

TNO PUBLIEK

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

www.tno.nl

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

TNO-rapport

TNO 2021 R10974 | Eindrapport

Monitor Draadloze Technologie Voorjaar 2021



Datum	juni 2021
Auteur(s)	Ir S. Braam, Dr. K. Das, Ir. H.J. Dekker, Ir. R. Overduin
Exemplaarnummer	
Oplage	
Aantal pagina's	46 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	
Opdrachtgever	Ministerie van Economische Zaken en Klimaat
Projectnaam	Monitor Draadloze Technologie 2021
Projectnummer	060.47269

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.

© 2021 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	DECT	5
2.2	Non-geostationaire satellietnetwerken voor communicatie	14
2.3	Small cell-systemen voor 5G openbare mobiele communicatie	22
2.4	Lokalisatie in mobiele netwerken.....	31
2.5	Open RAN	39
3	Tot besluit.....	46

1 Inleiding

Om overzicht te bieden in het speelveld van de diverse draadloze technologieën, stelt TNO sinds een aantal jaren 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. Het gaat dan om de voortdurende standaardisatie, ontwikkeling en beproeving van mobiele en draadloze communicatiesystemen naast de commerciële uitrol van 5G.

Deze voorjaarseditie geeft in Paragraaf 2.1 voor het eerst na meer dan tien jaar weer een uiteenzetting van de welbekende standaard DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunications). Deze keuze is ingegeven door nieuwe standaardisatie-ontwikkelingen onder de benaming DECT-2020 die in de loop van vorig jaar zijn ingezet. De ambitie van het DECT Forum is om DECT-2020 een onderdeel te laten uitmaken van IMT-2020 ofwel International Mobile Telecommunications 2020, de door de ITU (International Telecommunications

Union) gedefinieerde 5G-standaard en set specificaties. Het definitieve voorstel zal in het najaar aan de ITU-R worden aangeboden.

In aansluiting op de integratie van satellietcommunicatie in een 5G-netwerk die vorig jaar in de voorjaarseditie is behandeld, zal in Paragraaf 2.2 specifiek ingegaan worden op het onderwerp non-geostationaire satellietnetwerken met een nadruk op LEO (Low Earth Orbit)-constellaties. Rond deze technologie bestaat nog steeds een spanningsveld tussen voor Nederland interessante mogelijkheden, geboden door de combinatie lage vertraging en grote effectieve dekking en uitdagingen waaronder het tegengaan van interferentie met andere satellietssystemen en het bestrijden van ruimtepuin.

Medio 2020 is de Europese Unie gekomen met wetgeving ten aanzien van de fysieke en technische eigenschappen van *small cell*-systemen. Tezamen met de commerciële beschikbaarheid van 3,5 GHz biedt deze zogenaamde EU-uitvoeringsverordening concrete mogelijkheden voor het uitrollen van 5G small cells voor publiek gebruik. Met name de technische aspecten daarvan zullen in Paragraaf 2.3 aan bod komen. Daarbij is gekozen voor de beschouwing van de outdoor 5G-uitvoeringsvorm.

Vervolgens wordt in Paragraaf 2.4 ingegaan op lokalisatie in mobiele netwerken. Dit is niet eerder als specifiek onderwerp in de Monitor behandeld. Het toenemende belang van betrouwbare en nauwkeurigere positie-informatie voor tal van toepassingen rechtvaardigt inmiddels een focus op dit onderwerp. Vanuit historisch perspectief wordt ingezoomd op de technieken en perspectieven voor huidige en toekomstige mobiele communicatiesystemen.

Tot slot richt Paragraaf 2.5 zich op *Open RAN* (Radio Access Network). Dit concept brengt de interoperabiliteit tussen software-componenten van verschillende leveranciers op een open gestandaardiseerde wijze tot stand. Open RAN speelt in op de trend dat steeds meer functies in software worden uitgevoerd, zo ook voor een RAN. Tot voor kort was een RAN een gesloten platform waarop hardware en software waren geïntegreerd. Met Open RAN wordt *vendor lock-in* voor MNO's voorkomen terwijl vanuit de ontwikkelwereld ook kleinere partijen toegang krijgen en de concurrentie op de implementatiemarkt wordt vergroot.

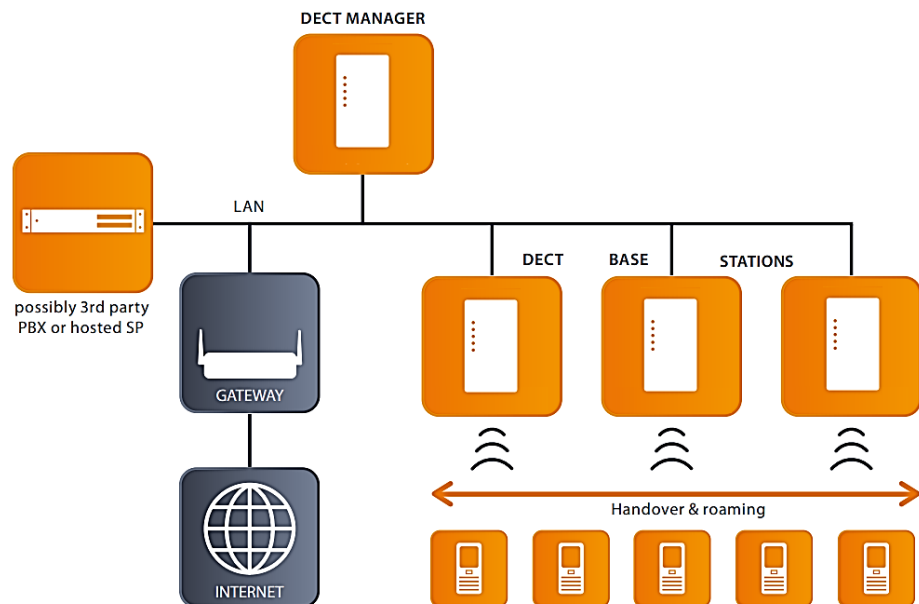
2 Ontwikkelingen in draadloze technologie

2.1 DECT

2.1.1 Inleiding

DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunications) is een protocol voor draadloze communicatie dat van oorsprong primair wordt gebruikt voor draadloze (dus niet-mobiele) telefoons, babyfoons en daarnaast data. Het protocol is gestandaardiseerd door de ETSI TC DECT-werkgroep als EN 300 175 en beschrijft alle functielagen van het OSI-model. De standaard wordt continu uitgebreid met nieuwe toepassingen waardoor DECT niet alleen maar voor spraak maar in toenemende mate ook voor velerlei datatoepassingen gebruikt kan worden.

In essentie is de basisstructuur van DECT¹ eenvoudig, zie Figuur 1.



Figuur 1: DECT-basisstructuur (eventuele repeaters zijn niet aangegeven) [bron: GigasetPro]

Een DECT-netwerk kan bestaan uit een of meerdere basisstations die via een kabel of LAN op het internet zijn aangesloten. DECT basisstation-functionaliteit wordt ook door sommige routers ondersteund zodat DECT niet alleen voor koperlijnen maar ook voor glasvezelaansluitingen en -modems mogelijk is.

Om van basisstation te wisselen in een meercellig DECT-netwerk wordt de oproep doorgeschakeld naar een andere cel op basis van het basisstation met het sterkste signaal (*handover*). Daarnaast ondersteunt DECT *roaming* tussen diverse DECT-netwerken. De gebruiker kan in principe ook handmatig verbinding maken met een ander basisstation of een ander basisnetwerk.

¹ https://www.gigasetpro.com/fileadmin/user_upload/downloads/dutch/systemen/n720/N720_NL.pdf

De draadloze dekking kan door inzet van *repeaters* worden vergroot. Ook bieden sommige fabrikanten door 'vast-mobiel integratie' van DECT in mobiele telefoons de mogelijkheid voor verdere extensie van de effectieve reikwijdte².

DECT heeft een ingebouwd tweewegs-authenticatie beveiligingsprotocol. De standaardversleuteling voor DECT-apparaten is 64-bits maar sommige fabrikanten gebruiken ook zwaardere coderingen³.

De DECT-standaard bevat een generiek toegangsprofiel (GAP: Generic Access Profile) voor de interoperabiliteit van eenvoudige telefoonopties zodat de DECT-apparatuur en -handsets van diverse fabrikanten samen kunnen werken op het niveau van het maken en ontvangen van oproepen. DECT-apparatuur wordt onder meer geleverd door Gigaset (Siemens), Alcatel, Yealink en Panasonic.

De ETSI-werkgroep krijgt input van verschillende industrieallianties, zoals het DECT Forum en de ULE (Ultra-Low Energy) Alliance. Deze zijn verantwoordelijk voor respectievelijk de in 2013 gestandaardiseerde DECT New Generation/CAT-iq (Cordless Advanced Technology - *internet and quality*)-varianten, DECT ULE (ETSI TS 102 939-01) en de recente DECT-2020 NR (New Radio).



Figuur 2: DECT evolutie [bron: DECT Forum]

De DECT-standaarden en -technologieën zijn als mijlpalen in Figuur 2 in chronologie aangegeven en de belangrijkste zullen in navolgende paragrafen worden besproken in de volgorde waarin zij tot stand kwamen. Ter afsluiting volgt een korte bespreking van de uitvoeringen van DECT-apparatuur en van marktperspectieven. Eerst zal worden ingegaan op het spectrum voor DECT-systemen.

2.1.2 Spectrum voor DECT

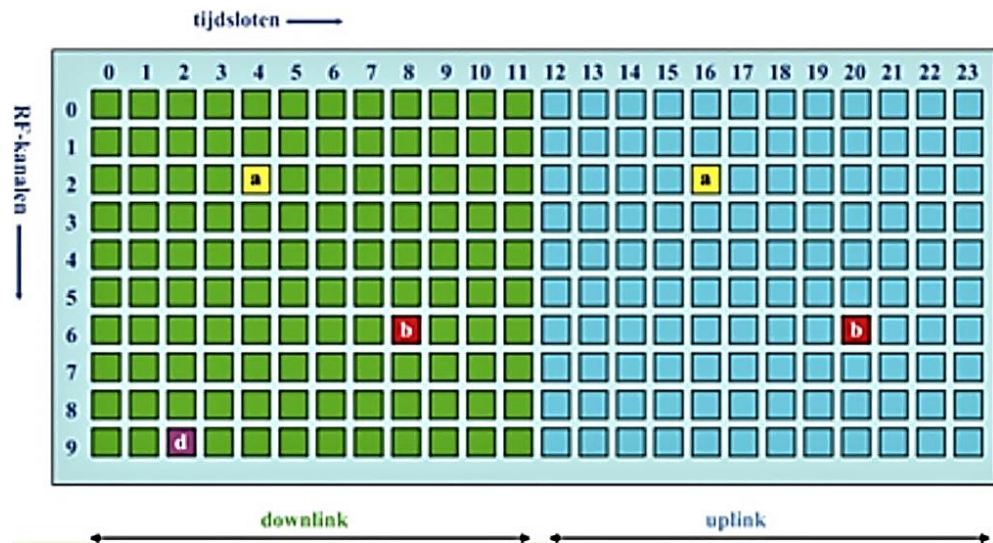
2.1.2.1 In Europa

DECT heeft een eigen frequentieband. Deze 1880-1900 MHz-band in onder meer Europa is vergunningsvrij maar is desondanks exclusief gereserveerd voor DECT. Hierdoor heeft DECT vrijwel geen last van storingen waardoor intrinsiek voordeel bestaat in termen van betrouwbaarheid en bereik. Deze 20 MHz van het radiospectrum wordt verdeeld in 10 kanalen met een tussenruimte van 1,728 MHz.

² <https://voclarion.nl/blog/dect-telefonie-in-zakelijke-omgeving/>

³ https://www.gigaset.com/hq_en/cms/dect.html

Het laagste kanaal is 1881,792 MHz en het hoogste is 1897,344 MHz. Zoals aangegeven in Figuur 3 bestaat elk kanaal uit 12 uplink- en 12 downlink tijdsloten van elk 10 ms.



Figuur 3: DECT-kanaalindeling met tijdslotstructuur [bron: Bits & Chips]

Daarnaast was oorspronkelijk een *guard band* aanwezig (van 1782,5 tot 1785 en van 1877,5 tot 1880 MHz) om storing op nabije frequenties voor mobiel gebruik te voorkomen, destijds in gebruik door GSM1800. Deze *guard band* is sinds 2011 vrijgegeven voor laagvermogen mobiele communicatietoepassingen die vergunningsvrij kan worden gebruikt⁴. De *installed base* van DECT in Nederland is nog zodanig groot dat op nationaal niveau geen plannen bestaan voor de herbestemming van de eigenlijke DECT-band.

Voor de nieuwste versie DECT-2020 (zie Paragraaf 2.1.5) bespreekt CEPT naast de oorspronkelijke *core band* van 1880-1900 MHz een uitbreiding voor Europa tussen 1900 en 1920 MHz. Voor Groot-Brittannië is mogelijk nog ruimte in 3,8 – 4,2 GHz en voor Duitsland 3,7 – 3,8 GHz, eventueel met eLSA (evolved Licensed Shared Access, ETSI TC RRS).

Specifiek worden SE7-studies verricht naar de coëxistentie met communicatie voor FRMCS (Future Railway Mobile Communication System) in 1900-1910 MHz en met UAS (Unmanned Aircraft System) in 1880-1900 MHz⁵.

Het DECT Forum onderzoekt in diverse landen in hoeverre men beneden 6 GHz nog frequentieruimte beschikbaar zou hebben of willen maken om de beoogde datasnelheden van DECT-2020 te kunnen realiseren voor toepassingen zoals Industriële IoT, *smart buildings* en PMSE: *Program Making and Special Events* (zie Paragraaf 2.1.5.1).

2.1.2.2 In Amerika en Japan

De VS hebben een specifieke frequentietoewijzing voor DECT. Deze toewijzing vond pas plaats in 2005 en is veilig gesteld tot tenminste 2026³. Door deze relatief late toewijzing in de VS heeft DECT daar nooit een substantieel marktaandeel

⁴ <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/stcrt-2011-15033.html>

⁵ DECT Forum Technology and Spectrum Update 06_2020_NL Regulator.pdf

verworven en zijn Amerikaanse zogenaamde DECT 6.0-producten niet compatibel met Europese DECT-producten.

DECT in de VS werkt in de band van 1920 tot 1930 MHz. Het verschil tussen DECT 6.0 en DECT in Europa betreft naast de verschillende frequenties ook een verschil in toelaatbaar zendvermogen.

Het Japanse J-DECT functioneert in de band van 1894 tot 1904 MHz die al voor Enterprise PHS Systems werd gebruikt. Om te zorgen dat J-DECT naast deze systemen kan werken werd het voor J-DECT bruikbare spectrumdeel nader gedefinieerd als veelvoud van 1728 kHz tussen 1895,616 MHz en 1902,528 MHz.

2.1.3 *New Generation DECT/ CAT-iq*

De onderliggende technische specificatie van New Generation DECT⁶ heeft vanaf 2008 de integratie van DECT in de Broadband Home Gateway gestandaardiseerd. Het DECT Forum heeft de overeenkomstige technologie aangeduid als CAT-iq (Cordless Advanced Technology - *internet and quality*). Deze upgrade heeft veel nieuwe aanvullende IP-dataservices mogelijk gemaakt zoals websurfen en downloaden, SIP (Session Initiation Protocol)-functies en HD Voice (hoogwaardige Voice-over-IP). Feitelijke toepassingen voor datadiensten binnen deze New Generation DECT zijn echter door datasnelheden tot maximaal circa 6,5 Mbit/s beperkt gebleven.

2.1.4 *DECT ULE*

Oorspronkelijk was DECT ULE ontworpen voor domotica-toepassingen, beveiliging en klimaatbeheersing. Dit betekent dat bijvoorbeeld apparaten op batterijen kunnen communiceren met DECT zonder dat de batterijen te snel leeg raken. ULE hergebruikt de ETSI DECT-specificatie voor de fysieke laag (EN 300 175-1) en de DECT Packet Radio Service (DPRS) ETSI EN 301 649-specificatie uit 2015⁷. ULE heeft echter de ETSI DECT-specificaties voor de hogere communicatielagen uitgebreid en ook een specifiek applicatieprofiel gedefinieerd⁸. Dit zorgt ervoor dat de communicatie die de eindgebruiker ervaart zo efficiënt mogelijk verloopt. Onderdeel daarvan is de ondersteuning van een specifiek protocol in de data-laag en een gerelateerd datamodel dat is gepubliceerd onder een open source licentie⁹.

De aantrekkingskracht van deze benadering is dat bestaande DECT-basisstations alleen een firmware-update nodig hebben om ook ULE te kunnen ondersteunen. Bovendien hebben ULE-apparaten in principe hetzelfde bereik als andere DECT-apparatuur. Het bereik binnenshuis van 30 meter is aanzienlijk groter dan dat van de concurrerende technologieën Bluetooth LE, Wi-Fi en Zigbee. DECT hoeft dan ook geen mesh-netwerkarchitecturen te gebruiken om dit dekkniveau te bereiken.

⁶ ETSI TS 102 527: *Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT); New Generation DECT*; parts 1-5 (2007-2015).

⁷ ETSI EN 301 649 V2.3.1: *Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT); DECT Packet Radio Service (DPRS)* (2015)

⁸ ETSI TS 102 939-1 V1.2.1: *Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT); Ultra Low Energy (ULE); Machine to Machine Communications; Part 1: Home Automation Network (phase 1)* (2015)

⁹ 'HF-Protocol', 'HF-Service', 'HF-Interface', 'HF-Profile', version 1.0 (2014), available for free after registration at <http://www.ulealliance.org/registration.aspx?f=11>.

In tegenstelling tot de verzadigde markt voor draadloze telefoons en babyfoons was ULE aanvankelijk een belangrijke groeimarkt voor DECT. In 2016, zo'n drie jaar na de standaardisatie in ETSI, zijn de eerste apparaten die voldoen aan de ULE-norm geproduceerd en gecertificeerd. Een jaar later is vanuit het DECT Forum het voorstel gedaan om ULE in te zetten samen met DECT-2020 (zie Paragraaf 2.1.5) als een 5G-technologie^{10,11}.

2.1.5 DECT-2020

2.1.5.1 Algemeen

Deze Radio Interface Technologie (RIT)¹² beschreven in TS 103 636-1 uit juli 2020 omvat in het algemeen oplossingen voor ad-hoc ontplooibare lokale implementaties voor Ultra-Reliable Low Latency (URLLC) en Massive Machine Type Communication (mMTC) zoals voorzien door ITU-R voor IMT-2020 (International Mobile Telecommunications-2020). Merk op dat hier Enhanced Mobile Broadband (eMBB) als derde algemene (5G) use case ontbreekt. Bij DECT-2020 gaat het in concreto om onder meer draadloze telefonie, audiostreaming, professionele auditoepassingen, consumenten- en industriële toepassingen van Internet of Things (IoT) zoals industriële- en gebouwwautomatisering en objectbewaking. Zoals bij DECT algemeen het geval is, zijn geldende uitgangspunten betrouwbaarheid c.q. beschikbaarheid, minimale onderhoud en autonomie, bijvoorbeeld door automatisch interferentiebeheer waardoor geen uitgebreide frequentieplanning nodig is. Daarnaast is voorzien in *interworking* functies met WAN's zoals glasvezelnetwerk- en internetprotocollen.

In Tabel 1 worden de voornaamste, oorspronkelijk voorziene doeleigenschappen van DECT-2020 vergeleken met de initiële en die van New Generation DECT.

Tabel 1: Doeleigenschappen van diverse generaties DECT [bron: ITU¹³]

Parameter	Initial value	DECT Evolution Target value	DECT2020 Target Value
Data Rates	kbps to 1 Mbps	kbps to 6.5 Mbps	kbps to 100 Mbps
Latency	10 ms	10 ms - 2 ms	10 ms - 1 ms
Reliability	1-10 ⁻³	1-10 ⁻⁵	1-10 ⁻⁵
Mobility Interruption time	0 ms	0 ms	0 ms
Antenna	SISO	SISO	MIMO
Connection Density	100K / KM ²	>100K / KM ²	1 Mio Devices / KM ²
Standby power Consumption	3-10 Years	3-10 Years	3-10 Years

¹⁰ https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-2020/Documents/S02-2_ETSI%20DECT%20IMT-2020.pdf

¹¹ ETSI TR 103 422 (juni 2017): *DECT evolution technical study; Requirements and technical analysis for the further evolution of DECT and DECT ULE*

¹² <https://www.etsi.org/technologies/dect>

¹³ https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-2020/Documents/S02-2_ETSI%20DECT%20IMT-2020.pdf

2.1.5.2 DECT-2020 NR

Bij beschikbaarheid van voldoende bandbreedte worden met de inzet van Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDM) en Multiple Input, Multiple Output (MIMO) in DECT-2020 NR (New Radio) datasnelheden van rond 1 Gbit/s voorzien⁵, zoals nader toegelicht zal worden in Paragraaf 2.1.5.3. De mogelijke data rates zoals nu geambieerd in DECT-2020 NR liggen dus minstens een orde-grootte hoger dan in Tabel 1 aangegeven. Het voorstel vanuit de ETSI van DECT-2020 NR aan de ITU-R voor de aanstaande IMT-2020 standaard zal in oktober 2021 definitief zijn.

De *mesh* netwerkcapaciteit van DECT-2020 NR maakt toepassingsgestuurde netwerktopologieën en -implementaties mogelijk in mMTC use cases. Doordat ook directe (relais)communicatie tussen handsets mogelijk is kan het effectieve bereik en de connectiviteit veel groter zijn dan bij het gebruik van een 'klassiek' cellulair basisstation. Dit neemt niet weg dat via dit laatste URLLC use cases door een ster-topologie kunnen worden ondersteund. Tenslotte is er in het verlengde van de oorspronkelijke DECT de mogelijkheid om betrouwbare point-to-point en point-to-multipoint draadloze verbindingen uit te brengen, bijvoorbeeld als vervangers voor kabels.

DECT-2020 NR is zodanig ontworpen dat in de huidige DECT-frequentiebanden interoperabiliteit met de oudere DECT en genoemde evolutievormen mogelijk is. In oktober 2020 heeft ETSI de DECT-2020 New Radio Interface voor IoT gelanceerd¹⁴.

De informatiebeveiliging is in DECT-2020 gerealiseerd door AES128 en CCM^{5,15}.

De fysieke- en radiotoegangslagen van DECT-2020 NR vertonen veel overeenkomst met die van 5G mobiele communicatie. Hieronder volgt in Paragraaf 2.1.5.3 hierover nadere informatie voor de meer technisch geïnteresseerde lezer.

2.1.5.3 De fysieke en radiotoegangslagen van DECT-2020 NR in meer technisch detail

In tegenstelling tot de oudere DECT-standaarden maakt de fysieke laag in DECT-2020 NR gebruik van Cyclic Prefix Orthogonal Frequency Division Multiplexing (CP-OFDM) gecombineerd met Time Division Multiple Access (TDMA) en Frequency Division Multiple Access (FDMA). Hierbij zijn up- en downlink gescheiden via Time Division Duplex (TDD). De fysieke laag laat meerdere sub-draaggolfafstanden¹⁶ toe, van 27 tot 216 kHz. Hierdoor zijn verschillende kanaalbandbreedtes mogelijk, van de oorspronkelijke 1,728 MHz tot maximaal 221 MHz. De instelling wordt automatisch geoptimaliseerd naar frequentieband en propagatieomgevingen. Datasnelheden zijn mogelijk van 120 kbit/s tot 1,1 Gbit/s bij de laagste sub-draaggolfafstand en tot 8,6 Gbit/s bij de hoogste¹⁵. De allocatie van radiofrequenties vindt binnen het voor DECT gereserveerde spectrum door *spectrum sensing* plaats zodat geen a priori frequentieplanning nodig is.

De fysieke laag ondersteunt geavanceerde kanaalcodering in de vorm van *turbocoding* voor zowel besturingskanalen als fysieke kanalen. Daarnaast wordt gebruik gemaakt van Hybride Automatic Retransmit Request (HARQ) met waardoor snelle heruitzending van data mogelijk is wanneer deze aanvankelijk niet foutloos

¹⁴ <https://www.etsi.org/newsroom/press-releases/1839-2020-10-etsi-launches-dect-2020-new-radio-interface-for-iot>

¹⁵ ETSI TC DECT_Generic_may 2020.pdf

¹⁶ En overeenkomstige cyclische prefixlengtes en FFT (Fast Fourier Transform) frequentie-resoluties

wordt ontvangen. Door met name deze twee technologieën is zeer betrouwbare communicatie mogelijk.

De fysieke laag ondersteunt bovendien snelle linkaanpassing, zend- en ontvangst-diversiteit en MIMO-processing tot acht gelijktijdige streams.

De nieuwe fysieke en radiotoegangslagen staan beschreven in de ETSI EN 175 Common Interface beschrijvingen uit december 2019, delen 1 tot en met 3.

2.1.6 Uitvoeringsvormen van DECT-apparatuur

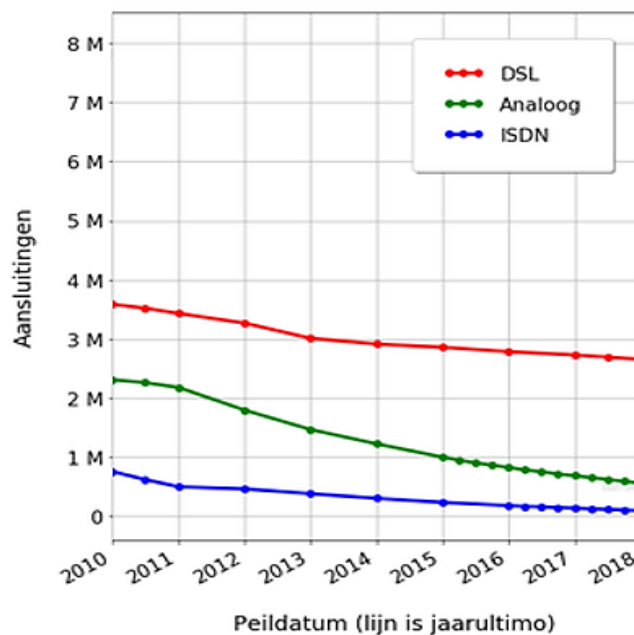
In de loop van de jaren is een diversiteit aan DECT-systemen op de markt verschenen zoals PBX's (Private Branch Exchange ofwel bedrijfstelefooncentrale), en bijbehorende telefoons, repeaters voor dekingsvergroting, headsets, intercomsystemen en conferentiesystemen.

Uiteenlopende uitvoeringsvormen van gebruikersapparatuur betreffen terminals met features voor slechthorenden, slechtzienden, senioren en terminals die de 'aan-tijd' minimaliseren en worden aangeduid met ECO-DECT³.

Over het algemeen zijn DECT handsets robuust uitgevoerd^{17,18}.

2.1.7 Marktperspectief voor DECT

Zoals opgemerkt is de markt voor draadloze telefoons (en babyfoons) verzadigd. Deze houdt immers in zekere mate verband met het aantal vaste (telefoon)lijnen in Nederland dat al geruime tijd aan het afnemen is, zie Figuur 4¹⁹.



Figuur 4: Ontwikkeling koperaansluitingen in Nederland van 2010 t/m 2018

Daarentegen zet de stijging van glasvezelinstallaties door, met name in nieuwbouwobjecten. Aangezien gebruik van DECT ook voor glasvezelaansluitingen mogelijk is maar de combinatie DECT en glasvezel niet is opgenomen in Figuur 4, geeft de daling in het laatste decennium in deze figuur voor wat betreft de totale

¹⁷ <https://www.gigasetpro.com/nl/1/news/dect-de-beste-keuze-voor-mobiliteit-op-de-werkvloer/>

¹⁸ <https://www.voips.nl/nieuws/wat-is-een-dect-telefoon/>

¹⁹ <https://blafhert.wordpress.com/2010/06/16/aantal-vaste-telefoonaansluitingen/>

gebruikstrend van DECT wellicht een wat te negatief getalsmatig beeld. De verzadigingstendens richting een zeker minimum aantal vaste aansluitingen is evenwel duidelijk zichtbaar. Een dergelijke 'vloer' zou verklaard kunnen worden vanuit diverse onderzoeken^{20,21} waarin naar voren komt dat een categorie consumenten belang blijft stellen in een nagenoeg zekere bereikbaarheid van hun huis of zakelijk pand. Deze categorie bedraagt circa 20% van de bezitters van een vaste lijn en wil voor deze bereikbaarheid niet volledig afhankelijk zijn van een (V)MNO. Afgezien van het opportunistische argument dat vaste telefonie in een alles-in-een abonnement kan zijn opgenomen, kunnen voor wat betreft het gebruik van DECT daarnaast andere, meer fundamentele overwegingen spelen. Dit is bijvoorbeeld de behoefte aan (meestal) professionele locatiegebondenheid van betrouwbare communicatie in diverse toepassingen in plaats van persoonsgebonden communicatie zoals bij mobiele communicatiesystemen zoals 4G en 5G het geval is. Hier valt te denken aan bestelterminals in horecagelegenheden, digitale werkbonden in een aannemers- of koeriersbusje²², de bewaking van een bedrijfsterrein of kantoorpand, et cetera. DECT wordt ook, zowel binnen als buiten, gebruikt bij *Program Making and Special Events* (PMSE), bijvoorbeeld voor *in-ear monitoring* (IEM) tijdens het opnemen van artiesten en als draadloze intercom voor de coördinatie, c.q. regievoering van evenementen²³. Deze toepassing van DECT is de laatste jaren sterk toegenomen vanwege het verlaten van de UHF-omroepband waar naast IEM en draadloze microfoons deze verbindingen oorspronkelijk waren gehuisvest. De 700 en 800 MHz-banden zijn daarin nu weggefallen. Met het overnemen van de genoemde functionaliteit in haar specifieke band ontlast DECT echter zo de nog resterende frequentieruimte in de UHF-omroepband voor de inzet van draadloze microfoons.

Wel moet opgemerkt worden dat op grote evenementen de bezetting van de beschikbare DECT-kanalen door PMSE zelfs tegen het maximum kan raken. De toename is dusdanig groot dat binnen ECC (European Electronic Communications Committee) aandacht is gevraagd om hiermee de *sharing*- en *compatibility* studies rekening te houden²⁴.

Vanwege de relatief hoge beschikbaarheid en goede kwaliteit van DECT-gespreksverbindingen, onder meer door een apart toegewezen (maar vrij toegankelijk) spectrum en een robuust toegangsprotocol, heeft DECT specifiek van oudsher bestaansrecht binnen de zakelijke markt voor primair draadloze telefonie. Meerdere omgevingen zijn daarbij denkbaar: een kantoor- of fabriekspand, een bedrijfsterrein, horeca, evenemententerrein, et cetera. DECT kan door de eindgebruiker worden uitgerold en beheerd.

De eerder geschetste doorgroei naar andere toepassingen met uiteindelijk DECT-2020 NR lijkt de positie van DECT in vooral het zakelijke segment te verstevigen. Dit neemt niet weg dat DECT op deze markt een positie heeft te verdedigen naast alternatieve en potentieel concurrerende technologieën waaronder Bluetooth en Wi-Fi²⁵. Deze technologieën kunnen vooral aanvullend op DECT worden gezien omdat elke optie voor bepaalde *use cases* eigen voor- en nadelen heeft. Kort gezegd, is

²⁰ <https://www.actiefonline.nl/nieuws/algemeen/40199/gebruiken-we-tegenwoordig-nog-wel-de-vaste-telefoon>

²¹ <https://www.breedbandwinkel.nl/nieuws/populariteit-en-gebruik-vaste-telefoonlijnen-blijft-dalen>

²² <https://dutchitchannel.nl/641325/dect-begint-aan-een-tweede-leven.html>

²³ <https://www.dect.org/dect-technology>

²⁴ https://www.cept.org/Documents/fm-51/59777/fm51-20-397_an2_is-to-pt1_pmse-use-of-dect

²⁵ <https://www.gigasetpro.com/nl/1/news/dect-bluetooth-en-wifi-voor-zakelijke-communicatie-een-overzicht/>

Bluetooth geschikt voor gebruik in de direct persoonlijke omgeving en Wi-Fi als goedkoop systeem ook daarbuiten met aanzienlijke bandbreedte maar met matige audio- en spraakkwaliteit met de nodige transmissie- en coderingsvertragingen. De eerder genoemde specifieke codering voor DECT heeft slechts een maximale vertraging van ongeveer 10 ms en is in dit opzicht veel beter dan Wi-Fi. De schaalbare infrastructuur van het meer robuuste en hoger-kwalitatieve DECT is wel duurder dan die van Wi-Fi.

2.2 Non-geostationaire satellietnetwerken voor communicatie

2.2.1 Scope en introductie

Onder non-geostationaire satellietssystemen of -netwerken worden zowel de LEO- (Low Earth Orbit) als de MEO (Medium Earth Orbit)-systemen gerekend.

Het relatieve verschil in hoogte van MEO's ten opzichte van LEO's vanaf de aarde bedraagt een factor van circa 20. Hierdoor bedraagt het relatieve verschil in de intrinsieke vertraging van radiosignalen door hun propagatietijd eveneens deze indicatie. Het van oorsprong belangrijke voordeel van de grotere, vaak stuurbare dekking per MEO-satelliet wordt steeds meer achterhaald door de toename van het aantal LEO-satellieten die dus met een veel geringere intrinsieke vertraging behept zijn. In het vervolg zal toegelicht worden waarom een geringe communicatievertraging zo belangrijk is voor veel toepassingen.

Veel navigatiesystemen zijn gebaseerd op MEO-systemen maar voor communicatie winnen de LEO-satellietnetwerken terrein. De overtuigende voordelen van LEO-systemen zijn immers de zeer lage vertraging en de geringe omvang en het -gewicht per satelliet. Daar staat wel tegenover dat er veel meer satellieten per LEO-netwerk nodig zijn dan voor een MEO-netwerk: duizenden tegenover circa 20. Ook de levensduur per LEO-satelliet is veel kleiner en het duurt langer voor een complete dekking is gerealiseerd met LEO- dan met MEO-satellieten. Gedreven door grote investeerders zoals Amazone en Musk is niettemin de opmars van LEO-communicatiesystemen een feit. In deze paragraaf valt de nadruk dan ook op LEO-netwerken voor communicatie waarbij ook uitdagingen aan de orde zullen komen.

In de negentiger jaren waren er veel initiatieven om globale connectiviteit voor spraak, fax en smalbandig berichtenverkeer te bieden via LEO (Low Earth Orbit)-satellietssystemen. Veel van deze initiatieven werden vanwege de hoge kosten en de beperkte vraag geannuleerd. Het tweetal dat nog resteert, Iridium en Globalstar, heeft het niet zonder kleerscheuren overleefd: beide zijn door een faillissement gegaan. De activa van Iridium en Globalstar, waar respectievelijk 6 miljard en 4,3 miljard dollar in was geïnvesteerd, zijn daarbij door investeerders overgenomen voor respectievelijk 'slechts' 25 en 43 miljoen dollar. Na deze ervaring zijn investeerders lange tijd sceptisch gebleven ten aanzien van de levensvatbaarheid van LEO-satellietssystemen.

In de afgelopen 20 jaar is echter veel veranderd: de vraag naar breedbandige internetverbindingen met lage vertraging (*low latency internet*) is sterk toegenomen, de technologie voor satellietcommunicatie is sterk verbeterd en investeerders zijn weer bereid om te investeren op de langere termijn²⁶. Desondanks blijft het nog steeds balanceren langs de rand van de afgrond. Zo is in november 2020 nog OneWeb failliet gegaan waarbij het is overgenomen door de Britse overheid en het Indiase Bharti Global.

Naast bovengenoemde veranderingen hebben LEO-satellietssystemen nog te maken met een aantal specifieke uitdagingen waaronder de nieuwe regels ten aanzien van spectrumrechten zoals vastgesteld tijdens de World Radiocommunication Conference (WRC) 2019, ruimtepuin en mogelijke interferentie met geostationaire (GEO: Geostationary Orbit) satellieten.

Hieronder zal eerst worden ingegaan op de meerwaarde van LEO-systemen. Daarbij worden tevens technologische aspecten en kostenconsequenties belicht.

²⁶ Het duurt vrij lang om een grote LEO-satellietconstellatie in de ruimte te krijgen waardoor het ook vrij lang duurt voordat deze gaat renderen.

Voorts wordt kort ingegaan op bovengenoemde uitdagingen. Tenslotte zal een aantal LEO-initiatieven de revue passeren.

2.2.2 *Meerwaarde van LEO-systemen*

Vertraging is een kritische factor geworden voor onder andere financiële instellingen, content aanbieders en *cloud computing* providers. Met name bij *high frequency trading* ('flitshandel') is een *low latency*-verbinding met de grote beurssteden van belang en rekent men zelfs in nanoseconden. Zo is er in 2015 nog een kabelverbinding aangelegd voor 300 miljoen dollar tussen New Jersey en Engeland. Hierdoor werd een vertraging van 45 ms bereikt, een afname van 12 ms ten opzichte van de vertraging van de tot dan toe snelste verbinding. Een dergelijke latency lijkt ook haalbaar met een LEO-satellietconstellatie mede omdat de voorplantingssnelheid in de ruimte circa 1,47 maal hoger is dan door een optische kabel. Daarbij kan een LEO-satellietconstellatie ook *low latency*-verbindingen met andere grote beurssteden in de wereld bieden zoals Tokyo en Sydney. Ook websites hebben belang bij *low latency*-verbindingen. Zo hebben onder andere Walmart en Amazon vastgesteld dat elke 100 ms reductie in laadtijd van een webpagina 1% meer inkomsten oplevert²⁷.

De meeste LEO-initiatieven hebben ook tot doel om breedband internet beschikbaar te maken op plekken waar dit nu nog niet het geval is. De kosten zullen echter nog behoorlijk moeten worden gereduceerd om dit bereikbaar te maken voor de meeste consumenten in ontwikkelingslanden, terwijl deze zich bovendien doorgaans al geen consumentenapparatuur zoals een laptop of smartphone kunnen veroorloven. Niettemin bestaat de mogelijkheid dat hier de diensten goedkoper zullen worden aangeboden²⁸. Aan de andere kant biedt het leveren van breedband internet in plattelandsgebieden van ontwikkelde landen wel meer mogelijkheden. Zo heeft de Federal Communications Commission (FCC) in Amerika al een subsidie van bijna 900 miljoen dollar uit het *Rural Digital Opportunity Fund* toegekend aan SpaceX voor het aanbieden van breedband internet op 640.000 locaties in Amerika. SpaceX beoogt hierbij 100 Mbit/s download en 20 Mbit/s upload verkeer te realiseren met hun Starlink LEO-satellietsysteem. De LEO-initiatieven zullen overigens nog geen bedreiging vormen voor de bestaande internet providers in dichtbevolkte gebieden omdat hiervoor de beschikbare capaciteit van de LEO-satellieten onvoldoende is²⁹.

Naast breedband internet voor consumenten biedt ook de zakelijke markt mogelijkheden. Hier valt te denken aan het aanbieden van *backhaul*³⁰ connectiviteit aan mobiele network operators (MNO's), internetproviders, de luchtvaart en aan de maritieme markt zoals aan boord van cruiseschepen.

In dit verband mag het MEO-constellatiesysteem van O3B (*the Other 3 Billion*) genoemd worden. Dit betreft een Nederlands initiatief met het hoofdkwartier in Den Haag. Met dit systeem *O3B-MPower* richtte men zich aanvankelijk op breedbandconnectiviteit voor ontwikkelingslanden maar ironisch genoeg bleek dit

²⁷ <https://www.machmetrics.com/speed-blog/how-does-page-load-time-affect-your-site-revenue/>

²⁸ Als LEO-satellieten boven deze gebieden geen andere mogelijkheid hebben om inkomsten te genereren, bestaat de kans dat genoeg wordt genomen met de relatief lagere tarieven die haalbaar zijn voor de plaatselijke bevolking.

²⁹ <https://arstechnica.com/information-technology/2020/03/musk-says-starlink-isnt-for-big-cities-wont-be-huge-threat-to-telcos/>

³⁰ Verbinding van een klein netwerk (bijvoorbeeld een 5G-basisstation) met het *core network*.

operationele systeem juist heel veel aftrek bij cruiseschepen te hebben (inmiddels richt O3B zich echter ook weer op ontwikkelingsgebieden).

2.2.3 Specifiek rond technologie en kosten

Met name de ontwikkeling van phased array antennes die elektronische gestuurde antennebundels of *beams* mogelijk maken in de hogere frequentiebanden heeft het mogelijk gemaakt om kleine vlakke antennes te gebruiken op zowel de LEO-satellieten als in gebruikersterminals.

De kosten voor een LEO-satellietconstellatie bedragen tussen de 5 en de 10 miljard dollar. Om zo snel mogelijk inkomsten te genereren worden de LEO-satellietconstellaties in opeenvolgende fasen gecreëerd. Hierbij is elke fase erop gericht om zo spoedig mogelijk diensten te kunnen leveren. In de eerste fase zijn daarbij de diensten alleen in een beperkt gebied op aarde beschikbaar en wordt dit gebied in de volgende fasen vergroot. Tegelijk vindt verdere ontwikkeling van de satellieten plaats. Zo hebben bijvoorbeeld aanvankelijk de satellieten van Starlink en OneWeb nog geen verbindingen tussen de satellieten onderling (*intersatellite links*) en zullen Starlink-satellieten in een latere fase gebruik gaan maken van de V-band, zie verder Paragraaf 2.2.5.1. Daarnaast vinden er gaandeweg ook wijzigingen in de geplande satellietconstellaties plaats. Zo heeft Starlink al een aanvraag ingediend om in de eerste fase meer satellieten in lagere banen te plaatsen dan de Amerikaanse FCC (Federal Communications Commission) eerder had toegestaan³¹, zie verder Paragraaf 2.2.5.1. De toekomstplannen van OneWeb voor de tweede fase zijn al een aantal malen gewijzigd van oorspronkelijk 2.620 satellieten naar 48.000 in mei 2020 en naar 6.372 in januari 2021.

2.2.4 Uitdagingen

2.2.4.1 Spectrumrechten

Tijdens de WRC 2019 (zie ook de Monitor voorjaarseditie van 2020³²) zijn er nieuwe regels ten aanzien van spectrumrechten overeengekomen. Zo moet nadat voor het eerst het spectrum wordt gebruikt (*Bringing-Into-Use* ofwel BIU in ITU-terminologie) door de eerste satelliet binnen twee jaar 10% van de satellietconstellatie ontplooid zijn. Na vijf jaar dient dit 50% te zijn en na zeven jaar 100%. Zodra deze deadlines niet worden gehaald worden de spectrumrechten beperkt tot de satellieten die op dat moment gelanceerd zijn. Voor operators die al zijn gestart met hun satellietconstellatie wordt daarbij 1 januari 2021 als BIU-datum gehanteerd.

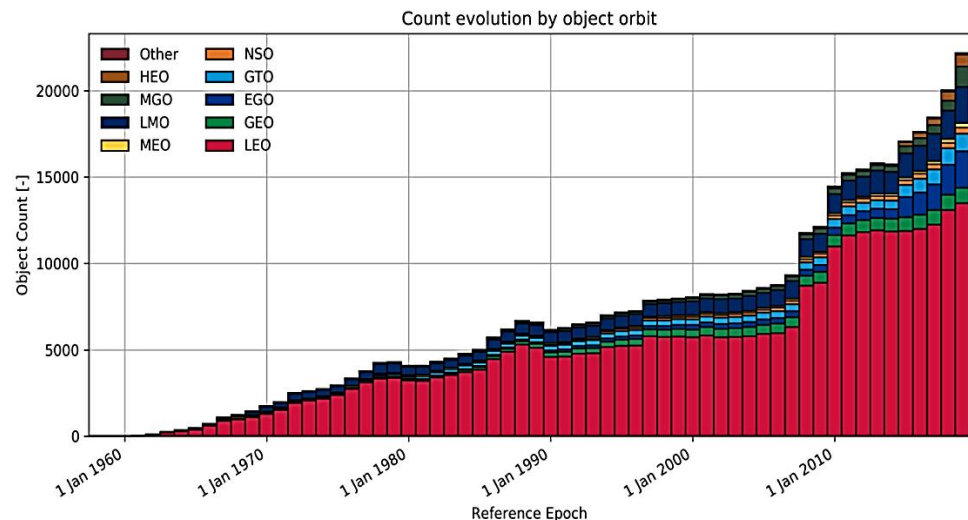
Het aantal satellieten waaruit een LEO-constellatie bestaat, bedraagt doorgaans duizenden en kan oplopen tot boven de tienduizend, en tot wel 42.000 zoals voor Starlink. Gezien dergelijke aantallen moeten de LEO-satellieten aan de lopende band worden geproduceerd en gelanceerd om de bovengenoemde deadlines te halen. Starlink heeft bijvoorbeeld in 2021 elke twee weken een lancering van 60 satellieten gepland en SpaceX werkt aan een raket waarmee per lancering 400 satellieten in de ruimte kunnen worden gebracht. Ook nadat de constellatie compleet is zal deze productie van satellieten doorgaan aangezien deze een relatief korte levensduur hebben van vijf tot ongeveer zeven jaar. Dit is dus aanmerkelijk korter dan de levensduur van 15 tot 20 jaar voor geostationaire satellieten.

³¹ <https://en.wikipedia.org/wiki/Starlink>

³² TNO 2020 R10955, juni 2020, Paragraaf 2.5

2.2.4.2 Ruimtepuin

Momenteel cirkelen circa 6.000 satellieten rond de aarde. Hiervan is ongeveer 60% niet langer operationeel en ruimtepuin geworden. Met de LEO-satellietsystemen, die elk uit duizenden satellieten bestaan, is de verwachting dat het aantal satellieten in de komende tien jaar zal toenemen met 990 per jaar, een trend die ook al enigszins zichtbaar wordt in een weergave tot en met 2019, zie Figuur 5.



Figuur 5: Aanwas van ruimtepuin tot en met 2019 [bron: ESA³³]

Tevens wordt duidelijk dat de bijdrage van LEO-satellieten die in deze figuur met rood is aangegeven, wezenlijk is en zonder adequate tegenmaatregelen niet af zal nemen. Een en ander betekent dat in 2028 circa 15.000 satellieten rond de aarde zullen cirkelen³⁴. Met deze toename maakt men zich dan ook steeds meer zorgen over de effecten van ruimtepuin. Met name het zogenaamde Kessler syndroom kan het gebruik van bepaalde baanhoogtes door satellieten praktisch onmogelijk maken. De dichtheid van ruimtepuin zou namelijk zo hoog kunnen worden dat elke botsing meer ruimtepuin veroorzaakt. Er is dan dus sprake van een domino-effect. De International Organization for Standardization heeft al een norm geproduceerd³⁵ waarin mitigatiemaatregelen staan die genomen kunnen worden voor alles wat in de ruimte wordt gelanceerd om de vorming van ruimtepuin te voorkomen. Deze standaard is echter niet bindend maar kan gebruikt worden om een reeks nationale voorschriften vast te stellen³⁶.

Ook met genomen maatregelen zoals het uit de baan halen van een LEO-satelliet aan het einde van zijn levensduur om uiteindelijk in de atmosfeer te verbranden, is de vorming van ruimtepuin niet altijd te voorkomen. Door het simpelweg falen van een satelliet voor het einde van zijn levensduur kan dit onmogelijk worden. Dit heeft

³³ http://www.esa.int/Safety_Security/Space_Debris/Analysis_and_prediction

³⁴ <https://www.weforum.org/agenda/2020/10/visualizing-earth-satellites-space-spacex/#:~:text=Right%20now%2C%20there%20are%20nearly,globe%20in%20April%20of%202020>

³⁵ ISO 24113

³⁶ In Amerika stelt de FCC eisen ten aanzien van voorkoming van ruimtepuin. Het al of niet voldoen aan deze eisen bepaald of een satellietsysteem zijn diensten mag aanbieden of niet (onder meer door het al of niet verlenen van vergunningen voor gebruikersterminals en gateway stations die daarbij gebruikt worden).

zich al voorgedaan bij bijvoorbeeld Iridium, waarbij 29 (defecte) satellieten niet uit hun baan konden worden gehaald en ruimtepuin zijn geworden.

Ook botsingen veroorzaken veel ruimtepuin, zoals in 2009 de botsing van de Iridium 33 satelliet met de Russische Kosmos-2551 satelliet. De kans op botsingen neemt toe naarmate het drukker wordt in de ruimte. Onlangs nog heeft de Europese ADM-Aeolus aardobservatiesatelliet van ESA een uitwijkingsmanoeuvre moeten uitvoeren om een botsing met de Starlink 44 satelliet te vermijden³⁷. Ook het ISS heeft in 2020 al drie keer moeten uitwijken voor ruimtepuin³⁸. Hoewel ruimtepuin wordt gevolgd, blijkt uit recent onderzoek met de Isaac Newton-telescoop op het eiland La Palma dat 75% van al het puin dat men in beeld wist te brengen nog niet in de database voorkwam³⁹. De brokstukken in de geostationaire baan zijn moeilijk detecteerbaar maar kunnen met behulp van gespecialiseerde software toch in beeld worden gebracht.

Er is al een Japans bedrijf genaamd Astroscale dat specifiek is opgericht op het vinden van oplossingen voor ruimtepuin. Astroscale heeft op 20 maart 2021 een puinruimer gelanceerd om te testen of ruimteafval met een magneet kan worden verzameld⁴⁰. Ook de ESA wil in 2025 een eerste missie uitvoeren om ruimtepuin op te ruimen. Hiervoor is het Zwitserse ClearSpace gecontracteerd, dat daarbij een object van 100 kg uit de ruimte moet halen⁴¹. Het merendeel van de puinruiminitiatieven is vooralsnog gericht op het opruimen van grote stukken ruimtepuin. Vergeleken met de kosten van een LEO satelliet, voor Starlink tussen een kwart en een half miljoen dollar, is ruimen prijzig.

Concluderend kan worden gesteld dat vooralsnog ruimtepuin een limiet zou opdringen aan de uitbreiding van (in casu) LEO-capaciteit maar dat kosteneffectieve ruimingsinitiatieven wat dit betreft wellicht perspectief kunnen bieden voor de toekomst. Regelgeving op onder meer het gebied van ruimtepuin wordt voorbereid door het *Office for Outer Space Affairs* (OOSA) van de Verenigde Naties. Er zijn inmiddels 21 *guidelines* geaccepteerd waarvan het de bedoeling is dat lidstaten deze in hun nationale wetgeving implementeren.

2.2.4.3 *Interferentie-risico*

Aangezien LEO-systemen gebruik maken van frequentiebanden die ook door bestaande geostationaire satellieten worden gebruikt, bestaat de kans dat onderlinge interferentie optreedt. Bestaande geostationaire satellieten en de bijbehorende terminals op aarde hebben het recht om hiertegen beschermd te worden. Dit stelt extra eisen aan de LEO-systemen. Dit onderwerp staat daarom ook op de agenda van de World Radio Conference in 2023 (WRC-23).

2.2.5 *LEO-initiatieven*

2.2.5.1 *Starlink*

Op 17 Januari 2021 had SpaceX 1.035 Starlink-satellieten gelanceerd van de initieel geplande 12.000 satellieten met een mogelijke toekomstige uitbreiding tot

³⁷ <https://www.spacepage.be/nieuws/ruimtevaart/ruimteafval/botsing-tussen-satellieten-van-esa-en-spacex-nipt-vermeden>

³⁸ <https://www.kijkmagazine.nl/space/iss-wijkt-uit-voor-ruimtepuin/>

³⁹ <https://www.kijkmagazine.nl/space/nieuw-onderzoek-benadrukt-het-ruimtepuin-probleem/>

⁴⁰ <https://www.newscientist.nl/nieuws/satelliet-verzamelt-ruimtepuin-met-magneet/>

⁴¹ <https://www.spacepage.be/nieuws/ruimtevaart/ruimteafval/europese-clearspace-1-gaat-ruimtepuin-opruimen>

42.000 satellieten. De initiële 12.000 satellieten zullen opereren in drie schillen: 1.440 satellieten op 550 km hoogte, 2.845 satellieten op 1.110 km hoogte en 7.500 satellieten op 340 km hoogte. De eerste satellieten maken gebruik van de Ku-band (10,7-14,5 GHz) en de Ka-band (17,8-30 GHz). De laatste 7.500 satellieten zullen gebruik maken van de V-band (37,5-51,4 GHz). De satellieten hebben een gewicht van 260 kg en zijn voorzien van vier phased array-antennes.

Op dit moment wordt de initiële zogenaamde *Better than nothing* beta-dienst al aangeboden aan een beperkt aantal klanten per gebied tussen 45 en 53 graden Noorderbreedte, onder andere in Nederland. Hier is de dekking met de huidige satellietconstellatie het beste⁴². Deze bèta-gebruikers mogen datasnelheden tussen de 50 en 150 Mbit/s verwachten en een vertraging van tussen 20 en 40 ms. Hierbij kunnen nog onderbrekingen voorkomen omdat de satellietconstellatie nog niet compleet is. Inmiddels zijn bij testen snelheden tot 400 Mbit/s bereikt. Omdat de eerste satellieten nog geen inter-satelliet verbindingen hadden, is de dienst verder alleen beschikbaar in de buurt van een gateway station dat de verbinding met het internet legt. In Nederland (Hoofddorp) zijn inmiddels 9 van zulke stations geplaatst. Met de lancering van nieuwe satellieten en de aanleg van meer gateway stations zal deze situatie continu verbeteren. Momenteel wordt de dienst aangeboden voor \$99 per maand en een eenmalige \$499 voor een complete gebruikersterminal, dat wil zeggen inclusief voeding, kabels, tripod en Wi-Fi router.

De gebruikersterminal heeft een phased array-antenne met een diameter van 48 cm en is zeer eenvoudig op te zetten zoals diverse video's op YouTube laten zien. SpaceX heeft de productiekosten van de terminal inmiddels al omlaag gekregen van \$3.000 naar \$1.300 per stuk en verwacht deze in een á twee jaar verder te kunnen verlagen naar enkele honderden dollars⁴³.

2.2.5.2 OneWeb

Op 18 december 2020 had OneWeb 110 satellieten gelanceerd van de initieel geplande 648 satellieten. Deze opereren in een nagenoeg polaire baan op een hoogte van 1.200 km. Deze hoogte is gekozen omdat zich hier een minimum aan bestaande satellieten en ruimtepuin bevindt. De satellieten maken gebruik van de Ku- en Ka-band, hebben een gewicht van 150 kg, zijn zo groot als een wasmachine en kunnen elk in een gebied van 1080x1080 km een capaciteit leveren van 7,5 Gbit/s. Deze eerste generatie satellieten is nog niet voorzien van intersatelliet-verbindingen. Noemenswaardig is dat OneWeb gebruik maakt van een eigen techniek om interferentie bij geostationaire satellieten te vermijden. Het gaat hier om *progressive pitching* van de satelliet, een techniek waarop inmiddels patent is aangevraagd⁴⁴.

Diensten komen eind 2021 beschikbaar, allereerst boven 50° noorderbreedte en naar verwachting eind 2022 overal ter wereld⁴⁵. Wat betreft de gebruikersterminals zullen er diverse, vaste en mobiele uitvoeringen beschikbaar komen⁴⁶. De details van deze terminals worden pas in de aanloop naar het aanbieden van de diensten bekend gemaakt. Uit de video op de site van OneWeb⁴⁷ blijkt dat deze terminals

⁴² De satellieten in de eerste schil bevinden zich in baanvlakken met een inclinatie van 53°.

⁴³ <https://www.teslarati.com/spacex-starlink-terminal-production-costs-gwynne-shotwell/>

⁴⁴ <https://www.itu.int/en/ITU-R/space/workshops/SSIS-2016/Documents/OneWeb%20.pdf>

⁴⁵ <https://www.oneweb.world/network>

⁴⁶ <https://www.canadasatellite.ca/OneWeb-User-Terminal.htm>

⁴⁷ <https://oneweb.world/>

uitgerust zijn met phased array-antennes waarmee een datasnelheid van 195 Mbit/s mogelijk is met een latency van ongeveer 50 tot 100 ms.

2.2.5.3 *Geplande LEO-systemen*

Er worden nog meer LEO-systemen verwacht zoals Lightspeed van Telesat en Project Kuiper van Amazon. Deze zullen hun diensten later gaan aanbieden dan Starlink en OneWeb. Wereldwijd zijn daarnaast nog diverse systemen in verschillende stadia van ontwikkeling. Vooral de Chinese systemen zijn vergevorderd. Een voorbeeld daarvan is het Honyan-systeem.

2.2.5.4 *Nederlands initiatieven*

Ten slotte kunnen nog twee Nederlandse initiatieven gemeld worden. Dit betreft ten eerste Hiberband van Hiber, werkend in de UHF-band op 400 MHz⁴⁸. Dit systeem is gericht op Internet of Things (IoT) en, via punt-puntverbindingen, Machine-to-Machine (M2M) communicatie voor het verzenden van korte berichten van elk 144 bytes. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van nanosatellieten, waarvan de eerste twee van het type 6U Cubesat sinds 2019 operationeel zijn. Dit jaar zijn nog eens twee, kleinere 3U Cubesat⁴⁹ satellieten gelanceerd⁵⁰. Het plan is om het aantal LEO-satellieten verder uit te breiden voor de verkorting van de *revisit time*, de tijd tussen twee opeenvolgende momenten dat een satelliet vanuit een locatie op aarde zichtbaar is en er een bericht kan worden verzonden⁵¹.

Als tweede initiatief waarin Nederland is betrokken noemen we Drebbelsat van het Amerikaanse bedrijf Viasat. Voor dit systeem in de Ka-band en de Q/V-band (37,5-51,4 GHz) bestaan plannen voor een constellatienetwerk van 288 satellieten die onder Nederlandse jurisdictie zullen gaan opereren. Via het Agentschap Telecom zijn (net als bij Hiber) internationale rechten geclaimd op het gebruik van ruimtebanen, frequentiebanden en technische parameters voor het LEO-satellietsysteem. De satellieten zullen opereren in acht ruimtebanen op een hoogte van 1300 km. In iedere baan bevinden zich steeds 35 operationele- en een reservesatelliet. In juni 2020 is een coördinatieverzoek voor deze LEO-constellatie ingediend bij de ITU voor publicatie. Hierin worden de plannen bekend gemaakt⁵² maar moet voor de realisatiefase nog met name worden aangetoond dat geen interferentie wordt veroorzaakt op bestaande satellietsystemen.

Met dit systeem wil Viasat wereldwijd breedbandcommunicatie aanbieden. Het bijzondere aan het Drebbelsat systeem is dat het gecombineerd zal worden met het geostationaire satellietsysteem van Viasat. De satellieten worden gebouwd door Airbus maar Viasat ontwerpt en bouwt zelf de zenders, ontvangers en antennes op de satellieten. Het gaat vijf jaar duren totdat het gehele systeem is gebouwd, gelanceerd en geoperationaliseerd. Voor ontwerp en bouw van het systeem zal worden samengewerkt met onder meer Airbus Leiden, ESA-ESTEC en het Nationaal Lucht en Ruimtevaartlaboratorium (NLR).

⁴⁸ In 2016 opgericht onder de naam Magnitude Space en in 2017 omgedoopt in Hiber.

⁴⁹ <https://www.isispace.nl/product/3u-cubesat-bus/>

⁵⁰ <http://www.parabolicarc.com/2021/01/25/hiber-four-satellite-in-space-with-green-cubesat-propulsion-launched-on-spacex-rocket/>

⁵¹ <https://www.sensemakers.k8s.surfsara.nl/wp-content/uploads/2019/11/2019-November-Hiber-IoT-Satellite-Services-Jasper-Veen.pdf>

⁵² <https://www.itu.int/ITU-R/space/asreceived/Publication/AsReceived>

2.2.6 *Wat heeft Nederland aan LEO-systemen?*

Het zal nog even duren voordat de breedbandige diensten van LEO-systemen wereldwijd, en dus ook in Nederland, beschikbaar komen en er door intersatelliet-verbindingen zeer grote afstanden mee kunnen worden overbrugd. Kijken we toch even vooruit, dan is het voordeel van LEO-systemen dat met apparatuur die zo klein is dat het in een koffer past overal snel en eenvoudig een breedbandige internet verbinding met een lage latency kan worden opgezet. Dit zal wat later ook mobiel mogelijk zijn op voer-, vaar- en vliegtuigen.

Bij vast, semi-vast of nomadisch gebruik bieden LEO-systemen een alternatief voor breedbandige internettoegang in buitengebieden. In Nederland wordt draadloos internet in buitengebieden op basis van Fixed Wireless Access (FWA) aangeboden door onder andere Greenet en Delta. Hiermee vergeleken zijn de maandelijkse kosten voor Starlink circa twee maal hoger maar biedt Starlink ook een twee maal hogere datasnelheid. Bovendien kun je je internetaansluiting en dus gebruikersterminal gewoon meenemen als je met de caravan op vakantie gaat. Andere mogelijkheden zijn denkbaar in de sector Openbare Orde en Veiligheid (OOV) wanneer met LEO-capaciteit voorzien wordt in backhaul-connectiviteit bij bijvoorbeeld rampen wanneer reguliere communicatiemiddelen niet beschikbaar zijn of bij grootschalige incidenten of evenementen waarbij de beschikbare capaciteit ontoereikend is. Ook voor toepassing voor de eerder genoemde 'flitshandel' zal het in Nederland aantrekkelijk kunnen zijn.

Verder zijn reële mogelijkheden denkbaar bij mobiel gebruik om aan een groot aantal passagiers internet toegang te kunnen bieden, zoals de eerder genoemde scheepvaarttoepassing aan boord van bijvoorbeeld cruiseschepen en in de luchtvaart tijdens bijvoorbeeld transatlantische vluchten. Met name de hogere minimale elevatiehoek bij LEO-satellietsystemen ten opzichte van geostationaire satellieten maakt de plaatsing van de terminal op vlieg- en vaartuigen veel eenvoudiger⁵³.

⁵³ Bij Starlink was deze initieel 20° en werd deze later 40°

2.3 Small cell-systemen voor 5G openbare mobiele communicatie

2.3.1 Definities en scope

Voordat wordt ingegaan op het onderwerp small cells zullen voor een goed begrip in deze paragraaf eerst wat definities worden gegeven rond deze technologie en zal de inhoudelijke afbakening van Paragraaf 2.3 worden toegelicht.

Definities van een *small cell* blijken uiteen te lopen van het zeer lokale dekking gebied dat voor mobiele communicatie of Wi-Fi in drukke gebieden wordt gecreëerd tot aan het antennesysteem dat deze dekking realiseert. In beide gevallen wordt het begrip small cell vooral in verband gebracht met 4G, 5G en Wi-Fi.

In het vervolg wordt voor de duidelijkheid gesproken van small cell-systemen, aangezien wordt ingegaan op de eigenschappen van de antennes en andere hardware die nodig is voor de totstandkoming van de beoogde dekking. De dekking zelf zal worden aangeduid met small cell. De small cell-systemen bestaan doorgaans uit een geïntegreerde uitvoering van antennes en andere hardware voor de radiofrequente functies. Daarbij kan deze apparatuur gebruik maken van vergunning-plichtig of vergunningsvrij radiospectrum of van een combinatie van beide.

In aansluiting op de recente ontwikkelingen en perspectieven binnen Nederland beperkt Paragraaf 2.3 zich verder tot 5G waarbij wordt uitgegaan van toepassing van de nog in Nederland te veilen frequenties op 3,5 GHz en 26 GHz. Beide frequentiebanden zijn door de Europese Unie aangewezen voor 5G. Op dit moment is het nog niet zeker in hoeverre 26 GHz in Nederland daadwerkelijk gebruikt zal gaan worden voor small cells, zie hiervoor ook de Monitor najaarseditie van 2019⁵⁴. Tenslotte worden in deze Monitorenditie in principe alleen 5G small cells in publieke buitenruimten beschouwd. In pandige small cells zijn reeds besproken in de Monitor voorjaarseditie van 2020⁵⁵.

2.3.2 Waarom, waar en wanneer small cells?

Small cells zijn ontwikkeld om extra dekking te bieden op drukke plaatsen zoals stads- en winkelcentra, stadions, metrostations, openbare binnenruimtes zoals terminalhallen van luchthavens, wachtruimtes in treinstations, congreshallen, et cetera. De small cell-systemen of basisstations worden uitgevoerd als kleine, integreerbare units met een bereik van tien tot honderden meters⁵⁶ om small cells te kunnen realiseren. De uitvoeringsvorm kan nog wel variëren om ze zo goed mogelijk geschikt te maken voor de plaats waar de dekking tot stand moet worden gebracht. Zo kan een small cell-systeem worden toegepast inabri's, op lantaarnpalen, verkeerslichten, reclameborden maar ook in of aan gebouwen. Sinds circa vijf jaar bestaan ook uitvoeringen, aanvankelijk vanaf 700 MHz, die onzichtbaar geïntegreerd worden in putdeksels^{57,58}, zie Figuur 6.

Om te voorzien in de extra dekkingcapaciteit zal een MNO deze uitbreiding uit kostenoverwegingen eerst via verbetering en vergroting van hun macronetwerken en small cell hot spots tot stand willen brengen. Wanneer met deze maatregelen

⁵⁴ TNO 2019 R11692, nov. 2019, Paragraaf 2.2.4

⁵⁵ TNO 2020 R10955, juni 2020, Paragraaf 2.2.4

⁵⁶ Volgens ETSI, in urbaan gebied

⁵⁷ <https://www.pi4raz.nl/index.php/2016/02/29/kathrein-toont-antennes-voor-700-mhz-en-small-cell-in-straat/>

⁵⁸ <https://newscentre.vodafone.co.uk/press-release/vodafone-lifts-lid-on-manhole-covers-to-improve-mobile-coverage/>

niet meer aan de vraag kan worden voldaan, zal worden overgegaan tot de uitrol van grootschalige small cell-structuren die gepaard gaat met meer complexiteit en kosten in vergelijking tot macronetwerken. Hier spelen factoren een rol als het vaststellen en alloceren van geschikte plekken, het realiseren van de elektrische voeding en connecties naar het mobiele netwerk. Juist in een stedelijke omgeving is dit niet eenvoudig. Al met al is de timing voor grootschalige invoer van smal cells lastig te voorspellen en moet gedacht worden aan de periode na 2026⁵⁹.



Figuur 6: Small cell-antenne, geïntegreerd in een putdeksel [bron: Vodafone UK⁵⁹]

2.3.3 Rol van de EU

Om het tempo van de uitrol van 5G binnen Europa te bevorderen is medio 2020 de Europese Unie gekomen met wetgeving ten aanzien van de fysieke en technische eigenschappen van small cell-systemen⁶⁰. In deze uitvoeringsverordening zijn diverse factoren meegenomen zoals veilige blootstelling van het publiek aan de elektromagnetische velden van small cells, een mechanisch gezien veilige en discrete constructie van de fysieke accommodatie van de apparatuur en esthetische aspecten. Hierbij kan gedacht worden aan het streven naar minimale visuele impact, bijvoorbeeld door camouflage van de systemen zoals nu wel bij sectorantennes het geval is (zie Figuur 7).

Naast de factoren die worden opgelegd door de wetgeving spelen bij de praktische realisatie ook temperatuur- en molestbestendigheid van de small cell-systemen een rol.

⁵⁹ <https://www.overalsnelinternet.nl/documenten/rapporten/2021/04/30/de-ontwikkeling-van-het-aantal-antenne-opstelpunten-voor-mobiele-netwerken-in-nederland-in-de-komende-tien-jaar-dialogic>

⁶⁰ Uitvoeringsverordening (EU) 2020/1070 van de Commissie van 20 juli 2020



Figuur 7: Voorbeeld van een gecamoufleerde antenne (in casu een sectorantennepaneel)
[bron: KWINK Groep⁶¹]

De onderliggende, overkoepelende reden voor de Europese uitvoeringsverordening is het verhogen van de acceptatie van small cell-systemen bij het publiek. Belangrijk onderdeel van de uitvoeringsverordening is dat de implementatie van small cell-systemen wordt aangemoedigd door deze vrij te stellen van vergunningsplicht. Wel is er een meldplicht, uiterlijk twee weken na de installatie. Naast het stimuleren van de ontwikkeling van draadloze communicatie in de Europese Unie met in het bijzonder de uitrol van 5G in Europa, is een motivatie voor de uitvoeringsverordening dat deze draadloze toegangspunten met laag vermogen en klein bereik waarschijnlijk ook een positief effect zullen hebben op het gebruik van radiospectrum.

Opgemerkt moet worden dat de algemene vergunningsplicht voor het plaatsen van antennes in specifieke situaties zoals bij monumenten, in beschermde stads- of dorpsgezichten en bij natuurgebieden ook voor small cell-systemen blijft gelden⁶². Op nationaal niveau biedt de *fact sheet Small Cells*⁶² een stroomdiagram om te bepalen of de antenne-installatie vergunningsvrij is of niet.

Zoals ook bij de totstandkoming van indoor-dekking speelt bij het realiseren van outdoor-dekking via een small cell-systeem aan een object zoals een gebouw of toren de zeggenschap en medewerking van objecteigenaren een rol, zie overweging 15⁶⁰. Als het gaat om publieke infrastructuur (openbare lichtmasten, lantaarnpalen et cetera) kan de provider of mastenbeheerder een verzoek voor medegebruik indienen bij een rijks-, provinciale- of lokale overheid mits de small cell voldoet aan de eigenschappen genoemd in de Europese uitvoeringsverordening. In principe zal het gaan om outdoor small cells die elk door meerdere providers worden gerealiseerd. Daarbij mag het totaal aan elektromagnetische velden, inclusief die van andere basisstations, de Europese blootstellingslimiet niet

⁶¹ https://www.rijksoverheid.nl/binaries/rijksoverheid/documenten/rapporten/2019/04/11/antennes-5g-en-welstand/Eindrapport+Antennes%2C+5G+en+Welstand_KWINKgroep.pdf

⁶² <https://www.antennebureau.nl/binaries/antennebureau/documenten/brochures/2020/juli/3/factsheet-lokaal-beleid-kleine-antennes/Factsheet+small+cells+1.1.pdf>,
<https://www.antennebureau.nl/actueel/nieuws/2020/december/18/infographic-rol-gemeenten-bij-plaatsing-antennes>

overschrijden. Dit wordt in Nederland door Agentschap Telecom (AT) bewaakt. 5G-installaties werkend met *beamforming* vallen in afwachting van een update van meetstandaard EN 62232 voorlopig buiten de verordening.

Tenslotte kan in Nederland de vereniging Monet⁶³ een rol spelen in het overleg met overheden over de plaatsing van small cell-antennes, met name als deze niet vergunningsvrij zijn. Recent is omtrent kennisgeving van een voorgenomen plaatsing van small cells in het antenneconvenant een artikel (nummer 8) toegevoegd; zie ook 2.3 van de voorbeeldnota antennebeleid⁶⁴.

2.3.4 *Nadere typering van small cells*

De typering van small cells is afhankelijk van de plaatsingsdichtheid en de afstand tot de gebruikers. In eerste instantie is deze typering gerelateerd aan indoor-systemen, wellicht omdat 80% van de mobiele gesprekken indoor wordt opgezet. Als de indoor-reikwijdte tot enkele 10-tallen meters bedraagt, wordt gesproken van een femtocell. Indien de reikwijdte groter is dan deze indicatie maar kleiner dan circa 200 m wordt deze indoor small cell aangeduid met picocell.

Afhankelijk van het outdoor-bereik wordt in analogie met de begrippen voor indoor-bereik gesproken van een *public* femtocell en van een *metrocell* als min of meer outdoor-equivalent van een picocell, waarbij de reikwijdte doorgaans gesteld wordt op een aantal honderden meters. De terminologie voor deze twee typen outdoor small cells is enigszins arbitrair aangezien aanbieders veelal hun eigen benamingen bezigen. Omdat de termen public femtocell en metrocell de context goed aanduiden, zullen deze hierna worden gebruikt.

Naast deze twee soorten is de term *microcell* gangbaar. Het bereik kan in deze radiocel oplopen tot ongeveer 2 km en valt daarmee buiten de grootste 5G small cell-dekking die door ETSI is geconcipieerd en zoals deze ook nationaal wordt gehanteerd⁶⁵.

2.3.5 *Algemene 5G small cell-systeemontplooiing*

Het uitgangspunt voor de uitrol van 5G small cell-systemen is dat deze toegang kunnen geven tot de mobiele diensten van meerdere providers. Meestal zijn de small cell-systemen aangesloten op een bekabelde breedbandige internetaansluiting zoals glasvezel maar het is ook denkbaar dat dit via de draadloze weg verloopt, veelal via straalverbindingen in de vorm van millimetergolf backhaul-verbindingen.

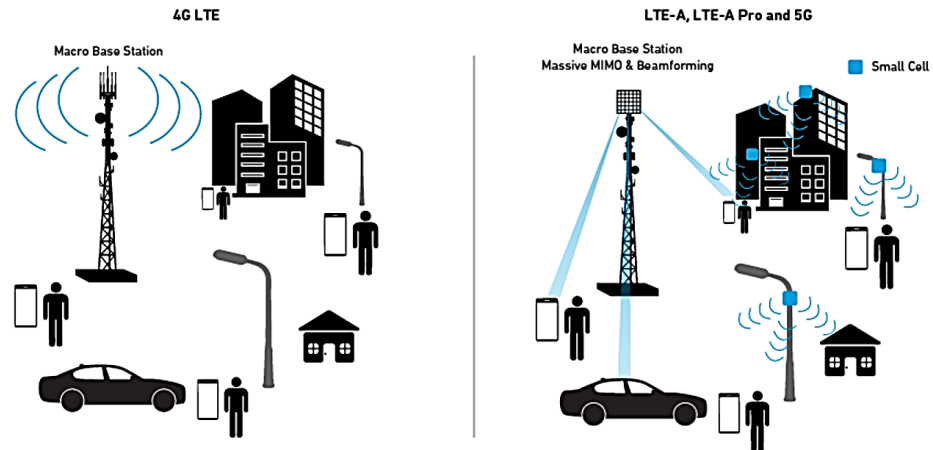
In Figuur 8 is de outdoor-dekking van de 5G en pre-5G systemen rechts weergegeven waarbij expliciet de outdoor 5G small cell-systemen zijn aangeduid⁶⁶. Hierbij kan opgemerkt worden dat metrocells technisch ook met 4G-technologie mogelijk zijn terwijl dit links in Figuur 8 niet expliciet is aangegeven. Sinds ongeveer vijf jaar worden 4G-metrocells in Nederland gerealiseerd met een reikwijdte van 200 m en wel binnen macrocellen om lokaal te kunnen voorzien in meer capaciteit, ook in aanloop naar 5G.

⁶³ www.monet.nl

⁶⁴ <https://www.antennebureau.nl/actueel/nieuws/2021/april/29/nieuwe-voorbeeldnota-gemeentelijk-antennebeleid>

⁶⁵ <https://www.antennebureau.nl/binaries/antennebureau/documenten/brochures/2020/juli/24/factsheet-verschillen-tussen-4g-en-5g/Factsheet+Verschillen+4G-5G.pdf>

⁶⁶ <https://www.qorvo.com/design-hub/blog/tips-and-trends-small-cell-5g-systems>



Figuur 8: Algemene outdoor ontplooiing van 5G en pre-5G (r) vergeleken met die van 4G (l)
[bron: Qorvo⁶⁶]

Tevens is in Figuur 8 het functionele verschil aangegeven waarop de verschillende generaties dekking tot stand brengen: in (pre-) 5G (rechts) worden meerdere individuele gebruikers door mMIMO (massive Multiple Input, Multiple Output) tegelijk door adaptieve multi-user beamforming aangestraald en gevolgd terwijl voor 4G (links) van deze selectieve en adaptieve belichting geen sprake is. Tenslotte moet opgemerkt worden dat 5G voor small cells ook mMIMO kan gebruiken, terwijl Figuur 8 (rechts) ten onrechte zou kunnen suggereren dat dit alleen voor de macro basestation zou gelden.

2.3.6 Technische eisen, systeemeigenschappen en cel-dimensioneringsaspecten

In de EU uitvoeringsverordening is bepaald dat small cell-apparatuur gebonden is aan een maximaal volume (30 liter voor de zichtbare delen en -zendvermogen. Voor wat betreft dit laatste is de verordening van toepassing op de installatieklassen E0, E2 en E10 die corresponderen met een maximale EIRP (Effective Isotropic Radiated Power) van respectievelijk een aantal milliwatt, 2 watt en 10 watt. Onderstaand is in Tabel 2 een overzicht gegeven van eisen per installatieklasse⁶².

Afgezien van zendontvanger-eigenschappen wordt de radiodekking van een moderne mobiele communicatie-cel en specifiek die van een 5G small cell ook onder meer sterk bepaald door de mate van beamforming (uitgedrukt in de *beamforming gain*), de vereiste maximale datasnelheid per gebruiker en de fysieke omgeving. Bij dit laatste moet concreet gedacht worden aan de invloed van de lokale bebouwing en -begroeiing. Daarnaast spelen voor 26 GHz ook weerscondities mee.

Tabel 2: Eisen voor small cell-systemen [bron: Antennebureau⁶²]

	Installatieklasse		
	E0	E2	E10
Maximaal vermogen (EIRP)	enkele milliwatt	≤ 2 watt	≤ 10 watt
Indoor minimale plafondhoogte	geen	geen	4 meter
Minimale plaatsingshoogte	geen	geen	2,20 meter
Maximum volume zichtbare delen	30 liter	30 liter	30 liter
Voorbeeld	Indoor hotspot	Indoor DAS-systeem	4G/5G small cell
Illustratie			

Sommige inschattingen geven aan dat meer dan 50 *ultra-small cells* per km² benodigd zouden zijn om alle 5G-diensten te kunnen leveren⁶⁷. Ter indicatie: volgens een optimale vlakvulling met regelmatige zeshoeken ('honingraten') zou dit neerkomen op radiocellen met een maximaal bereik van minder dan 88 m. Een ander voorbeeld⁶⁸ waarin gesproken wordt van een minimale site-dichtheid van 900 small cells per oppervlakte met een straal van 3 km (circa 32 small cells per km²) komt overeen met een bereik van 100 m en valt dus net als de voorgenoemde 88 m in de lage kant van de range die door ETSI voor *small cell* is vastgesteld. Berekeningen voor Nederland⁶⁹ wijzen uit dat voor het dichtste stedelijke gebied, bijvoorbeeld in de centra van Amsterdam, Rotterdam en Den Haag gemiddeld uitgegaan kan worden van een site-dichtheid van 3,67 per km² zoals in Tabel 3 is aangegeven.

Tabel 3: Gebruikers- en site-dichtheden in Nederland naar *geotype* [bron: ScienceDirect⁶⁹]

Geotype	Total Population	Total Sites	Total Area (km ²)	Average Population Density (km ²)	Average Site Density (km ²)	Average Site Density (50% site share) (km ²)
Urban	1,567,800	520	146	11,790	3.67	1.84
Suburban 1	2,896,235	1027	545	5401	1.93	0.96
Suburban 2	2,836,390	1075	1012	2932	1.12	0.56
Rural 1	2,690,045	1347	2512	1176	0.63	0.32
Rural 2	1,283,830	717	2657	493	0.32	0.16
Rural 3	1,313,645	806	4995	265	0.21	0.1
Rural 4	1,038,820	1368	10,857	93	0.23	0.12

Geotype-indeling naar minimale gebruikersdichtheden per km² als volgt: Urban: 7348; Suburban 1: 4046; Suburban 2: 1949; Rural 1: 672; Rural 2: 346; Rural 3: 191 en Rural 4: 0

⁶⁷ <https://www.md7.com/nl/perspectives/the-european-perspective-on-the-development-of-ultra-small-cell-for-5g/>

⁶⁸ SCF Associates Ltd: *Light Deployment Regime for Small-Area Wireless Access Points (SAWAPs)*, 3 december 2019. Publicatiebureau van de Europese Unie, Luxemburg. ISBN 978-92-76-13357-5

⁶⁹ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S073658531830830X>

Deze site-dichtheid komt overeen met een small cell-bereik van circa 300 m. Een recente studie van Dialogic^{59, p.36} suggereert impliciet ook een dergelijke waarde. Bij aanname van 50% *site sharing* neemt deze toe tot circa 400 m. Dit bereik valt nog ruim binnen de small cell-definitie en de voornoemde definitie van metrocell. Het is reëel dat een dergelijke reikwijdte met apparatuur in de E2 en E10-klassen en met de nodige *beamforming gain* mogelijk zelfs in de E0-klasse op 3,5 GHz is te realiseren. Zoals al vermeld in Paragraaf 2.3.3 zijn deze systemen met *beamforming*, in afwachting van een update van meetstandaard EN 62232, nog niet vergunningsvrij.

26 GHz daarentegen zou ingezet kunnen worden voor *public femtocells* met reikwijdtes van enkele tientallen meters. Deze zouden met E0- en eventueel E2-apparatuur tot stand kunnen worden gebracht. Zo geven realistische systeemgegevens⁷⁰ en outdoor propagatiecondities en de modellering hiervan in een stedelijke omgeving^{71,72} aan dat een outdoor small cell-systeem dat zendt met een EIRP van 100 mW met een gewenste reikwijdte van circa 40 m theoretisch al zonder beamforming is te realiseren. Indien beamforming zou worden toegepast, zou de EIRP in een dergelijke *public femtocell* aanzienlijk kunnen worden gereduceerd⁷³ zodat dit systeem overtuigend valt binnen installatieklasse E0. Hierbij moet opgemerkt worden dat de combinatie van aanzienlijke gains voor de beamforming en dito gains van individuele antenne-elementbundels ook nodig zijn om demping door objecten, bosschages en neerslag op deze relatief hoge radiofrequentie te compenseren en gelijktijdig gebruik op hoge datasnelheden binnen deze radiocellen met aanzienlijke gebruikersdichtheid mogelijk te maken. Voor small cell-toepassingen bestaan ook al kleine antennes voor frequenties vanaf 60 GHz. Gebruik van deze frequentie maakt ook deel uit van 5G maar is in Nederland nog niet als zodanig gealloceerd. De voorziene algemene toepassing is realisatie van een draadloze backhaul, de verbinding van de small cell-antenne naar het vaste netwerk.

- 2.3.7 *Technologische realisatie van small cell-systemen en hun installatie; fabrikanten*
Omdat de uitvoeringsvorm van small cell-systemen doorgaans klein moet zijn, worden alle deelsystemen meestal geïntegreerd in één behuizing. Het gaat om een zendontvanger, een antennesysteem, een verwerkingseenheid voor de radiosignalen, een voeding en kabelverbindingen.

Voor frequenties in de 3,5 GHz-band zijn diverse systemen verkrijgbaar die voldoen aan de criteria die genoemd worden in de Europese uitvoeringsverordening EU 2020/1070. Deze worden aangeboden door fabrikanten zoals Ericsson, Qualcomm, ZTE, Huawei en Nokia. Het gaat daarbij om geïntegreerde uitvoeringen van zendontvangers met antennes die meestal geschikt zijn voor gelijktijdige dekking door meerdere operators. Soms is het aantal antennes uit te breiden waardoor in principe beamforming mogelijk wordt.

De indruk bestaat dat mMIMO waardoor diverse individuele gebruikers (*multi-user*) met smalle, gerichte bundels kunnen worden bediend en gevolgd, vooral voorbestemd is voor mmWave frequenties, dus boven 6 GHz. Enerzijds is dit het geval omdat de ontwikkeling van mMIMO zich vooral afspeelt vanaf de C-band (4-8 GHz) en anderzijds omdat de beperking van het volume van small cell-systemen en

⁷⁰ <https://ieeexplore.ieee.org/document/7226781>

⁷¹ Shu Sun et al.: *Propagation Path Loss Models for 5G Urban Micro- and Macro-Cellular Scenarios*, 83rd Vehicular Technology Conference (VTC2016-Spring), Mei 2016

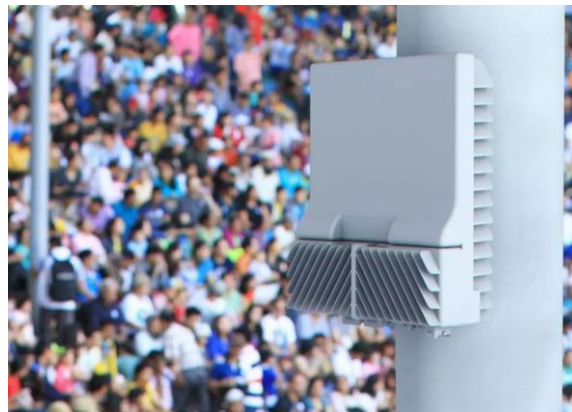
⁷² <https://www.mdpi.com/2079-9292/9/2/339/pdf>

⁷³ <https://www.mwrf.com/technologies/systems/article/21131231/knowles-precision-devices-building-blocks-for-28ghz-small-cells>

dus van -antennes deze trend ook afdwingt. Bij dit laatste moet aangetekend worden dat het niet altijd kosteneffectief of praktisch haalbaar zal zijn een relatief groot uitgevoerd small cell-systeem te camoufleren.

Over geavanceerde mmWave-antennes voor 5G is de nodige informatie te vinden in de Monitor voorjaarseditie van 2019⁷⁴. In aanvulling hierop kan worden opgemerkt dat de in Paragraaf 2.3.6 genoemde praktische randvoorwaarden voor (in casu 26 en 28 GHz) mmWave small cell-systemen doorwerken naar de technische eisen voor zendontvangers en antennes. De concrete dekkingslocatie en -situatie stellen immers eisen ten aanzien van onder meer volume, temperatuurbestendigheid, de integratiemogelijkheden van de behuizing in- of aan objecten en daarmee aan het totale gewicht. De ontwerpuitdaging wordt dan om bij het miniaturiseren en integreren van deelsystemen de kosteneffectiviteit in het oog te houden en niet teveel in te leveren op de efficiëntie en temperatuurstabiliteit van de eigenschappen van deelsystemen zoals antenne-elementen, beamforming ICs, RF-filters, mixers et cetera. Het aantal antenne-elementen zal hiertoe tot 64 beperkt moeten blijven⁷⁵. Vanuit een ander oogpunt, namelijk de beperking van onderlinge signaalstoring tussen gelijktijdige bundels (*beams*) is dit maximum aantal elementen ook in de genoemde Monitor voorjaarseditie van 2019 genoemd.

Vooraf op mmWave-frequenties is het belangrijk om verliezen in met name de passieve systeemelementen te beperken om voldoende EIRP en dus dekking te bereiken. Het verhogen van de gain per antenne-element gaat namelijk gepaard met een toename van kosten en complexiteit en wordt daardoor begrensd⁷⁶. De fabricage van mmWave small cell-systemen rond 26 GHz en hoger wordt geleverd door de grote fabrikanten zoals Samsung, Ericsson, Huawei, Qualcomm, LG en Nokia⁷⁵. Zo heeft in december 2020 LG met Qualcomm het eerste 28 GHz 5G-netwerk in Zuid-Korea uitgerold op een universiteitscampus⁷⁶.



Figuur 9: Voorbeeld van een mmWave small cell-systeem: Nokia AirScale mmWave op 28 en 39 GHz [bron: Nokia⁷⁷]

Fabrikanten kunnen zich verenigen in het Small Cell Forum⁷⁸, een industrieel platform voor samenwerking en nadere collectieve specificatie op het gebied van small cell-technologie.

⁷⁴ TNO 2019 R10725, juni 2019, Paragraaf 2.3

⁷⁵ <https://www.microwavejournal.com/articles/33774-nokia-expands-5g-offering-with-new-radio-access-airscale-solutions>

⁷⁶ <https://www.greyb.com/5g-companies/>

⁷⁷ <https://www.nokia.com/networks/products/airscale-mmwave-radio/>

⁷⁸ <https://www.smallcellforum.org/>

Bij het vaststellen van het radiodekkingsgebied van een small cell-systeem op een zekere specifieke locatie zal door providers gekeken worden naar de beïnvloeding van de omgeving op het stralingspatroon van de antennes. Hiertoe kunnen ter plekke metingen worden gedaan of, wellicht kosten-effectiever, computermodellen worden ingezet die de technische eigenschappen en positie van het systeem in de specifieke omgeving modelleren en op grond daarvan de dekking bepalen. Op het moment van schrijven is bekend dat Nederlandse MNO's vooral experimenteren met small cell-technologie op 3,5 GHz (zie ook de Monitor najaarseditie 2020⁷⁹) en dat slechts een enkele zich ook richt op 26 of 28 GHz-technologie.

⁷⁹ TNO 2020 R11669, nov. 2020, Hoofdstuk 6

2.4 Lokalisatie in mobiele netwerken

2.4.1 Inleiding

Draadloze lokalisatie is een discipline die al gedegen is onderzocht. In de afgelopen decennia heeft, vanwege de wereldwijde dekking buitenshuis, satellietnavigatie de lokalisatietechnologie gedomineerd. Lokalisatie op basis van een mobiel netwerk wordt gebruikt als een aanvulling, vooral in omgevingen waar GPS (Global Positioning System) niet of nauwelijks dekking heeft.

Van oudsher waren hulpdiensten de belangrijkste *drivers* achter lokalisatie in mobiele, c.q. cellulaire netwerken. Zo is Advanced Mobile Location (AML) nog steeds in gebruik als digitale dienst die de lokalisatiefunctie van de mobiele telefoon gebruikt om bij noodoproepen automatisch de (GPS)-positie aan de alarmcentrale door te geven. Overheidsinstellingen zoals de federale Amerikaanse regering die de ontwikkeling van de verbeterde alarmcentrale (911) in gang heeft gezet en de Europese Commissie die zich heeft gericht op het harmoniseren van hulpdiensten, speelden een belangrijke rol bij het standaardiseren van cellulaire lokalisatie. Hoewel lokalisatietoepassingen directe of indirecte economische winst kunnen opleveren, waren de MNO's aanvankelijk terughoudend om te investeren in de extra infrastructuur voor mobiele lokalisatie⁸⁰. Hoewel lokalisatietechnieken al in gebruik waren in de tweede generatie mobiele netwerken (2G) is het pas recent dat lokalisatie in mobiele netwerken meer aandacht krijgt bij providers. Hier speelt de evolutie naar de vijfde generatie (5G) mobiele netwerken en de mogelijkheden ervan voor onder meer lokalisatie een belangrijke stimulerende rol.

De locatie van het mobiele apparaat biedt de gebruiker aanvullende functionaliteit die bekend staat als *Location Based Services* (LBS). Deze functionaliteit kan commercieel worden geëxploiteerd door netwerkoperators en applicatieontwikkelaars. Voorbeelden van dergelijke diensten zijn navigatie, *mapping*, *geomarketing* en advertenties, *asset-tracking*, sociale netwerken, *augmented reality* (AR), locatiegevoelige facturering, et cetera. De locatie-informatie kan ook worden gebruikt voor netwerkoptimalisatie hetgeen vooral interessant is voor MNO's. Gesteld mag worden dat lokalisatie heeft geleid tot een paradigmaverschuiving in mobiele dienstverlening.

In kort bestek zullen eerst de lokalisatie- en plaatsbepalingstechnologieën worden besproken waarbij deze eveneens onderling zullen worden vergeleken. Vervolgens wordt ingegaan op de realisatie van lokalisatie in mobiele netwerken ofwel cellulaire lokalisatie. Vervolgens wordt specifiek stil gestaan bij de uitdaging van indoorlokalisatie. Daarna zullen huidige en toekomstige trends in cellulaire lokalisatie worden toegelicht en worden tenslotte enige verwachtingen verwoord.

2.4.2 Technische benaderingen van lokalisatie/plaatsbepaling

De termen lokalisatie en plaatsbepaling of *positioning* worden in de literatuur vaak door elkaar gebruikt. Terwijl plaatsbepaling zich richt op het bepalen van de coördinaten van een apparaat gaat het bij lokalisatie om het plaatsen van deze coördinaten op een digitale kaart waardoor dus coördinaten in een context worden gebracht. Plaatsbepaling kan worden beschouwd als de belangrijkste *enabler* voor lokalisatie. Deze paragraaf richt zich dan ook op plaatsbepaling waarbij de diverse

⁸⁰ J. A. d. Peral-Rosado, R. Raulefs, J. A. López-Salcedo en G. Seco-Granados: *Survey of Cellular Mobile Radio Localization Methods: From 1G to 5G*, IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 20, nr. 2, pp. 1124-1148, Second quarter 2018

benaderingen met hun respectievelijke sterke en zwakkere punten worden toegelicht.

Elke benadering maakt gebruik van een netwerk met twee soorten knooppunten (*nodes*): *ankers* zoals basisstations en GPS-satellieten die hun positie of coördinaten 'kennen' en *agents* zoals een smartphone of een GPS-ontvanger in de auto waarvan de posities moeten worden geschat. Ankers fungeren als referentiepunten voor lokalisatie. Door de informatie van de ankers te gebruiken, kunnen *agents* hun eigen positie bepalen door middel van een afstandsvrije- of een afstandsgerichte plaatsbepalingstechniek.

Bij de **afstandsvrije** techniek wordt de positie van de *agent* geschat op basis van topologische informatie van het netwerk, bijvoorbeeld door het vaststellen van de positie van het bewuste basisstation dat op het bewuste moment de dekking levert. Voor **afstandsgerichte** plaatsbepaling wordt de positie geschat op basis van de afstanden tussen de ankers en de *agent* die worden afgeleid uit de sterkten of tijdsverschillen van ontvangen radiosignalen door de *agent* of op basis van de hoek, c.q. richting van de ontvangen radiosignalen bij de *agent*. Voorbeelden van op afstandsgerichte plaatsbepalingstechnieken zijn trilateratie en triangulatie. Deze technieken zullen in Paragraaf 2.4.2.2 worden toegelicht.

2.4.2.1 *Onderverdeling van technieken*

Plaatsbepalingstechnieken kunnen op verschillende manieren worden gegroepeerd.

Afhankelijk van waar de berekening wordt uitgevoerd, kunnen

plaatsbepalingsalgoritmen worden ingedeeld in twee hoofdcategorieën, namelijk:

(i) **mobiel-gebaseerd**, waarbij de *agent* ofwel het mobiele apparaat zelf zijn locatie berekent door de metingen met de ankers te gebruiken en

(ii) **netwerk-gebaseerd**, waarbij het netwerk de positie van het mobiele apparaat berekent door middel van of metingen die zijn uitgevoerd door het netwerk met betrekking tot het bewuste mobiele apparaat, of via de metingen die zijn uitgevoerd en verzonden door het mobiele apparaat naar het netwerk.

Dit onderscheid is relevant voor het gebruik van meetmiddelen en computercapaciteit en het daarmee gepaard gaande energieverbruik.

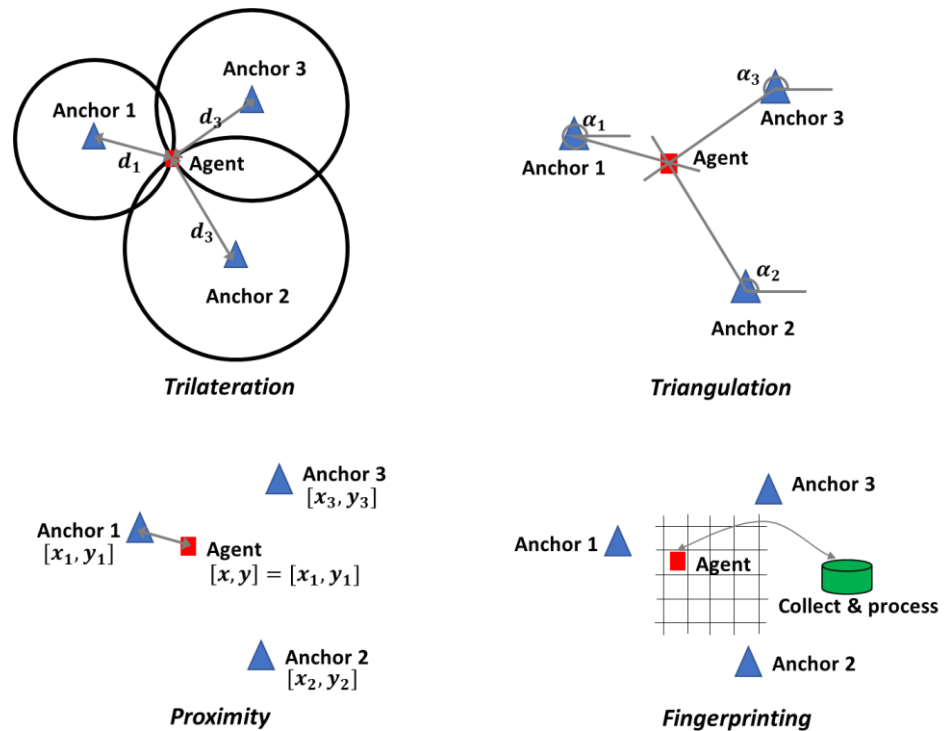
Op basis van hoe de informatie wordt uitgewisseld tussen de netwerkelementen kunnen plaatsbepalingstechnieken worden onderverdeeld in (i) niet-coöperatieve en (ii) coöperatieve algoritmen.

Niet-coöperatieve algoritmen gebruiken alleen de informatie van ankers om de positie van de *agent* te schatten terwijl in **coöperatieve algoritmen** de *agents* positie-informatie delen. Naast hun communicatie met ankers en voeren ze onderling metingen uit. Coöperatieve algoritmen kunnen vaak een betere positienauwkeurigheid bereiken dan niet-coöperatieve- ten koste van een hogere rekencomplexiteit en meer netwerkverkeer.

Vanwege praktische overwegingen zoals bedieningsgemak, energieverbruik en privacy- en veiligheidsproblematiek hebben netwerk-gebaseerde, niet-coöperatieve plaatsbepalingstechnieken vaak de voorkeur voor lokalisatie in mobiele netwerken.

2.4.2.2 *Veel toegepaste plaatsbepalingstechnieken in mobiele netwerken*

De volgende technieken worden veel gebruikt voor plaatsbepaling in mobiele netwerken (zie Figuur 10):



Figuur 10: Gangbare plaatsbepalingstechnieken in mobiele netwerken [bron: IEEE⁸⁰]

- Trilateratie:** de positie van de *agent* wordt geschat door de bepaling van het snijpunt van cirkels of hyperbolen die worden gecreëerd door afstandsmetingen tussen de *agent* en de ankers. Deze afstand wordt geschat door middel van afstandsmettechnieken zoals aankomsttijd (ToA: Time of Arrival), tijdsverschil van aankomst (TDoA: Time Difference of Arrival) of de ontvangen sterkte van radiosignalen (RSS: Received Signal Strength). De trilateratietechniek wordt bijvoorbeeld door GPS-ontvangers gebruikt. Trilateratietechnieken hebben vaak een lage complexiteit. Bovendien hebben trilateratie-implementaties een grote *installed base*. Nadelen zijn dat een nauwkeurig propagatiemodel vereist is en dat de werking in indroomgevingen doorgaans matig tot slecht is.
- Triangulatie:** de richting of hoek van aankomst (DoA of AoA) van ontvangen radiosignalen wordt gebruikt om de positie te schatten. Dit wordt gedaan door het snijpunt van ten minste twee bekende richtingen van het inkomende signaal te gebruiken en wel door de verwerking van ontvangen antennesignalen bij de *agent*, bijvoorbeeld van signalen van *dual-polarized* antennes of door de faseverschillen van de ontvangen signalen van de verschillende elementen van een *phased array* van de *agent* te bepalen. De triangulatietechniek is niet erg complex maar is wel afhankelijk van de aanwezigheid van vrij-zichtlijn omstandigheden. De indoorwerking van triangulatie is meestal matig tot gemiddeld.
- Proximity:** de positie van het dichtstbijzijnde anker wordt gebruikt als de geschatte positie van de *agent*. Een dergelijke techniek is toegepast in vroege GSM-netwerken waar de positie die wordt gedeeld die van het basisstation is waarmee men op dat moment verbinding heeft. Dit is de *Cell-ID* methode ofwel CID. Later is deze nog wat verfijnd tot E-CID (Enhanced Cell ID) waardoor de

nauwkeurigheid is toegenomen. *Proximity* is relatief eenvoudig maar de nauwkeurigheid wordt bepaald door het aantal ankers.

- **Fingerprinting:** bij deze benadering wordt een database aangelegd waartoe per locatie uitgebreide signaalmetingen worden verricht zoals RSS, tijdvertraging of spreiding van de kanaalvertraging. Deze informatie levert tezamen voor een bepaalde locatie een *fingerprint* op. De metingen worden meestal uitgevoerd door een bewegende *agent* die deze informatie doorgeeft aan de beschikbare ankers in een omgeving waar lokalisatie moet worden uitgevoerd. Het algoritme is gebaseerd op het bepalen van de beste match voor een bepaalde signaalmeting uit de database. Uit deze *best match* volgt de positie van de agent.
Bij het bepalen van de *best match* kan bijvoorbeeld gebruik worden gemaakt van patroonherkenningsalgoritmen, eventueel met AI in de vorm van Machine Learning (ML). Het relatief groot aantal benodigde signaalmetingen door de ankers is een nadeel van deze techniek. Als de *fingerprints* eenmaal beschikbaar zijn, kan de bepaling van de *agent*-positie eenvoudig en relatief snel plaatsvinden. Een voordeel is dat de methode weinig afhankelijk is van radiopropagatie. Met name in indooromgevingen kan de nauwkeurigheid van deze methode bevredigend zijn.
- **Hybride techniek:** dit betreft een combinatie van een van de bovengenoemde plaatsbepalingstechnieken. Deze wordt ingezet wanneer bepaalde signaalmetingen niet beschikbaar zijn of om de algehele plaatsbepalingsnauwkeurigheid te verbeteren.

2.4.2.3 Onderlinge vergelijking van plaatsbepalingstechnieken

Tabel 4 geeft een vergelijking op hoofdlijnen tussen de verschillende technieken. Merk op dat de laatste rij van deze tabel de hybride vorm weergeeft. Te zien is dat 3G-, 4G- en 5G-systemen meerdere lokalisatietechnieken toepassen. Zo gebruikt E-CID bijvoorbeeld AoA en andere metingen naast op RSS gebaseerde metingen.

Tabel 4: Onderlinge vergelijking van plaatsbepalingstechnieken

Aspect	Trilateratie			Triangulatie	Finger-printing	Proximity
	RSS	ToA	TDoA	AoA/DoA		
<i>Tijdsynchronisatie tussen ankers en agents</i>	Niet nodig	Essentieel	Niet nodig	Niet nodig	Niet nodig	Niet nodig
<i>Minimum aantal ankers (voor 2D-plaatsbepaling)</i>	3	3	3	2	n.v.t.	1
<i>Complexiteit afstands-bepaling</i>	Laag	Gemiddeld	Gemiddeld	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
<i>Complexiteit localisatie</i>	Laag	Laag	Laag	Laag	Hoog	Laag
<i>Vrij-zichtlijn (LOS) nodig</i>	Nee	Vaak	Vaak	Ja	Nee	Nee
<i>Afhankelijkheid van nauwkeurige omgevings- en propagatiemodellen</i>	Ja	Ja, als door de variant LOS niet nodig is	Ja, als door de variant LOS niet nodig is	Nee	Nee	Nee
<i>Werking in indoor-omgeving</i>	Slecht	Matig tot gemiddeld	Matig tot gemiddeld	Matig tot gemiddeld	Redelijk tot hoog	Zoals in outdoor
<i>Andere afhankelijkheden</i>	Hoge standaarddeviatie in RSS in indoor leidt tot onnauwkeurige localisatie			Foutgevoelig als de afstand toeneemt	Uitgebreide metingen nodig	Nauwkeurigheid afhankelijk v/h aantal ankers
<i>Gebruikte versie in mobiele netwerken (voor details zie volgende paragraaf)</i>	E-CID (3.9G: LTE)	E-CID (3.9G: LTE), Multi-RTT (5G)	E-OTD (GSM), OTDoA (3G: UMTS, 4G: LTE-A, 4.5G: LTE-A Pro), UTDDoA (4G: LTE-A)	E-CID (3.9G: LTE), DL-AoD (5G), UL-AoA (5G)	RFPM (4G: LTE-A)	Cell-ID (GSM, 3G), E-CID (3.9G: LTE)

2.4.3 Cellulaire localisatie

Hoewel er geen lokalisatiemechanismen waren gespecificeerd in de eerste generatie (1G) mobiele technologieën werd het lokaliseren van voertuigen met behulp van 1G-netwerkinformatie al in 1977 onderzocht. Localisatie werd in 1995 geïntroduceerd in de 2G-standaardisatie (GSM). GSM-netwerken gebruikten benaderingen zoals CID, het simpelweg detecteren van het basisstation (BTS) waarmee de mobiele telefoon was verbonden en op Enhanced-Observed Time Difference (E-OTD) gebaseerde localisatie die triangulatie tussen basisstations uitvoert. Met CID kon een lokalisatienauwkeurigheid bereikt worden in de orde-grootte van 500 m tot 15 km, afhankelijk van de locatie. Met E-OTD kon in

vergelijking met CID een tienvoudige nauwkeurigheid bereikt worden⁸¹. De 3G (UMTS) specificaties⁸² definieerden begin 2000 de lokalisatiemethoden op basis van CID, het waargenomen tijdsverschil van aankomst (OTDoA) in downlink en Assisted-GPS⁸³ (A-GPS, waarbij GPS-lokalisatie wordt ondersteund door informatie van andere externe bronnen dan navigatiesatellieten).

De LTE-technologie (Release 9) die eind 2009 de evolutie van mobiele netwerken naar 4G heeft geïnitieerd, specificeerde de plaatsbepalingsmethoden binnen TS 36.355. Verbeteringen betroffen:

- Uitgebreide cell-ID (E-CID);
- OTDoA met een speciaal referentiesignaal voor plaatsbepaling (PRS: *positioning reference signal*);
- Assisted-GNSS (*global navigation satellite systems* zoals GPS, GLONASS en Galileo)⁸⁴ en
- het LTE-plaatsbepalingsprotocol (LPP: *LTE positioning protocol*).

E-CID combineert cel-dekking met aanvullende metingen zoals AoA, timing en signaalsterktemetingen.

Begin 2011 introduceerde de 4G (LTE-Advanced)-standaardisatie verschillende verbeteringen in plaatsbepalingsmethoden, namelijk:

(i) **Network-Based Positioning** in Release 10 die Uplink TDoA (UTDoA) gebruikte om lokalisatiemogelijkheden te ondersteunen voor oudere mobiele telefoons zonder downlink OTDoA-mogelijkheden;

(ii) **Radiofrequency Pattern Matching (RFPM)** waarvoor een database met *signal fingerprints* nodig is die verband houden met een geografische positie en

(iii) **Positioning Enhancements** die gebruik maken van multi-antenne transmissiediversiteit, netwerkheterogeniteit en *coordinated multipoint* (CoMP).

Met 4G kon een plaatsbepalingsnauwkeurigheid van ongeveer 50 m worden bereikt. De toenemende nauwkeurigheid gaat hand in hand met de opkomst van toepassingen die niet alleen voordeel bieden voor vooral de hulpdiensten maar ook voor de industrie en consumenten. Daarbij valt te denken aan toepassingen zoals indoor navigatie voor robots in fabriekshallen, autonoom rijden, et cetera. Voor dergelijke toepassingen is GPS vaak veel minder geschikt omdat dekking in indooromgevingen en in sommige buitenruimten niet is gegarandeerd. Ondanks het feit dat MNO's hier financieel mogelijk interessante cases hebben, in ieder geval interessanter dan lokalisatie voor hulpdiensten, lijkt de investering voor deze verbeterde plaatsbepalingstechnologieën MNO's vooralsnog af te schrikken.

3GPP Release 13, bekend als LTE-Advanced Pro (4.5G), bracht begin 2016 verdere verbeteringen in plaatsbepaling zoals verbetering van OTDoA, device-to-device (D2D)-gestuurde plaatsbepaling, toepassing van Multiple Input, Multiple Output (MIMO), WLAN/Bluetooth, terrestrische bakensystemen (TBS) en Barometer.

3GPP Release 15, de eerste 5G-specificatie, biedt naast UE (User Equipment)-gebaseerde plaatsbepaling al protocolondersteuning voor RAT (Radio Access Technologies)-onafhankelijke plaatsbepalingstechnieken. Het bevat ondersteuning voor Real-Time Kinematic Positioning (RTK), een satelliet navigatietechnologie die

⁸¹ T. D'Roza en G. Bilchev: *An Overview of Location-Based Services*, BT Technology Journal, vol. 21, pp. 20-27, 2003

⁸² 3GPP Release 99

⁸³ TS 25.305

⁸⁴ TS 36.305

in gunstige outdoor-omstandigheden de positienauwkeurigheid van GNSS naar centimeter-niveau kan brengen.

2.4.4 *Uitdagingen rond indoorlokalisatie*

Ondanks decennia van ontwikkelingen is het nog steeds een uitdaging om overal een hoge lokalisatienauwkeurigheid te bereiken, vooral in een omgeving waar GPS-dekking problematisch is zoals in bepaalde indooromgevingen en in dichtbebouwde stedelijke gebieden, zogenaamde *urban canyons*. Terwijl huidige en vorige generaties mobiele netwerken connectiviteit kunnen bieden met mobiele apparaten die zich buiten bevinden en ook meestal met mobiele apparaten binnen, moet beseft worden dat ze niet specifiek zijn ontworpen voor lokalisatie. Met cellulaire signalen kan in buitenomgevingen lokalisatie met acceptabele kwaliteit worden bereikt, maar cellulaire lokalisatie binnenshuis heeft last van gebrek aan dekking, de aanwezigheid van aanzienlijke multipad-propagatie en het gebrek aan synchronisatie tussen kleine indoorcellen⁸⁵.

Op lokalisatie gerichte implementaties zoals UWB- of Bluetooth-positioneringsbakens zijn dus nodig voor nauwkeurige indoorlokalisatie. Om een nauwkeurige lokalisatie te verkrijgen kunnen dergelijke industriële implementaties gebruik maken van een grote signaalbandbreedte, speciale digitale kaarten en een database met uitgebreide metingen om effecten van multipad-propagatie, blokkering en qua dekking *dead spots* in specifieke indooromgevingen te verkleinen. De relatief hoge kosten en de inflexibiliteit van deze systemen beperken echter de brede toepassing van dergelijke gepatenteerde lokalisatieoplossingen en -technologieën.

2.4.5 *Huidige ontwikkelingen en toekomstige trends in cellulaire lokalisatie*

De recente 3GPP Release 16 introduceerde *native* ondersteuning voor plaatsbepaling op de 5G New Radio (NR)-*carrier*. Naast de bestaande LTE-technieken worden in deze release nieuwe technieken zoals Multicell Round Trip Time (Multi-RTT), Uplink Angle of Arrival (UL-AoA) en Downlink Angle of Departure (DL-AoD) gespecificeerd⁸⁶.

De toekomstige 3GPP Release 17 (TR 38.857) zal de mogelijkheden en eisen voor toekomstige cellulaire communicatiesystemen adresseren. Door de hogere bandbreedtes en antenne-arrays met vele elementen in toekomstige generaties cellulaire netwerken zal het mogelijk zijn om ruimtelijke propagatiekanaaldomeinen te benutten in combinatie met tijdmetingen om een veel hogere lokalisatienauwkeurigheid te bereiken in zowel binnen- als buitenscenario's. Opkomende toepassingen zoals het lokaliseren van objecten, het traceren van bewegende objecten in fabrieken en *smart transport and logistics* zullen profiteren van deze ontwikkelingen⁸⁷.

De verwachting is dat in aansluiting op de trend van 5G-systemen, 6G cellulaire communicatiesystemen zich zullen kenmerken door nog hogere frequentiebanden, bredere bandbreedtes en meer antenne-arrays. Verwacht mag dan ook worden dat

⁸⁵ A. Yassin, Y. Nasser, M. Awad, A. Al-Dubai, R. Liu, C. Yuen, R. Raulefs en E. Aboutanios: *Recent Advances in Indoor Localization: A Survey on Theoretical Approaches and Applications*, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vols. 1 of 2, doi nr. 2, pp. 1327-1346, Second quarter 2017

⁸⁶ A. Ghosh, A. Maeder, M. Baker en D. Chandramouli: *5G Evolution: A View on 5G Cellular Technology Beyond 3GPP Release 15*, IEEE Access, vol. 7, pp. 127639-127651, 2019

⁸⁷ TS 22.261

in het 6G-tijdperk lokalisatienauwkeurigheid op cm-niveau haalbaar is. Bovendien zullen lokalisatie en detectie *naast* communicatie in 6G-systemen bestaan en zullen de beschikbare middelen in tijd, frequentie en ruimte worden gedeeld⁸⁸.

2.4.6 Afsluitend

Huidige mobiele netwerken zijn geëvolueerd van een louter communicatiesysteem naar een veelzijdig systeem met verbeterde dekking en capaciteit voor een groot aantal apparaten en toepassingen. Terwijl eerdere generaties cellulaire netwerken alleen basismiddelen voor lokalisatie boden, zal lokalisatie steeds meer een ingebouwde dienst zijn in toekomstige cellulaire netwerken waarvan bovendien de nauwkeurigheid toeneemt. Dit maakt futuristische toepassingen mogelijk zoals *extended reality* (XR), autonome voertuigen en drones, intelligente netwerkfuncties et cetera. Met de ontwikkeling van intelligente netwerken zullen zich ook passieve lokalisatietechnieken aandienen voor cellulaire plaatsbepaling zoals die, welke gebaseerd zijn op het gebruik van opportunistische ontvangstsignalen, dat wil zeggen signalen die toevallig aanwezig zijn maar die wel kunnen worden gebruikt voor lokalisatie.

⁸⁸ C. de Lima, D. Belot, R. Berkvens, A. Bourdoux, A. Dardari, M. Guillaud, M. Isomursu, E.-S. Lohan, Y. Miao, A. N. Barreto, M. R. K. Aziz, J. Saloranta, T. Sanguanpuak, H. Sarieddeen, G. Seco-Granados, J. Suutala, T. Svensson and M. Valkama: *6G White Paper on Localization and Sensing*, vol. No. 12, University of Oulu, 2020

2.5 Open RAN

2.5.1 Introductie

Open RAN is de laatste jaren een steeds relevanter onderwerp geworden binnen het domein van mobiele netwerken en is bij zowel RAN-leveranciers als operators in snel tempo zeer populair geworden. Met deze technologie wordt het *Radio Access Network* (RAN) — traditioneel geleverd als één gesloten platform waarop hardware en software zijn geïntegreerd — opgesplitst in meerdere functionele softwarecomponenten die kunnen draaien op generieke hardware-platformen, dat wil zeggen platforms met hardware die softwarematig van functies kan worden voorzien. Deze softwarecomponenten hebben open interfaces waardoor niet alle componenten van dezelfde leverancier hoeven te komen. Sterker nog, de interoperabiliteit tussen componenten van verschillende leveranciers is een van de grondbeginselen van Open RAN. Het opent de deur voor nieuwe, kleinere spelers in het RAN-ecosysteem en voor open source-oplossingen die nauwelijks te vinden zijn in traditionele RAN.

In het vervolg geven we een beknopt overzicht van Open RAN en de recente ontwikkelingen in standaardisatie. Daarna volgt uitleg over het Open RAN ecosysteem dat naast de traditionele leveranciers ook veel nieuwe spelers kent. We eindigen met een blik op de toekomst: wat zijn de huidige uitdagingen voor Open RAN en hoe zal deze technologie zich de komende jaren ontwikkelen?

2.5.2 Overzicht

Een traditionele 4G/5G RAN-architectuur bestaat uit *radio units* (RU's) die bovenin de masten zijn bevestigd en *baseband units* (BBU's) die zich onderaan de masten bevinden. De radio units bestaan uit verschillende RF-ketens en antennes die de signalen verwerken, verzenden en ontvangen. De baseband units nemen de rest van de RAN protocol stack op zich en eisen daardoor ook veel meer rekenkracht op. De interface tussen de RU en de BBU wordt de *fronthaul* genoemd en de interface tussen de BBU en het *core network* wordt de *backhaul* genoemd.

De backhaul is gedefinieerd als een open interface in de 3GPP-standaarden waardoor het mogelijk is om een RAN en een core network van verschillende leveranciers met elkaar te verbinden. Voor de fronthaul is de Common Public Radio Interface (CPRI) standaard ontwikkeld⁸⁹. Deze bevat de specificaties voor de signalering (*control plane*), het transport van content (*user plane*) en synchronisatie tussen de BBU en RU. Helaas zijn er binnen deze standaard en ook binnen de opvolger Evolved CPRI (eCPRI) nooit afspraken gemaakt over hoe informatie voor *operations & maintenance* wordt uitgewisseld. De meeste leveranciers hebben er dan ook voor gekozen om hun eigen protocollen over (e)CPRI te implementeren⁹⁰. Hierdoor is interoperabiliteit tussen BBU's en RU's van verschillende leveranciers nooit een realiteit geworden en zijn nagenoeg alle operators afhankelijk geworden van een zeer beperkt aantal RAN-leveranciers.

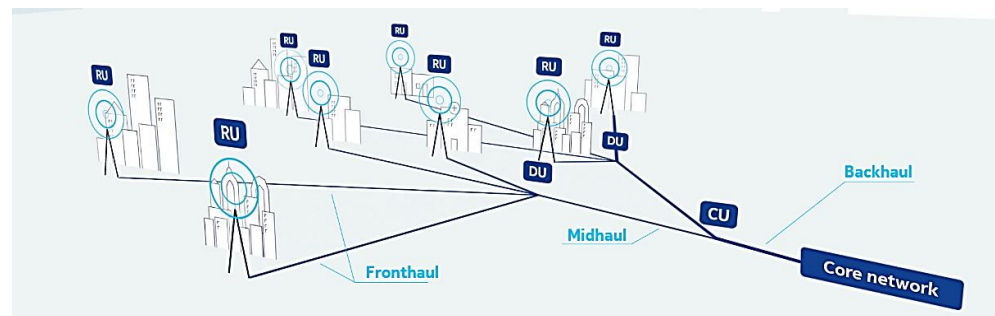
Deze afhankelijkheid wordt nog extra versterkt door het feit dat vrijwel alle BBU's en RU's als geïntegreerde componenten geleverd worden waardoor de software en hardware ook van dezelfde partij afkomstig zijn. Bovendien bieden leveranciers alleen hun eigen platform aan voor de configuratie en het monitoren van de RAN-componenten.

⁸⁹ <http://www.cpri.info/spec.html>

⁹⁰ <https://blog.wirelessmoves.com/2021/01/cpri-ecpri-oran-and-the-fronthaul.html>

Open RAN leunt op twee belangrijke concepten: het opsplitsen van het RAN in meerdere logische componenten (in het Engels: *disaggregation*) en het goed definiëren van open interfaces tussen deze componenten zodat interoperabiliteit mogelijk wordt gemaakt. Het opsplitsen gebeurt op twee manieren:

- **Opsplitsen van de RAN protocol stack.** Het RAN wordt opgesplitst in drie componenten: de *radio unit* (RU) die zich nog steeds bovenin de mast bevindt; de *distributed unit* (DU), onderaan de mast of in de *edge*; en de *centralized unit* (CU) die meestal gevirtualiseerd in de cloud wordt gerealiseerd. De BBU wordt dus vervangen door twee nieuwe componenten: de DU en CU, terwijl de nieuwe interface die tussen de DU en CU ontstaat de *midhaul* wordt genoemd, zie ook Figuur 11.
De DU kan dicht bij de antennes geplaatst worden en voert tijdkritische taken uit zoals MAC (Medium Access ofwel radiotoegang) en RLC (Radio Link Control). De CU voert de andere, hogere OSI-lagen functies uit zoals PDCP (Packet Data Convergence Protocol) en RRC (Radio Resource Control). De CU kan nog verder worden opgesplitst in een *CU user plane* (CU-UP) en een *CU control plane* (CU-CP) component. De CU-UP zorgt voor het verwerken en doorsturen van datapakketten van gebruikers. De CU-CP zorgt voor het verwerken en doorsturen van alle benodigde signalering tussen de gebruikers en het *core network* en voert de Radio Resource Management (RRM)-taken uit zoals *scheduling*.
- **Ontkoppelen van hardware en software.** De RAN-componenten worden zoveel mogelijk als software gerealiseerd die op generieke hardware-platformen kunnen draaien, bijvoorbeeld in een *virtual machine* of een *container*⁹¹ op een cloud-platform.



Figuur 11: Horizontaal opgesplitste RAN [bron: Nokia⁹²]

Naast de zogenaamde opgesplitste RAN-componenten introduceert een Open RAN-architectuur nog twee extra software-componenten: de *Near-Real-Time RAN Intelligent Controller* (Near-RT RIC) en de *Non-Real-Time RAN Intelligent Controller* (Non-RT RIC).

- Op de **Near-RT RIC** kunnen applicaties gezet worden (genaamd *xApps*) die tijd-kritische RAN-processen aansturen zoals handovers en interferentie-

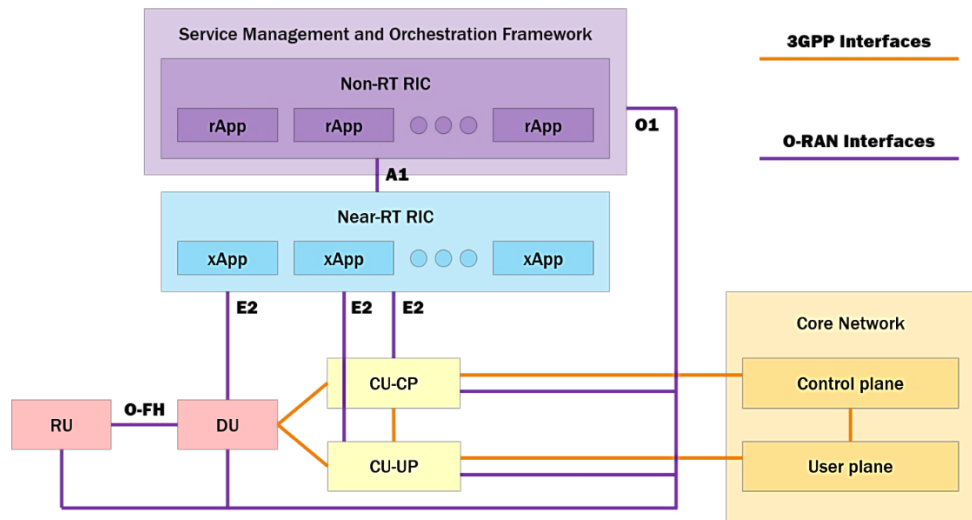
⁹¹ Een *container* maakt een gevirtualiseerd beperkt maar generiek operating system beschikbaar voor apps met hun *libraries* en *binaries* terwijl een *virtual machine* apps met hun *libraries* en *binaries* laat runnen over een bepaald gevirtualiseerd, volwaardig operator system. Een virtual machine is daardoor veel minder portabel en trager dan wat een container biedt.

⁹² <https://www.nokia.com/about-us/newsroom/articles/open-ran-explained/>

mitigatie. Ook het uitvoeren van RRM, normaal een taak van de CU-CP, kan als applicatie op de Near-RT RIC gezet worden.

- Op de **Non-RT RIC** kunnen applicaties gezet worden (genaamd *rApps*) die minder tijd-kritische RAN-processen beïnvloeden, zoals *load balancing* en *traffic steering*.

Figuur 12 toont alle componenten van een Open RAN-architectuur. De interfaces tussen deze componenten zijn open en worden gestandaardiseerd door de O-RAN Alliance, waarover in de volgende paragraaf meer.



Figuur 12: Open RAN-architectuur

2.5.3 Standaardisatie

Het traditionele 4G RAN-ecosysteem kent eigenlijk slechts drie wereldwijde spelers: Huawei, Ericsson en Nokia. Dat moet anders kunnen, vonden vijf internationale operators (AT&T, China Mobile, Deutsche Telekom, NTT Docomo en Orange). In 2018 richtten zij de O-RAN Alliance op met als doel om de RAN-industrie te transformeren naar meer open, intelligente, gevirtualiseerde en volledig interoperabele mobiele netwerken. Naast het voorkomen van *vendor lock-in* is het openen van de RAN voor operators zelf of derde partijen ook een belangrijk aspect van O-RAN. Dit vertaalt zich in bijvoorbeeld de dynamische implementatie van *RAN slicing*⁹³ die al beperkt door 5G basisstations wordt ondersteund. Het gaat dan om het slim kunnen verdelen van de verkeersbelasting of het bewerkstelligen van een snellere roaming tussen netwerken van verschillende operators als die uiteraard contractueel en technologisch meewerken. Tot nu toe zijn operators afhankelijk geweest van wat een leverancier voor hen implementeerde; met Open RAN kan de operator zelf algoritmen maken en implementeren. De O-RAN Alliance is volop bezig met specificaties voor nieuwe Open RAN-componenten zoals de Near-RT RIC en de Non-RT RIC en met specificaties voor open interfaces tussen nieuwe en bestaande componenten. Zoals in Figuur 12 te zien is, zijn de O-RAN interfaces (in het paars) een uitbreiding op de bestaande 3GPP interfaces (in het oranje) en zijn het dus geen concurrerende technologieën. 3GPP-interfaces zijn onderdeel van

⁹³ In state-of-the-art oplossingen wordt het core network gevirtualiseerd geleverd, onder meer om *network slicing* mogelijk te maken.

een O-RAN architectuur, maar omgekeerd (nog) niet. O-RAN gaat als het ware een paar stappen verder dan 3GPP in het opsplitsen en definiëren van interfaces.

De belangrijkste nieuwe interfaces gedefinieerd door de O-RAN Alliance zijn:

- **O-FH** is de Open Fronthaul interface, die zich tussen de DU en de RU bevindt. Dit is de eerste specificatie van een daadwerkelijk open fronthaul, die het mogelijk maakt om de DU en de RU van verschillende leveranciers met elkaar te verbinden;
- **O1** is de interface tussen de opgesplitste RAN-componenten en het *Service Management and Orchestration Framework* (SMO). Het SMO ontvangt via de O1 interface data van de verschillende componenten die gebruikt kan worden om bijvoorbeeld een *machine learning* model te trainen of om de prestaties van het netwerk in de gaten te houden. De O1-interface wordt ook gebruikt om typische *management & orchestration*-taken in te stellen op de RAN-componenten, zoals KPI (Key Performance Indicators) en PM (Performance Monitoring)-jobs;
- **E2** is de interface tussen de opgesplitste RAN-componenten en de Near-RT RIC. xApps gebruiken de E2-interface om data te verzamelen van de RAN-componenten om deze vervolgens te optimaliseren. De tijdschaal waarop dit gebeurt ligt tussen 10 milliseconden en 1 seconde;
- **A1** is de interface tussen de Non-RT RIC en de Near-RT RIC. De Non-RT RIC kan deze interface gebruiken om de Near-RT RIC te voorzien van
 - (i) updates over het beleid, zoals het gebruiken van een ander *scheduling* algoritme,
 - (ii) updates van de *machine learning*-modellen en
 - (iii) informatie van buiten het RAN die van pas kan komen bij optimaliseren zoals de GPS-locaties van gebruikers. De tijdschaal waarop dit gebeurt is groter dan 1 seconde.

Naast het ontwikkelen van specificaties organiseert de O-RAN Alliance een aantal keer per jaar zogenaamde *plugfests*. Hierbij werken telecom operators, hardware- en softwareleveranciers samen om de interoperabiliteit te testen tussen verschillende componenten. Momenteel zijn hierbij (nog) geen Nederlandse operators actief betrokken.

De O-RAN Alliance werkt ook nauw samen met een aantal andere organisaties:

- In april 2019 werd de *O-RAN Software Community* opgericht, een samenwerking tussen de Linux Foundation en de O-RAN Alliance⁹⁴. De O-RAN Software Community heeft tot doel om open source RAN-componenten te ontwikkelen zoals de Near-RT RIC, Non-RT RIC, CU, DU en daarnaast ook een cloud- en virtualisatieplatform.
- In februari 2020 hebben Telecom Infra Project (TIP) en de O-RAN Alliance de ambitie uitgesproken om samen te werken op het gebied van open en interoperabele RAN-oplossingen⁹⁵. Er is afgesproken om informatie uit te wisselen, specificaties op elkaar af te stemmen en samen testen en trials uit te voeren.

⁹⁴ <https://www.o-ran.org/s/FINAL-O-RAN-OSC-190402.pdf>

⁹⁵ https://www.o-ran.org/s/2020-02-25_O-RAN-TIP-PR-v10.pdf

- In augustus 2020 kondigde Open Networking Foundation (ONF) de ontwikkeling aan van een open source-implementatie van de Near-RT RIC⁹⁶. Als onderdeel hiervan wordt samen met de O-RAN Software Community gewerkt aan een *portability SDK* (Software Development Kit) die ervoor moet zorgen dat xApps straks op beide Near-RT RICs kunnen draaien. Let wel: de meeste implementaties van de Near-RT RIC (en de andere componenten) zijn *closed-source*. O-RAN betekent **niet** dat alles open-source is maar alleen dat de *interfaces* op de componenten 'open' zijn.
- In december 2020 hebben Next Generation Mobile Networks (NGMN) en de O-RAN Alliance een overeenkomst ondertekend om samen te werken op het gebied van transport tussen de verschillende RAN-componenten⁹⁷. Het gaat hier om het optimaliseren van het transport en gaat dus wel de richting op van de implementatie.

2.5.4 Ecosysteem

Van de traditionele RAN-leveranciers zijn Nokia en Ericsson beide erg actief in de verschillende werkgroepen van de O-RAN Alliance. Hun jarenlange ervaring in andere standaardisatiegroepen en het feit dat Open RAN de afgelopen anderhalf jaar flink wat momentum heeft gekregen, heeft ze waarschijnlijk toch doen besluiten om lid te worden. Huawei heeft nog niet van zich laten horen, vermoedelijk omdat ze (nog) niet in de technologie geloven⁹⁸ in tegenstelling tot andere partijen, waaronder Chinese.

Er zijn ook veel nieuwe aanbieders van Open RAN hardware en software omdat het makkelijker wordt gemaakt om als kleinere partij toe te treden in het ecosysteem. Vroeger moest de volledige *RAN stack* geleverd worden, nu kan een bedrijf zich focussen op slechts één RAN-component. Voorbeelden van nieuwe Open RAN-leveranciers zijn:

- Uit de VS: Mavenir, Altiorstar, Parallel Wireless, Radisys, Airspan;
- Uit de EU: Altan, Accelleran;
- Uit Azië: NEC, Fujitsu, ZTE, Samsung.

Tot slot is er nog een nieuwe belangrijke categorie in het ecosysteem: system integrators. Vroeger werden de apparatuur en het supportcontract van dezelfde leverancier betrokken maar door de mogelijkheid om RAN-componenten van meerdere leveranciers te combineren, stijgt ook de vraag naar een partij die dit voor operators makkelijk kan installeren en onderhouden. Onder andere Tech Mahindra, Amdocs en Atos zijn bedrijven die in deze niche opereren.

2.5.5 Uitdagingen

Als grootste uitdaging — en volgens tegenstanders: risico — van Open RAN wordt vaak de beveiliging genoemd. In september 2020 publiceerde Ericsson nog een artikel⁹⁹ waarin de Open RAN-architectuur als inherent onveilig wordt weggezet en het makkelijker maakt voor hackers om toegang te krijgen. Een week later

⁹⁶ <https://opennetworking.org/news-and-events/press-releases/onf-announces-new-5g-sd-ran-project/>

⁹⁷ <https://www.ngmn.org/ngmn-news/press-release/ngmn-and-o-ran-alliance-sign-co-operation-agreement.html>

⁹⁸ <https://www.huawei.com/en/publications/communicate/89/open-ran-is-a-marathon-not-a-sprint>

⁹⁹ <https://www.ericsson.com/en/blog/2020/9/open-ran-security-5g>

reageerden¹⁰⁰ operators Rakuten en Telefónica op deze claims: volgens hen geeft de openheid van het netwerk juist meer veiligheid omdat de operator mee kan kijken in alle componenten en interfaces. Er is niet langer meer sprake van *black boxes*, waarvan de veiligheid alleen maar aangenomen kan worden omdat de leverancier dat beweert.

Hoe dan ook moet gesteld worden dat de security-uitdaging toeneemt doordat de gNB is opgesplitst in meerdere componenten van verschillende leveranciers. De bewustwording hiervan speelt zeker bij de spelers van het O-RAN ecosysteem. Naar verwachting zal dan ook een passende beveiligingsoplossing op de markt komen. De indruk bestaat dat O-RAN partijen zelfs een *zero-trust* aanpak hanteren rond de *interworking* tussen de verschillende gNB-modules en met het RIC platform. Binnen O-RAN is er een speciale *Security Focus Group* die zich bezighoudt met de beveiligingsaspecten.

Een andere uitdaging is de schaalbaarheid en volwassenheid van Open RAN-apparatuur. Voor veel leveranciers is het produceren van RAN-apparatuur een nieuwe aangelegenheid dus zal het nog even duren voordat ze net zoveel kunnen leveren dan conventionele RAN-leveranciers. Ook zijn de meeste Open RAN-producten die nu op de markt komen nog niet zo geavanceerd als de overige 5G RAN-producten: technologieën zoals Massive MIMO en mmWave zijn momenteel nog nauwelijks beschikbaar. Leveranciers willen eerst een relatief eenvoudige MVP (Minimum Viable Product) realiseren om te laten zien dat het werkt.

2.5.6 State-of-the-art & perspectieven

Wereldwijd vinden er veel plugfests en trials plaats die Open RAN-technologieën gebruiken maar er is één operator die er met kop en schouders bovenuit steekt. In september 2020 lanceerde Rakuten in Japan als eerste een commercieel 5G-netwerk gebaseerd op Open RAN. Dit netwerk maakt nog gebruik van een Non-Standalone (NSA) architectuur. Dit betekent dat de 5G RAN nog verbonden is met een 4G core network. De lancering van het 5G Standalone-netwerk staat voor het tweede kwartaal van 2021 op de planning¹⁰¹. Ook Dish Wireless, een nieuwe operator van Amerikaanse bodem maakte in 2020 bekend Open RAN te gaan gebruiken voor de uitrol van hun netwerk.

Open RAN begint langzaam maar zeker ook op de agenda te komen van grote bestaande operators waarvoor het lastiger is om Open RAN-componenten te introduceren in de huidige, vaak gesloten infrastructuur. Deutsche Telekom, Orange, Telefónica, en Vodafone Group tekenden in januari 2020 een *Memorandum of Understanding* (MoU) waarin ze Open RAN bestempelen als de technologie van toekomstige mobiele netwerken en beloven zich in te zetten voor de eerste Open RAN-implementaties in Europa¹⁰². In Nederland is TNO bezig om binnen de context van 5Groningen een O-RAN op te zetten en wel als onderdeel van het Hi5-platform.

Als eerste potentiële markt voor Open RAN worden vaak netwerken in landelijke gebieden en particuliere mobiele netwerken zoals in een fabrieksomgeving of binnen een kantoor genoemd omdat de complexiteit van deze netwerken minder is.

¹⁰⁰ <https://www.telecomtv.com/content/security/telco-ctos-hit-back-at-ericsson-s-open-ran-security-scare-39705/>

¹⁰¹ <https://www.rcwireless.com/20210409/carriers/rakuten-mobile-attracts-over-3-9-million-applications-for-its-mobile-offering>

¹⁰² <https://www.politico.eu/wp-content/uploads/2021/01/20/POLITICO-Memorandum-of-Understanding-OPEN-RAN-big-four-operators-January-2021.pdf>

Nadat Open RAN hier met succes is gedemonstreerd, kan uitgebreid worden naar grotere en publieke mobiele netwerken waar ook geavanceerdere technologieën nodig zijn zoals Massive MIMO.

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.