

TNO-rapport

www.tno.nl

TNO 2020 R10955 | Eindrapport

T +31 88 866 10 00
F +31 70 328 09 61

Monitor Draadloze Technologie

Voorjaar 2020



Datum	juni 2020
Auteur(s)	Ir. H.J. Dekker, Dr. L. Jorguseski, Ir. R. Overduin, Ir. P.H. Trommelen
Exemplaarnummer	
Oplage	
Aantal pagina's	35 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	
Opdrachtgever	Ministerie van Economische Zaken en Klimaat
Projectnaam	Monitor Draadloze Technologie 2020
Projectnummer	060.42829

Alle rechten voorbehouden.

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

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2020 TNO

TNO PUBLIEK

Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
1.1	De Monitor Draadloze Technologie	3
1.2	Het 'draadloos speelveld'	3
2	Ontwikkelingen in draadloze technologie.....	5
2.1	Satellietcommunicatie in 5G	5
2.2	Methoden voor indoordekking van mobiele communicatie	13
2.3	Bedrijfsspecifieke communicatie	20
2.4	Technische ontwikkelingen voor communicatie over zeer korte afstanden, anders dan Wi-Fi	26
2.5	Nabeschuwing van WRC 2019.....	31
3	Tot besluit.....	35

1 Inleiding

Om overzicht te bieden in het speelveld van de diverse draadloze technologieën, stelt TNO sinds een Monitor Draadloze Technologie samen. Hierin worden ontwikkelingen in de technologie en de markt gevolgd.

In dit inleidende hoofdstuk worden de scope en de opzet van de Monitor Draadloze Technologie behandeld.

1.1 De Monitor Draadloze Technologie

Met de Monitor Draadloze Technologie (kortweg 'de Monitor') wil TNO een degelijk, actueel en toegankelijk overzicht bieden van de stand van zaken ten aanzien van de ontwikkeling en inzet van draadloze technologie. De Monitor Draadloze Technologie tracht diverse doelgroepen te bedienen bij overheid en bedrijfsleven in Nederland. Dit impliceert dat de Monitor erop gericht is om informatief te zijn voor lezers met een algemene achtergrond in de telecommunicatie. In principe worden wereldwijde ontwikkelingen gevolgd, vanuit een nationaal perspectief.

Evenals vorige jaren is gekozen voor de schriftelijke rapportagevorm om de informatie te ontsluiten. Deze bestaat uit twee halfjaarlijkse edities, zodat beter kan worden aangesloten op recente trends en ontwikkelingen:

- Een overzicht van ontwikkelingen vanuit voornamelijk technologisch perspectief. Per technologie wordt kort de stand van zaken beschreven. Dit wordt gedaan in de voorjaarseditie, die nu voor u ligt;
- Een editie die met name gaat over een aantal thema's, trends en toepassingen van draadloze communicatietechnologie. Dit is de zogenaamde najaarseditie.

TNO hecht eraan te benadrukken dat de Monitor slechts een momentopname is van een complex en snel veranderend speelveld. Het is daarom mogelijk dat opgenomen informatie op het moment van lezen niet meer up-to-date is, of niet langer relevant. Daarnaast valt niet te ontkomen aan enige willekeur in de keuze van geschetste ontwikkelingen. Het kan dus zijn dat ontwikkelingen die in de ogen van een specifieke lezer zeer relevant zijn, niet worden beschreven. TNO staat open voor suggesties of aanbevelingen voor verdere verbeteringen.

1.2 Het 'draadloos speelveld'

Met de explosief stijgende groei in mobiel dataverkeer krijgen ook ontwikkelingen die hieraan tegemoet willen komen, steeds verder vorm. Mobiele providers houden zich concreet bezig met 5G, hetzij al met de eerste commerciële uitrol, hetzij via beproevingen of lokale pilotnetwerken. Hierbij gaat het ook om de ontwikkeling van applicaties in samenwerking met academische organisaties, het bedrijfsleven en niet in de laatste plaats de toekomstige commerciële gebruiker.

Wereldwijd wordt gekeken naar de mogelijkheid om satellietcommunicatie te integreren in een 5G-netwerk als een nieuw te standaardiseren 5G-dragertechnologie voor het verwezenlijken van de combinatie van zeer grote reikwijdte en -capaciteit in 5G. Deze technologie zal ook voor Nederland om een aantal redenen van belang zijn en wordt dan ook in Paragraaf 2.1 toegelicht.

Een ander, nog steeds actueel onderwerp is de inspanning om de dekking van mobiele communicatiesystemen waarbij het de vraag is hoe deze problematiek zich met de komst van nieuwe mobiele technologie zal ontwikkelen. Een overzicht van methoden met hun voor- en nadelen is opgenomen in Paragraaf 2.2. Hierbij zijn niet alleen mobiele commerciële netwerken beschouwd maar wordt ook gekeken naar professionele besloten netwerken, terwijl ook de *installed-base* van lokale, 'eigen' zogenaamde PMR (Private Mobile Radio)-systemen in Nederland binnen diverse sectoren zoals zorg, transport, beveiliging, gemeentelijke dienstverlening, musea, amusement, et cetera, aanzienlijk is en waarvoor gewoonlijk eveneens een indoordekkingsbehoefte bestaat.

Met de belofte van 5G rond de gelijktijdige ondersteuning van diverse gebruikersgroepen en hun individuele dienstbehoeften rijst de vraag welke opties er überhaupt zijn voor bedrijfsspecifieke mobiele communicatie en het daarvoor benodigde spectrum. Dit onderwerp komt in Paragraaf 2.3 aan bod.

Naast cellulaire mobiele systemen heeft met name Wi-Fi (Wireless Fidelity) in de afgelopen jaren zijn positie verstevigd bij het laagdrempelig aanbieden van lokale draadloze toegang met een toenemende diversiteit aan diensten. De stand van zaken rond Wi-Fi is dan ook in de Monitor-voorjaarseditie van 2019 uitvoerig toegelicht.

In het radiofrequente spectrum zijn echter nog meer mogelijkheden voor lokale connectiviteit waarbij wordt beoogd nog kleinere afstanden te overbruggen dan met Wi-Fi. Het gaat hier om technologieën voor een verscheidenheid aan mogelijkheden zoals energie-efficiënte afstandsbedieningen voor *smart home* toepassingen en Personal Area Networks (PAN's). In deze voorjaarsmonitor wordt in Paragraaf 2.4 aandacht besteed aan gestandaardiseerde radiofrequente ontwikkelingen op dit gebied sinds de laatste vier jaar zoals Zigbee, Bluetooth, Near-Field Communication (NFC) en Ultra Wide Band (UWB).

Tenslotte is in deze voorjaarseditie in Paragraaf 2.5 een samenvatting opgenomen van de vierjaarlijkse World Radiocommunication Conference (WRC) waarvan de meest recente in oktober vorig jaar werd gehouden. Tijdens de WRC zijn belangrijke internationale afspraken gemaakt rond de bestemming van spectrum voor een variëteit aan toepassingen. De belangrijkste besluiten en perspectieven, juist ook voor Nederland, zijn toegelicht in deze paragraaf.

2 Ontwikkelingen in draadloze technologie

2.1 Satellietcommunicatie in 5G

2.1.1 *Introductie: waarom integratie van satellietverbindingen in 5G?*

In deze paragraaf wordt eerst ingegaan op de voordelen van satellietintegratie in 5G zoals deze wereldwijd worden gezien om vervolgens in te gaan op wat deze integratie voor Nederland kan betekenen.

2.1.1.1 *Mondiale perceptie over de toegevoegde waarde van satellietintegratie in 5G*

Het gebruik van satellieten of van HAPS (High-Altitude Platform Systems: systemen die zich hoog in de atmosfeer bevinden¹) voor communicatie- en omroepdiensten zoals televisie en radio is onontkoombaar voor gebieden zonder telecommunicatie-infrastructuur of daar waar de uitrol van een infrastructuur geen duurzame business case oplevert. Het gaat dan om gebieden zoals op zee, om moeilijk bereikbare berggebieden, woestijnen, dun bewolkt rurale gebieden, et cetera. In het verleden heeft de standaardisatie van de diverse generaties mobiele communicatiesystemen (2G/GSM, 3G/UMTS en 4G/LTE) volledige integratie van satelliet-gebaseerde communicatieverbinding buiten beschouwing gelaten, ondanks dat de satellietverbinding altijd een onderdeel was van de beschouwde toepassingsscenario's. De focus lag namelijk in eerste instantie op het adequaat ondersteunen van mobiele breedbanddiensten en -spraak en niet op relatieve niche scenario's. Bovendien was nog geen sprake van een gecoördineerde en significante vertegenwoordiging van stakeholders voor diverse toepassingssectoren of *verticals* als nu voor de 5G-standaardisering.

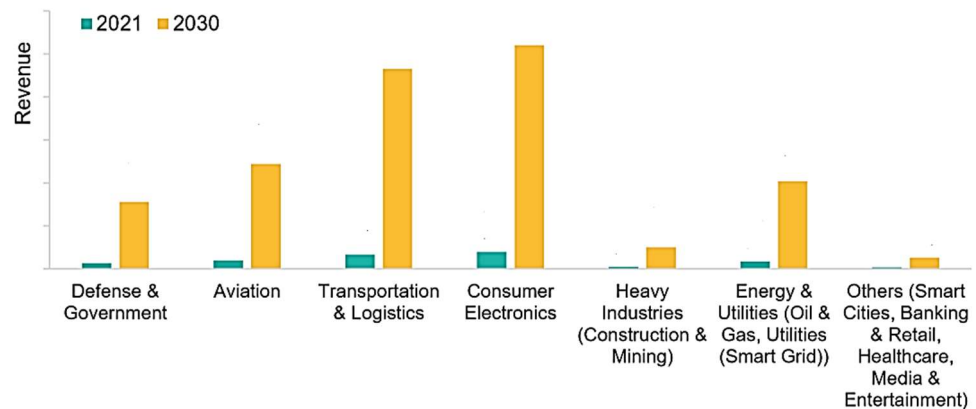
De toegevoegde waarde van satellietintegratie in 5G wordt op wereldwijde schaal echter vooral gezien in de realisatie van een draadloos breedbandmiddel over lange afstanden waardoor voorkomen wordt dat kostbare fiberlijnen over grote trajecten moeten worden aangelegd. Daarmee wordt ten volle gebruik gemaakt van het algemeen geldende voordeel van satellietcommunicatie: het realiseren van de *combinatie* van een groot dekkinggebied over lange afstanden en hoge bandbreedte. Zo kan door multicasting via satellietverbindingen veel data dichtbij diverse RAN's (Radio Access Networks ofwel radiotoegangsnetwerken) worden gebracht en kunnen bovendien vaste, 'aardse' delen van 5G-netwerken worden ontlast, zogenaamde *offloading*.

Het is de bedoeling dat satellietintegratie in 5G zal functioneren in allerlei soorten omgevingen. Hiermee onderscheidt het zich van satellietnetwerken zoals Starlink, die bedoeld zijn voor afgelegen plattelandsgebieden waar geen hoogwaardig internet is en waar vanwege de afstanden terrestrische 5G-technologie niet realistisch is. Een satellietnetwerk met duizenden satellieten in een lage baan om de aarde zal echter veel minder bandbreedte voor een dichtbevolkt gebied kunnen leveren dan met de 5G-satellietcomponent wordt beoogd.

Tenslotte voorziet de marktstudie van BIS Research² op mondiale schaal de volgende relatieve verdeling van de 5G satellietcommunicatiemarkt naar *verticals* (Figuur 1):

¹ Waar in dit hoofdstuk gesproken wordt over satelliet mag ook HAPS worden gelezen, tenzij uit de context duidelijk blijkt dat een van beide wordt bedoeld.

² Global 5G Satellite Communication Market 2021-2030, maart 2020



Figuur 1: Relatieve verdeling van 5G satellietcommunicatiemarkt naar toepassingssectoren

Deze verdeling laat zien dat de voorziene toepassingsgebieden die het meest profiteren van 5G satellietcommunicatie bestaan uit luchtvaart, transport & logistiek en consumentendiensten.

2.1.1.2 Toegevoegde waarde van satellietintegratie in 5G voor Nederland

Voor Nederland geldt het mondiaal gepropageerde voordeel van satellietintegratie in 5G echter niet of nauwelijks vanwege de hoge geografische dichtheid van bestaande vaste fibernetwerken en het feit dat in Nederland de bodemgesteldheid het toelaat nieuwe fiberinfrastructuur tegen reële kosten aan te kunnen leggen. Het voordeel van satellietintegratie in 5G voor Nederland is in de eerste plaats gelegen in het beschikbaar kunnen maken van 5G op plekken waar het leggen van vaste fiberconnecties geen optie is, zoals aan het begin van de vorige paragraaf aangegeven.

Ook voor Nederland is de integratie van satellietverbindingen in 5G van belang voor 5G-communicatie en -applicaties die zich uitstrekken ver tot over de landsgrenzen. Zo valt te denken aan communicatie met en binnen de burgerscheepvaart. Het kan dan niet alleen gaan om de overdracht van gegevens zoals nu via maritieme kanalen plaatsvindt maar ook om het doorgeven van situatiebeelden en mogelijk ook Internet of Things (IoT)-verkeer. Anderzijds kunnen via een in 5G geïntegreerde satellietverbinding commerciële 5G-applicaties voor passagiers en bemanning beschikbaar komen. Dergelijke toepassingen binnen de burgerscheepvaart zijn ook denkbaar voor windmolenparken op zee en offshore olieplatforms.

Verder zijn voor Nederland belangrijke 5G-toepassingen waarvoor directe, snelle lange afstandsverbindingen zijn benodigd, AgriFoodTech-applicaties waar snel veel data internationaal moet worden uitgewisseld, zie de Monitor najaarseditie van 2019. In het algemeen is de satellietintegratie in 5G in de context van IoT-toepassingen relevant, ook voor Nederland. We zien al dat voor non-cellulaire IoT, dus IoT-dienstlevering via zelfstandige Low Power Wide Area Networks (LPWAN's), satellietcommunicatie in toenemende mate wordt aangeboden en wel tegen afnemende prijzen zoals door Fleet en Lacuna. In Nederland is Hiber actief met een grondstation in Delft.

Wanneer satellietintegratie in 5G eenmaal een feit is, zijn echter ook voor Nederland in potentie nog extra voordelen van deze integratie denkbaar zoals:

- De eerder genoemde *offloading* van geaggregeerd verkeer voor verbindingen tussen 5G netwerkelementen;

- Via multicast over satellietverbindingen kunnen snel en efficiënt firmware updates gestuurd worden naar IoT-sensoren;
- In geval van directe verbindingen met 5G-gebruikers kan via de satelliet een extra draadloze verbinding bestaan in situaties waar de terrestrische radioweg (via 3,5 GHz of 700 MHz) onvoldoende beschikbaar is. Dit is met name van belang voor die diensten waarvoor bijzonder hoge betrouwbaarheid geldt maar geen lage vertraging noodzakelijk is.

Bij alle genoemde toepassingen gaat het erom dat vanuit of naar een 5G-gebruikerstoestel ofwel gebruikersterminal een satellietverbinding opgezet kan worden. Er is dan sprake van zogenaamde *directe toegang*, in tegenstelling tot satellietverbindingen die alleen bestaan tussen 5G-systeemelementen.

2.1.2 *Standaardisatie van satellietintegratie in 5G*

De standaardisatie van de 5G mobiele communicatiesystemen verschilt met de vorige generaties in de intrinsieke en nadrukkelijke ondersteuning van de toepassingssectoren ofwel *verticals* zoals automotive, Industry 4.0, eMBB (extended Mobile Broad Band), maritieme communicatie, logistiek, et cetera. Hierdoor is in de standaardisatie van 5G de satellietcomponent al geïntegreerd in Release 16 en wel als *Non-Terrestrial Networks* ofwel NTN³. Het verdere normatieve specificatiewerk staat gepland voor 3GPP Release 17⁴ die eind 2021 voorzien wordt⁵.

De traditionele toepassing van de satellietcommunicatielink in mobiele netwerken is ten behoeve van de transportlink tussen het basisstation en het kernnetwerk (*core network* ofwel CN), zeker voor locaties waar een vaste verbinding met het basisstation niet mogelijk is. In 5G is echter ook de zogenaamde *directe toegang* gespecificeerd tussen een NTN-*capabel* gebruikerstoestel zoals een 5G smartphone, en het 5G-netwerk.

2.1.3 *De technische NTN-architectuur op hoofdlijnen*

De NTN-systeemarchitectuur voor directe toegang wordt gedefinieerd door de volgende elementen:

- **NTN terminal:** bijvoorbeeld de 3GPP Class 3 gebruikersapparatuur zoals een 5G smartphone of een specifieke portabele satellietterminal zoals een VSAT (Very Small Aperture Terminal);
- **NTN-ruimtesegment of HAPS:** het NTN-platform in respectievelijk de ruimte en hoog in de lucht. De communicatieapparatuur aan boord wordt aangeduid met transparante (*bent-pipe*) en niet-transparante (regeneratieve) *payload*, zie Figuur 2. Dit onderscheid hangt samen met de wijze van afhandeling van 5G-communicatieverkeer. Hierop wordt straks ingegaan;
- **Service link:** de radiolink tussen de 5G terminal en het NTN-platform: het satelliet ruimtesegment of HAPS-element;
- **Inter-satellite links (ISLs) of Inter-aerial links (IALs):** de radio- of optische links tussen niet-transparant (regeneratieve) NTN -elementen;
- **Gateways:** systemen op de grond die het NTN-platform verbinden met het 5G CN, zie Figuur 2. Voor transparante HAPS gaat dit via een 5G RAN-functie die zich binnen de gateway bevindt;

³ TR 38.821

⁴ RP-193234, TR 23.737 v17.0.0

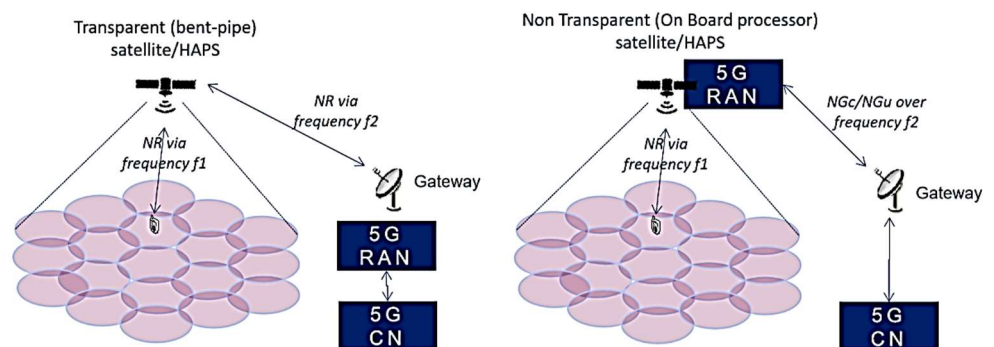
⁵ https://www.3gpp.org/images/articleimages/Releases/graphic_version3_SP-200222.jpg

- **Feeder links:** de radiolink tussen de gateways en het NTN-platform.

Het belangrijke verschil tussen de transparante en niet-transparante directe toegang tot het 5G-netwerk via de NTN-component is als volgt, zie ook Figuur 2:

- 1) **Transparante (*bent-pipe*) directe 5G-toegang:** hier bevat het gateway-element de functionaliteit van het 5G-basisstation ofwel gNB (Next Generation NodeB) in 3GPP-termen en weergegeven als de 5G RAN in Figuur 2. Het radiosignaal tussen de NTN terminal en het aardse 5G-basisstation is als het ware door het NTN-platform 'gebogen', vandaar het woord *bent-pipe*. Het NTN-platform doet geen verdere radiosignaalverwerking dan het vertalen tussen twee frequenties (f_1 en f_2 in Figuur 2). Dit is dus volledig transparant voor de NTN terminal en het basisstation in de gateway.
- 2) **Niet-transparante (regeneratieve) directe 5G-toegang:** hier is de 5G-basisstation functionaliteit geïmplementeerd in het NTN-platform. Het NTN-platform verwerkt het 5G-radiosignaal (op frequentie f_1) tussen de NTN terminal en het NTN-platform, vandaar de benaming 'regeneratief'. Verder wordt de 5G-data gecommuniceerd via de feeder link tussen het NTN-platform en de gateway via frequentie f_2 , mogelijk een satelliet-specifieke radiofrequentie. Doordat de 5G-basisstationfunctionaliteit zich bevindt in het NTN-platform is de vertraging kleiner dan bij de transparante toegangswijze. De complexiteit is echter groter maar maakt snelle routing mogelijk in een netwerk van NTN-platforms.

De link tussen het NTN-platform en de gateway is door 3GPP gedefinieerd als de interface tussen de gNB en het 5G core system⁶.



Figuur 2: Directe 5G-toegang via NTN satelliet/HAPS platforms: (l) transparante (*bent-pipe*) payload en (r) regeneratieve/niet-transparante payload [bron: 5G Americas 5G Services Innovation, november 2019]⁷

In de 3GPP-standaardisatie zijn ook meer gedetailleerde NTN-scenario's⁸ met bijvoorbeeld:

- Zogenaamde *dual connectivity* waarbij sprake is van twee parallele communicatielinks, in casu een via het NTN-platform en een via het 5G-netwerk op de grond. Deze *dual connectivity* dient om continuïteit van de verbinding te kunnen realiseren bij de overgang van satelliet- en terrestrische

⁶ Door de Next Generation (NG) control plane (NGc, de zogenaamde N2 interface met de AMF: Access and Mobility Function) en de user plane (NGu, de zogenaamde N3 interface met de UPF: User Plane Function)

⁷ <https://www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2019/11/5G-Services-Innovation-FINAL-1.pdf>

⁸ TR 38.821 v16.0.0

dekking en vice versa, bijvoorbeeld bij een schip dat de wal nadert of zich daarvan verwijdt. Daarnaast kan het wenselijk zijn als voor toepassingen waarvoor hoge betrouwbaarheid is vereist ondersteuning kan plaatsvinden door twee parallelle verbindingen;

- Een niet-transparant scenario met meerdere typen satellieten, bijvoorbeeld een gemengde LEO (Low Earth Orbit)- en MEO (Medium Earth Orbit)-constellatie;
- HAPS, verbonden via ISLs of IALs. Het NTN-platform kan zich bevinden op verschillende hoogtes, zoals aangegeven in Tabel 1. Als consequentie van het hoogteverschil van de NTN-platforms kan de dekking en dus de afmeting van de belichting op de grond (*beam footprint*) onderling zeer uiteenlopend zijn, zie de kolom *typische beam footprint* in Tabel 1. Dit geldt ook voor de tijdsvertraging van het 5G-radiosignaal tussen de NTN terminal en het NTN-platform zodat een mix bestaande uit diverse soorten platforms nodig kan zijn om voor bepaald verkeer de gewenste combinatie tussen vertraging en dekking te kunnen realiseren.

Tabel 1: Diversiteit aan NTN-platforms [bron: TR 38.821]

Platforms	Hoogte (altitude) range [km]	Baan	Typische beam footprint [km]
Low-Earth Orbit (LEO) satellite	300 – 1.500	Circulair rond de aarde	100 – 1.000
Medium-Earth Orbit (MEO) satellite	7.000 – 25.000		100 – 1.000
Geostationary Earth Orbit (GEO) satellite	35.786	Vaste positie ten opzichte van een punt op aarde	200 – 3.500
UAS (Unmanned Aerial System) platform (w/o HAPS)	8 – 50 (20 voor HAPS)		5 - 200
High Elliptical Orbit (HEO) satellite	400 – 50.000	Elliptisch rond de aarde	200 – 3.500

2.1.4 Gebruikersterminals, configuraties en prestaties

De typische 5G terminaleigenschappen die zijn beschouwd in de 3GPP-standaardisatie voor NTN-toepassingen zijn aangegeven in Tabel 2.

Tabel 2: 5G-toesteleigenschappen voor NTN *system level* simulaties [bron: TR 38.821]

Eigenschappen	VSAT ⁽²⁾	Handheld	Andere ⁽¹⁾
Frequentieband	Ka-band (30 GHz uplink; 20 GHz downlink)	S-band (2 GHz)	Ka-band (30 GHz uplink; 20 GHz downlink)
Type antenne en configuratie	Directioneel met 60 cm equivalente apertuur diameter	<i>Dual polarised</i> met een omni-directioneel antenne-element	Directioneel ⁹
Polarisatie	circulair	Lineair: +/-45°X-pol	Lineair: +/-45°X-pol
antenna gain (ontvangst)	39,7 dBi	0 dBi per element	n.t.b.
Antennetemperatuur	150 K	290 K	n.t.b.
Ruisgetal	1,2 dB	7 dB	n.t.b.
Zendvermogen	2 W (33 dBm)	200 mW (23 dBm)	n.t.b.
antenna gain (zenden)	43,2 dBi	0 dBi per element	n.t.b.
(1): Bedoeld aan boord van bewegende platforms zoals schepen en vliegtuigen en antennes op gebouwen bevestigd. Genoemde waarden zijn ter illustratie. (2): De eigenschappen van VSAT (Very Small Aperture Terminal) zouden kunnen worden gerealiseerd met phased array antennes			

Hierin impliceert het 'handheld'-type terminal dat de standaardisatie van de satellietintegratie in 5G juist ook expliciet bedoeld is om 5G gebruikersterminals via NTN-platforms directe toegang te geven tot 5G-netwerken. Uit deze tabel blijkt ook dat de eigenschappen van de VSAT en van de handhelds onderling aanzienlijk verschillen. Hier speelt het compromis tussen enerzijds omvang en dus hanteerbaarheid en anderzijds de verbindingcapaciteit die kan worden verkregen. De verschillende satelliet operators in de regio's Europa, het Midden-Oosten en Afrika (EMEA)¹⁰ en verschillende mobiele netwerk operators in de alliantie Next Generation Mobile Networks (NGMN)¹¹ hebben een gezamenlijke studie gedaan over de integratie van satellietcommunicatie in 5G. Het resultaat hiervan is gepubliceerd via het whitepaper *Non-terrestrial Position Paper*¹². De conclusies over de haalbare performance voor verschillende NTN *use cases* zijn samengevat in Tabel 3. Zo is de verwachte datasnelheid 13,5 Mbit/s (downlink) en 10 Mbit/s (uplink) voor het scenario met een 5G smartphone en gebruik van de S-band met een LEO-satellietconstellatie. Als we in hetzelfde scenario uitgaan van HAPS NTN-platforms, dus met een platformhoogte van slechts enkele tientallen kilometers, is de haalbare (symmetrische) datasnelheid 55 Mbit/s. De haalbare capaciteiten zijn dus zeer afhankelijk van de gehele configuratie, dus zowel van de gebruikersterminals als van het ruimte- of luchtsegment. Deze configuratie moet goed worden overwogen in de context van vooral de voorziene *use cases* die volgen uit de gewenste toepassingen en de daaraan verbonden datasnelheden en toelaatbare vertragingen.

⁹ Nadere specificatie: er is *dual polarisation* voorzien. De *half power beam width* bedraagt 65 graden. Het aantal antenne-elementen en de relatieve antenne-omvang zijn nog nader te bepalen.

¹⁰ <https://www.esoa.net/>

¹¹ <https://www.ngmn.org/>

¹² <https://www.ngmn.org/publications/ntn-position-paper.html>

Tabel 3: NTN use case performance
[bron: "Non-Terrestrial Networks Position Paper", NGMN, 27 november 2019]

Use case category	UE Class	Space platform	Frequency band	Example throughput assuming 10 MHz channel (Mbps DL/UL) ⁽¹⁾	Added value for 5G
Land-mobile (pedestrian)	3GPP Class 3	LEO (NGSO)	S Band	13.5 / 10	MBB Service Continuity (outdoor)
	3GPP Class 3	HAPs	1.8 GHz	55 / 55	
	3GPP Class 3	GEO	S Band	12 / 10	
IoT	3GPP Class 3 ⁽²⁾	GEO	L Band	17 / 7	IoT Service continuity (outdoor)
Direct VSAT access for Verticals (Maritime, Connected car, community WiFi)	VSAT	GEO	S Band	40 / 25	Fixed & mobile services in unserved areas
	VSAT Flat Panel Antenna	GEO HTS	Ku Band	10 / 19	Vertical (maritime)
	VSAT Flat Panel Antenna	GEO HTS	Ka Band	9 / 13	Vertical (connected car)
Backhaul Support for Community WiFi or/and Cellular 2G, 3G, 4G or 5G	Flat Panel Antenna	LEO (NGSO)	Ku Band	33 / 35	Cellular backhaul in unserved & underserved areas

Volgens de eerder genoemde marktstudie van BIS Research heeft integratie van satellietcommunicatie via LEO's, die inherent de laagste transmissievertraging geven, het grootste mondiale marktaandeel in het komende decennium. De introductie van het NTN-platform in 5G resulteert in verschillende fundamentele veranderingen in het ontwerp van de 5G mobiele netwerken, die gespecificeerd zullen worden in 3GPP Release 17:

- Door de hoge snelheden van bijvoorbeeld een LEO-satelliet of een terminal geïnstalleerd op een vliegtuig moeten invloeden van het dopplereffect op de timing en frequentiesynchronisatie opgelost worden. Dit is ook van belang voor het ontwerp van het Physical Random Access Channel (PRACH).
- Door de lange (effectieve) afstand tussen de NTN terminal en de gNB moet de tijdsvertraging van de communicatielink opgevangen worden in de *random access procedure* die gebruikt maakt van de PRACH en in de hertransmissies van de pakketjes (volgens de zogenaamde HARQ procedure¹³).
- De *beam footprint* van het 5G-radiosignaal afkomstig van bijvoorbeeld een LEO-satelliet 'volgt' de vliegtroute van de satelliet. Rekening moet worden gehouden met de effecten van deze 'verplaatsing' op de mobiliteit-procedures zoals cell (re-)selectie, Tracking Area Update (TAU) voor niet-actieve terminals, en de *handover* procedure voor actieve terminals.

¹³ HARQ staat voor Hybrid Automatic Repeat reQuest en is een combinatie van snelle *forward error-correcting* coding en ARQ foutencontrole

In Release 17 wordt dan ook alleen standaardisatie van het transparante/bent-pipe alternatief opgenomen. De standaardisatie van de non-transparante variant staat voor Release 18 gepland¹⁴.

2.1.5 *Conclusies*

Ook voor Nederland is een gestandaardiseerde satellietintegratie in 5G van belang waarbij gebruikers op basis van *directe toegang* gebruik kunnen maken van een 5G-satellietverbinding. De standaardisatie hiervan betreft vooralsnog de variant waar het ruimte- of luchtsegment als relais fungeert en heeft impact op de specificatie van 5G. Deze standaardisatie staat daarom pas eind 2021 gepland. Hierdoor kunnen rond 2023-2024 de eerste gebruikerstoestellen die deze integratievariant ondersteunen, verwacht worden.

Haalbare snelheden en capaciteiten hangen sterk af van zowel de terminals als van het ruimte- of luchtsegment. Er is dan ook veel mogelijk in de afstemming tussen behoefte (toepassingen) en aanbod (terminals en ruimte- of luchtsegment) en deze moet dan ook worden afgewogen in een totale context van toepassingen, toekomstvisie rond mogelijkheden en behoeften, investeringen en dergelijke. De mondiaal voorziene toepassingssectoren die het meest baat hebben bij satellietintegratie in 5G kunnen ondersteund worden door de directe toegangsarchitectuur. De Nederlandse toepassingen zoals geadresseerd passen binnen deze *verticals* zodat ook nationaal aansluiting is op deze wereldwijde marktverwachting. Dit geeft perspectief voor het op termijn daadwerkelijk nationaal kunnen benutten van satellietintegratie in 5G.

¹⁴ Zie RP-193234

2.2 Methoden voor indoordekking van mobiele communicatie

2.2.1 *De problematiek van mobiele indoordekking*

Naast de algehele continue toename van het gebruik van mobiele netwerken ten koste van het gebruik van vaste netwerken in het afgelopen decennium is een gegeven dat het merendeel van het mobiele verkeer in Nederland in pandig plaatsvindt¹⁵ en ditzelfde geldt mondiaal voor 4G²². Deze locaties zijn divers: het kan gaan om kantoorcomplexen, fabrieken, woonhuizen en om winkels en openbare ruimtes zoals op vliegvelden, grote treinstations, in ziekenhuizen, musea maar ook moet worden gedacht aan (lange) tunnels en parkeergarages. Sinds het bestaan van de algehele behoefte aan mobiele dekking is duidelijk dat indoordekking door de verminderde doordringbaarheid van radiogolven problematisch kan zijn. Dit geldt in het bijzonder voor de interactieve diensten zoals digitale mobiele telefonie omdat het wegvallen van dekking direct manifest is en het mobiele gesprek frustreert. Is de dienst niet interactief en dus minder tijd-kritisch dan is algemeen meer verstoring toelaatbaar, maar ook dit heeft uiteraard zijn grenzen. De dekkingsproblematiek wordt door moderne isolatienormen die het energieverbruik van panden verlagen in de hand gewerkt omdat radiogolven nog minder goed dan voorheen of zelfs helemaal niet meer door muren of ramen kunnen dringen.

Een ander aspect dat bijdraagt aan de verslechtering van mobiele indoordekking is dat met de opeenvolging van generaties mobiele communicatiesystemen de frequentiebanden waarin deze werken over het algemeen hoger worden: voor 2G (GSM) lag deze op 900 en 1800 MHz, voor 3G (UMTS) en 4G (LTE) rond 2 GHz en voor 5G wordt de frequentie in urbane gebieden waarschijnlijk vooral rond 3,5 GHz. Nu is de ligging van de frequentieband in het radiospectrum bepalend voor de doordringbaarheid door bouwmaterialen: hoe hoger de radiofrequentie, hoe lager de penetratie door materialen is. Voor 5G zou dit juist pleiten voor beschouwing van lagere banden voor 5G voor indoor gebruik, zoals 700 MHz en bestaande mobiele banden zoals 1800 MHz.

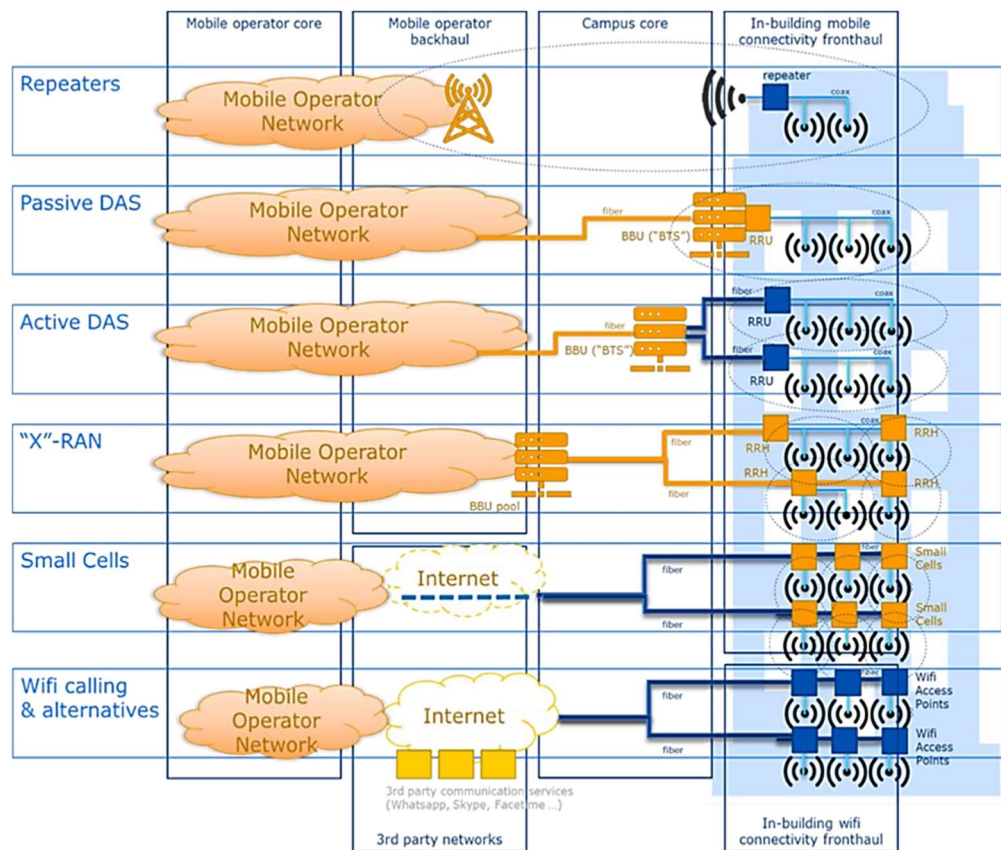
Met de toenemende behoefte aan bandbreedte om de groeiende vraag naar mobiel verkeer te kunnen ondersteunen, is echter de bovenbeschreven tendens naar het gebruik van hogere radiofrequenties ook voor indoor gebruik niet verwonderlijk omdat hier in potentie de benodigde frequentieruimte geboden kan worden.

Bovenstaande schets van de radiodekkingsproblematiek voor mobiele communicatienetwerken maakt duidelijk dat deze zonder adequate maatregelen eerder toe- dan af zal nemen. In de volgende paragraaf wordt ingegaan op bestaande technische opties om mobiele indoordekking tot stand te brengen.

2.2.2 *Huidige technische opties voor mobiele indoordekking*

Diverse benaderingen zijn beschikbaar voor het zodanig verbeteren of verkrijgen van mobiele indoordekking van met name MNO's dat in pandige connectiviteit op een vergelijkbaar niveau gebracht kan worden als connectiviteit buiten een object, zie Figuur 3.

¹⁵ <https://www.btg.org/2017/08/28/indoordekking-nog-altijd-punt-grote-zorg/>



Figuur 3: Diverse opties voor inpanidige mobiele dekking

[bron: <https://www.stratix.nl/>

[rapport-indoor-connectiviteit-en-mobiele-technologie-op-de-campus/](https://www.stratix.nl/rapport-indoor-connectiviteit-en-mobiele-technologie-op-de-campus/)]

Elke aanpak heeft zijn voor- en nadelen:

- P-DAS (Passive Distributed Antenna System); standaardisatie door DITS**
 Deze benadering is gebaseerd op coaxkabel en inpanidige antennes zoals omnidirectionele- en sectorantennes. Soms is de coaxkabel als *leaky feeder* uitgevoerd om tevens te fungeren als een antenne. Deze DAS-infrastructuur wordt aangesloten op indoor basisstation-functies die de connectie levert met het signaal van de provider. Binnen Nederland is deze methode door BTG (Branchevereniging ICT en Telecommunicatie Grootgebruikers) gestandaardiseerd in de DITS (Dutch operators Indoor Technical Specification) en wel als multi-operator oplossing voor:
 - 2G in de 900 en 1800 MHz-banden;
 - 3G in de 900, 1800 en 2100 MHz-banden en
 - 4G in de 800, 900, 1800, 2100 en 2600 MHz-banden.
 Bij LTE worden TDD (Time Division Duplex), FDD (Frequency Division Duplex) en de 3GPP IoT-technologieën LTE-M (Machine Type Communication) en Narrowband-IoT ondersteund¹⁶. In geval van LTE is voldoende GPS-ontvangst, dat wil zeggen van een voldoende aantal satellieten, wel een belangrijk aandachtspunt.
 De DITS voorziet ook in de beschrijving van de ondersteuning van non-MNO

¹⁶ <https://www.btg.org/consultatie-standaard-indoordekking-passieve-das/>

systemen zoals C2000, van belang voor de indoorcommunicatie met hulpverleners. Via regelgeving kan dit bij objecteigenaren worden afgedwongen. Paragraaf 2.2.3 gaat verder in op de DITS.

Bij dit concept huurt of koopt een objecteigenaar een P-DAS waarbij betrokken MNO's hun BTS (Base Transceiver Station ofwel basisstation) functionaliteit aanbieden, gewoonlijk aan een NHC (Neutral Host Contractor) die de objecteigenaar 'ontzorgt', voor installatie in een apparatuur-ruimte in het object, afspraken met de gewenste MNO's en het beheer. De BTS is direct via fiber aangesloten op het MNO-netwerk.

Belangrijk aspect voor de uitbreidbaarheid van capaciteit is de modulaire opbouw van de P-DAS. Te denken valt aan bijvoorbeeld uitbreiding van het aantal MNO's die indoor worden ondersteund en/of de uitbreiding van het inpandige dekkinggebied. Bij dit laatste worden de grenzen bepaald door de signaaldemping die toeneemt met de lengte van de inpandige P-DAS kabelinfrastructuur en de radiofrequentie.

- **A-DAS (Actieve Distributed Antenna System)**

Deze oplossing wordt voor grotere objecten toegepast. A-DAS is gebaseerd op P-DAS waarbij de BTS-functionaliteit zich in of buiten het object bevindt, bijvoorbeeld als onderdeel van een groter *enterprise* netwerk. De BTS-signalen van de diverse ondersteunde MNO's worden via glasfiber naar het object doorgevoerd en verdeeld over meerdere indoor DAS-segmenten, bijvoorbeeld één voor elke verdieping van een gebouw. Via actieve versterkers ofwel *repeaters* kan vervolgens de kabledemping in elk segment voldoende worden gecompenseerd om een langere infrastructuur met meerdere inpandige antennes te kunnen bedienen voor ontplooiingen die nodig zijn in zodanig omvangrijke objecten dat de gewenste indoordekking niet met P-DAS kan worden bereikt. Hierdoor is dus bij A-DAS binnen een soortgelijke modulaire structuur als van de P-DAS de beperkte schaalbaarheid van de passieve structuur ondervangen. Voor met name grote objecteigenaren is A-DAS erg interessant. Zij draaien voor alle infrastructuurkosten op en er is dus veel voor te zeggen om een operator-onafhankelijke oplossing te hebben die bovendien schaalbaar is zodat niet bij iedere verandering van huurders delen van de infrastructuur moeten worden vervangen. Ook is het gewenst dat naast huurders ook bezoekers overal in het pand mobiel moeten kunnen communiceren via hun eigen operator. Het nadeel ten opzichte van P-DAS zijn de hogere kosten door de actieve elementen. Ook is A-DAS nog niet in Nederland gestandaardiseerd en dus nog niet geharmoniseerd onder MNO's.

- **Hybride vorm van P-DAS en A-DAS (niet expliciet in Figuur 3 aangegeven)**

In de praktijk wordt deze vorm wel toegepast in middelgrote panden door een actief hoofddeel over verdiepingen heen aan te brengen en per etage een passief deel met de antennes te ontplooiën.

- **Wi-Fi connectivity fronthaul**

Dit betreft een relatief goedkope oplossing bestaande uit een inpandig fibernetwerk van Wi-Fi access points dat is aangesloten op internet. Hier bedient men zich van *third party* applicaties en voor spraak van *Wi-Fi calling*. Deze optie heeft met name voor bedrijven doorgaans minder mogelijkheden wat betreft specifieke diensten en kwaliteit/beschikbaarheid. Zo kan het

alarmnummer (nog) niet gebeld worden vanwege regelgeving die verplicht om een cell-id aan te geven.

- **Private mobile network (PMN; niet expliciet in Figuur 3 aangegeven)**

Het gaat hier om een in pandig mobiel netwerk van de vierde, derde of soms zelfs tweede generatie in eigendom van een doorgaans grote onderneming die dit netwerk als *site owner* zelf beheert. 4G private netwerken functioneren in Nederland gewoonlijk in de 3,5 GHz-band. Dit is voor deze zakelijke gebruikers aantrekkelijk omdat zij later kunnen profiteren van nieuwe 5G-toepassingen in deze band. Er ontstaan daarnaast ook mogelijkheden om Wi-Fi frequenties te gebruiken.

Seamless handover van calls tussen de private mobile netwerk en MNO's is echter zowel organisatorisch als technisch niet eenvoudig. Dit zou voor medewerkers met dual-SIM te ondervangen zijn maar dit biedt voor bezoekers geen uitkomst. Deze oplossing is dan ook sterk afhankelijk van individuele afspraken met MNO's²³. PMN's en de voorgenomen banden rond 3,5 GHz voor de periode vanaf 2026 komen verder ter sprake in Paragraaf 2.3.3.

Volledigheidshalve moet ook een heel eenvoudige benadering worden genoemd die inmiddels voor MNO's echter als achterhaald kan worden beschouwd. Het gaat hier om een eenvoudige opzet waarbij in plaats van de indoor basisstation-functies, een donor-antenne het providersignaal opvangt en doorgeeft aan de DAS, zie Figuur 3, bovenste optie. Het gaat hier om een basale single-MNO oplossing waarvoor geen apparatuur van de MNO is benodigd. Het bronsignaal is dan wel zodanig zwak, dat deze door een *repeater* moet worden versterkt. Deze methode is meer geschikt voor het doorgeven van het signaal van een enkele non-MNO zoals van C2000. Dit vindt plaats in de DMO: Direct Mode of Operations.

Verder worden ook specifieke, propriëtaire oplossingen aangeboden zoals van een Indiase leverancier die automatisch omschakelen van gebruikersapparatuur naar 900 MHz faciliteert wanneer wordt gedetecteerd dat men zich in een indooromgeving bevindt¹⁷.

De samenwerking tussen KPN, T-Mobile en VodafoneZiggo om op Schiphol één mobiel netwerk aan te leggen, toont aan dat in de praktijk veel mogelijk is¹⁸. Het is de bedoeling dat dit indoornetwerk toekomstbestendig is waardoor upgradering naar 5G mogelijk wordt. Bovendien kan het tevens worden gebruikt door de hulpdiensten. Ook wordt dekking van het Schiphol portofoonsysteem ondersteund. Naast Schiphol zijn andere locaties zoals evenementhallen en stadions (Rotterdam Ahoy, Amsterdam Arena) essentieel voor de noodzaak tot samenwerking tussen de MNO's om daar gezamenlijk dekking te bieden.

2.2.3 *Standaardisatie van indoordekking in Nederland*

Zoals opgemerkt heeft Nederland met de DITS een eerste stap gezet in de standaardisatie van indoordekking, te beginnen met de definitie van de P-DAS. De DITS is geen dwingende standaard maar moet worden gezien als een algemene norm voor het zelfstandig realiseren van goede indoordekking door private partijen

¹⁷ <https://telecom.economictimes.indiatimes.com/news/airtel-deploys-lte-900-technology-to-boost-4g-indoor-coverage-in-delhi-ncr/69722468>

¹⁸ <https://tweakers.net/nieuws/144289/schiphol-gaat-met-providers-gezamenlijk-indoor-mobiel-netwerk-aanleggen.html>

namens de gebruikers in hun gebouw(en), waar alle MNO's op aan kunnen sluiten. DITS heeft dan ook zeker autoriteit bij de operators. Essentieel is dat het buitennetwerk van de MNO's door een indoor dekkingsvoorziening niet verstoord wordt. Dialoog met MNO's blijft op sommige punten nodig. Zo zal de eventuele implementatie van de antennetechnologie MIMO (Multiple Input- Multiple Output) in de DAS in overleg met betrokken MNO's moeten worden bekeken omdat dit weliswaar indoordekking met hoge capaciteit impliceert maar tegelijk een wezenlijke uitbreiding van de P-DAS infrastructuur betekent. Momenteel worden voorbereidingen getroffen voor de nationale standaardisatie van andere concepten¹⁹.

2.2.4 Toekomstige technische opties voor mobiele indoordekking

Naast de in de vorige paragraaf besproken methoden zijn er in de nabije toekomst andere die vooral zijn gericht op de volgende generatie mobiele netwerken ofwel 5G. Elke nieuwe generatie mobiele communicatie is gericht op het ondersteunen van het groeiende mobiele dataverkeer, zo ook 5G. Het gebruik van de vergunningsvrije frequentieruimte in de 1800 MHz-band voor indoordekking zal echter niet toereikend zijn om in de groeiende behoefte aan inbandige breedbandcommunicatie te voorzien²⁰. Omdat eenmaal in een indooromgeving radiosignalen op de hogere frequenties van 5G (3,5 GHz en mogelijk later 26 GHz) deze ruimte moeilijk kunnen verlaten, leeft momenteel voor het realiseren van voldoende toekomstige indoorcapaciteit wel de opvatting om 3,5 GHz voor inbandig gebruik vergunningsvrij beschikbaar te stellen²¹. De belangstelling hiervoor zal onder leden van de BTG-expertgroep omtrent indoordekking worden gepeild om de dialoog hierover te voeren met het ministerie van EZK. In EU-verband draagt dit ministerie reeds bij aan het harmoniseren van de voorwaarden voor vergunningsvrij gebruik van de 66-71 GHz band, overigens zowel voor in- als outdoor-toepassing²⁰.

Buiten het bieden van meer capaciteit door nieuwe, hogere radiofrequenties wordt in 5G meer dynamisch, softwarematig configureerbaar en adaptief. Van deze eigenschap kan voor het verkrijgen van indoordekking gebruik gemaakt worden. Meer specifiek moet worden gedacht aan de volgende methoden, zie vierde en vijfde opties van boven in Figuur 3:

- **Digitaal gedistribueerde basisstations** met tenminste 4x4 MIMO²². Deze worden aangestuurd vanuit de *edge* van het vaste MNO-netwerk door de operator waarbij naar gelang de verkeersintensiteitsvraag de dekking per basisstation kan worden ingesteld. Er zijn diverse uitvoeringen mogelijk van dit concept: Distributed RAN en Cloud RAN²³. Deze zijn momenteel in ontwikkeling. Er zijn nog geen standaarden aanwezig en ook zijn operators nog niet toeschietelijk deze variant als multi-operator aan te bieden ondanks het technisch potentieel voor met name 5G.
- **Femtocellen (*small cells*)**
Hier gaat het om het creëren van meerdere, zelfstandige inbandige cellen met een straal van circa 20 m door *standalone* basisstation systemen waarbij

¹⁹ <https://www.btg.org/agenda/expertgroep-indoordekking-en-kmbg-vrij-gebruik-35ghz/>

²⁰ Actieplan Digitale Connectiviteit, juli 2018

²¹ <https://www.surf.nl/files/2019-11/position-paper-inbandig-medegebruik-van-5g-frequenties.pdf>

²² <https://carrier.huawei.com/minisite/Indoor-5G/pdf/Indoor-5G-Networks-White-Paper-V2.0-en.pdf>

²³ <https://www.stratix.nl/rapport-indoor-connectiviteit-en-mobiele-technologie-op-de-campus/>

connectiviteit wordt gelegd met behulp van bestaande vaste fiberverbindingen zoals een al aanwezig indoor netwerk dat ook voor andere toepassingen wordt gebruikt. Via een IPsec-verbinding wordt via internet verbinding met het mobiele kernnetwerk van de MNO onderhouden. Multi-operator oplossingen zijn nog in ontwikkeling. Een private 5G-netwerk kan worden gezien als een oplossing onder dit concept.

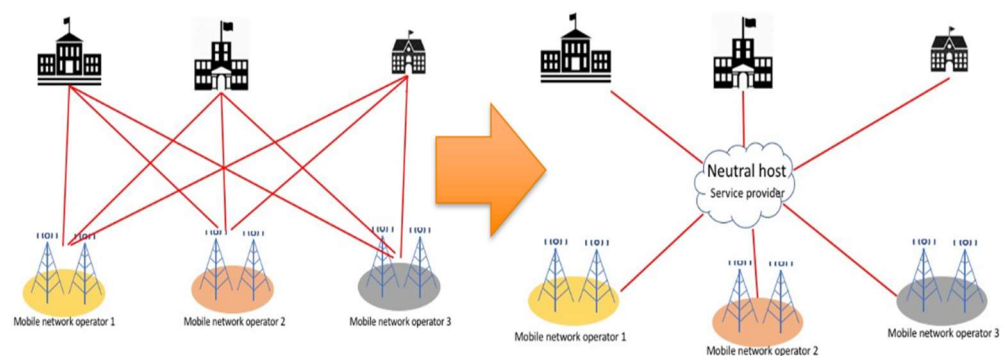
Momenteel is er in Nederland nog geen operator die een femtocel aanbiedt op basis van een zogenaamde Home eNodeB (4G basisstation) naar verluidt omdat de *interworking* met het mobiele kernnetwerk niet eenvoudig is⁹.

Leveranciers demonstreerden op het Mobile World Congres 2019 oplossingen waarbij soms 4G en 5G konden worden gemengd in bestaande frequentiebanden. Hierdoor kunnen niet alle capaciteitsvoordelen van 5G behaald worden, maar is wel integratie met de huidige netwerken of het gebruik van bestaande antennes mogelijk. Juist via de hybride A-DAS en P-DAS zouden hiermee in principe 5G-signalen verspreid kunnen worden. Het A-DAS-deel is dan nodig om de relatief grote verzwakking van radiosignalen door kabels op hogere frequenties tegen te kunnen gaan.

Het 5G Multi-Tenancy onderzoeksproject

In het **5G** Multi-Tenancy onderzoeksproject willen Surf, Agentschap Telecom en TNO samen met meerdere operators en leveranciers testen of specifiek een software-gebaseerde en dus -instelbare 5G-oplossing in de praktijk gaat functioneren. Door het nog in ontwikkeling zijnde *slicing* concept (zie de Monitor-voorjaarseditie 2019) ontstaan interessante mogelijkheden voor het centraal vanuit de NHC realiseren van (her)programmeerbare, zogenaamde *gevirtualiseerde* netwerkfuncties. Dit kan voor elke MNO apart en in onderlinge isolatie²⁴.

De methode doet denken aan een A-DAS waarbij een NHC hier een concentratiepunt van gevirtualiseerde basisstations van diverse MNO's is zoals aangegeven in Figuur 4. Deze figuur visualiseert voor het aangegeven voorbeeld van drie objecten de winst in schaalbaarheid ten opzichte van de huidige situatie.



Figuur 4: Verbeterde schaalbaarheid door 5G Multi-tenancy (r) t.o.v. huidige situatie (l)
[bron: "5G Multi-tenancy" Multi-stakeholder Research Project, update februari 2020]

Welke partij de rol van NHC of kortweg *neutral host* vertolken kan, is momenteel nog niet gedefinieerd in het onderzoeksproject.

²⁴ <https://www.5gcity.eu/2019/07/30/the-neutral-host-model-some-considerations-from-the-telco-point-of-view/>

Onderzocht zal gaan worden op welke punten interoperabiliteit is benodigd en waar standaarden zijn gewenst. Te denken valt aan interfacepunten tussen de NHC-apparatuur en de gevirtualiseerde basisstations, interfaces tussen management systemen van de indoor A-DAS en de NHC-apparatuur et cetera. Ook zal de *handover* tussen de indooromgeving en het buitennetwerk geadresseerd worden. Voorlopig bevindt de propositie zich echter in een *deadlock* situatie omdat venders willen voorkomen dat bepaalde MNO's zich benadeeld zouden kunnen voelen ten opzichte van andere. Ook speelt hier de invulling van de NHC-rol mogelijk parten. Het gaat zoals bij veel huidige systemen voor indoordekking hoe dan ook om een derde partij waarbij elke MNO de controle op het radionetwerk uit handen geeft. De MNO's blijken sowieso nog onzeker over de business case: kun je als MNO nog steeds voldoende winst maken als je zelf de NHC-rol hebt, welke andere partijen kunnen de HDC-rol vervullen, et cetera.

2.2.5 *Concluderend*

Voor het bereiken van acceptabele indoordekking bestaan thans diverse opties. Elke heeft zijn eigen sterke en zwakkere kanten, vaak in relatie tot kosten, objecteigenschappen en gebruikerswensen. De ondersteuning van meerdere MNO's voor een oplossing blijkt vanuit de optiek van zeggenschap en controleerbaarheid door de objecteigenaar een continue aandachtspunt. Deels is deze op te lossen via standaardisatie waarbij veel stakeholders, dus ook MNO's, betrokken zijn. Hiermee is via BTG met de DITS een veelbelovend begin gemaakt. Deze eerste Nederlandse standaard voor P-DAS is een feit. Momenteel wordt doorgepakt naar standaardisatie van andere, meer toekomstbestendige concepten, te beginnen met A-DAS. Het is hierbij nodig dat de radiosignalen van de diverse indoorantennes voor elke MNO controleerbaar zijn en er voldoende isolatie bestaat voor een eerlijke en wederzijds ongestoorde indoor *network sharing* tussen de MNO's.

Ook wordt gekeken naar de volgende generatie mobiele netwerken: 5G. Het nadeel van beperkte doordringbaarheid van elektromagnetische golven van de daarin toegepaste hogere radiofrequenties kan worden omgebogen tot een voordeel wanneer in pandige basisstations kunnen worden geïnstalleerd en het providersignaal via vaste lijnen wordt toegevoerd. Zeker in 5G wordt de hoge mate van programmeerbaarheid van indoor netwerkkassets vanuit een *neutral core* een voordeel maar concepten hiervoor zijn nog volop in ontwikkeling. Vooralsnog lijken operators nog niet erg ontvankelijk voor acceptatie van dergelijke multi-operator benaderingen. Dit kan uiteraard veranderen, getuige de reeds gerealiseerde multi-operator indoornetwerk op Schiphol. De rol van een *neutral host* als specialistische, multidisciplinaire derde partij zal dan mogelijk ook in Nederland toenemen²⁵.

²⁵ <https://www.commscope.com/globalassets/digizuite/2996-multi-operator-small-cells-for-neutral-hosts-wp-113645-en.pdf?r=1>

2.3 Bedrijfsspecifieke communicatie

2.3.1 Inleiding: de oorspronkelijke situatie

Voor bedrijfsspecifieke communicatie staat een onderneming een drietal basale opties open:

1. Gebruik maken van een publieke beschikbare infrastructuur zoals een 4G cellulair netwerk. Hier bestaat voor de professionele gebruiker geen onderscheid tussen beschikbaarheid, dienstkwaliteit, -onderhoud en beveiliging ten opzichte van de publieke gebruiker. Daar staat tegenover dat het bedrijf buiten specifieke applicaties, geen bijzondere investeringen hoeft te plegen;
2. Een virtueel besloten bedrijfsnetwerk waarbij infrastructuur en diensten worden aangeboden door een operator. Voor mobilofoon-toepassing wordt deze optie aangeduid met PAMR (Public Access Mobile Radio). Hier gaat het bedrijf met een operator een SLA aan voor de te leveren diensten, het exclusief frequentiegebruik inbegrepen. De levering en het beheer van de dienst zijn daarmee uitbesteed. De gebruiker is contractueel verzekerd van een gewenste beschikbaarheid, exclusiviteit, dienstkwaliteit, -onderhoud en beveiliging. Deze overstijgen die van een commercieel netwerk;
3. Een besloten bedrijfsnetwerk waarbij alles in eigen beheer en eigendom is. De PMR (Private Mobile Radio) is oorspronkelijk een radionetwerk, vaak op basis van *push-to-talk*, dat model staat voor dit type bedrijfsnetwerk. Daarbij is sinds jaren al de tendens naar 'meer bandbreedte' zichtbaar.
Voor een onderneming is PMR de meest kostbare optie, waarbij niet alleen netwerkelementen maar ook het gebruik van het benodigde spectrum wordt aangekocht. Bovendien is hier het onderhoud in eigen handen. Hier spelen argumenten zoals gewenste eigen beschikking en -controle over de infrastructuur (inclusief het 'eigen' spectrum), dienst, beveiliging en apparatuur ten behoeve van het garanderen van beschikbaarheid, voldoende dekking en betrouwbaarheid, juist ook in de toekomst. Deze vormen dus motieven om communicatie *niet* als dienst in te kopen.

In de praktijk zijn ook mengvormen van bovenstaande 'archetypen' mogelijk.

Veel van de professionele connectiviteit kan voor alle bovenstaande opties nu en naar verwachting in de toekomst worden afgenomen op basis van generieke, breedbandige technologie zoals landelijke mobiele netwerken²⁹. Afnemers geven aan bij voorkeur connectiviteit als dienst op basis van deze technologie te willen gebruiken vanwege de voordelen die deze biedt rond kwaliteit en capaciteit (breedbandigheid en lage *latency*), aanbidding door meerdere partijen, onderhoud, OPEX, upgrades/ toekomstvastheid et cetera. Operators van generieke mobiele netwerken zijn echter niet altijd in staat te voldoen aan door professionele gebruikers gevraagde randvoorwaarden zoals de ondersteuning van grote verkeersdynamiek tijdens bijvoorbeeld calamiteiten²⁶.

De beschikbaarheid van de gevraagde dienstverlening in de markt is daarnaast afhankelijk van het schaalniveau van de toepassing en is klein voor niche toepassingen. Zo is het aanbod van specifiek toegespitste draadloze connectiviteit in de vorm van PAMR erg beperkt. Deze diensten, toegankelijk voor professionele gebruikers in besloten groepen en het op afstand uitlezen en besturen van

²⁶ <https://www.dialogic.nl/wp-content/uploads/2017/07/Dialogic-Marktonderzoek-PAMR-in-de-450-470-MHz-band.pdf>

apparatuur zijn over het algemeen nog gericht op spraak en smalbandig dataverkeer. Zo wordt de PAMR-band van 2 maal 3 MHz in 450-470 MHz momenteel vooral voor slimme meters gebruikt. De vergunning voor het gebruik van deze band is verlengd tot en met 17 november 2024 terwijl bekeken wordt wat het beleid wordt voor na 2024²⁷.

De gevestigde *installed-base* van PMR's voor smalbandige toepassingen zoals *push-to-talk* radiosystemen in bedrijven en dienstverlenende organisaties vinden we in onder andere 410-430 MHz en 450-470 MHz²⁸.

2.3.2 *Spectrumbehoefte voor breedbandige bedrijfsspecifieke communicatie*

Voor zowel virtuele als fysiek besloten netwerken is de tendens binnen vele toepassingssectoren naar de ondersteuning van breedbandig verkeer met geringe vertraging voor hoge-resolutie videostreaming op 4K Ultra High Density, *Augmented Reality* (AR) en *Virtual Reality* (VR)²⁹. Bij deze toepassingen is bandbreedtebeperking door compressie niet gewenst vanwege de gevraagde beeldkwaliteit en/of extra *latency* die dat zou opleveren. In het bijzonder kan de grote bandbreedte gebruikt worden voor de ondersteuning van missie- en bedrijf-kritisch verkeer.

Spectrum voor *breedbandig* besloten bedrijfsnetwerk is benodigd wanneer:

- de generieke infrastructuur naar verwachting niet in staat zal zijn om specifieke dienstverlening te bieden, en/of
- wanneer wordt verwacht dat (V)MNO's van generieke netwerken niet de gevraagde specifieke dienstverlening zullen bieden, en
- reeds beschikbaar spectrum waaronder vergunningsvrij 2,4 GHz, 5 GHz en mogelijk in de toekomst 26 GHz, niet volstaat.

Een bandbreedte van 40 MHz tot 80 MHz wordt gezien in onderzoeken die respectievelijk januari 2018²⁹ en september 2017³⁰ zijn gepubliceerd als het meest voor de hand liggend om toe te wijzen aan specifieke toepassingen en wel op basis van TDD (dus ongepaard spectrum) en exclusieve controle over het spectrum op het eigen bedrijfsterrein en binnen eigen gebouwen. Hierbij is uitgangspunt dat het spectrum moet worden ondersteund door generieke technologie: primair 4G/LTE en 5G. Spectrum kan in principe liggen in de banden 2,3 GHz en 3,5 GHz. Deze laatste mogelijkheid betreft voor Nederland, conform de Nota Mobiele Communicatie van 2019, vanaf 2026 de banden 3400-3450 MHz en 3750-3800 MHz. De 2,3 GHz-band is in Nederland toegewezen aan het Ministerie van Defensie. Er is in coördinatie met dit ministerie medegebruik voor videoverbindingen ten behoeve van ENG/OB (Electronic News Gathering/ Outside Broadcasting) en van videoverbindingen van politiehelikopters. De 2,3 GHz-band is niet beschikbaar voor MNO's. Tijdens WRC 2023 wordt weer gezocht naar extra

²⁷ Nationaal Frequentiebeleidsoverleg, 20 maart 2020. De beleidsstudie rond slimme meters wordt verwacht. Een marktonderzoek is ingesteld waarvan in het 3^{de} kwartaal van 2020 de consultatie wordt verwacht.

²⁸ De 446 MHz-band is bedoeld voor niet-professioneel PMR-gebruik en is vergunningsvrij.

²⁹ <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2018/01/30/de-behoefte-aan-spectrum-voor-specifieke-professionele-breedbandige-toepassingen>

³⁰ https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2017/09/20/rapport-onderzoek-naar-vergunningvrij-gebruik-in-de-2100-mhz-band/Rapport+vergunningvrij++gebruik+2100+MHz+band_v+1.1-publicatie+versie.pdf

spectrum voor IMT (International Mobile Telecommunications) en mogelijk is de 2,3 GHz-band een van de opties die beschouwd gaat worden.

Omdat voor 5G in Nederland ook ruimte op 26 GHz is gereserveerd, is het denkbaar dat ook deze band deels zou kunnen worden ingezet voor bedrijfsspecifieke communicatie. Het banddeel 24,25 GHz – 26,5 GHz is toegewezen voor backhaul-straalverbindingen van mobiele netwerken en dit zijn voornamelijk punt-puntverbindingen. Het andere deel van 26,5 – 27,5 GHz, oorspronkelijk toegewezen aan het Ministerie van Defensie, komt vrij voor herbestemming voor mobiel breedband en in eerste instantie door de overheid worden uitgegeven³¹.

De daadwerkelijke toepassing van 26 GHz in Nederland is echter nog erg onzeker; veel aandacht van operators is nu gericht op de banden 700 MHz en 3,5 GHz. Wel heeft het ministerie vroeg 2020 een marktconsultatie naar het gebruik van de 26 GHz-band uit laten gaan. Hier werd onder meer gevraagd naar *use cases*. Van de vele reacties waren er drie afkomstig van binnenlandse organisaties en twee buitenlandse. Voor wat betreft het gebruik van 26 GHz voor professionele communicatie worden naast outdoor- vooral indoortoepassingen gezien. Vanwege het lokale gebruik en de natuurlijke afscherming van buiten naar binnen en vice versa is de algehele opvatting dat de toepassing voor deze band gepaard kan gaan met een vergunningsvrij medegebruik voor in pandig gebruik of anders een vergunningsgebruik onder een licht regime. Meerdere reacties op de marktconsultatie naar het gebruik van de 26 GHz-band pleitten er dan ook voor om naast de band 26,5 – 27,5 GHz, ook op termijn de band 24,25 GHz – 26,5 GHz voor indoor gebruik beschikbaar te stellen, temeer daar voor deze netwerken gedacht wordt aan het kunnen accommoderen van een groei aan bandbreedtebehoefte.

In de volgende paragraaf zal nader worden ingegaan op de toepassing van 26 GHz voor breedbandige bedrijfsspecifieke communicatie.

2.3.3 *Private 4G en 5G networks*

Voor meer breedbandige besloten (bedrijfs)netwerken zoals bedoeld onder de opties 2 en 3 van Paragraaf 2.3.1 wordt de aanduiding *private networks* gebruikt. De aanduiding *private network* heeft betrekking op elke vorm van draadloos breedbandig besloten netwerk, inclusief Wi-Fi. Wanneer cellulaire netwerktechnologie de basis vormt, wordt gesproken van *private 2G*-, *3G*-, *4G*- of *5G*-netwerken of van *private mobile networks* (PMN's). Uiteraard zijn daarbij tegenwoordig vooral 4G en 5G als technologiebases interessant. Deze generaties PMN's en wel die de gevraagde ongepaarde bandbreedte van minstens 40 MHz kunnen accommoderen, zullen dan ook hierna worden beschouwd. Daarbij moet opgemerkt worden dat naast 4/5G PMN's voor de middellange termijn ook Wi-Fi een gangbare *private network*-technologieoptie zal zijn en wel in de vorm van Wi-Fi 6. Deze optie zal concurrerend zijn indien snelheid, het gemak en kosteneffectiviteit van de uitrol ten opzichte van die van PMN's belangrijke overwegingen zijn³². Anderzijds kan ondersteuning van kritische communicatie een keuze voor *Private 4G* of *-5G* rechtvaardigen. Hoewel niet direct als kritisch te bestempelen maar wel connecties waar goede betrouwbaarheid en beschikbaarheid van toepassing zijn, betreft verbindingen met geleverde apparatuur in instellingen en bedrijven zoals

³¹ <https://www.internetconsultatie.nl/marktconsultatie26ghzband>

³² Deloitte Insights: Technology, Media, and Telecommunications Predictions 2020, p. 33

koffieautomaten, snoepautomaten, printers, verwarmingen, pinautomaten, beveiligingscamera's, ventilatiesystemen, et cetera. Wi-Fi (en Ethernet) is hiervoor ongeschikt omdat leveranciers niet afhankelijk willen zijn van ongelicenseerd spectrum, het correct functioneren van een gast account en/of van de interne infrastructuur met firewalls voor het optimaal functioneren van hun product of dienst. Het aantal partijen dat hiervoor de 4G-technologie inzet neemt toe, aangetrokken door de schaalvoordelen van een dergelijke wereldwijde technologie. In het algemeen geldt dus dat elke technologie voor PMN-toepassing voor- en nadelen heeft zoals aangegeven in Tabel 4. Hierbij moet wel worden aangetekend dat Release 16 reeds 5G-LAN definieert als vervanger van Ethernet en Wi-Fi.

Tabel 4: Onderlinge vergelijking van diverse moderne private netwerk-technologieën [gebaseerd op: *Deloitte Insights: Technology, Media, & Telecommunications Predictions 2020*]

Aspect	Wi-Fi 6	Private 4G/LTE	Private 5G
<i>Dekking en omgeving</i>	Zeer lokaal, 'hot spots' zowel publiek als besloten	Alle lokale besloten gebieden, inclusief die waar geen publiek 4G is	Alle lokale besloten gebieden, inclusief die waar geen publiek 5G zal zijn
<i>Commerciële Beschikbaarheid</i>	Ca. 2021. Terugwaarts compatibel	Nu	Ca. 2021
<i>Robuustheid verbindingen</i>	Afhankelijk van verkeersintensiteit	Goed	Zeer goed
<i>Transportsnelheid</i>	Tot 10 Gbit/s	Tot 1 Gbit/s, afhankelijk van de situatie	Tot 10 Gbit/s in initiële fase
<i>Capaciteit</i>	Ca. 6 gelijktijdige verbindingen; 4x beter dan vorige Wi-Fi standaard	100.000 connecties per km ²	1.000.000 connecties per km ²
<i>Mobiliteits-ondersteuning</i>	Geen	Roaming tussen besloten en publiek 4G mogelijk; 350 km/u	Roaming tussen besloten en publiek 5G mogelijk; 500 km/u
<i>Vertraging</i>	Meer dan 0,1 s	40-50 ms	Minder dan 1 ms
<i>(mogelijke) frequentiebanden in Nederland</i>	Vergunningsvrije ISM-banden 2,4 en 5 GHz ³³ .	Licenties voor 40 MHz in 3,7-3,8 GHz; Na 2026 2x50 MHz in 3,4-3,8 GHz	Licenties voor 40 MHz in 3,7-3,8 GHz; Na 2026 2x50 MHz in 3,4-3,8 GHz; 26,5-27,5 GHz; Eventueel ook 2,3 GHz voor langere termijn (zie tekst)
<i>Relatieve kosten</i>	Beperkt	Veel duurder dan Wi-Fi 6	Waarschijnlijk duurder dan private 4G

In principe kunnen ook *spectrum sharing*-technieken zoals LTE-LAA (Licensed-Assisted Access) en MulteFire de voor LTE gevraagde bandbreedtes realiseren via een samenstel van vergunnings- en vergunningsvrije banden. Voor 5G Release 16

³³ Eventueel gebruik van 60 GHz voor lange termijn, op basis van WiGig

beschouwt 3GPP de mogelijkheid voor LAA in 5G (NR-U) en standalone NR-U waarbij geen ankerfrequentie nodig is. Gebleken is echter dat vooralsnog veel operators niet warm lopen voor dergelijke oplossingen waarin dienstkwaliteit en -beschikbaarheid bij gedeeld spectrum, waarbij dus deels van vergunningsvrij spectrum wordt gebruikt, niet vaststaan en daardoor niet zijn te garanderen³⁴. Bovendien zal voor private 5G networks de noodzaak voor *spectrum sharing* eerder af- dan toenemen indien men de geografisch goed herbruikbare mmWave frequenties (voor Nederland 26 GHz) zou toepassen. Hierdoor zouden ofwel de MNO's gemakkelijk in staat worden gesteld om inbandige PMN's aan te leggen, ofwel kunnen bij vergunningsvrij inbandig medegebruik objecteigenaren zelf, zonder overleg met MNO's, per gebouw inbandige connectiviteit aanleggen. In het eerste geval dient én per gebouw én per mobiele operator onderhandeld te worden om de inbandige connectiviteit van de mobiele netwerken te verbeteren. Dit schaaft dus slecht, is tijdsintensief en zeer kostbaar. Waarschijnlijk kan moeilijk van standaard implementaties worden afgeweken³⁵. Ook kan een rol spelen dat men niet frequenties willen 'inhuren' van een vergunninghouder omdat men op het standpunt kan staan dat lange-termijnbehoeften beter met een eigen voorziening afgedekt kunnen worden.³⁶

Tijdens het Mobile World Congres in februari 2019 werden private LTE-oplossingen getoond van onder meer Attocore samen met CellXica, Octasic en Quorus. 5G functies van zowel de 5G-gebruikersterminal als het -kernnetwerk worden stapsgewijs toegevoegd aan bestaande private LTE-producten. Zo toonde Octasic een nieuwe DSP (Digitale Signaal Processor) met ondersteuning voor 5G NR (New Radio). De software stack voor het 5G kernnetwerk is nog in ontwikkeling.

In de VS lopen reeds sommige *early adopters* met hun eerste, experimentele uitrol van private 5G networks vooruit op de 5G-standaardisatie en -implementaties, bijvoorbeeld voor medische *augmented reality*-toepassingen in ziekenhuizen³⁷. Enerzijds wil men de concurrentie voorblijven en anderzijds wordt ook ingezien dat bepaalde belangrijke toepassingen alleen op basis van 5G kunnen werken. Gartner heeft 5G-technologie nu gepositioneerd in hun *hype cycle* op de *peak of inflated expectations* zodat het naar verwachting nog twee tot vijf jaar zal duren voor 5G algemeen gebruikt kan worden, ook in PMN's.

2.3.4 *Private Li-Fi networks?*

In theorie zou nog gedacht kunnen worden aan de toepassing van Li-Fi voor het realiseren van breedbandige besloten bedrijfsnetwerken. Voor Li-Fi systemen zijn spectrumgebruik en co-existentie met andere systemen immers geen kwesties, terwijl het potentieel voor beschikbare bandbreedte zeer groot is.

Een eerste nadeel van Li-Fi is echter dat deze benadering alleen geschikt is voor inbandig gebruik. Bovendien wordt, meer nog dan voor Wi-Fi 6 geldt, zeer geringe

³⁴ 2020-02-GSA-Private-LTE-5G-Networks-Report-February-2020.pdf

³⁵ Reactie SURF op markconsultatie 26 GHz-band:
<https://www.internetconsultatie.nl/marktconsultatie26ghzband/reactie/d6a71cef-689b-4410-a0a0-582e155e6bde>

³⁶ Reactie Vereniging van Nederlandse Gemeenten op markconsultatie 26 GHz-band:
<https://www.internetconsultatie.nl/marktconsultatie26ghzband/reactie/eb24ff-c8b8-4b04-aa4b-174ee4f6e29a>

³⁷ <https://www.networkworld.com/article/3531319/enterprises-roll-out-private-5g-while-waiting-for-standards-devices-coverage.html>

ondersteuning van mobiliteit geboden doordat het lichtsignaal erg gevoelig is voor variaties in de kwaliteit van het optische communicatie-pad door fysieke blokkering en reflecties. Daarnaast gelden voor inzet ten behoeve van kritische communicatie en genoemde IoT-toepassingen van verhuurde apparaten of diensten dezelfde beperkingen als voor Wi-Fi. Tenslotte is het nog de vraag in hoeverre de toepassing van (indoor) *private Li-Fi* zodanig omgevingsafhankelijk is dat deze per geval goed moet worden overwogen en (vervolgens) zorgvuldig moet worden geïnstalleerd.

Intrinsieke voordelen van Li-Fi (zie ook de Monitor-voorjaarseditie uit 2018) lenen zich wellicht eerder voor specifieke omgevingen en toepassingen zoals daar waar elektromagnetische velden verstorend kunnen zijn, zoals in operatiekamers. Ook kan gedacht worden aan plaatsen waar veel interferentie in het radiospectrum wordt gegenereerd, zoals in de buurt van lasrobots. Een Li-Fi systeem zou eventueel wel aanvullend kunnen zijn op een *private network* in het radiospectrum op plekken met veel gebruikers in relatief statische situaties, waaronder kantoren, fabrieken en ziekenhuizen, om meer capaciteit te creëren.

2.4 Technische ontwikkelingen voor communicatie over zeer korte afstanden, anders dan Wi-Fi

2.4.1 Inleiding

In de voorjaarseditie van de Monitor van 2019 is uitgebreid aandacht besteed aan de ontwikkelingen rond Wi-Fi. In de voorjaarmonitor van 2020 is er dan ook voor gekozen in deze paragraaf enkele belangwekkende RF-technologieën te behandelen die bedoeld zijn voor nog kortere afstanden. Hierbij moet worden gedacht aan toepassingen zoals *smart home*, Personal Area Networks (PAN's) en *automotive*, waar de bedoeling is afstanden tot hooguit 10 m of zelfs slechts tot binnen een meter te overbruggen.

2.4.2 Meest gangbare protocollen

Er staat de laatste jaren een veelheid aan zowel open als fabrikanteigen, gepatenteerde protocollen ter beschikking voor zeer korte afstanden. De meest toegepaste zijn wel Zigbee, Bluetooth, Z-Wave en Thread³⁸. In de laatste jaren is ook IoT en vooral Industrial IoT, een belangrijke driver geworden van deze protocollen. Dit geldt vooral voor Zigbee, gevolgd door Bluetooth Low Energy (BLE)³⁹, terwijl Thread en Z-Wave voornamelijk op de consumentenmarkt worden gebruikt, bij uitstek voor *smart home* oplossingen.

In de voorjaarsmonitor van 2016⁴⁰ is al het belang van Bluetooth, NFC (Near Field Communication) en Zigbee voor providers onderkend vanwege hun *enabling* van geavanceerde internetdiensten. Voor technische achtergrond van deze protocollen zij verwezen naar deze Monitor-editie uit 2016.

In aanvulling op deze beschrijvingen kan worden opgemerkt dat:

- Met de komst van Bluetooth 5.1 in 2019 dit protocol een nieuwe *direction finding feature* heeft die de nauwkeurigheid van de bestaande lokalisatiefunctie heeft verbeterd van enkele meters tot op tien centimeter⁴¹.
- Op het gebied van NFC is medio 2019 vanuit het NFC Forum voorzien in een gestandaardiseerde tweewegcommunicatie met IoT devices⁴². Dit betekent dat behalve het lezen van een dergelijk apparaat ook het veranderen van de toestand ervan mogelijk wordt, bijvoorbeeld het lezen van een actuele muziektitel en vervolgens het bijstellen van het volume. Verder is er de tendens dat NFC in toenemende mate ook voor het vergemakkelijken van overheidsdiensten wordt ingezet. Zo is het in Nederland sinds eind 2019 mogelijk om via een DigiD-app voor iPhone, de NFC-chip in officiële identiteitsbewijzen te verifiëren zodat gevoelige informatie beschikbaar komt voor de gebruiker⁴³. Hierdoor kan deze zaken op afstand regelen zoals het overschrijven van een auto bij de RDW (Rijksdienst voor Wegverkeer). Voor wat betreft het spectrale gebruik zijn rond NFC geen ontwikkelingen te melden.

³⁸ <https://www.smarthomeweb.nl/smart-home-beginnen/protocollen/>

³⁹ <https://www.digikey.nl/nl/articles/techzone/2019/dec/use-multi-protocol-multi-band-wireless-socs-for-iiot-networks>

⁴⁰ <https://publications.tno.nl/publication/34620447/C2f9S9/TNO-2016-R10467.pdf>, blz. 25-32

⁴¹ <https://tweakers.net/nieuws/148468/bluetooth-51-bevat-functie-om-heel-nauwkeurig-apparaten-te-lokaliseren.html>

⁴² <https://nfc-forum.org/nfc-forum-enhances-connectivity-of-iiot-devices-with-new-and-updated-specifications/>

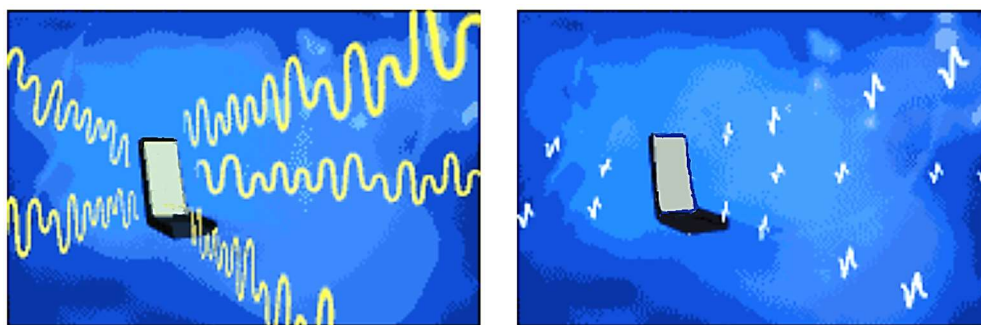
⁴³ <https://www.bright.nl/nieuws/artikel/4917341/digid-app-voor-iphone-kan-nfc-chip-paspoorten-controleren>

2.4.3 UWB

Voor de ultrakorte afstanden (ruim binnen een meter) is naast NFC ook UWB (Ultra Wide Band) steeds meer in beeld gekomen. Deze technologie zal in deze paragraaf nader belicht worden.

2.4.3.1 Wat is UWB?

UWB is een radiotechniek waarbij een zender hele zwakke, zeer kortdurende pulsen uitzendt, zie **Figuur 5**. Daarbij wordt geen draaggolf gebruikt. Toch is er sprake van modulatie: de afstand tussen de pulsen is namelijk een maat voor de actuele waarde van het informatiesignaal- in principe een bit, dus een logische '0' of '1'. Deze techniek wordt tijdmodulatie (TD) genoemd. De bijbehorende vorm van UWB wordt dan ook aangeduid met TD-UWB. Ook kan ervoor worden gekozen de polariteit van de pulsen te gebruiken om de over te brengen informatie te coderen.



Figuur 5: Radiosignalen van conventionele radiotechnieken (l) vergeleken met die van UWB (r)

UWB heeft voordelen boven andere radiotechnologieën⁴⁴. Duidelijk is bij UWB sprake van een zeer laag gemiddeld zendvermogen, mede door de lage *duty cycle*: de verhouding tussen puls-duur en de tijd tussen opeenvolgende pulsen. Dit heeft niet alleen laag accu- en batterijverbruik tot gevolg maar bevordert ook de bescherming van informatie die wordt overgebracht. Verder impliceert de korte duur van de pulsen de mogelijkheid tot nauwkeurige positiebepaling, waarover meer in de volgende paragraaf.

In praktische UWB-systemen zal de vorm van de idealiter rechthoekige pulsen worden 'afgerond' waardoor het bandbreedtebeslag kan worden beperkt.

Naast de 'basisvorm' TD-UWB ofwel (*im*)*pulse radio*, zijn aanvankelijk diverse, onderling concurrerende vormen van UWB voorgesteld waaronder MB-OFDM (Multiband Orthogonal Frequency Division Multiplexing) en DS (Direct Sequence)-UWB⁴⁵.

Bij MB-OFDM past de zender tegelijkertijd honderden draaggolven in een band van ruim 500 MHz toe. Om de microseconde springt de zender naar een andere frequentiegebied om het vermogen binnen de band laag te houden. Een bijkomend voordeel van het gebruik van OFDM bij deze UWB-vorm is dat het signaal robuuster wordt tegen meerweg-propagatie. Dit laatste ontstaat door weerkaatsing van radiosignalen door diverse oppervlakken en wordt ook wel *multipath* genoemd.

⁴⁴ <https://www.computable.nl/artikel/achtergrond/mobility/1679267/1444691/ultra-wideband-vleugellam.html>

⁴⁵ <https://bits-chips.nl/artikel/ultrawideband-in-opkomst/>

DS-UWB gebruikt geen draaggolven maar verdeelt de pulsen in deelpulsen volgens een quasi-random gecodeerd patroon, aangegeven met een digitale sleutel. Aan de ontvangtzijde is deze sleutel nodig om de informatie te decoderen. Inherent is bij DS-UWB dus sprake van een vorm van beveiliging.

Verder hebben beide vormen van UWB hun voor- en nadelen op het gebied van bandbreedtebeslag, kosten van hardware en gevoeligheid voor radiopropagatie-omstandigheden⁴⁶. Voor toepassingen voor de zeer korte afstand slaat de balans door naar DS-UWB, die het dichtste bij de basisvorm van UWB ligt.

2.4.3.2 *Communicatietoepassingen van UWB*

Tijdens de periode tussen circa 2002 en 2006 was UWB een hype. Hoewel UWB in principe ook voor radar gebruikt kan worden, beperkt deze paragraaf zich tot de meer gangbare toepassingen communicatie en plaatsbepaling.

De UWB-technologie werd naast middel voor de zeer korte afstanden zoals voor draadloze muizen en toetsenborden⁴⁷ en specifiek draadloze USB, zelfs gezien als mogelijk concurrerend met mobiele communicatietechnologieën van die tijd, dat wil zeggen met 3G⁴⁸. Duidelijk hebben mobiele communicatietechnologieën van de met name de daarop volgende generatie de concurrentieslag van UWB gewonnen.

De UWB-technologie lijkt echter in recente jaren weer te zijn herontdekt door in eerste instantie de *automotive* sector voor toepassingen als het draadloos overbrengen van voorkeursinstellingen van de automobilist of passagier, draadloze sleutels, automatisch betalen bij parkeren en tanken en dergelijke.

Halfgeleiderfabrikant NXP heeft eind 2019 een UWB-chip aangekondigd waardoor de autosleutel-functie in een smartphone kan worden ondergebracht⁴⁹. Voor veel toepassingen is het belangrijk dat UWB tegelijk met ultrakorte afstandscommunicatie precieze, real-time locatiebepaling van het apparaat ten opzichte van andere UWB-empowered apparaten mogelijk maakt. Vooral in indooromgevingen is dit krachtig omdat daar GPS-dekking onzeker is. Hoe dan ook haalt GPS de precisie van UWB-lokalisatie, die ligt in de orde van enkele centimeters, bij lange na niet. Hierdoor kan UWB naast voor *automotive*-applicaties voor IoT-toepassingen worden gebruikt zoals toegang van personen en draadloze betalingstransacties waarbij dan tevens, bijvoorbeeld voorafgaand aan de transactie, precieze plaatsbepaling van het apparaat wordt doorgegeven. Ook kan UWB gebruikt worden voor het volgen van allerlei producten en objecten zoals gereedschap en bagage. UWB is al opgenomen in sommige moderne smartphones voor onderlinge gegevensuitwisseling en voor het lokaliseren van objecten⁵⁰.

IMEC biedt een Ultra Low Power Impulse Radio UWB zendontvanger⁵¹ aan voor lokalisatie en streaming toepassingen. Deze is compliant met de standaard IEEE802.15.4a. De datasnelheid is instelbaar van 110 kbit/s tot 27 Mbit/s.

⁴⁶ J.I. Agbinya et al: *Advances in Broadband Communication and Networks*, pp. 178-188. River Publishers, Aalborg 2008, ISBN 978-87-92329-00-4

⁴⁷ http://www.gemex.nl/nl/html/ultra_wide_band.html

⁴⁸ <https://www.computable.nl/artikel/nieuws/mobility/1795764/250449/ec-keurt-uwb-goed-voor-gebruik-binnenshuis.html>

⁴⁹ <https://media.nxp.com/news-releases/news-release-details/nxp-announces-new-automotive-ultra-wideband-chip-capable-turning/>

⁵⁰ <https://tweakers.net/nieuws/160814/apple-iphone-11-vraagt-locatie-zonder-toestemming-op-vanwege-ultrawide-band.html>

⁵¹ <https://www.imec-int.com/en/ulp-ir-uwb-radio>

2.4.3.3 Regelgeving

Alle protocollen voor de zeer korte afstand die in de inleiding zijn genoemd, werken in licentievrije frequentiebanden. Het frequentiebeslag voor UWB is door de werking van deze technologie per definitie echter veel groter dan bij de andere technieken zoals NFC waardoor UWB buiten de gangbare licentievrije band rond 2,4 GHz opereert. Het zendvermogen is echter over deze grotere bandbreedte verspreid zodat de dichtheid navenant kleiner is dan bij de andere technieken voor de zeer korte afstand.

Het bandbreedtebeslag van UWB stuitte echter op bezwaren van de gevestigde spectrumgebruikers aangezien zij vreesden voor interferentie van UWB op andere draadloze systemen. De Europese regelgeving kwam hieraan tegemoet door zodanig lage maximale elektromagnetische emissieniveaus vast te stellen dat het UWB-bereik in de praktijk beperkt werd tot circa tien meter. Bovendien werd het gebruik tot indoor beperkt. Voor UWB voor communicatie- en meetdoeleinden werd ook in Europa in 2007 de frequentieband 3,1 tot 10,6 GHz aangewezen.

De gevoeligheid van de huidige vorm van UWB, TD-UWB, voor (zelf)verstoring door multipad en voor interferentie veroorzaakt door andere UWB-gebruikers is vooral erg afhankelijk van het aantal gelijktijdige UWB-gebruikers, de datasnelheid en de fysieke omgeving⁵². Vanuit de literatuur komt op dit gebied dan ook geen eenduidig, algemeen beeld naar voren. Een beeld vanuit een inschatting op basis van een kansberekening, waarbij de geringe *duty cycle* als bepalend voordeel wordt gezien, mag als te eenvoudig worden beschouwd. Wel mag gesteld worden dat het probleem niet wezenlijk optreedt voor afstanden binnen circa 10 cm. In het algemeen zijn gangbare tegenmaatregelen zoals *echo cancellation* en *spread spectrum* coderingsmethoden beschikbaar om deze vormen van verstoring tegen te gaan.

De nodige studies rond co-existentie met andere draadloze systemen hebben uiteindelijk in mei 2019 geleid tot een besluit van de Europese Commissie rond spectrumharmonisatie voor UWB in Europa⁵³. Volgens dit besluit is UWB toegestaan op basis van non-interferentie indien de apparatuur uitzendt onder de (frequentieafhankelijke) vermogenslimieten en in principe sprake is van indoor gebruik. Bij outdoor gebruik mag de apparatuur op geen enkele wijze verbonden zijn met een vaste opstelling, -infrastructuur of -buitenantenne. Recent is daarmee dus de toepassingsmogelijkheid van UWB vooral in mobiele apparatuur, binnen Europa vergroot.

2.4.3.4 UWB-standaardisatie

Met de 'herontdekking' van UWB hebben technologiebedrijven en eindgebruikers in december 2018 de *UWB Alliance* opgericht met als primaire doelstelling een hoge mate van wereldwijde interoperabiliteit en standaardisatie tot stand te brengen en hierdoor, naast voorlichting rond UWB, de ontwikkeling en het gebruik van deze technologie te bevorderen⁵⁴. In eerste instantie begon de alliantievorming in 2017 met bedrijven uit de sectoren *automotive* en toegangscontrole maar maken

⁵² <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016003215003853>

⁵³ Commission Implementing Decision (EC) 2019/785 of 14 May 2019: 'On the harmonisation of radio spectrum for equipment using ultra-wideband technology in the Union and repealing Decision 2007/131/EC'

⁵⁴ <https://www.rfidjournal.com/articles/view?18219>

inmiddels ook fabrikanten van smartphones, audioapparatuur en robots deel uit van de UWB Alliance.

De fysieke radioaspecten (inclusief radiofrequente beveiliging door gecodeerde puls-positieoffset) en de radiotoegangsfunctie van UWB zijn inmiddels gestandaardiseerd door ISO en in IEEE 802.15.4a (*pulse radio*). Het streven is om ten behoeve van volwaardige interoperabiliteit ook andere functies te standaardiseren zoals een *multi-layered* beveiliging conform de beveiligingsarchitectuur voor NFC.

De UWB Alliance maakt zich ook sterk om met de uitbreiding van de Wi-Fi band in 6 GHz in de VS, door dialoog binnen de IEEE co-existentie met UWB te bewerkstelligen. Richting Europa is er samenwerking met ETSI.

2.4.4 *Conclusie*

Open protocollen, van belang voor interoperabiliteit, voor communicatie over zeer korte afstanden (tot circa 10 m) zijn in recente jaren gestabiliseerd. Wi-Fi buiten beschouwing gelaten, gaat het hier om Bluetooth Low Energy, Zigbee, NFC en UWB. Daarbij is voor alle technologieën IoT de belangrijkste driver. Veel van deze toepassingen vereisen tweewegcommunicatie en daarbij nauwkeurige positiebepaling.

Zichtbaar wordt dan ook dat op het gebied van deze toepassingen genoemde protocollen onderling concurreren. Daarbij is de laatste jaren UWB 'herontdekt' omdat deze technologie een aantal voordelen: laag gemiddeld zendvermogen, hoge lokalisatieprecisie en -snelheid, combineert en bovendien zeer energiezuinig is en kosteneffectief geïmplementeerd kan worden. Onderscheidend te opzichte van andere protocollen is echter dat de juist genoemde voordelen van UWB een intrinsieke mate van veiligheid in aanvulling op de gangbare beveiligingstechnieken oplevert. Vooral met de binnen Europa verruimde regelgeving en de oprichting van de *UWB Alliance* lijkt de weg open voor UWB als concurrerende en interoperabele draadloze communicatietechnologie. Aan de andere kant maakt deze alliantie zich ook sterk voor het bevorderen van de co-existentie met andere protocollen voor de zeer korte afstand.

2.5 Nabeschuiving van WRC 2019

2.5.1 Inleiding

De WRC ofwel World Radiocommunication Conference wordt doorgaans eens in de vier jaar gehouden. Tijdens deze omvangrijke conferentie worden nieuwe afspraken gemaakt over het frequentiegebruik en satellietbanen die in de ITU (International Telecommunication Union) Radio Regulations worden vastgelegd. Deze afspraken zijn het resultaat van uitgebreide studies, intensieve discussies en voorbereidingen van besluiten in draft documenten. Deze activiteiten vinden plaats binnen verschillende werkgroepen onder de ITU en beslaan de vier jaar in de aanloop naar een WRC. De uiteindelijke besluiten in de plenaire bijeenkomsten van de WRC, vastgelegd in de *Final Acts*, vormen het uitgangspunt voor het spectrumbeleid in de individuele landen waaronder Nederland. De meest recente WRC, de WRC 2019, vond plaats van 28 oktober tot en met 22 november 2019 in Egypte.



Figuur 6: Plenaire WRC-bijeenkomst met duizenden deelnemers [bron: ITU Pictures]

2.5.2 Belangrijke uitkomsten uit de WRC 2019

Vanuit met name de ITU^{55,56}, het verslag van AT (Agentschap Telecom)⁵⁷ en het Nationaal Frequentiebeleidsoverleg van 20 februari 2020 zijn voor wat betreft de WRC 2019 de volgende *highlights* te melden:

Terrestrische en semi-terrestrische telecommunicatie:

- Voor een beperkt aantal landen of regio's is **extra spectrum voor 5G** vastgesteld voor de frequentiebanden 24,25-27,5 GHz, 37-43,5 GHz en 66-71 GHz. Door de wereldwijde harmonisatie van frequentiebanden worden de standaardisatie en ontwikkeling van vijfde generatie (5G) mobiele communicatieapparatuur voor deze banden bevorderd;
- Wat betreft het gebruik van de band 24,25 -27,5 GHz (de zogenaamde **26 GHz band**) is bepaald dat met het oog op de bescherming van de Earth Exploration Satellite Service (EESS) *passive* in de band 23,6-24 GHz een 'tweetraps bescherming' plaatsvindt. Hierbij zijn tot en met 2027 minder strikte waarden van toepassing op het internationale mobiele telecommunicatiesysteem (IMT) waarna de limiet aangescherpt wordt⁵⁸. Bovendien is afgesproken dat het niet de bedoeling is om in de aanpalende band van *EESS passive* beneden de 23,6 GHz mobiele applicaties met hoge dichtheid te gebruiken.

⁵⁵ www.itu.int/en/mediacentre/Pages/2019-PR24.aspx

⁵⁶ https://www.itu.int/en/itunews/Documents/2019/2019-06/2019_ITUNews06-en.pdf

⁵⁷ www.magazines.agentschaptelecom.nl/ontwikkelingenindeether/2019/12/terugblik-wrc-2019.pdf

⁵⁸ Dat wil zeggen van -33 dBW/200 MHz voor de basisstations naar -39 dBW/200 MHz

- Wereldwijde toewijzing van de frequentieband 38-39,5 GHz voor platformsystemen op grote hoogte ofwel **High Altitude Platform Station systems (HAPS)**⁵⁹, zie ook Paragraaf 2.1 . Dit zijn radiosystemen die zich aan boord van ballonnen of Unmanned Aerial Vehicles (UAV's) in de stratosfeer bevinden. Deze systemen realiseren telecommunicatie met een groot dekkingsgebied op aarde. Hierdoor wordt betaalbare breedbandtoegang in landelijke en afgelegen gebieden mogelijk. Specifiek kunnen HAPS worden ingezet om **bij rampen en calamiteiten getroffen gebieden waar de telecommunicatievoorzieningen zijn weggefallen van tijdelijke verbindingen te voorzien**. Eveneens vormen HAPS een alternatief voor het realiseren van mobiele communicatie naast de 5G-satellietcomponent die wordt ontwikkeld;
- Voor de **maritieme sector** zijn afspraken gemaakt rond het frequentiegebruik van autonome maritieme radiotoepassingen, waaronder voor Man Overboard (MOB)-apparatuur. Daarnaast zijn afspraken gemaakt over de toekomstige implementatie van het maritieme VHF Data Exchange System (VDES) dat de functies van VHF Data Exchange (VDE), Application Specific Messages (ASM) en het Automatic Identification System (AIS) integreert in de maritiem-mobiele marifoonband (156,025-162,025 MHz).

Satellietcommunicatie (satcom):

- Afspraken zijn gemaakt om de dienst **Earth Exploration Satellite Service (EESS) passive** te beschermen zoals boven beschreven. Bij deze dienst moet gedacht worden aan satellietvolgsysteem, -telemetrie (voor weersverwachtingen en klimaatonderzoek) en -beheer;
- Regelgevingsprocedures zijn onder meer vastgesteld voor **niet-geostationaire satellietconstellaties** ten behoeve van mobiele en niet-mobiele (*fixed*) satcom-toepassingen. Deze procedures zijn voor realisatie van communicatiemogelijkheden van de volgende generatie satcom van groot belang. Dit betreft zogenaamde mega-constellaties van satellieten die bestaan uit tientallen tot duizenden pico-, nano- en wat minder kleine satellieten in een lage baan (beneden de 700 km) om de aarde. Deze mega-constellaties werken onder meer in de banden 137-138 MHz en 148-149,9 MHz en worden populair voor de realisatie van wereldwijde telecommunicatie, *remote sensing* ('teledetectie'), ruimte- en atmosferisch onderzoek, meteorologie, astronomie, IoT, breedband internettoegang en tenslotte voor technologiedemonstraties en onderwijsdoeleinden;
- Wijzigingen in de internationale regelgeving, de ITU Radio Regulations, zijn ingevoerd ter **vereenvoudiging van efficiënt en economisch gebruik van frequentiebanden en de bijbehorende satellietbanen**, inclusief de geostationaire. Voor Nederlandse satellietoperators is de verbeterde helderheid, met name rond het gebruik van de banden 399,9-400,05 MHz, 17 en 27 GHz van belang voor de voorbereiding van de uitrol van hun netwerk(en);
- Frequentiebanden boven 30 GHz, de zogenaamde Q- en V-banden, zijn aangewezen voor **gezamenlijk gebruik** door geo- en non-geostationaire satcom;
- Frequentietoewijzingen voor de omroepsatellietdienst (**Broadcasting Satellite Service ofwel BSS**) zijn van oudsher beschermd. Een prioriteitsmechanisme

⁵⁹ <https://news.itu.int/wrc-19-identifies-additional-frequency-bands-for-high-altitude-platform-station-systems/>

voor ontwikkelingslanden wordt geboden om deze betere toegangsmogelijkheden te verlenen;

- Voorzien is in uitgebreide dekking en verbeterde mogelijkheden voor het **Global Maritime Distress and Safety System (GMDSS)**. Positief voor de Nederlandse maritieme sector is dat er nu concurrentie is ontstaan omdat naast INMARSAT ook Iridium GMDSS-diensten zal kunnen aanbieden en wel in de band 1621,35-1626,5 MHz;
- Technische en procedurele regelgeving is overeengekomen om het gebruik van **Earth Stations In Motion (ESIM)** onder strikte technische voorwaarden mogelijk te maken in de banden 17,7-19,7 GHz en 27,5-29,5 GHz. Deze regelgeving biedt een eenvoudigere uitrol van de mobiele satellietstations in vliegtuigen, schepen en treinen in banden die zijn gealloceerd voor Fixed Satellite Services (FSS).

Lokale draadloze toegangssystemen:

- Met betrekking tot de **band 5150-5250 MHz** is een beperkte verruiming voor buitengebruik toegestaan (tot 2%), alsmede voor het gebruik in treinen en auto's. Een resolutie over **spoorwegradiocommunicatiesystemen** (tussen trein en baanapparatuur) is goedgekeurd.

Diverse:

- Rond **Intelligente transportsystemen (ITS)** is een nieuwe ITU-aanbeveling of *Recommendation* goedgekeurd ter bevordering van studies naar gebruik van nieuwe technologie om ICT-systemen te integreren in evoluerende intelligente transportsystemen (ITS) om voertuigen te verbinden, verkeersmanagement te verbeteren en veiliger rijden te ondersteunen.

2.5.3 Korte voorbeschuiving van de WRC 2023

Voor de volgende WRC zijn onder andere de volgende onderwerpen op de agenda gezet:

- Het beoordelen van het spectrumgebruik en de spectrumbehoeftes van de bestaande diensten in de frequentieband 470-960 MHz in ITU Regio 1 en voor deze regio het overwegen van mogelijke regelgevende acties in de frequentieband 470-694 MHz op basis van voornoemde beoordeling,
- Mogelijke bescherming van mobiele diensten in de band 4,8–4,99 GHz voor lucht- en zeevaart tegen stations die opereren vanuit nationaal grondgebied;
- Overwegen van de banden 3,3-3,4 GHz, 3,6-3,8 GHz, 6,425-7,025 GHz en 10-10,5 GHz voor het IMT, inclusief mogelijke additionele primaire allocatie voor mobiele diensten, specifiek 3,6-3,8 GHz voor Regio 1;
- Beschouwing van spectrum voor smalbandige toepassingen, anders dan voor collectieve satelliet-tv ofwel GSO: Gemeenschappelijke Satelliet Ontvangst;
- Regeling van de condities voor de operationalisering van *sub-orbital vehicles*.

De nationale voorbereidingscommissie (NVC) voor het vaststellen van de Nederlandse posities zal naar verwachting pas na de zomer van 2020 kunnen plaatsvinden.

Verder zijn voor de WRC 2023 onderwerpen geagendeerd zoals het nader uitwerken van de voorwaarden voor ESIM en in hoeverre voor 5G-basisstations aan boord van HAPS gebruik gemaakt kan worden van dezelfde frequentiebanden als voor aardse 5G-basisstations. Er zullen diverse mobiele communicatietoepassingen voor de luchtvaart worden geagendeerd waaronder de modernisering van HF-radio, nieuwe mobiele toepassingen voor lucht-lucht, grond-lucht en lucht-grond

communicatie van vliegtuigsystemen, anders dan voor de vliegveiligheid. Mogelijk worden ook nieuwe toewijzingen voor de mobiele satellietcommunicatiedienst voor de luchtvaart behandeld ter ondersteuning van de VHF-communicatie. Ook zal de modernisering van het GMDSS in 2023 op de WRC-agenda staan. Het gaat dan in ieder geval om review van het huidige systeem en om extra spectrum- en satellietbronnen voor de verbetering van maritieme mogelijkheden van het GMDSS zoals ten behoeve van e-navigatie.

3 Tot besluit

Voor eventuele vragen of opmerkingen naar aanleiding van deze Monitor Draadloze Technologie kunt u contact opnemen met TNO, via e-mail adres monitordraadlozetechnologie@tno.nl.

Graag wijzen wij u op de mogelijkheid om deze Monitor Draadloze Technologie, of delen daarvan, door TNO te laten presenteren voor doelgroepen binnen de Nederlandse telecommunicatiesector. Voor verdere informatie hierover verzoeken wij u contact op te nemen via bovengenoemd e-mail adres, of met één van de auteurs van dit rapport.