



De ontwikkeling van het aantal antenne-opstelpunten voor mobiele netwerken in Nederland in de komende tien jaar

In de jaren 2021 t/m 2026 verwachten we dat er tussen de 296 en 726 nieuwe antenne-opstelpunten voor openbare mobiele netwerken geplaatst zullen worden in Nederland. Hiervan zijn er tussen de 100 en 150 nodig om de dekking en snelheid te kunnen realiseren die in recent uitgegeven vergunningen wordt verplicht. Deze opstelpunten komen met name buiten de steden. Doorlopende netwerkverbeteringen leiden jaarlijks tot tussen de 30 en 90 nieuwe opstelpunten, verspreid door het land, bijvoorbeeld bij nieuwe woonwijken. Hoewel de vraag naar mobiele data toeneemt, kan deze grotendeels met nieuw spectrum en technologische verbeteringen worden ingevuld zonder nieuwe opstelpunten te hoeven plaatsen. De vraaggroei leidt naar verwachting dan ook tot een beperkt aantal nieuwe opstelpunten, geconcentreerd in de grotere steden. In een versneld groeiscenario is al eerder een beperkt aantal extra opstelpunten nodig. Op basis van de huidige inzichten verwachten we geen uitrol van grootschalige small cellstructuren voor 2027. Als uitrol hiervan uiteindelijk plaatsvindt zal dit allereerst in de centra van grotere steden zijn. De inschattingen zijn gebaseerd op door ons ontwikkelde modellen en zijn ter validatie voorgelegd aan de operators en diverse belanghebbenden.

**ir. Tommy van der Vorst, ir. Jan van Rees, ir. Wazir Sahebali, ir. Menno Driesse,
ir. ing. Reg Brennenraedts MBA, prof. dr. ir. ing. Rudi Bekkers**

Opdrachtgever:

Ministerie van Economische
Zaken en Klimaat

Publicatienummer:

2020.014.2035 v1.11

Datum:

Utrecht, 31 maart 2021

Inhoudsopgave

Afkortingen	3
1 Introductie	5
1.1 Aanleiding	5
1.2 Onderzoeksvragen.....	5
1.3 Aanpak en beperkingen.....	6
1.4 Definities.....	6
2 Uitgangssituatie	9
2.1 Theorie	9
2.2 Huidige situatie	11
2.3 Verwachte ontwikkelingen	14
2.4 Strategie van de operators	22
2.5 Conclusie	26
3 Ontwikkeling aantal antenne- opstelpunten tot 2027	28
3.1 Meest aannemelijke scenario	28
3.2 Overige scenario's en invloeden	31
3.3 Onzekere factoren	34
3.4 Vergelijking met andere analyses	35
4 Impact van nieuwe antenne- opstelpunten	38
4.1 2021 t/m 2026: nieuwe macro-antenne- opstelpunten	38
4.2 Vanaf 2027: een beperkt aantal nieuwe macro-antenne-opstelpunten.....	40
4.3 Vanaf 2021: her en der invulling van 'hotspots' met losstaande small cellinstallaties.	40
4.4 Na 2026: grootschalige small cellstructuren denkbaar	41
4.5 Conclusie	43
5 Conclusie	45
Bijlage 1. Methode	47
Definities	47
Overzicht modellering.....	49
Aanbod-vraagmodel	49
Verplichtingen van de 700 MHz-vergunningen .	56
Small cellstructuren.....	58
Bijlage 2. Uitkomsten vraag- aanbodmodellering.....	60
Bijlage 3. Verantwoording.....	61
Verwijzingen	63

Afkortingen

Woord	Uitleg
5G NR	5G <i>New Radio</i> . De radiostandaard die wordt gebruikt voor 5G. Een 'opvolger' van LTE.
BBU	Base-band Unit. Onderdeel van een (verzameling van) antenne-installaties dat het (digitale) radiosignaal logisch opbouwt.
DSS	<i>Dynamic Spectrum Sharing</i> . Techniek waarbij 5G NR en LTE tegelijkertijd in dezelfde frequentieruimte kunnen worden gebruikt. De verdeling tussen 5G NR en LTE groeit mee met de adoptie van 5G NR.
LTE	<i>Long Term Evolution</i> . De standaard die in Nederland in gebruik is voor het leveren van 4G-diensten.
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i> . Techniek waarbij antennesystemen die bestaan uit meerdere interne antenne-elementen worden gebruikt om tegelijkertijd de capaciteit van meerdere propagatiepaden te kunnen gebruiken.
RRU	<i>Remote Radio Unit</i> . Onderdeel van een antenne-installatie dat analoge radio-signalen genereert en decodeert vanuit (en naar) digitale signalen. Vaak dicht bij een antenne geplaatst.

Citeren als: Dialogic, van der Vorst, Tommy, van Rees, Jan, Sahebali, Wazir, Driesse, Menno, Brennenraedts, Reg & Bekkers, Rudi (2021). *De ontwikkeling van het aantal antenne-opstelpunten voor mobiele netwerken in Nederland in de komende tien jaar*. Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, Den Haag.

1 Introductie

1.1 Aanleiding

Met koppen als "Kabinet wil 5G-masten op elke straathoek" werd medio 2019 in verschillende media¹ gecommuniceerd over de aanstaande wijziging van de Telecomwet: het implementeren van de Europese Telecomcode in de Nederlandse wetgeving. Door deze aanpassingen zijn gemeenten en andere overheidsinstanties verplicht mee te werken aan de aanleg van kleine antenne-installaties (*small cells*) in, op of aan openbare gebouwen, aan lantaarnpalen en aan verkeerslichten, ten behoeve van 5G.² Maar om hoeveel kleine antenne-installaties gaat het?

Naar aanleiding van gesprekken aan verschillende regiotafels³ formuleerden de operators een concreet antwoord: de komende jaren zou de verwachte toename van het aantal antenne-installaties beperkt blijven tot 10% [1] en deze uitrol zou in nauwe samspraak met de gemeenten plaatsvinden. Andere partijen in de keten claimden echter dat de toename van het aantal antenne-installaties wel eens veel groter zou kunnen zijn dan door de operators wordt gesteld. De verschillende standpunten in het debat worden uiteraard gekleurd door de economische en strategische belangen van de verschillende partijen. Een objectieve inschatting van het aantal te verwachten antenne-installaties ontbreekt echter. Daarnaast bestaat behoefte aan een vertaling naar de impact in de praktijk, in termen van het aantal antenne-opstelpunten in plaats van *-installaties*. Op een enkele mast (opstelpunt) kunnen immers best meerdere installaties aanwezig zijn.

Het ministerie van Economische Zaken en Klimaat heeft om deze reden Dialogic gevraagd een onafhankelijk onderzoek uit te voeren naar de te verwachten ontwikkeling van antenne-opstelpunten in Nederland in de komende zes tot tien jaar.

1.2 Onderzoeksvragen

In dit onderzoek beantwoorden we de volgende vraag:

Wat is de verwachte ontwikkeling van het aantal antenne-opstelpunten in Nederland in de komende zes jaar, ten behoeve van openbare, grootschalige mobiele communicatienetwerken?

Hierbij hebben wij de volgende deelvragen gedefinieerd:

- Welke ontwikkeling wordt *kwantitatief* verwacht in de komende zes jaar ten aanzien van antenne-opstelpunten in Nederland?
 - a) Hoeveel antenne-opstelpunten worden er, naar type (zie boven) en omgeving (zie boven) in de komende zes jaar verwacht?
 - b) Hoe verhoudt deze inschatting zich tot schattingen uit de literatuur en zoals gedaan door markt- en adviespartijen?
 - c) Welke 'drivers' spelen een rol in deze ontwikkeling, en hoe ontwikkelen deze zich binnen de tijdshorizon?
- Welke ontwikkeling wordt in de komende zes jaar *kwalitatief* verwacht ten aanzien van antenne-installaties in Nederland?
 - a) Welke typen antenne-installaties ('conventionele' macro-antenne-installaties tot en met small cells) zijn te onderscheiden, en wat zijn daarvan de voor ruimtelijk beleid relevante eigenschappen (afmetingen, uiterlijk)?
 - b) Wat zijn relevante ruimtelijke omgevingen (grootstedelijke binnensteden, kernen, buitengebied) en hoe verschilt de ontwikkeling kwalitatief tussen deze gebieden?
 - c) Welke 'drivers' spelen een rol in deze ontwikkeling, en hoe ontwikkelen deze zich binnen de tijdshorizon?

In het onderzoek kijken we tien jaar vooruit; modelmatige inschattingen maken we tot zes jaar vooruit. Een lange termijnblik is noodzakelijk voor

¹ Zie bijvoorbeeld [\[rd.nl\]](#), [\[ad.nl\]](#) en [\[androidworld.nl\]](#)

² Voor zover deze infrastructuur onder zeggenschap staat van een overheidsinstantie.

³ Waaronder in bijvoorbeeld [\[zuid-holland.nl\]](#)

beleidsvorming. Beide tijdshorizonnen zijn echter, in telecomtermen, erg lang. In zowel de kwantitatieve als het kwalitatieve deel geven we dan ook aan wat de onzekerheidsmarge en onderliggende factoren zijn.

Zoals aangegeven in de onderzoeksvraag beperken we ons tot openbare, grootschalige mobiele communicatienetwerken, en dat zijn met name de 2G – 5G netwerken. Niet-openbare netwerken als C2000 vallen buiten de scope. Ook beperken we ons tot de ontwikkeling van opstelpunten in de openbare ruimte: *inpanidige* opstelpunten vallen buiten onze ramingen (we corrigeren in de modellering van de vraag uiteraard wel voor inpanidige vraag). Vastdraadloos internet (FWA) op basis van lokale netwerken laten we buiten beschouwing.

1.3 Aanpak en beperkingen

Op basis van een gedetailleerde modellering geven we antwoord op de vraag hoeveel antenne-opstelpunten er nodig zullen zijn. De basis wordt gevormd door een model waarin vraag en aanbod worden vergeleken in verschillende scenario's. Het verschil rekenen we om tot een aantal te verwachten nieuwe opstelpunten. Dit model vullen we aan met deelvormen voor specifieke dynamiek (zoals de verplichtingen gekoppeld aan de 700 MHz-vergunningen). Op basis van interviews en literatuurstudie vullen we deze scenario's in en duiden we de resultaten. Uitgebreide informatie over onze aanpak is te vinden in Bijlage 1.

Naast de capaciteitsvraag en ontwikkeling van het aanbod zijn er andere factoren die het aantal antenne-opstelpunten kunnen beïnvloeden. Onder andere de financiële situatie van een operator, logistieke beperkingen (zoals de capaciteit van onderaannemers), het verloop van vergunningstrajecten, wijzigingen in het beleid en maatschappelijke ontwikkelingen kunnen de ontwikkeling van het aantal antenne-opstelpunten (negatief) beïnvloeden. Een operator kan daarnaast commerciële keuzes maken, bijvoorbeeld ten aanzien van de kwaliteit van de geleverde dienst en de prijs ervan (welke bijvoorbeeld de vraag kan beïnvloeden). Een nieuwe toetreders zou in korte tijd kunnen leiden tot een groei van het aantal opstelpunten. In dit onderzoek zijn deze factoren niet doorgerekend. We benoemen de factoren voor zover bekend echter wel in het rapport.

Naast de voorgenoemde factoren is het aannemelijk dat er ook *niet-voorzienbare* factoren zijn die invloed kunnen hebben op het aantal antenne-opstelpunten. Een voorbeeld is de coronapandemie, die de capaciteitsvraag op mobiele netwerken sterk beïnvloedde. Hoewel het onderzoek verder niet ingaat op onvoorzienbare factoren geeft het wel grenswaarden waarmee kan worden bepaald wanneer een bepaalde gebeurtenis of factor voldoende invloed heeft op de vraag om ook het aantal opstelpunten te kunnen beïnvloeden.

1.4 Definities

In dit onderwerpsgebied wordt volop gebruik gemaakt van verwante, maar niet altijd identieke begrippen (zo zijn er antennes, antenne-opstelpunten, antenne-installaties, cellen, sites, sectoren, basisstations, etc.). Zoveel mogelijk maken we in dit rapport gebruik van consistente terminologie, aansluitend bij de relevant regelgeving en (in de sector) gangbare begrippen. Een uitgebreid overzicht van de gehanteerde definities is eveneens te vinden in Bijlage 1.

In dit onderzoek tellen we **antenne-opstelpunten**. Dit zijn bouwwerken waarop of waaraan één of meerdere antenne-installaties zijn geplaatst. Voorbeelden zijn (vakwerk)masten, daken en gevels van gebouwen. Wanneer meerdere operators van één antenne-opstelpunt gebruik maken zijn er dus meerdere antenne-installaties aanwezig op hetzelfde opstelpunt. Het antenne-opstelpunt wordt dan *gedeeld*.

Een **antenne-installatie** is de basiseenheid voor een operator in de dimensionering van een mobiel netwerk. Het begrip wordt ook door het Antenne-register gebruikt om aantallen antennes te rapporteren. Een antenne-installatie bestaat uit antennes, een of meer antennedragers, de bedrading, de in techniekkasten opgenomen apparatuur, met de daarbij behorende bevestigingsconstructie(s) en (veiligheids)voorzieningen. Een antenne-installatie is altijd gekoppeld aan één operator, kan gebaseerd zijn op meerdere technologieën (*toepassingen*) en bestaan uit meerdere antennes en antenne-elementen.

Een **cel** is het gebied dat door een antenne-installatie wordt voorzien van mobiele dekking en capaciteit. De cellen van een operator vormen (per technologie en frequentie) een (min of meer) regelmatige structuur in het *macronetwerk*. **Small cells** zijn cellen die

zich aan deze (macro)structuur onttrekken en gericht zijn op het realiseren van aanvullende capaciteit op specifieke locaties (*hotspots*) met beperkte oppervlakte. Wanneer meerdere small cells samen een groter gebied bedekken en een regelmatige structuur vormen spreken we van *grootschalige small cellstructuren*.

2 Uitgangssituatie

In Nederland zijn drie aanbieders van openbare mobiele communicatie actief met een eigen netwerk: KPN, T-Mobile en VodafoneZiggo. De aanbieders met eigen netwerk noemen we in het vervolg van dit rapport de *operators*. Naast de operators zijn enkele tientallen aanbieders actief die gebruik maken van de netwerken van de operators. Alle aanbieders, met of zonder eigen netwerk, concurreren om consumenten en zakelijke afnemers te voorzien in hun vraag naar mobiele communicatie.

Om aan de groeiende vraag te kunnen voldoen investeren de operators continu in hun netwerk, om de dekking en capaciteit – die bepalend zijn voor de kwaliteit en doorvoersnelheid die een klant ervaart – te vergroten. Naast het inzetten van nieuwere technologieën kan een operator extra radiospectrum verwerven (wanneer dit beschikbaar komt) of meer antennes plaatsen. Het plaatsen van extra antennes vergroot de dekking, en, wanneer deze al op orde is, de capaciteit in een bepaald gebied.

In de basis kan het aantal antennes (en daarmee antenne-opstelpunten) in Nederland worden gezien als functie van de vraag: hoe groter de vraag, hoe meer antennes er nodig zijn. Dit principe vormt het uitgangspunt van onze modellering van de ontwikkeling van het aantal antenne-opstelpunten. Toch is de werkelijkheid niet zo eenvoudig: zo spelen er diverse (strategische) afwegingen, technische beperkingen, speelt timing een rol, en is het maar de vraag hoe de vraag naar mobiele data zich ontwikkelt.

In dit hoofdstuk werken we deze factoren verder uit. Allereerst gaan we in op de theorie achter mobiele netwerken (§2.1). In §2.2 beschrijven we de huidige situatie op het gebied van vraag en aanbod. In §2.3 gaan we in op ontwikkelingen hiervan. Paragraaf §2.4 beschrijft strategische overwegingen van operators. Tot slot komen we in §2.5 tot de conclusie en presenteren we een roadmap. Voor de details over de wijze waarop de kwantitatieve modellering is uitgevoerd verwijzen we naar Bijlage 1.

2.1 Theorie

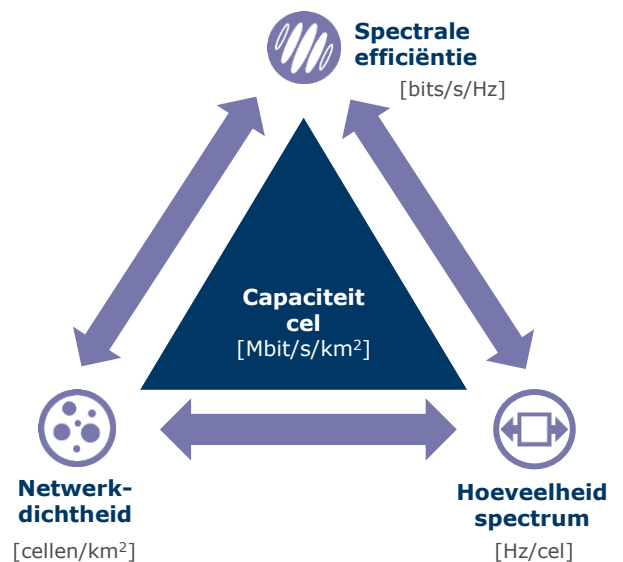
Een mobiel netwerk bestaat uit *cellen*. Een cel is een gebied waarbinnen één antenne-installatie dekking en capaciteit voorziet voor de klanten van de operator (gebruikers). Iedere cel kent een bepaalde capaciteit (uitgedrukt in Mbit/s). Deze wordt gedeeld tussen alle gebruikers die zich in de cel bevinden.

Hoe meer gebruikers er zich in een cel bevinden, hoe kleiner de capaciteit per gebruiker. De ligging en omvang van een cel zijn bepalend voor de hoeveelheid gebruikers.

In dit onderzoek vergelijken we de capaciteit die een operator op een bepaalde locatie biedt met de capaciteit die nodig is om aan de vraag te voldoen. We bepalen hiervoor de vraag per locatie en (op basis van de capaciteit van cellen) de capaciteit per locatie in Nederland.

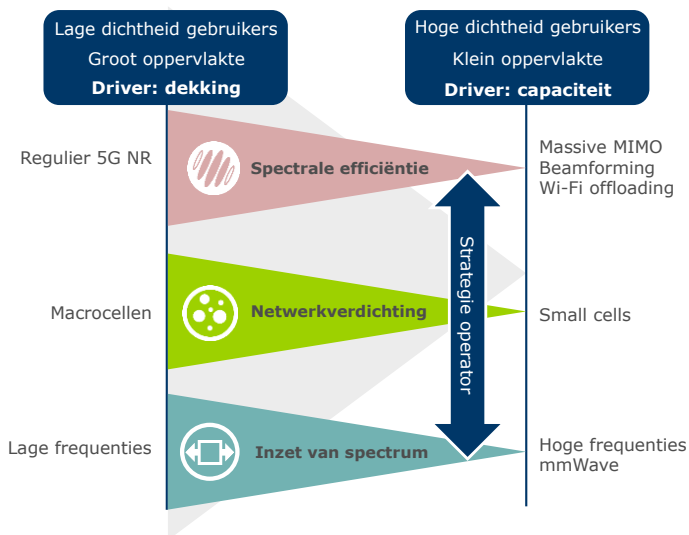
2.1.1 Capaciteit van mobiele netwerken

De capaciteit van mobiele netwerken wordt in beginsel bepaald door de volgende drie parameters: (1) de spectrale efficiëntie van de gehanteerde technologie (uitgedrukt in bits/s/Hz), (2) de hoeveelheid ingezet spectrum en (3) de mate van verdichting van het netwerk (die hergebruik van de frequentieruimte mogelijk maakt). Figuur 1 toont dit schematisch.



Figuur 1 De relatie tussen capaciteit, spectrale efficiëntie, spectrum en netwerkverdichting (illustratie: Dialogic)

Figuur 2 toont schematisch het afwegingskader van een operator. De 'mix' van oplossingen (op vlak van efficiëntie, verdichting of spectrum) wordt bepaald aan de hand van de strategie van de operator, waarin kosten een primaire rol spelen. De uitgangspositie van een operator is eveneens bepalend: heeft een operator relatief veel spectrum ter beschikking, dan kan zij andere keuzes maken dan een operator met minder spectrum; hetzelfde geldt voor het aantal opstelpunten en de apparatuur die een operator al in gebruik heeft. Een operator kan de invulling uiteraard differentiëren naar locatie en behoefte.



Figuur 2 Mogelijkheden voor vergroten capaciteit door operator (illustratie: Dialogic)

De hoeveelheid spectrum die een operator ter beschikking heeft is een parameter die voor langere tijd vaststaat: alleen via een veiling (zoals de recente multibandveiling en de veiling van de 3,5 GHz-band in 2022) en het 'refarmen' van oude technologieën (GSM, UMTS en in de toekomst LTE) kan spectrum worden vrijgemaakt voor efficiëntere inzet. Spectrum komt eens in de zoveel tijd beschikbaar. Binnenkort komt in Nederland een substantiële hoeveelheid spectrum (300 MHz) vrij in de 3,5 GHz-band.

De efficiëntie van de radiotechnologie staat voor een belangrijk deel vast gegeven de betreffende technische standaard (zoals UMTS, LTE of 5G NR). Deze standaarden worden wereldwijd ontwikkeld door 3GPP en in Europa overgenomen door ETSI. De efficiëntie die in de praktijk wordt gehaald is afhankelijk van de (prestaties van de) door fabrikanten van netwerkapparatuur en terminals geïmplementeerde delen van de standaard en uitbreidingen daarop. Omdat ook de terminal bepalend is, speelt ook de adoptie van modernere terminals door eindgebruikers een belangrijke rol.

Het 5G NR-radioprotocol is in de basis iets efficiënter dan LTE, het radioprotocol dat voor 4G wordt gebruikt. Op zichzelf is dat echter niet voldoende om substantieel hogere capaciteit te realiseren – moderne technologieën komen steeds dichterbij het theoretische maximum van een radiokanaal, gegeven door het Shannon–Hartley-theorema. Wel kan een operator, binnen een bepaalde standaard, er voor kiezen bepaalde optionele technologieën in te zetten. Het gebruik van *beamforming* en *Massive*

MIMO wordt steeds meer gemeengoed, al is dit op dit moment nog kostbaar. Beide technieken maken een hogere mate van frequentiehergebruik binnen een cel mogelijk. Operators zullen er waarschijnlijk voor kiezen om geselecteerde antenne-installaties hiermee uit te rusten.

Wanneer de beschikbare hoeveelheid spectrum en (ontwikkeling van) spectrale efficiëntie voor langere tijd vaststaan, is de derde parameter, de verdichting van het netwerk, de primaire 'draaiknop' voor een operator om capaciteitsgroei op specifieke locaties te realiseren. Naast het realiseren van dekking (wat een operator in principe doet met het macronetwerk) zal een operator willen zorgen dat op specifieke plaatsen met veel verkeer (hotspots) voldoende capaciteit wordt geleverd. Op het niveau van 'gewone' wijken en buurten kan een operator dit meestal nog wel realiseren in het macronetwerk: door meer antenne-installaties te plaatsen worden grotere macrocellen gesplitst in kleinere, daalt het aantal gebruikers per cel, en stijgt de gemiddelde beschikbare capaciteit per gebruiker.

Small cell-infrastructuur

Naarmate op een specifieke locatie de capaciteitsvraag heel hoog is, kunnen macrocellen tegen beperkingen aanlopen en wordt een aanpak op basis van *small cells* relatief efficiënter. In een regulier 'macronetwerk' vormen antennes op (meestal vrij hoge en op hoog vermogen werkende) opstelpunten samen een cellenstructuur. Small cells zijn kleinere cellen die overlappen met een 'macrocel' en (vanwege kleinere hoogte en vermogen) een beperkt gebied afdekken. De small cell functioneert in feite als een omgekeerde 'paraplu': het verkeer binnen de small cell komt niet ten laste van het macronetwerk. Small cells die met één small cellinstallatie worden gerealiseerd kunnen een gebied met een straal van enkele tientallen meters bedekken, zoals bijvoorbeeld een klein plein. Met meerdere small cellinstallaties kan een groter gebied, zoals een voetbalstadion, met small cells worden bedekt.

Op langere termijn is het denkbaar dat een operator grootschalige small cellstructuren uitrolt die meer dan één 'hotspot' bedekken. De small cells worden daarbij de primaire 'radiolaag' voor het realiseren van capaciteit, terwijl het macronetwerk op de achtergrond actief blijft voor (o.a. inbandige) dekking.

2.2 Huidige situatie

2.2.1 Vraag

2021 begon, traditioneel, met een nieuw recordvolume mobiele data tijdens de nieuwjaarsnacht; KPN verwerkte maar liefst 248 terabyte tussen 22:00 en 04:00. [2] In het tweede kwartaal van 2020 verbruikten Nederlanders in totaal 219 miljard MB aan mobiele data. Dit was 2,5% meer dan het kwartaal ervoor. Traditioneel zien we een veel hogere groei van het volume van mobiel dataverkeer: in de eerste helft van 2019 was de groei nog 19%. Het is zeer waarschijnlijk dat de coronamaatregelen die gedurende 2020 van kracht waren hieraan ten grondslag liggen. Het aantal mobiele belminuten steeg in het eerste halfjaar van 2020 fors (23%) [3]

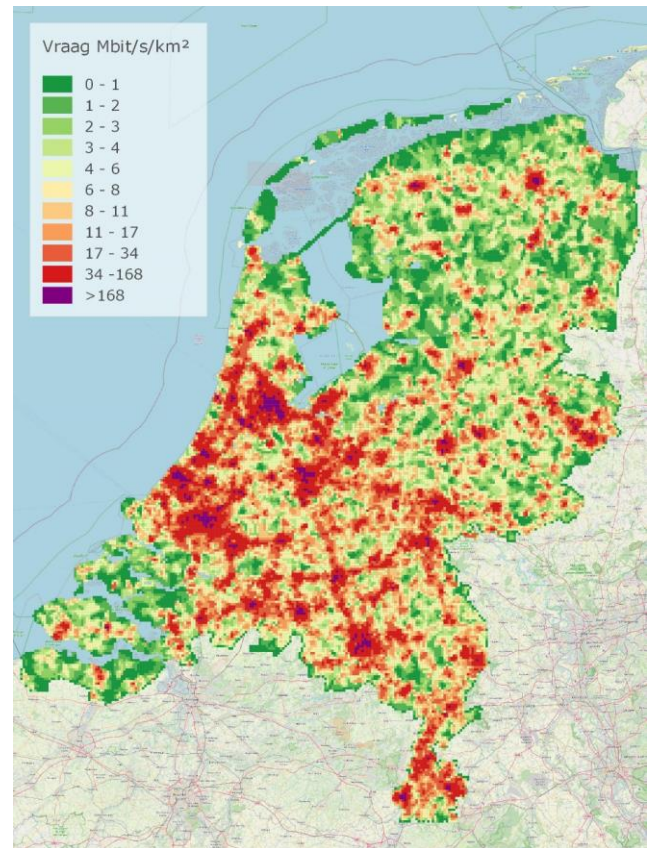
In totaal kent Nederland (Q2 2020) 21,9 miljoen mobiele aansluitingen, waarvan het merendeel (20,3 miljoen) zowel een data- als spraakdienst betreft. Dit aantal aansluitingen is de afgelopen jaren relatief stabiel gebleven. Relevant is wel dat het aantal machine-to-machine-aansluitingen nog steeds een sterke groei doormaakt: het aantal ontwikkelde zich van ongeveer 5,5 miljoen aansluitingen in 2019 tot 7,1 miljoen halverwege 2020. [3]

Geografische verdeling van de vraag

De vraag naar mobiel dataverkeer is niet evenredig verdeeld over Nederland, maar concentreert zich op locaties waar zich veel mensen bevinden. Op basis van een modellering hebben wij berekend hoe de vraag geografisch is verdeeld. Figuur 3 toont onze schatting van de huidige vraag (in Mbit/s/km²) per vierkante kilometer.⁴ De grote steden en enkele snelwegen zijn in deze kaart duidelijk waarneembaar.

2.2.2 Aanbod

De mobiele aansluitingen in Nederland worden afgenomen bij KPN (25-30%), VodafoneZiggo (20-25%), T-Mobile (25-30%) en diverse aanbieders zonder eigen netwerk (20-25%⁵). Sinds 2019 steeg het marktaandeel van T-Mobile ten koste van dat van KPN. [3]

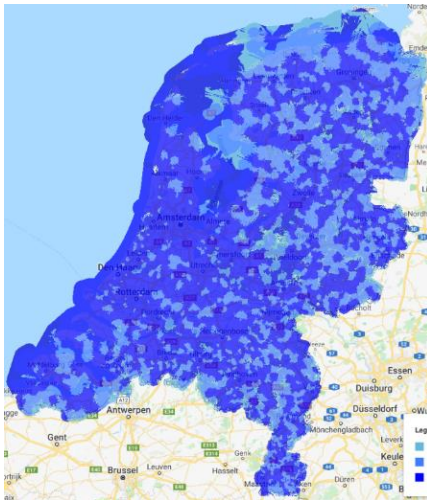


Figuur 3 Huidige vraag in Mbit/s/km² voor het combinatie-scenario (bron: modellering Dialogic; zie Bijlage 1)

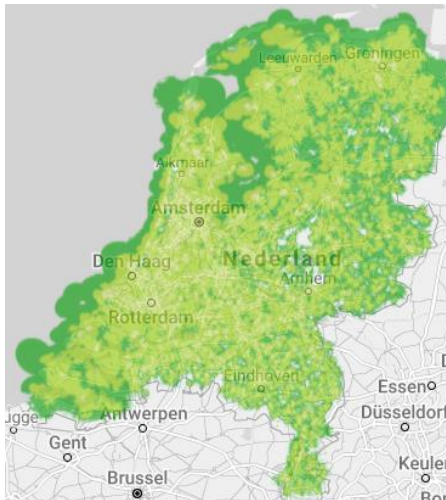
Vanuit technisch perspectief beschikt Nederland over zeer goede mobiele infrastructuur. [4] De drie mobiele operators bieden in het overgrote deel van Nederland 4G-dekking. Figuur 6, Figuur 5 en Figuur 4 tonen de dekkingkaarten van respectievelijk T-Mobile, KPN en Vodafone voor 4G mobiele data. Operators baseren deze kaarten in het algemeen op een combinatie van propagatiemodellen en praktijkmetingen. Doordat de onderstaande kaarten van de drie operators echter ieder een ander perspectief en meetmethode hanteren, kunnen ze niet gebruikt worden om de dekking van deze drie netwerken met elkaar te vergelijken.

⁴ Hierbij is per vlak van 1 km² telkens de hoogste vraag genomen zoals berekend in de thuis-, werk- en spitsituatie. In de modellering zijn beperkingen als gevolg van pandemiemaatregelen niet meegenomen, tenzij anders aangegeven. Zie Bijlage 1 voor toelichting.

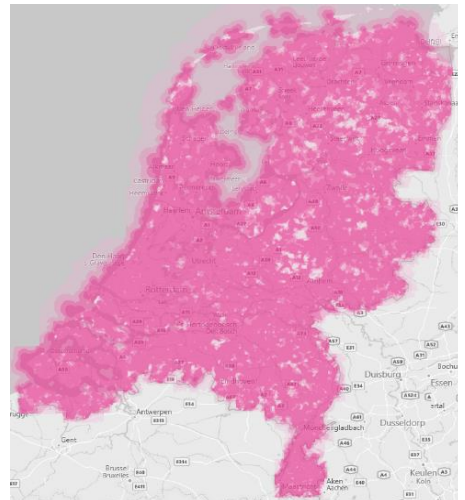
⁵ Het marktaandeel van de aanbieders zonder eigen netwerk is niet noodzakelijkerwijs evenredig verdeeld over de operators (met een eigen netwerk).



Figuur 4 Dekkingskaart van Vodafone voor 4G mobiele data (december 2020). [5] In de donkerblauw gekleurde vlakken is dekking op basis van 4G+ (een snelle variant van 4G). In de lichtblauw gekleurde gebieden is alleen buitenpandig dekking op basis van 4G.



Figuur 5 Dekkingskaart van KPN voor 4G mobiele data (december 2020). [6] In de groen gekleurde gebieden is volgens KPN dekking. In de donkergroene gebieden is er alleen buitenpandig dekking.



Figuur 6 Dekkingskaart van T-Mobile voor 4G of 5G mobiele data (december 2020). [7] In de magenta gekleurde gebieden is volgens T-Mobile dekking.

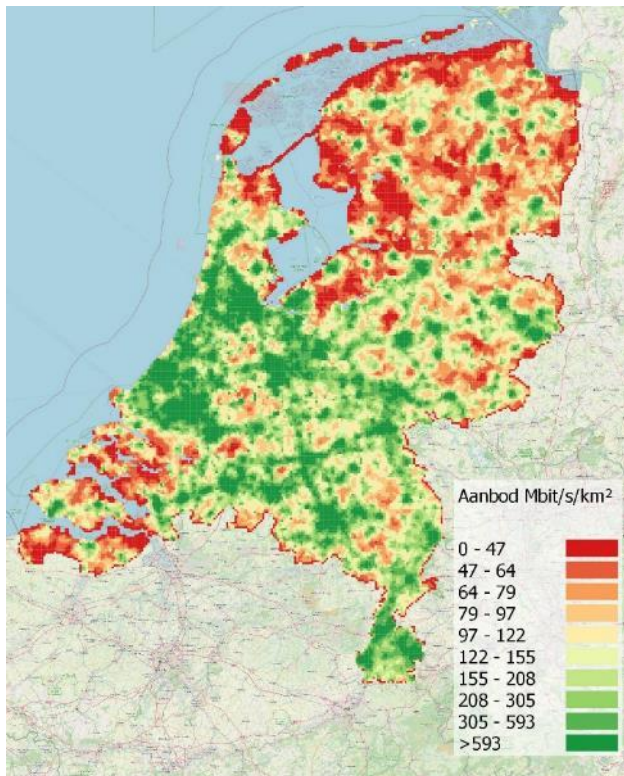
In vrijwel alle bebouwde omgevingen is 4G in Nederland buiten beschikbaar. In steden en dorpen is er in de regel ook binnenshuis bereik, al zal dat grotendeels afhankelijk zijn van het soort gebouw, en zal er bijvoorbeeld ondergronds of in een lift al snel geen dekking meer zijn. In dunbevolkte gebieden zien we hier en daar een gat in de dekking, met name in het noorden en oosten van het land. In veel gevallen gaat het om natuurgebieden.⁶

Kijken we naar de *capaciteit* die de Nederlandse netwerken kunnen leveren, dan zien we een beeld als in Figuur 7. Deze figuur toont de gemodelleerde capaciteit van de drie netwerken opgeteld. De capaciteit is hier berekend per vierkante kilometer. Een bepaalde antenne-installatie biedt voor een bepaald gebied een bepaalde capaciteit (afhankelijk van de configuratie van de antenne-installatie⁷). Deze capaciteit moet vervolgens worden gedeeld door alle gebruikers binnen dat gebied. Een gebied met een lage capaciteit per vierkante kilometer biedt dus niet per definitie een lage capaciteit *per gebruiker*, omdat

het immers vaak ook de gebieden zijn waar zich weinig gebruikers bevinden. De getoonde capaciteit moet dus worden afgezet tegen de *vraag* om een indruk te krijgen van de beschikbare capaciteit per gebruiker. De steden zijn dus niet voor niets groene vlekken met veel aanbod: daar is ook de meeste vraag.

⁶ In grensgebieden tonen sommige dekkingskaarten overigens dat er geen of minder dekking is. Rond de grens gelden beperkingen ten aanzien van het gebruik van spectrum. In de praktijk kan, wanneer er geen dekking is, gebruik worden gemaakt van het buitenlandse netwerk via *roaming*.

⁷ Operators kunnen per antenne-installatie en zelfs per sector bepalen welke functionaliteiten er zijn ingeschakeld (bijv. de MIMO-variant), in hoeveel sectoren een antenne-installatie wordt verdeeld, en hoeveel van het beschikbare spectrum in welke banden er wordt ingezet.



Figuur 7 Capaciteit van de huidige mobiele netwerken opgeteld (bron: modellering Dialogic; zie Bijlage 1)

Antenne-installaties

Het Antenneregister rapporteert maandelijks het aantal antenne-installaties dat in Nederland is geplaatst. Volgens het Antennebureau stonden er in januari 2021 in totaal 15.744 antenne-installaties in Nederland.⁸

Figuur 8 toont de ontwikkeling van het aantal antenne-installaties in de afgelopen tien jaar. Wat opvalt is dat het aantal installaties varieerde tussen de 15.471 (juni 2010) en 19.157 (augustus 2019), maar vanaf september 2020 weer rond het niveau van 2010 ligt. Er is een aantal verklaringen mogelijk bij de fluctuatie van de aantallen:

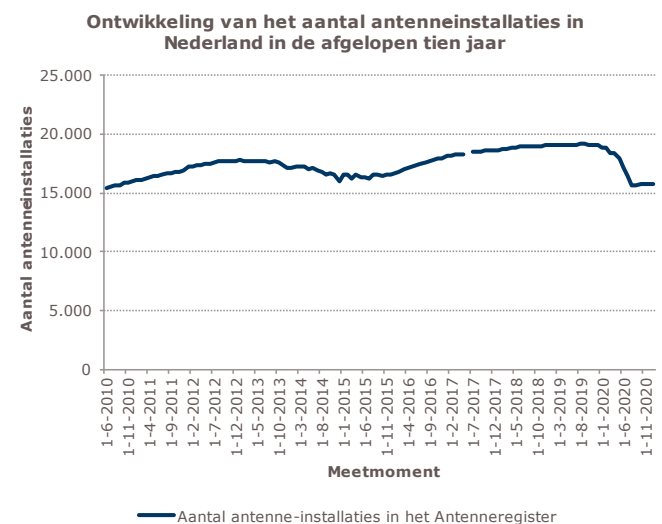
- Tele2 trad in 2013 toe tot de Nederlandse markt en bouwde zijn eigen 4G-netwerk. Per 1 januari 2019 fuseerde Tele2 met T-Mobile. Inmiddels is aangekondigd dat het netwerk van Tele2 zal worden geïntegreerd met dat van T-Mobile. [8] Het is aannemelijk dat de Tele2-registraties

⁸ Het Antennebureau rapporteert maandelijks het aantal antenne-installaties in Nederland en de daarin aanwezige combinaties van mobiele communicatietechnologieën ("toepassing"). [82] Het aantal antenne-installaties (volgens onze definitie) correspondeert met het aantal unieke sitemummers.

vanaf eind 2020 in het Antenneregister zijn komen te vervallen.

- De operators rolden gedurende de getoonde periode 4G uit, wat tot een hoger aantal antenne-installaties leidde.
- De operators hebben de 2G en 3G-netwerken afgeschaald en in sommige gevallen zelfs uitgeschakeld. Hoewel veel antenne-installaties worden gedeeld over technologieën is het denkbaar dat hierdoor een aantal installaties is komen te vervallen.

Binnen een jaar variëren de aantallen steeds licht ($\pm 2,5\%$ rond het gemiddelde). De reden hiervoor ligt (ook) in vervanging.

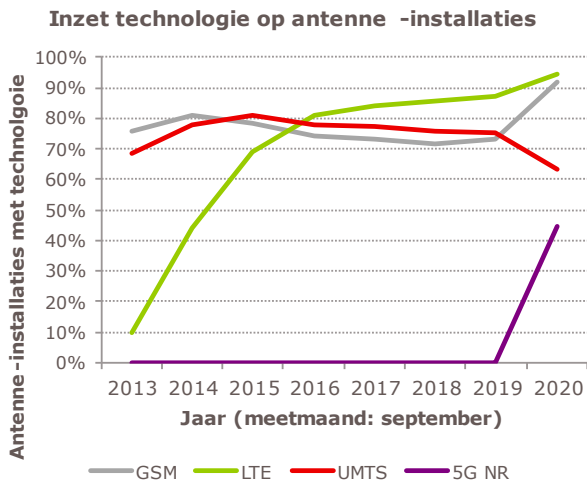


Figuur 8 Ontwikkeling van het aantal antenne-installaties in Nederland in de afgelopen tien jaar (bron: Antenneregister)⁹

De inzet van verschillende technologieën veranderde in de afgelopen jaren flink. In Figuur 9 tonen we per technologie het aantal antenne-installaties (ten opzichte van het totaal aantal installaties) dat de betreffende technologie ondersteunt. Tussen 2013 en 2019 zien we de uitrol van LTE (4G). Vanaf 2019 zien we de opkomst van 5G NR en het uitfasen van UMTS (3G) en GSM (2G) door verschillende operators.¹⁰

⁹ Eveneens op basis van unieke sitemummers. In juni 2017 werd per abuis een groot aantal installaties dubbel geregistreerd; dit datapunt is daarom hier verwijderd.

¹⁰ T-Mobile schakelt 2G uit per 1 juni 2021 en noemt nog geen einddatum voor 3G. [77] VodafoneZiggo heeft 3G uitgeschakeld per 4 februari 2020. [78] KPN schakelt 3G

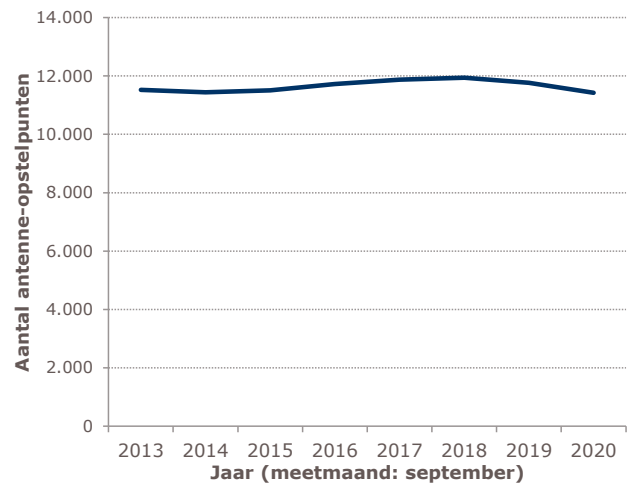


Figuur 9 Inzet van technologie op antenne-installaties (bron gegevens: Antenneregister, analyse Dialogic).

Antenne-opstelpunten

In dit onderzoek richten we ons op het aantal antenne-opstelpunten. Op één opstelpunt kunnen één of meerdere antenne-installaties worden geplaatst. Vergunningstrajecten verlopen over het algemeen per antenne-opstelpunt. Daarnaast hangt de 'visuele' impact van antennes primair samen met het aantal antenne-opstelpunten, en in mindere mate met het aantal daarop geplaatste installaties.

In de afgelopen zeven jaar waren er tussen de 11.500 en 12.000 antenne-opstelpunten in Nederland. De trend in het totale aantal opstelpunten wordt getoond in Figuur 10.¹¹ Het aantal opstelpunten is over de tijd relatief stabiel gebleven (het verschil tussen het maximum en minimum is ongeveer 4%).



Figuur 10 Historische ontwikkeling van het aantal antenne-opstelpunten in Nederland (bron: modellering Dialogic)

Operators delen regelmatig antenne-opstelpunten (*site sharing*). We kunnen dit kwantificeren door te kijken naar het aantal antenne-installaties in verhouding tot het aantal antenne-opstelpunten. In september 2020 waren er in totaal 15.689 antenne-installaties (cf. Antenneregister) verdeeld over (onze benadering) 11.421 antenne-opstelpunten. Als gevolg van site sharing is het aantal opstelpunten dus 27% lager dan wat het zou zijn geweest zonder sharing.¹²

Het delen van antenne-opstelpunten en het uitschakelen van oudere technologiegeneraties heeft ervoor gezorgd dat het aantal antenne-opstelpunten bij de uitrol van 4G netto niet substantieel is gestegen. De toetreding van Tele2 leidde weliswaar tot een stijging van het aantal antenne-installaties, maar niet tot een stijging van het aantal opstelpunten, omdat Tele2 gebruik maakte van gedeelde opstelpunten.

2.3 Verwachte ontwikkelingen

2.3.1 Vraag

De vraag naar mobiel dataverkeer steeg in de afgelopen jaren substantieel. In 2019 groeide het gebruik

uit per januari 2022. [79] Noch KPN, noch VodafoneZiggo geven een einddatum voor 2G. Het aanbod van 2G en 3G wordt door alle operators die het nog aanbieden afgeschaald. De hoeveelheid spectrum die wordt ingezet voor 2G/3G wordt verminderd en toegewezen aan 4G/5G.

¹¹ Op basis van het Antenneregister. Omdat het Antenneregister niet op het niveau van opstelpunten registreert (en wij hier geen sitenummers tot onze beschikking hadden) hebben we het aantal opstelpunten benaderd door

antenne-installaties te clusteren aan de hand van de locatie. De methode wordt in Bijlage 1 uitgelegd.

¹² Anders gezegd: op de antenne-opstelpunten in Nederland vinden we gemiddeld 1,37 antenne-installatie. Omdat een opstelpunt door één, twee of drie operators kan worden gedeeld is uit deze statistiek niet af te leiden op welk percentage van de opstelpunten er (door ten minste twee operators) wordt gedeeld.

in termen van volume met 32% ten opzichte van 2018, zo blijkt uit cijfers van ACM. [9] Zouden gebruikers nog beperkt worden door de bundelgrootte, dekking (in pandig) en functionaliteit van de gebruikte apparaten, dan zou de *latente* vraag wellicht nog hoger kunnen zijn. In hoeverre dit het geval is, is lastig vast te stellen. Hoewel de operators allen 'unlimited'-bundels aanbieden is niet bekend welk percentage abonnees deze afneemt en of abonnees bij lagere prijzen meer mobiele data zouden kopen en gebruiken (de *prijselasticiteit*).

Ook op vaste netwerken is al jarenlang een substantiële groei van de datavolumes zichtbaar. De absolute volumes liggen op vaste netwerken nog altijd vele malen hoger dan op mobiele netwerken. In zowel 2014 en 2016 voerde Dialogic en TU/e onderzoek uit naar de vraagontwikkeling op vaste netwerken en de drivers daarvan. [10] [11] Op vaste netwerken speelt toename van *kwaliteit* van diensten (denk bijvoorbeeld aan videoresolutie) en toename van *intensiteit* (denk bijvoorbeeld aan het *vaker* kijken van streaming video via internet).

Scenario's voor vraagontwikkeling

Of de groei van de vraag zich in de komende 6 tot 10 jaar voortzet, is allerminst zeker. Uit gesprekken met vendors en operators en literatuuronderzoek komen zowel scenario's met sterke vraaggroei, als scenario's van afvlakking van de vraag voor.

De voornaamste argumenten die bij *vraaggroei* worden genoemd, zijn de volgende:

- *Het aantal niet-smartphones dat via 5G zal communiceren neemt in de komende jaren sterk toe.* Te denken valt aan VR/AR-brillen, smart watches, tablets en laptops. We kunnen ons goed voorstellen dat deze ontwikkeling zich zal voordoen, maar we vragen ons af in welke mate de vraag uiteindelijk zal worden afgewikkeld via Wi-Fi-netwerken thuis of op kantoor.
- *5G maakt nieuwe use cases mogelijk, die tot vraaggroei leiden.* 5G zal mogelijkheden bieden voor nieuwe toepassingsgebieden, zoals in auto's/verkeer. Mobiliteit is echter niet de enige nieuwe toepassing. Voor investeringen in 5G wordt gerekend op drie 'pilaren' aan de vraagkant: *enhanced mobile broadband* (feitelijk de groei uit bestaande mobiele use cases), *ultra-reliable low latency (URLLC)* en *massive machine-type communications (MMTC)*. Voor de laatste twee categorieën speelt niet zozeer een

capaciteitsvraag, maar kan het aantal opstel-punten wel worden gedreven door overwegingen als redundantie en dekking. Voor URLLC is de verwachting dat dit op beperkte oppervlakte wordt ingezet (bijvoorbeeld een specifiek bedrijfsgebied) en dat de operator hier specifieke aanpassingen voor realiseert in de radioplanning.

- *Mobiele connectiviteit substitueert vaste connectiviteit.* De eigenschappen van 5G maken de mobiele verbinding voor een groot aantal toepassingen geschikt. Een scenario van substitutie van vast door mobiel is daarom denkbaar.

We kunnen ons vanuit de vraagzijde van de markt goed voorstellen dat deze prikkel er is. We zijn echter onzeker in welke mate de operators dit zullen faciliteren. Voor een aanbieder is mobiele data echter veel kostbaarder dan data over de vaste infrastructuur. Operators die zowel vaste als mobiele diensten bieden ('geconvergeerde operators') hebben daarom een prikkel om door middel van bundeling gebruikers juist richting de vaste infrastructuur sturen (en daarbij binnenshuis Wi-Fi te promoten).

- *Draadloze vaste internettoegang (FWA) genereert meer verkeer.* Dit soort gebruik als aangeboden dienst is met name in het buitenland gemeengoed op locaties waar geen goede vaste infrastructuur aanwezig is. In Nederland wordt het slechts op heel kleine schaal ingezet, in buitengebieden. We verwachten, mede op basis van de input van de Nederlandse operators die we spraken, geen sterke toename van vast-draadloos in Nederland. We zien wel in toenemende mate dat operators FWA inzetten om klanten die wachten op een vaste aansluiting te voorzien van internet, en als aanvulling op locaties waar de vaste aansluiting niet genoeg capaciteit biedt. [12]

Dat uitrol van FWA kan leiden tot substantiële structurele groei van het gevraagde dataverkeer ligt voor de hand gezien de volumes op vaste netwerken (die een ordegrrootte hoger liggen dan op mobiele netwerken) en bij operators in het buitenland zoals Three (UK), die (zelfs dit jaar) hoge groeipercentages rapporteren. [13]

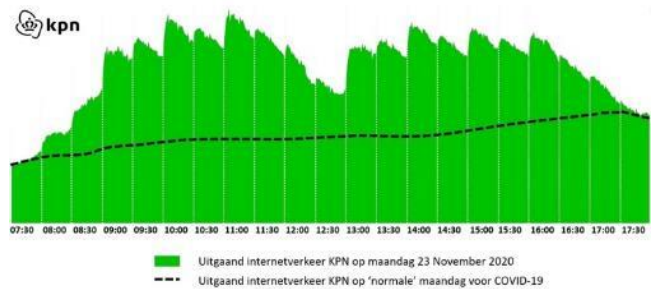
De voornaamste argumenten die bij scenario's voor *afvlakking* van de vraag worden genoemd, zijn de volgende:

- *Operators die 'unlimited'-bundels¹³ zijn gaan aanbieden, zouden initieel een sterke stijging van de vraag zien, gevolgd door een afvlakking.* De aanname is dat klanten met een 'unlimited'-bundel niet meer 'nadenken' over hoeveel data zij verbruiken (en of bepaalde diensten wel of niet mobiel gebruikt kunnen worden), en deze dus een goede weerspiegeling geven van de latente vraag.
- *Er zou een limiet kunnen zijn aan mediaconsumptie via de smartphone.* Op vaste infrastructures zijn het vooral videodiensten die de vraag opstuwen. [11] Dit geldt ook voor mobiele infrastructures, maar de meerwaarde van hogere resoluties (HD/4K) en kwaliteit is op mobiele telefoons simpelweg minder relevant, omdat het om kleine schermen gaat.¹⁴

We merken op dat argumenten voor sterke groei en argumenten voor afvlakking ook tegelijkertijd kunnen afspelen, en daarmee elkaar deels neutraliseren.

Naast de sterkte van de groei kan er ook sprake zijn van (tijdelijke) fluctuaties. Zo zagen we het afgelopen jaar dat ook onvoorziene oorzaken een flink effect kunnen hebben op de vraag naar mobiele data. Als gevolg van de maatregelen ter bestrijding van het coronavirus zagen operators de hoeveelheid mobiele dataverkeer op sommige (werk)locaties meer dan halveren. De groei van het mobiele dataverkeer was in deze periode zeer beperkt. [14]

Op vaste netwerken was de impact van de coronamaatregelen bijvoorbeeld goed te zien. Uit een analyse van KPN (Figuur 11) volgt dat niet alleen het totale verkeersvolume tijdens een maandag in coronatijd fors hoger ligt dan op een 'gewone' maandag, maar ook dat een opmerkelijk patroon zichtbaar is: aan het begin van het hele en halve uur is het datavolume substantieel hoger, vermoedelijk als gevolg van het feit dat veel videogesprekken op deze momenten beginnen.



Figuur 11 Vergelijking van het volume van het uitgaande dataverkeer op het vaste netwerk van KPN voor en tijdens de coronamaatregelen (maandag 23 november 2020) [15] De verticale as toont het verkeersvolume (schaal niet gegeven).

Figuur 12 toont drie scenario's voor de ontwikkeling van de vraag naar mobiele data, gebaseerd op de diverse input die we verkregen:

- **Een jaar-op-jaar groei (CAGR)¹⁵ van 28% die in de komende jaren afvlakt tot 15%.** Dit is op basis van de laagst gevonden percentages in de onlinebronnen en gevoerde gesprekken. [16]
- **Een jaar-op-jaar groei van 35%.** Dit is de gemiddelde historische groei van de vraag in de afgelopen jaren in Nederland.
- **Een jaar-op-jaar groei van 60%.** Dit is het hoogste, maar volgens ons nog enigszins aannemelijke jaarlijkse groeipercentage. Het groeipercentage komt voor in enkele bronnen en is tijdens een van de genoemd. Groeipercentages van 60% of hoger zijn in andere landen niet ongebruikelijk. Het verschil tussen 35% en 60% vraaggroei in termen van datavolume is door het exponentiele karakter echter zeer groot. Waar een gebruiker bij 35% groei eind 2026 ongeveer 26 GB per maand zou verbruiken, ligt dit bij 60% op 90 GB; een factor 3,5 hoger. Om tot dergelijke verbruikscijfers te komen, zouden Nederlandse gebruikers binnen grofweg twee jaar in de top drie van internationale vergelijking (zie hierna) moeten staan.

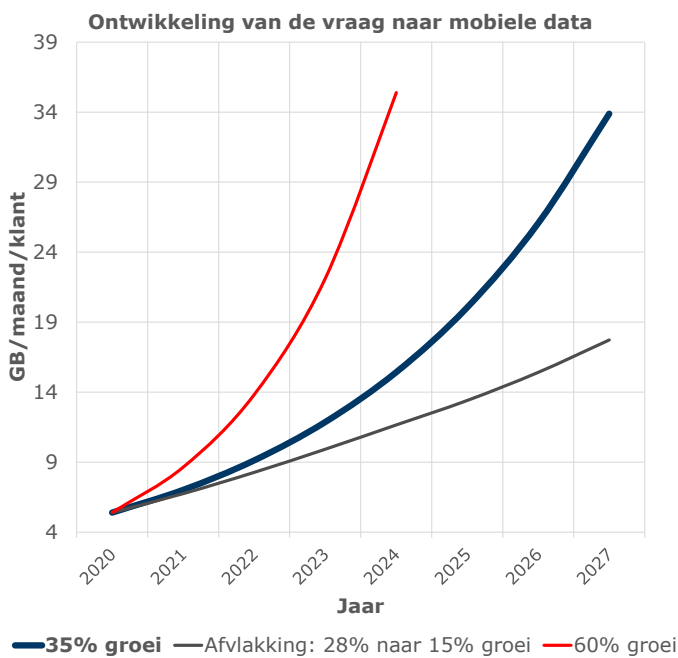
¹³ Aansluiting met een 'fair use policy' of een systeem waarbij boven een bepaalde hoeveelheid gebruik steeds een SMS moet worden gestuurd.

¹⁴ Aan de andere kant is de resolutie in tien jaar behoorlijk verhoogd: de iPhone 4 (2010) beschikte over een scherm met een resolutie van 960 bij 640 pixels. De

iPhone 12 Pro Max (2020) beschikt over 2778 bij 1284 pixels. Het aantal pixels is grofweg een factor zes hoger.

¹⁵ Compound Annual Growth Rate (CAGR) is een begrip dat komt uit de financiële wereld dat een jaar-op-jaar groei berekend.

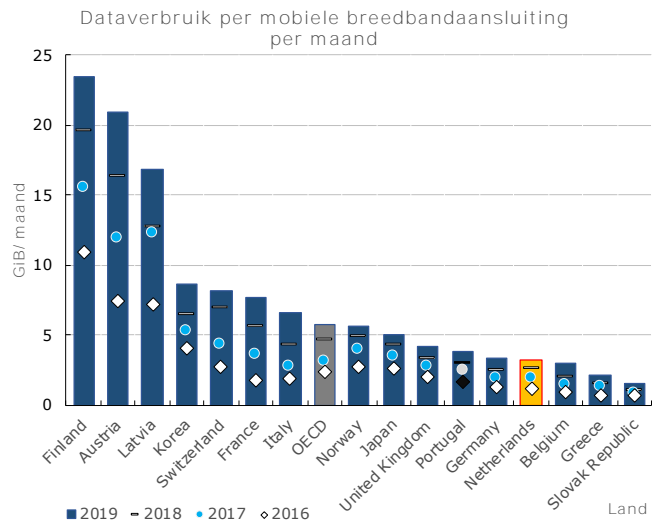
Het voert daarom wat ons betreft te ver om 60% structurele groei voor de komende jaren aan te houden voor Nederland. Een *incidentele groei* (voor één of twee jaren) van 60% is echter denkbaar (als gevolg van een "Netflixmoment"). We rekenen de 60% vraaggroei daarom niet verder door dan het moment waarop de vraag in dit scenario de vraag in het 35%-scenario in 2027 overschrijdt, met de gedachte dat het 60%-scenario daarmee hooguit een "tijdelijk voorschot in de tijd" is op het 35%-scenario. Omdat de netwerken eerder te maken krijgen met hogere vraag is het echter zeer denkbaar dat er een effect is op het aantal antenne-opstelpunten.



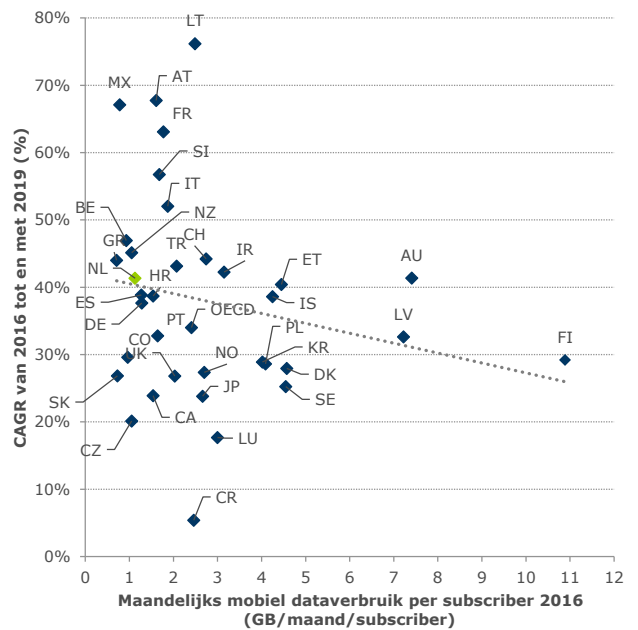
Figuur 12 Ontwikkeling van de vraag naar mobiele data: de verschillende scenario's die we hanteren in de modellering (bron: modellering Dialogic, zie Bijlage 1).

Internationale vergelijking

Een ander perspectief op vraaggroei is internationaal: hoe meet Nederland zich ten opzichte van andere landen, en welke groei is daar te zien? Figuur 13 toont de gemiddelde hoeveelheid data per mobiele breedbandaansluiting die in verschillende landen wordt verbruikt.



Figuur 13 Dataverbruik per mobiele breedbandaansluiting naar land (bron gegevens: [17], bewerking en landselectie Dialogic)



Figuur 14 Mobiel dataverbruik per aansluiting in 2019 versus groei van dit dataverbruik tussen 2016-2019 (bron gegevens: [17], bewerking Dialogic)

Het relatief lage verbruik van data voor Nederlandse mobiele aansluitingen is mogelijk te verklaren door de uitstekende vaste infrastructuur die Nederland heeft. Veel van het verkeer vanaf mobiele apparaten

zal hierdoor via thuis- of kantoor-Wi-Fi en (uiteindelijk) vaste infrastructuur worden afgewikkeld.¹⁶

Het lijkt, tot slot, te vroeg om te kunnen concluderen of de vraag in landen met hoog mobiel dataverbruik afvlakt, doorzet of juist groeit. Figuur 14 toont het maandelijkse dataverbruik en de groei daarvan per land voor de periode 2016-2019. Een negatieve trend is zichtbaar, maar deze is sterk afhankelijk van een kleine groep landen (Australië, Letland en Finland) en de statistische significantie van deze trend is zwak.

2.3.2 Aanbod

Beschikbaarheid spectrum

De Nederlandse operators hebben samen de beschikking over 680 MHz aan spectrum (eind 2020). Daarvan is 580 MHz zogenaamd 'gepaard' spectrum: 290 MHz in een hogere frequentieband voor de downlink (verkeer van netwerk naar de gebruiker), 290 MHz in een lagere frequentieband voor de uplink (verkeer van de gebruiker naar het netwerk). De overige 100 MHz is ongepaard en wordt ingezet op basis van TDD (downlink en uplink verkeer vinden afwisselend in tijd plaats in dezelfde frequentieband), of wordt ingezet als aanvullende downlinkband (SDL). Wanneer de operators TDD inzetten met een verhouding van 4:1 (downlink:uplinktijd) hebben zij in totaal effectief circa 362 MHz beschikbaar in de downlinkrichting. Tabel 1 toont de hoeveelheden per operator.

Tabel 1 Hoeveelheid spectrum die de mobiele operators ter beschikking hebben (situatie eind 2020; analyse Dialogic)¹⁷

Duplex:	FDD		TDD	SDL	Totaal (bruto)	Effectief totaal (bij TDD 4:1)	
	DL	UL	BI	DL		DL	UL
KPN	80	80	30	15	205	111	84
T-Mobile	110	110	30	10	260	136	114
VodafoneZiggo	100	100	0	15	215	115	100

De operators kunnen dit spectrum, rekening houdend met diverse beperkingen vanuit technologie en wet- en regelgeving, naar eigen inzicht inzetten (de

¹⁶ Daarnaast zou FWA in de OESO-cijfers niet worden meegenomen. Desondanks verwachten we dat in landen waar FWA gemeengoed is ook veel semi-FWA-gebruik zal plaatsvinden (een reguliere aansluiting gebruiken als 'hotspot' in een vakantiehuisje, bijvoorbeeld).

¹⁷ Merk op dat van het 30 MHz TDD-spectrum van KPN en T-Mobile slechts 20 MHz effectief bruikbaar is. Dit is verrekend in het effectieve totaal.

vergunningen zijn *technologieneutraal*). Relevant is dat de operators *zelf* beslissen welke technologie zij in welke delen van het door hen verkregen spectrum inzetten en zelf verantwoordelijk is voor het plaatsen van de benodigde antenne-installaties.

Multibandveiling 2020

In juli 2020 verkregen drie operators additioneel spectrum uit de 'multibandveiling'; het betrof 26 vergunningen in de 700 MHz-band (3 maal 10+10 MHz gepaard), de 1400 MHz-band (15+10+15 MHz, alleen downlink) en 2100 MHz-band (3 maal van 20+20 MHz gepaard). [18] De eerste twee banden betroffen 'nieuw' spectrum, terwijl het spectrum in de 2100 MHz-band al in gebruik was door de operators maar opnieuw werd verdeeld. De verwachting is dat de operators het additionele spectrum uit de multibandveiling inzetten voor 5G NR en/of LTE¹⁸ en het reeds in gebruik zijnde 2100 MHz-spectrum de komende jaren daarnaartoe migreren. Alle vergunningen bevatten een ingebruiknameverplichting. [19]

Veiling 3,5 GHz-spectrum

Vanaf 1 september 2022 komt in totaal 300 MHz aan spectrum in de 3,5 GHz-band beschikbaar ten behoeve van openbare mobiele netwerken. [20] De veiling van de frequenties is toegankelijk voor de huidige operators en eventuele toetreders. Doordat de frequenties in kavels worden geveild zijn verschillende uitkomsten mogelijk, al is de maximumhoeveelheid spectrum die een operator verkrijgt waarschijnlijk beperkt tot 120 MHz. [21]

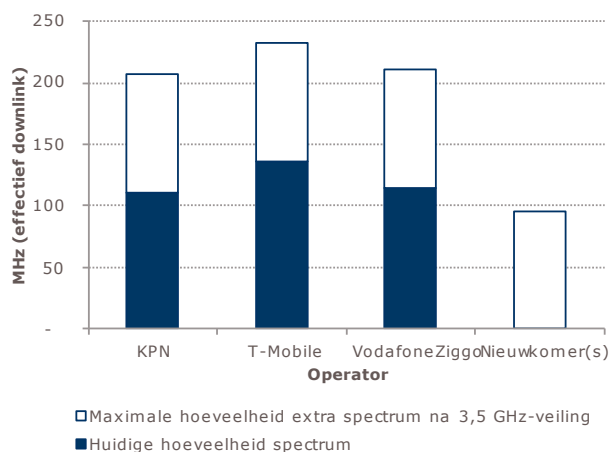
In het model rekenen we in eerste instantie met de drie huidige operators, en nemen we aan dat deze operators samen de beschikking krijgen over 300 MHz. De exacte verdeling heeft in het model beperkte invloed (alleen wanneer het marktaandeel sterk zou afwijken van het relatieve spectrumaandeel van de operator in de 3,5 GHz-band).¹⁹

We schatten in dat operators in de 3,5 GHz-band uitsluitend 5G NR gaan inzetten. Deze radiotechnologie is op zichzelf iets efficiënter dan LTE (4G), maar de

¹⁸ Al dan niet op basis van Dynamic Spectrum Sharing (DSS), waarmee zowel 5G NR als LTE in dezelfde frequentieruimte gelijktijdig kunnen worden gebruikt.

¹⁹ In ons eerdere onderzoek naar mogelijke kavelgroottes voor de 3,5 GHz-band wordt uitgewerkt welke uitkomsten mogelijk en aannemelijk zijn in scenario's met en zonder toetreders; zie [22].

capaciteitsgroei ontstaat vooral doordat deze substantiële hoeveelheid extra spectrum te combineren met de inzet van *massive MIMO*, waardoor het spectrum ook binnen één sector van een cel meerdere keren hergebruikt kan worden. De capaciteit van het netwerk kan daarmee sterk worden verhoogd op basis van bestaande opstelpunten door de 3,5 GHz-band in te zetten.



Figuur 15 Overzicht huidige en verwachte toekomstige (maximale) hoeveelheid spectrum per operator (analyse Dialogic)²⁰

Beschikbaarheid millimetergolfspectrum

Voor het realiseren van grote hoeveelheden capaciteit wordt (voor 5G, maar ook voor de nieuwe Wi-Fi 802.11ad standaard) gekeken naar de inzet van (zeer) hoge frequentiebanden, zoals 26 GHz en 60 GHz-spectrum: de zogenaamde 'millimetergolfbanden'. Het grote voordeel van deze banden is dat er veel ruimte is, en daardoor brede (en efficiënte) carriers kunnen worden gerealiseerd.

²⁰ Analyse van Dialogic op basis van [83]. Getoond is de effectieve hoeveelheid downlink-spectrum. Voor TDD-spectrum is steeds 4/5^e genomen van de totale hoeveelheid (ervan uitgaand dat een verhouding van 1:4 UL:DL zal worden gehanteerd). We nemen verder aan dat de capregeling [84] van toepassing is, welke bepaalt dat iedere partij maximaal 40% van (1) de totale hoeveelheid beschikbaar spectrum, en (2) de totale hoeveelheid spectrum met lage frequenties, en (3) de totale hoeveelheid spectrum in de 3,5 GHz-band kan verwerven. Deze laatste beperking is nog niet vastgelegd in de capregeling, maar dat zal volgens de toelichting op de regeling wel gebeuren. Dit zou betekenen dat toetreders maximaal 120 MHz kunnen verkrijgen in de 3,5 GHz-band. [86]

²¹ Hiermee bedoelen we dat de ontvanger de zender kan 'zien' (er zich geen obstakels tussen beiden bevinden), of dat het signaal hooguit één keer hoeft te weerkaatsen

Een nadeel is dat de hoge frequenties ongunstigere propagatie-eigenschappen kennen dan de lagere frequenties die nu worden gebruikt in mobiele netwerken. Het bereik op basis van millimetergolf-frequenties is slechter dan het bereik op basis van de huidige mobiele frequentiebanden. Voor outdoor gebruik is een (bijna-)zichtverbinding²¹ tussen terminal en antenne nodig. Zelfs de hand die een toestel vasthoudt kan het signaal blokkeren.²² Desondanks biedt de techniek veel potentie voor (met name in pandig en op kleine gebieden) leveren van zeer grote capaciteit. [22] De beperkingen van de hogere frequenties kunnen deels worden opgevangen door ze samen met lagere frequenties in te zetten²³ en deels doordat de hogere frequenties zich uitstekend lenen voor nieuwe antennetechnologieën²⁴.

De 26 GHz-band is Europees bestemd voor mobiele communicatie; lidstaten moeten de band vanaf juni 2020 zelfs hiervoor inzetten. [23] [24] Het is nog niet bekend wanneer en in welke vorm Nederland de band beschikbaar zal maken voor mobiele netwerken, maar het is mogelijk dat dit (op zijn minst voor een deel van de band) binnen nu en maximaal twee jaar gebeurt.

De grootste beperking bij de inzet van deze banden lijkt voorsnog de adoptie van de band aan de toestelkant te zijn. Veel fabrikanten bieden ondersteuning voor het millimetergolfspectrum alleen nog aan als optie bij de topmodellen. De reden hiervoor ligt primair in de benodigde aanpassingen in hardware en licentiekosten. Adoptie van toestellen

(reflectie) op bijvoorbeeld een gebouw. De daadwerkelijke signaalsterkte/signaal-ruisverhouding hangt af van de specifieke situatie en bijvoorbeeld het materiaal waarop het signaal reflecteert of zich doorheen moet verplaatsen (bijvoorbeeld glas).

²² Zie bijvoorbeeld [linustechtips.com]. Dit verschijnsel speelt in mindere mate overigens ook bij lagere frequenties.

²³ Zo zou uplinkverkeer, dat over het algemeen veel minder capaciteit nodig heeft dan downlinkverkeer, over de lage frequenties kunnen worden afgewikkeld.

²⁴ Doordat de golflengte laag is kunnen antennes worden gebouwd met zeer veel antenne-elementen terwijl de afmetingen binnen de perken blijven. Dat maakt implementatie van beamforming en massive MIMO praktischer.

met 26 GHz-ondersteuning zal in Europa naar verwachting minstens enkele jaren duren.²⁵

Beschikbaarheid nieuwe frequentiebanden

Naast de millimetergolfbanden komen in de komende jaren ook andere frequentiebanden beschikbaar voor mobiele communicatie. Een van de banden waarvoor vanuit de industrie interesse is uitgesproken, is de 6 GHz-band (6.425 – 7.125 MHz). De beslissing over de internationale toewijzing van deze band volgt waarschijnlijk in 2023 (tijdens de *World Radio Conference*) waarna de bestemming en toewijzing uiteraard nog op Europees en nationaal niveau dient plaats te vinden. Daarnaast wordt op dit moment al getest met 5G in de 6 GHz-band. [25] [26]

Een andere richting waarin de mobiele netwerken mogelijk 'nieuw' spectrum kunnen vinden, is in vergunningvrije banden. In de 5 GHz ISM-band is veel spectrum beschikbaar en zou 5G NR naast bestaande toepassingen (waaronder Wi-Fi) 'opportunistisch' (in de technische zin van het woord) kunnen worden ingezet om extra capaciteit te realiseren.

Netwerkverdichting

Op het gebied van netwerkverdichting zijn de volgende aspecten en ontwikkelingen van belang.

Verdichting ten behoeve van de verplichtingen van de 700 MHz-vergunningen

De vergunningen die de operators in 2020 verkregen voor het spectrum in de 700 MHz-band bevatten een dekkings- en snelheidsverplichting. Deze stelt dat iedere operator een openbare elektronische communicatiedienst moet aanbieden die minimaal 98% geografische dekking moet realiseren (bepaalde gebieden, zoals Natura 2000-gebieden²⁶, zijn uitgesloten), met een minimale downloadsnelheid van 8 Mbit/s (met een waarschijnlijkheid van ten minste 90%), binnen twee jaar na afloop van de veiling. Uiterlijk zes jaar na de veiling dient 10 Mbit/s te

worden gehaald (eveneens met 90% waarschijnlijkheid). Deze eisen hoeven niet (alleen) met het 700 MHz-spectrum te worden gehaald. [19]

Verdichting door het realiseren van small cells op drukke locaties ('hot spots')

Vanaf 2013 experimenteerden de Nederlandse operators met outdoor small cells op specifieke drukke locaties [27] [28]. Dit heeft niet geleid tot grootschalige uitrol van small cells in de openbare buitenruimte. Wel hebben alle operators op diverse plekken small cells uitgerold op drukke (semi-)in pandige locaties, zoals stations, vliegvelden, stadions en evenementenlocaties. Ter illustratie: op Utrecht Centraal gaat het om 50 antennes op basis van 2x2 MIMO. De operators delen in dergelijke scenario's vaak de passieve infrastructuur via een DAS (*Distributed Antenna System*). [29] In veel gevallen werken de small cells als sector van een (bestaande) macrosite.

Small cells kunnen ook worden ingezet om het bereik van het mobiele netwerk in pandig te vergroten. Tot 2016 bood Vodafone dergelijke 'femtocellen' voor thuis aan op basis van 3G; per 2018 werd de ondersteuning gestaakt. [30] Bij de auteurs is geen grootschalige inzet van femtocellen in Nederland bekend.

Verdichting door het toevoegen van Wi-Fi-hotspots ('Wi-Fi offloading')

De drie mobiele operators zijn allemaal 'converged', wat wil zeggen dat ze naast de mobiele netwerken ook vaste infrastructuur exploiteren. De operators maken gebruik van de vaste infrastructuur om hun mobiele netwerk te ontlasten. Sinds ten minste 2013 wordt geëxperimenteerd met Wi-Fi-hotspots. [31] Vandaag de dag biedt onder andere VodafoneZiggo vanaf (vrijwel) alle vaste aansluitingen toegang tot internet via Wi-Fi aan haar abonnees. [32] De andere operators kennen vergelijkbare diensten. In 2020 voegden alle operators aanbod van "Wi-Fi-versterkers" toe, en bieden sommigen geavanceerde mesh-

²⁵ Bijkomend probleem is dat wereldwijd de meeste aandacht voorlopig uitgaat naar de 28 GHz-band (n257: 26,5- 29,5 GHz). Recente cijfers van GSA laten zien dat van de 112 bekende modellen toestellen met ondersteuning voor millimetergolfspectrum er slechts 8 de 26 GHz-band (n258: 24,5 – 27,5 GHz) ondersteunen. [85] De n257-band overlapt overigens met n258, waardoor maximaal 1 GHz aan de 'bovenkant' van de 26 GHz-band (26,5 – 27,5 GHz) nog bruikbaar is met deze toestellen.

²⁶ Tevens uitgesloten zijn de 'buitenwateren' zoals de Noordzee en de Eems. In een gebied rondom Westerbork mag de daar aanwezige radioastronomie niet worden verstoord door signalen van mobiele netwerken, en is om die reden geen dekking.

Wi-Fi systemen aan hun klanten. Niet alleen leidt betere Wi-Fi thuis tot een betere ervaring voor de klant, het helpt ook de operator het mobiele net te ontlasten; smartphones schakelen immers sneller over op de vaste verbinding en belasten (thuis) het mobiele netwerk veel minder.

Wi-Fi speelt ook een rol bij het verbeteren van in-pandige dekking. Vanaf 2019 is het bij de meeste operators mogelijk om te bellen over Wi-Fi (VoWiFi). Een telefoon maakt daarbij gebruik van de internetverbinding (die overigens niet van dezelfde operator hoeft te zijn) in plaats van het mobiele netwerk. Hiermee kan de noodzaak om het mobiele netwerk te verdichten worden verlaagd. [33]

De relatie tussen netwerkverdichting en het aantal opstelpunten

Netwerkverdichting is niet één-op-één gerelateerd aan groei van het aantal antenne-opstelpunten. De Nederlandse operators delen sinds jaar en dag antenne-opstelpunten. [34] Daarnaast maken zij ook op andere manieren gebruik van gedeelde infrastructuur, bijvoorbeeld glasvezelverbindingen. Het totale aantal opstelpunten is dan ook meer dan een kwart lager dan de aantallen *antenne-installaties* voor de drie operators opgeteld.

RAN sharing

Een relevante ontwikkeling in dit kader is RAN-sharing: het delen van *actieve* onderdelen van een radionetwerk. Deze vorm wordt in steeds meer landen toegepast, maar de Nederlandse operators zijn vooralsnog terughoudend als het gaat om het delen van *actieve* infrastructuur. Mogelijk spelen complexiteit, controle en concurrentiële overwegingen hierbij een rol. In de 5G-standaard is specifiek aandacht besteed aan functionaliteit voor virtualisatie en 'slicing', zodat delen van infrastructuur eenvoudiger virtueel gedeeld kunnen worden (o.a. 'vRAN').

Spectrale efficiëntie

De efficiëntie van mobiele netwerktechnologie wordt alsmear hoger.²⁷ De ontwikkeling van deze efficiëntere technologieën vindt vooral plaats in de standaardiseringsorganisaties (m.n. 3GPP) waarin een breed scala aan belanghebbenden, zoals fabrikanten van chipsets en terminals en mobiele operators, zijn vertegenwoordigd.

Uitrol van 5G

De Nederlandse mobiele operators zijn inmiddels begonnen met de uitrol van 5G. In eerste instantie gebruiken zij hiervoor de 700 MHz-band en spectrum dat eerder voor 3G en 4G werd ingezet. Een enkele operator combineert 4G en 5G in hetzelfde spectrum met *dynamic spectrum sharing (DSS)*. Het betreft zogenaamde 'non standalone' (NSA)-implementaties. Hierbij worden kanalen op basis van 5G NR (de radiotechniek van 5G) alleen gebruikt om de capaciteit van het net te vergroten. Het signaleringsverkeer vindt nog altijd over 4G plaats. De operators hadden naar eigen zeggen eind 2020 in een groot deel van Nederland 5G-dekking gerealiseerd.

Adoptie aan terminalzijde

Bij het uitrollen van nieuwere technologie is een operator beperkt door wat de terminals van haar klanten ondersteunen. Op dit moment is met name de adoptie van terminals die 5G (en de in Nederland gebruikte frequentiebanden) ondersteunen een factor van belang.

Afgaand op een rapportage van Ericsson zou de markt ook aan de toestelkant vanaf 2021 klaar moeten zijn voor grootschalige uitrol van 5G [35]. Desondanks constateren we dat 5G nog lang niet op alle (nieuwe) telefoons aanwezig is. Hoewel de operators toestellen met 5G aanbieden zijn dit vooralsnog alleen de duurdere modellen. De verwachting is dat dit vanaf 2021 verandert. [36] De in Nederland gebruikte 5G-banden worden over het algemeen allemaal ondersteund door nieuwe modellen die in Nederland worden uitgebracht.

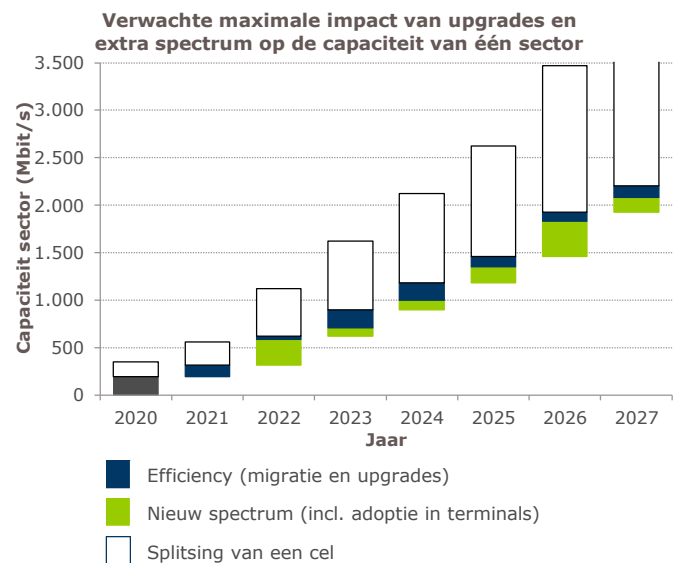
²⁷ Er bestaat een natuurkundige bovengrens voor de capaciteit van een enkel (radio)signaal, die afhankelijk is van de signaal-ruisverhouding (gegeven in het theorema van Shannon-Hartley). Sommige technieken (zoals CoMP, beamforming, verbeterde modulatie- en foutcorrectie-algoritmen) dragen bij aan het verhogen van de signaal-ruisverhouding, zodat de capaciteit de theoretische

bovengrens dichter nadert. Technieken als MIMO 'omzeilen' de natuurkundige bovengrens door bijvoorbeeld meerdere signalen (propagatiepaden) tegelijkertijd te gebruiken (het principe bij MIMO). De capaciteit van een enkel signaal wordt niet groter, maar de capaciteit van de cel in het radionetwerk wel.

Uiteraard is er sprake van een enorme 'installed base'. Een gemiddelde smartphone gaat steeds langer mee, en het zal dus even duren voordat de operators bepaalde oudere technologieën kunnen uitfasen zonder dat dit effect op klanten zal hebben. Transitionele technologieën zoals DSS (*Dynamic Spectrum Sharing*) stellen een operator in staat om geleidelijk mee te bewegen met de ontwikkeling van de installed base.

2.3.3 Impact van de ontwikkelingen

Wat leveren de in deze paragraaf beschreven ontwikkelingen in de praktijk op in termen van capaciteit in mobiele netwerken? In Figuur 16 wordt voor de Nederlandse situatie de maximale impact getoond van technische upgrades (5G, massive MIMO, en andere efficiëntie verhogende technieken), en ook de impact van het verkrijgen van spectrum in de 3,5 GHz-band (2022) en de 26 GHz-band (eveneens 2022, maar tragere adoptie in terminals en beperktere dekking) daarbij. We gaan er hierbij van uit dat de operator de beschikbare factoren *maximaal* inzet om de capaciteit van een sector te vergroten. De grafiek toont, in andere woorden, het 'best haalbare'. De operator kiest uiteindelijk welke factoren in welke mate worden ingezet. De verbetering door middel van verdichting kan uiteraard in principe meerdere keren worden herhaald.



Figuur 16 Impact van upgrades op capaciteit in mobiele netwerken (bron: modellering Dialogic; zie Bijlage 1)²⁸

Figuur 16 toont dat de efficiëntieverbeteringen jaarlijks een flinke vergroting van de capaciteit mogelijk maken. Met het nieuwe spectrum in de 3,5 GHz-band dat naar verwachting in 2022 beschikbaar komt, kan direct een flinke slag worden gemaakt (welke nog enigszins na-ijlt als gevolg van adoptie van de band aan terminalzijde). In de jaren daarop is de impact van efficiëntieverbetereing substantieel hoger, omdat deze betrekking heeft op een grotere hoeveelheid spectrum. Het verdichten van het netwerk, tot slot (in de grafiek "splitsing van een cel") levert steeds iets minder dan een verdubbeling van de bestaande capaciteit op. Merk verder op dat de verbetering in de jaren vanaf 2022 substantieel hoger liggen dan de maximale verbetering die in 2021 nog gehaald kan worden met verdichting.

2.4 Strategie van de operators

In de inleiding werd beschreven dat diverse factoren invloed hebben op de mate waarin een operator overgaat tot verdichting van het netwerk. Hoe komen deze factoren bij elkaar in de Nederlandse context? In deze paragraaf gaan we hier nader op in door het gedrag van de operator te modelleren, gegeven de eerder beschreven ontwikkelingen.

²⁸ Voor 'splitsing van een cel' tonen we hier het maximale effect voor splitsing door verdichting (het plaatsen van een nieuwe antenne). Sectorisering (statisch of dynamisch) is ook een vorm van celsplitsing, maar heeft

doorgaans een minder groot effect (omdat het verkeer vaak niet evenredig is te verdelen over de sectoren).

2.4.1 Rationeel gedrag

In onze modellering gaan we ervan uit dat een operator een *rationele actor* is: zij maakt altijd de keuzes die het eigen economische belang (winst) maximaliseren. De operators moeten hiertoe echter keuzes maken voor langere termijn en in context van onzekerheid. Daarnaast bestaan verschillen tussen de operators (in termen van uitgangspositie) en diverse (strategische) keuzemogelijkheden.



A. Dekking realiseren

Een operator realiseert primair een basisniveau van (outdoor) dekking. Hiervoor worden hoofdzakelijk 'lage' frequenties ingezet. Vervolgens wordt de indoordekking verbeterd.



B. Doorlopende vervanging

Als gevolg van opzeggingen of verplaatsingen moeten voortdurend antenne-opstelpunten worden vervangen. Soms keert een opstelpunt op dezelfde plaats terug, soms op een nieuwe.



C. Vergroten van de capaciteit macronetwerk

Op plekken waar dit nodig of verplicht is realiseert de operator aanvullende capaciteit, als volgt:

- 1. Migratie naar nieuwe technologiegeneratie**
Zodra installed base en ecosysteem dat ondersteunen
- 2. Inzet van extra spectrum**
Wanneer dit beschikbaar komt en verkregen kan worden
- 3. Technische upgrades (o.a. MIMO) en sectorisering**
Verhoging efficiëntie en verlaging aantal gebruikers/sector
- 4. Hotspots plaatsen**
Extra antenne-installaties om drukte 'op te vangen'
- 5. Verdichting en 'remote sectors'**
Verkleinen van aantal gebruikers per antenne-installatie



D. Uitrol van grootschalige small-cellstructuren

Een grootschalige small cellstructuur ontlast het macronetwerk en is de primaire toegang in grotere gebieden.

Figuur 17 Routekaart voor een operator ten aanzien van netwerkverdichting (illustratie: Dialogic)

Kijken we naar het gedrag van een operator ten aanzien van netwerkverdichting, dan zien we het in

Figuur 17 geschetste patroon, dat we een 'routekaart' noemen. Een operator doorloopt grofweg drie 'fasen' waarin verdichting van het netwerk steeds door een andere factor gedreven wordt.

A. Dekking realiseren

Allereerst zal een mobiele operator antenne-installaties plaatsen om dekking te realiseren. Het niet kunnen bieden van dekking betekent immers direct dat bepaalde klanten de mobiele dienst niet overal kunnen gebruiken. In eerste instantie zal worden gekeken naar outdoor dekking. Vervolgens is in pandige dekking de drijvende factor. Hoewel veel gebruikers thuis binnen zullen beschikken over Wi-Fi gaat het hier bijvoorbeeld om kantoorgebouwen, openbare gebouwen, grotere evenementenlocaties en dergelijke.

Het aantal antenne-installaties in deze fase is sterk afhankelijk van fysieke factoren (frequentie, hoogte van de antenne, hoogte van bebouwing in de omgeving, zendvermogen, et cetera). Ook de voorkeurspositie van een antenne wordt in deze fase aan de hand van deze factoren bepaald. Zo zal de voorkeur worden gegeven aan hoge locaties, zodat direct een groot gebied kan worden 'gedekt'.

Naast de groei die wij met ons model trachten te voorspellen, voorzien wij ook nog additionele redenen waarom het aantal antennes bij een operator wordt vergoot. Denk hierbij aan het bedienen van (nieuwe) speciale klanten, het onverwachts wegvalLEN van dekking door bouw van een nieuw hoog gebouw, capaciteitsproblemen in specifieke spectrumblokken, et cetera. De exacte aantallen zullen afhangen van het beschikbare budget voor netwerkverbeteringen bij de operators, maar een groei van tien tot dertig extra antenne-opstelpunten per jaar per operator achten wij reëel.

B. Invulling doorlopende vervanging

Zodra dekking is gerealiseerd krijgt een operator te maken met een cyclus van doorlopende vervanging van opstelpunten. Allereerst zal een antenne-installatie af en toe kapot gaan (denk bijvoorbeeld aan stormschade of blikseminslag) of moeten worden vervangen door een nieuwer model. Daarnaast speelt dat antennes vaak zijn geplaatst op bouwwerken die niet in eigendom zijn van de operator; de locatiehouder kan de 'verhuur' aan de operator dus ook opzeggen. De operators geven aan dit in toenemende mate te zien, als gevolg van maatschappelijke weerstand tegen 5G.

In veel gevallen zal een opstelpunt in deze fase worden vervangen door een gelijkwaardig opstelpunt op dezelfde locatie of op een locatie niet ver van de originele locatie vandaan. Afhankelijk van de vraag naar dekking en capaciteit op de betreffende locatie kan er ook worden gekozen om op moment van vervanging direct tot splitsing van de cel over te gaan. De antenne-installatie wordt dan vervangen door twee of meer nieuwe antenne-installaties op twee of meer antenne-opstelpunten.

C. *Vergroten van de capaciteit*

Nadat dekking is gerealiseerd en alle antenne-installaties operationeel zijn, functioneert het netwerk, maar kan er zich desondanks een tekort aan capaciteit voordoen. Hoe groter de concentratie van abonnees in een bepaalde cel, hoe groter de totale vraag naar capaciteit in die cel, en hoe groter de impact van de gemiddelde groei van de vraag naar data. In het algemeen zullen antenne-installaties in de buurt van 'drukke' locaties dus als eerst tegen de grenzen van capaciteit aanlopen.

Om de capaciteit van een cel te vergroten bestaan verschillende mogelijkheden; hieronder op volgorde van (algemene) voorkeur:

1. **Migratie naar een nieuwe technologiegeneratie.** Een nieuwere technologiegeneratie gaat efficiënter om met beschikbare bronnen (spectrum en tijd) en is daardoor in staat om meer capaciteit te realiseren op basis van dezelfde (fysieke) opstelpunten. Beperkende factor is de adoptie van de nieuwe technologiegeneratie in de apparaten van de gebruikers (terminals). Om de kosten zo laag mogelijk te houden zal een operator niet te veel 'generaties' tegelijkertijd in bedrijf willen hebben. Niet voor niets zijn de Nederlandse operators druk bezig met het uitschakelen van oudere 3G- en 2G-netwerken (waarbij ze soms een 'klein' oud netwerk aanhouden om redenen van dekking of compatibiliteit met oudere toestellen; zie hierboven).
2. **Inzet van extra spectrum.** Operators zetten niet per definitie al het spectrum waarover zij beschikken in op alle locaties. Inzet van spectrum vraagt immers specifieke antennes en apparatuur, en in sommige gevallen licentiebetalingen aan de vendor. Wanneer de apparatuur ter plaatse echter geschikt is voor een bepaalde band waarin de operator over spectrum beschikt, is het 'inschakelen' van dit spectrum een relatief

eenvoudige en effectieve methode om de capaciteit te vergroten. Ook hier is ondersteuning van de betreffende band door terminals een beperkende factor. Deze oplossingsrichting leidt over het algemeen niet tot extra opstelpunten.

3. **Technische upgrades.** In de loop der tijd komen diverse verbeteringen beschikbaar binnen een technologiegeneratie, die de operator kan toepassen op bestaande antenne-installaties. Vaak is daarvoor aanpassing of vervanging van apparatuur en/of de antennes noodzakelijk, al gaat het in sommige gevallen slechts om een software-update. De verbetering van de capaciteit varieert van marginaal tot significant. Voorbeelden van mogelijke upgrades zijn de volgende:

- **Inzet van (massive) MIMO.** Door antennes bestaande uit meerdere (interne) antenne-elementen aan zend- en ontvangzijde te gebruiken kunnen meerdere 'propagatiepaden' worden gecreëerd, waardoor de capaciteit van het radiokanaal effectief wordt vergroot. Voor 'hogere orde'-varianten van MIMO zijn steeds grotere aantallen antennes noodzakelijk (tot wel 64 of 128 aan zijde van de antenne-installatie). Naast MIMO zijn er ook andere interessante technieken die spectrale efficiëntie verhogen, zoals beamforming.
- **Sectoriseren van de antenne-installatie.** Bij statische sectorisering worden meerdere antennes geplaatst op een opstelpunt, waarbij iedere antenne een bepaald deel van de gradenboog 'bedient'. Bij dynamische sectorisering wordt met actieve antennesystemen een soortgelijk effect bewerkstelligd. Het gebied dat een enkele sector bedient wordt verkleind, waarmee het aantal gebruikers per sector (en dus het aantal gebruikers dat capaciteit moet delen) daalt, en de capaciteit per gebruiker stijgt. In Nederland worden op dit moment typisch antenne-installaties met drie sectoren toegepast. Het verder sectoriseren naar vier of meer sectoren heeft niet altijd zin, omdat de gebruikers vaak niet evenredig over de sectoren verdeeld zijn. Dynamische vormen van sectorisering

bieden hier mogelijk een (beperkte) verbetering.²⁹

- **Het herplaatsen van de antennes op het opstelpunt.** Door antennes op een bestaand opstelpunt anders te plaatsen kan in sommige gevallen de efficiëntie worden verhoogd.
- 4. Hotspots plaatsen.** Op sommige locaties, zoals bijvoorbeeld stations en voetbalstadions, loont het de moeite om additionele, kleinere cellen te creëren. Deze vangen een deel van het verkeer op, waardoor het macronetwerk wordt ontlast. Bij deze oplossing worden dus nieuwe (kleinere) antennes geplaatst. Het kan hier gaan om small cellinstallaties (dezelfde als bij grootschalige uitrol – zie hieronder – maar dan geen onderdeel van een grootschaligere structuur, maar echt gericht op een specifieke drukke plek). Onder deze oplossingsrichting scharen we tot slot ook Wi-Fi-offloading.
- 5. Netwerkverdichting.** Wanneer de capaciteit in een cel op geen enkele andere manier kan worden uitgebreid, zal een operator de cel moeten 'splitsen'. Hierbij wordt één antenne-installatie vervangen door twee antenne-installaties, waarbij de oppervlakte van de originele cel over beiden wordt verdeeld. In theorie biedt dit een verdubbeling van de capaciteit; in de praktijk ligt dit lager. In deze oplossingsrichting gaat het om het plaatsen van volwaardige 'macro- antenne-installaties', veelal met inzet van dakopstellingen.

D. Uitrol van een grootschalige small cellstructuur

Wanneer het verder splitsen van het macronetwerk niet meer praktisch wordt, en alle 'hotspots' zijn gevuld, is de laatste mogelijkheid een overstap naar een grootschalige small cellstructuur. Daarvoor realiseert de operator een groot aantal (kleine) antenne-installaties, bijvoorbeeld gemonteerd aan lantaarnpalen of ander straatmeubilair (met een voor het radionetwerk passende 'dichtheid' – zo zijn er per vierkante kilometer minder bushokjes dan er opstelpunten nodig zouden zijn). In deze opzet is het aantal gebruikers per cel een ordegrrootte lager en kan een forse stap in capaciteit per gebruiker worden gezet. Het primaire nadeel van deze

oplossingsrichting zijn de kosten (een zeer groot aantal antenne-installaties, dat daarnaast moet worden beheerd).

In hoofdstuk 4 gaan we nader in op de impact van grootschalige small cellstructuren.

2.4.2 Keuzeruimte en afweging per operator

De 'routekaart' uit de vorige paragraaf kan worden gebruikt om de netwerkverdichting van operators als gevolg van vraaggroei te modelleren. Zoals eerder besproken zijn er echter ook andere redenen die ertoe kunnen leiden dat een operator eerder, later of niet overgaat tot netwerkverdichting. We zien de volgende afwegingen. Deze afwegingen zijn *niet* meegenomen in de modellering, maar kunnen wel van invloed zijn op de uiteindelijke aantallen.

Opvattingen over onzekere factoren

Een operator moet *anticiperen* op de ontwikkeling van de markt. Hoewel operators over grote hoeveelheden data beschikken om hier een goede afweging te maken, verschillende operators substantieel in hun inschatting van de vraaggroei.

Vraagsturing

Een geconvergeerde operator kan klanten deels sturen in hun dataverbruik tussen vaste en mobiele infrastructuur, bijvoorbeeld door het aanbieden van Wi-Fi-hotspots.

Een operator kan het dataverbruik van klanten sturen door middel van de (beprijzing en omvang van) bundels. Ook zaken als 'zero rating', 'multi-SIM' et cetera kunnen bepaald gedrag stimuleren of juist ontmoedigen.

Veiligheid en overheidsmaatregelen

Sommige operators ondervinden meer impact dan andere als gevolg van (van overheidswege genomen) veiligheidsmaatregelen, die (onder andere) het vervangen van apparatuur voorschrijven.

Afschrijving van apparatuur

Iedere operator heeft te maken met een afschrijvingscyclus van de eigen 'assets'. Voor apparatuur in het radionetwerk gaat het om een termijn van ongeveer zeven jaar. Een operator zal eventuele

²⁹ Bij dynamische sectorisatie 'volgt' de sectorindeling het verkeer. Deze techniek kan alleen worden gerealiseerd met actieve antennesystemen.

upgrades willen afstemmen op deze cyclus om de investeringen in de apparatuur maximaal uit te nutten. Om die reden kunnen upgrades en verdichting worden uitgesteld of juist naar voren worden gehaald.

De ene operator biedt daarnaast meer 'specials' aan (groot)zakelijke klanten dan andere. Kenmerkend voor deze 'specials' is dat ze aanpassingen in het netwerk vereisen en vaak voor langere tijd moeten worden aangeboden. De hoeveelheid 'specials' beperkt de operator in de keuzevrijheid en flexibiliteit.

Verschillen in uitgangssituatie tussen operators

De Nederlandse operators verschillen in hun uitgangssituatie vanwege de historie. Zo beschikt T-Mobile over een groter aantal antenne-opstelpunten dan de andere operators. Een van de redenen is dat het netwerk van T-Mobile initieel was ingericht op het leveren van GSM in de 1800 MHz-band, terwijl KPN en Vodafone hun GSM-netwerk baseerden op 900 MHz-spectrum, en daarom initieel veel minder opstelpunten nodig hadden. Daarnaast speelt mee dat T-Mobile en Tele2 per januari 2019 fuseerden, en daarmee twee van oorsprong onafhankelijk geplande netwerken samenkwamen.

In de modellering is overigens gewerkt op basis van daadwerkelijke antennelocaties van de drie operators, en is deze factor dus grotendeels wél meegenomen.

Strategisch gedrag en concurrentiële overwegingen

Een operator kan zich strategisch gedragen in concurrentie met andere operators; daarmee wordt bedoeld dat het gedrag niet (alleen) gebaseerd is op de eigen economische belangen (op de korte- of middellange termijn). Strategisch gedrag zou ook kunnen voorkomen rondom opstelpunten, waarbij ook de zogenaamde *tower companies*³⁰ een rol kunnen spelen. ACM signaleert overigens eveneens dat opstelpunten een cruciale rol (gaan) spelen in de komende jaren. ACM heeft inmiddels een leidraad rondom het delen van opstelpunten vastgesteld, zodat dit mogelijk blijft in een competitief speelveld en partijen met tegengestelde belangen. [37]

³⁰ *Tower companies* zijn partijen die antenne-opstelpunten beheren en verhuren aan operators. In Nederland zijn onder andere Open Tower Company (OTC) en NOVEC actief. Laatstgenoemde is een dochteronderneming van TenneT,

2.5 Conclusie

De roadmap die Nederlandse operators waarschijnlijk zullen volgen

Kijken we naar alle hierboven besproken factoren in samenhang, dan voorzien we dat de Nederlandse operators een roadmap gaan volgen zoals aangegeven in Figuur 18.³¹

Tussen 2020 en 2022 plaatsen de Nederlandse operators een beperkt aantal nieuwe antenne-opstelpunten als gevolg van de verplichtingen in de vergunningen voor het 700 MHz-spectrum. Vanaf 2022 (september) verwachten we dat de operators 3,5 GHz-spectrum zullen inzetten voor 5G vanaf de bestaande opstelpunten. We verwachten als gevolg daarvan een zeer beperkte groei in het aantal opstelpunten, ter verbetering van de dekking.

Zodra er spectrum in de millimetergolfbanden (26 GHz) beschikbaar komt verwachten we dat de operators die dit verkrijgen, het zullen inzetten op drukkere macro- antenne-installaties, om daarmee de andere radiolagen te ontlasten. Introductie van 26 GHz-spectrum is ook een moment om de strategie ten aanzien van small cells opnieuw te bekijken.

Vanaf een zeker moment verwachten we een uitrol van grootschaligere small cellstructuren. De timing wordt bepaald door diverse factoren (met name: kosten small cells, maar ook beschikbaarheid van opstelpunten, noodzaak voor vergroting capaciteit, en regelgeving). We verwachten dat dit na 2026 zal plaatsvinden, en kwantificeren dit moment daarom hier niet. We verwachten dat, wanneer het zover is, uitrol allereerst zal plaatsvinden in (delen van) grotere steden, waarbij operators in een gebied ter grootte van een wijk een small cellstructuur realiseert op basis van bestaand straatmeubilair. Een dergelijke grootschalige small cellstructuur kan worden uitgerold op basis van 3,5 GHz en/of 26 GHz-spectrum.

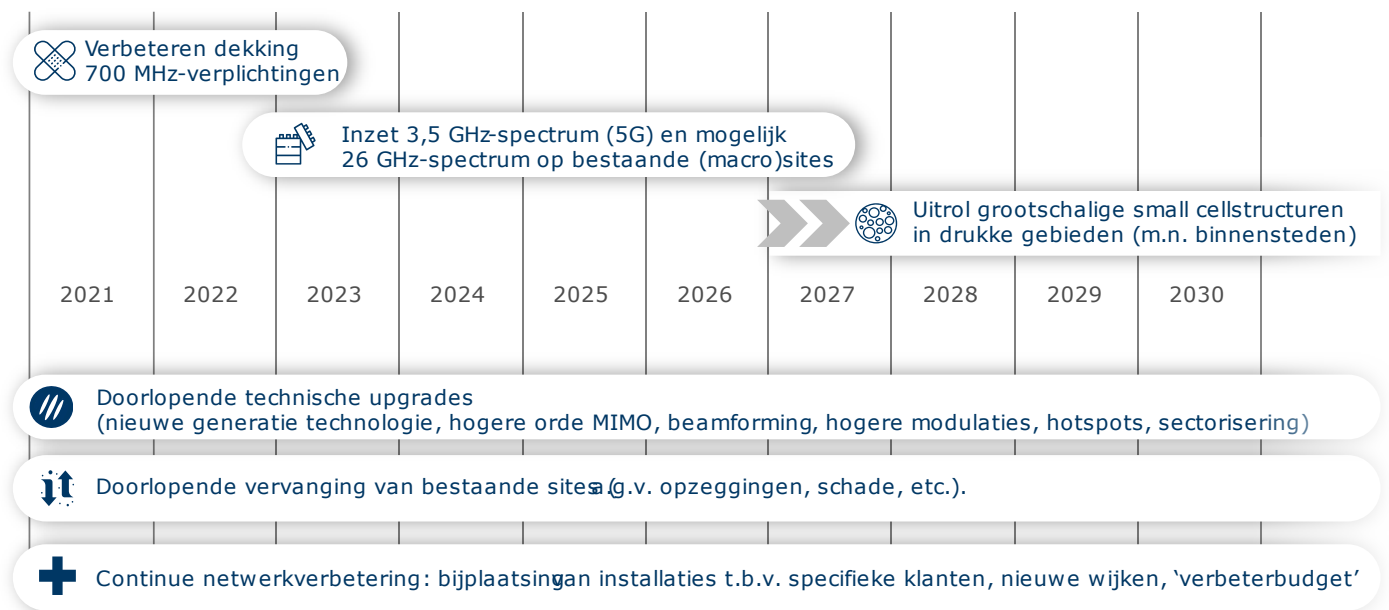
Doorlopend hebben operators te maken met vervanging en voeren zij upgrades uit aan de bestaande antenne-installaties. Het aantal antenne-opstelpunten zal hierdoor netto nauwelijks toenemen of afnemen. Wel kan het zijn dat antenne-opstellingen

en exploiteert opstelpunten op telecommasten en hoogspanningsmasten in Nederland.

³¹ Dit beeld komt op hoofdlijnen overeen met het door de operators geschetste pad in o.a. [1].

van vorm of afmeting veranderen. Operators plaatsen tot slot jaarlijks een tiental nieuwe antenne-installaties, om het netwerk te verbeteren

(bijvoorbeeld ten behoeve van een specifieke grotere klant of een nieuwe woonwijk).



Figuur 18 Roadmap voor Nederlandse mobiele operators (illustratie Dialogic)

3 Ontwikkeling aantal antenne-opstelpunten tot 2027

In dit hoofdstuk presenteren we onze verwachtingen ten aanzien van het aantal antenne-opstelpunten in Nederland. Vervolgens geven we de resultaten op basis van de (wat ons betreft) meest aannemelijke uitgangspunten. Naast dit meest waarschijnlijke scenario presenteren we enkele andere scenario's. Tot slot gaan we in op de validiteit en robuustheid en van de resultaten.

3.1 Meest aannemelijke scenario

In het vorige hoofdstuk is een roadmap gepresenteerd. In deze paragraaf berekenen we de impact van deze roadmap op de ontwikkeling van het aantal antenne-opstelpunten. Dat doen we op basis van twee fasen in de roadmap:

1. Verdichting ten behoeve van de verplichtingen van de 700 MHz-vergunningen.
2. Capaciteitsgedreven verdichting. Hierin speelt de inzet van 3,5 GHz-spectrum en later de inzet van 26 GHz-spectrum (op macro-antenne-installaties).

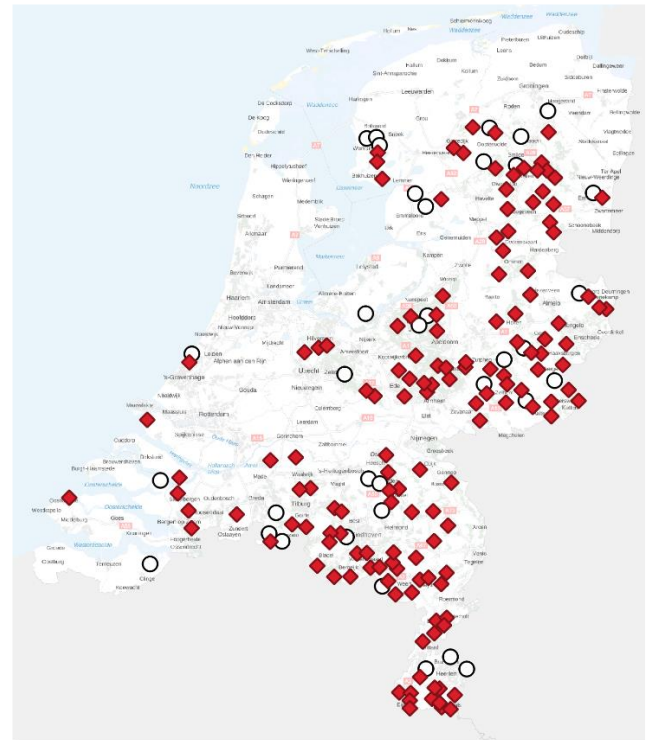
De uitkomsten van deze twee fasen zijn zodanig dat het niet aannemelijk is dat de derde fase (uitrol van grootschalige small cellstructuren) binnen de modeleringstermijn (zes jaar) zal starten, en werken we daarom niet kwantitatief uit in dit hoofdstuk. In het volgende hoofdstuk gaan we hier wel uitgebreid kwalitatief op in.

3.1.1 Verdichting 700 Mhz

In 2020 verkreeg elk van de drie Nederlandse operators spectrum in (onder andere) de 700 MHz-band (tweemaal 10 MHz gepaard spectrum per operator). [38] De vergunning voor het gebruik van dit spectrum bevat eisen ten aanzien van de dekking en snelheid van de geleverde dienst. [19]

De operators geven aan dat zij extra opstelpunten moeten plaatsen om aan de eisen te kunnen voldoen. Om te bepalen om hoeveel opstelpunten het gaat, is door ons een analyse uitgevoerd op basis

van de (openbaar beschikbare) dekkingskaarten van de operators (zie [7] [6] [5]) en het Antenneregister. [39]



- ◆ Nieuwe antenne-installatie nodig, nieuw opstelpunt nodig
- Nieuwe antenne-installatie nodig, shared site mogelijk

Figuur 19 Analyse Dialogic van de (maximaal) benodigde hoeveelheid antenne-installaties voor invullen van de dekkingverplichting 700 MHz voor één operator, op basis van Antenneregister (aug '19)

Op basis van de analyse verwachten we dat de operators ieder maximaal tussen de 50 en 100 extra antenne-installaties nodig hebben om te kunnen voldoen aan de dekking- en snelheidsverplichting voor de 700 MHz-vergunningen. We verwachten dat iedere operator ongeveer 40 antenne-installaties kan realiseren op bestaande opstelpunten (gedeeld met een andere operator, oftewel een shared site). Ook in dit kader nieuw gerealiseerde antenne-opstelpunten kunnen uiteraard worden gedeeld. Netto zouden de drie operators³² samen in totaal maximaal 150 nieuwe antenne-opstelpunten moeten realiseren.

Uit onze analyse blijkt dat er duidelijke verschillen zijn tussen provincies en regio's. Dit is met name het gevolg van natuurlijke gebiedskenmerken (dekking

³² Deze opstelpunten zouden uiteraard ook door een derde partij ('tower company') gerealiseerd kunnen worden die ze openstelt voor de operators.

in heuvelachtig gebied is bijvoorbeeld lastiger te realiseren) en andere omgevingsfactoren (zoals de landsgrens). Dit is duidelijk zichtbaar in Figuur 19, waarin we de uitkomsten van onze analyse voor één van de operators laten zien.

We verwachten dat in de praktijk het aantal nieuw benodigde opstelpunten lager zal liggen dan het hier gevonden maximum. Het meetprotocol bepaalt dat de dekking en snelheid met een bepaalde kans moeten worden gehaald; de lat ligt daarmee lager dan het hier gepresenteerde scenario. Ook kunnen in specifieke gevallen wellicht andere (voordeligere) oplossingen worden gevonden, zoals het aanpassen van bestaande antenne-installaties. Wat ons betreft is 100 nieuwe antenne-opstelpunten een realistische ondergrens.

Triangulatie van de resultaten

In voorbereiding van de uitgifte van de 700 MHz-vergunningen is door PA Consulting onderzoek uitgevoerd naar de impact van de dekkingseis. [40] In nadere analyse en op basis van feedback van de operators is vervolgens specifiek gekeken naar het aantal benodigde nieuwe sectoren en antenne-installaties. [41] Hieruit volgt dat er een substantieel aantal nieuwe *sectoren* nodig is om aan de eis te kunnen voldoen. Het aantal nieuw benodigde macro- antenne-installaties is volgens het onderzoek echter zeer beperkt: tussen de 9 en 18 in totaal.

In het onderzoek van PA lijkt een model te zijn gehanteerd dat geen rekening houdt met de topografie op locatie (bossen, heuvels, bebouwing). In onze analyse is dat wel gedaan, doordat is gewerkt op basis van de dekkingskaarten van de operators. Op basis van onze analyse lijkt het ons daarnaast zeer onwaarschijnlijk dat het op grote schaal (statistisch) sectoriseren van antenne-installaties soelaas biedt voor het verbeteren van de dekking.³³ Samenvattend denken we dat het aantal nieuwe antenne-opstelpunten als gevolg van de dekkingseis aanzienlijk minder is dan het

gevonden maximum van 150, maar dat de berekening van PA Consulting van 9 tot 18 te laag is.

3.1.2 Capaciteitsgedreven verdichting

In de volgende fase is netwerkverdichting primair gedreven door de noodzaak tot capaciteitsvergroting. We onderscheiden twee parallelle trajecten: de uitrol en adoptie van 3,5 GHz-spectrum en die van het 26 GHz-spectrum.

Inzet van 3,5 GHz-spectrum

Zoals eerder beschreven leidt de inzet van spectrum in de 3,5 GHz-band (in totaal 300 MHz) op basis van 5G NR direct tot een substantiële verhoging van de capaciteit, bij redelijk goede dekking, zonder dat nieuwe antenne-opstelpunten benodigd zijn (uiteraard is wel nieuwe apparatuur op *bestaande* opstelpunten nodig). Daarnaast kan de capaciteit met de inzet van het 3,5 GHz-spectrum ook in de jaren daarna nog verder worden vergroot (zie Figuur 16). De introductie van de 3,5 GHz-band betekent daarmee concreet uitstel van verdere verdichting van het netwerk.

Inzet 26 GHz-spectrum

De inzet van 26 GHz (millimetergolf)-spectrum is in beginsel mogelijk op basis van bestaande antenne-opstelpunten. Dit is ook financieel een aantrekkelijk scenario voor operators. Echter, door de minder gunstige propagatie-eigenschappen van millimetergolven (ze 'doven' veel sneller uit), is de dekking van deze extra radiolaag dan wel beperkt tot een klein gebied rond het opstelpunt. Daarbij is een (bijna) zichtlijn tussen ontvanger en antenne-installatie in de praktijk noodzakelijk.

Een uitrol van 26 GHz op bestaande opstelpunten leent zich daarmee met name voor situaties waarin zich veel gebruikers binnen een beperkte straal rond bestaande opstelpunten bevinden. In Nederland valt dan te denken aan drukke locaties in de grotere steden en evenementenlocaties.

sectorisering van 3 naar 4 of 6 sectoren beperkt is (gebruikers dienen hiervoor evenredig verdeeld te zijn rond de antenne-installatie) en capaciteit in het buitengebied al nauwelijks de beperkende factor is vanwege de lage dichtheid van gebruikers. Overigens zou op basis van *dynamisch* sectoriseren (middels actieve antennesystemen) iets meer efficiëntiewinst kunnen worden behaald.

³³ In Nederland wordt op vrijwel alle antenne-installaties gebruik gemaakt van drie sectoren (bron: [40], analyse Dialogic). Het verder vergroten van het aantal sectoren verhoogt de signaalsterkte met enkele dB. Dit is echter niet voldoende om dekking te verbeteren in situaties waarbij een bos, heuvel, gebouw of ander obstakel de oorzaak is van slechtere dekking. Voor capaciteit lijkt het sectoriseren ook niet nodig, omdat de capaciteitswinst bij

Wanneer een operator vanaf bestaande macro-opstelpunten gebruik gaat maken van 26 GHz-frequenties, kan naar schatting tot ongeveer 46% van de oppervlakte buiten worden bedekt in een dichtbebouwde Nederlandse stad.³⁴ In een druk (stads)centrum met veel mensen in de buitenlucht kan hiermee dus een aanzienlijke ontlasting van het macronetwerk in de huidige banden worden bereikt. Ook binnenshuis zal er enige dekking zijn, al blijft dit beperkt tot "vlak achter het raam" vanwege de snelle uitdoving van 26 GHz-signalen.

Met name met macro-antenne-installaties op strategische locaties, dicht bij drukke plekken, kan veel waardevolle capaciteit worden gerealiseerd. Denk hierbij bijvoorbeeld aan een dakinstallatie op een gebouw aan een plein. In smallere straten is dit iets lastiger, maar zien we (in onze modellering) alsnog een behoorlijke dekking op basis van bestaande macro-opstelpunten. De daadwerkelijke dekking is (met name in de smalle straten) sterk afhankelijk van de precieze plaatsing van de antenne-installaties.

3.1.3 Totaal benodigde aantal opstelpunten

De totale verwachte uitrol in de komende zes jaren kan voor het meest waarschijnlijke scenario als volgt worden samengevat:

- Tussen de 100 en 150 nieuwe antenne-opstelpunten als gevolg van de verplichtingen die aan de 700 MHz band verbonden zijn.
- 30 tot 90 antenne-opstelpunten per jaar als gevolg van continue netwerkverbetering.
- Een jaarlijks toenemend aantal antenne-opstelpunten als gevolg van toenemende vraag. Wij verwachten dat dit tot in totaal maximaal 36 nieuwe antenne-opstelpunten leidt tot 2027.

In het meest aannemelijke scenario is de voornaamste groei van het aantal antenne-opstelpunten niet te wijten aan vraaggroei, maar aan het realiseren van extra dekking (met name in buitengebieden) en netwerkverbeteringen (bijvoorbeeld bij nieuwbouwwijken). De uitrol van opstelpunten ten behoeve van dekking leidt daarnaast tot substantiële capaciteit in gebieden waar de vraag lager is, waardoor in die

gebieden voorlopig geen nieuwe opstelpunten hoeven worden geplaatst omwille van capaciteit.

Tabel 2 hieronder toont de aantallen; in Bijlage 2 zijn de aantallen per jaar te vinden.

Tabel 2 Verwacht aantal nieuwe antenne-opstelpunten tot 2027 in het meest waarschijnlijke scenario (modellering Dialogic)

Drijfveer voor nieuwe antenne-opstelpunten	Aantal nieuwe antenne-opstelpunten in het meest aannemelijke scenario (35% vraaggroei per jaar)
Verplichtingen 700 MHz-vergunningen	100 – 150 in 2021-2022
Doorlopende netwerkverbeteringen	180 – 540 t/m 2026 (30 – 90 per jaar)
Capaciteitstekort als gevolg van vraaggroei	16 – 36 t/m 2026
Totaal t/m 2026 (t.o.v. 2021)	296 – 726

3.1.4 Locatie van nieuwe opstelpunten

De locaties waar de (in Tabel 2 geprognosticeerde) nieuwe antenne-opstelpunten zullen worden geplaatst, verschillen sterk per drijfveer.

Verplichtingen van de 700 MHz-vergunningen

De opstelpunten die nodig zijn om te kunnen voldoen van de dekkings- en snelheidsverplichting in de 700 MHz-vergunningen zullen vooral nodig zijn buiten de steden. In het bijzonder gaat het daarbij om gebieden met radiotechnisch 'lastige' topografie, zoals heuvelachtige en bosrijke landschappen. Figuur 19 geeft een *indicatie* hiervan. In Tabel 3 tonen we de namen van de gemeenten waar we drie of meer opstelpunten verwachten als gevolg van de dekkingsverplichting (boven op deze aantallen komt incidenteel nog een opstelpunt als gevolg van een capaciteitstekort, en mogelijk opstelpunten als gevolg van doorlopende verbeteringen).

³⁴ Gebaseerd op modellering door Dialogic (zie Bijlage 1) voor een Nederlandse binnenstad op basis van bestaande (macro)opstelpunten van een Nederlandse operator met het hoogste aantal antenne-installaties in dat gebied. Het genoemde percentage geeft daarmee een bovengrens.

Merk op dat alle hier getoonde uitkomsten op gemeenteniveau indicatief zijn. Het is zeer goed denkbaar dat de operators tot andere locaties komen. Dit is afhankelijk van diverse factoren, waaronder de prioritering van de operators en het verloop van vergunningstrajecten. We adviseren gemeenten de plaatsingsplannen die de operators jaarlijks met hen delen te bestuderen (zie [42]).

Tabel 3 Overzicht nieuwe antenne-opstelpunten als gevolg van dekkingsverplichting 700 MHz-vergunningen (bron: modellering Dialogic; zie Bijlage 1)

Gemeente	Nieuwe antenne-opstelpunten voor dekkingsverplichting
Midden-Drenthe	5
Heeze-Leende	4
Bronckhorst	4
Berkelland	4
Ede	3 (+1*)
Apeldoorn	3 (+1*)
Gulpen-Wittern	3
Westerveld	3
Bergeijk	3
Echt-Susteren	3

+21 gemeenten met 2 nieuwe antenne-opstelpunten als gevolg van de dekkingsverplichting

+61 gemeenten met 1 nieuw antenne-opstelpunt als gevolg van de dekkingsverplichting

*: Nieuw opstelpunt als gevolg van capaciteitsgroei.

Doorlopende netwerkverbeteringen

De opstelpunten die worden geplaatst ten behoeve van doorlopende verbetering van het netwerk zullen min of meer willekeurig door het land worden geplaatst, met een nadruk op bebouwde gebieden. Het kan hier bijvoorbeeld gaan om nieuwe woonwijken, bedrijven- of industrieterreinen en drukke locaties. Vergeleken met de opstelpunten die om andere redenen worden geplaatst verwachten we hier het grootste verschil tussen de operators, die hier de grootste vrijheid hebben om strategische keuzes te maken. Het is dan ook niet eenduidig aan te geven waar deze uitrol zal plaatsvinden.

Kijken we naar waar de komende jaren nieuwe woonwijken, bedrijventerreinen en kantoorlocaties worden voorzien (zie bijvoorbeeld [43]), dan valt op dat een groot deel van de plannen zich bevindt in dichtbevolkt gebied waar de capaciteit op dit moment al hoog is (en waar we in de eerdere

modellering ook al nieuwe opstelpunten verwachten als gevolg van vraaggroei). Desondanks zien we her en der een aantal locaties in gebieden aan de randen van steden en in gebieden met minder hoge capaciteit. De hier bedoelde nieuwe opstelpunten voor netwerkverbetering verwachten we met name in deze gebieden.

Capaciteitstekort als gevolg van vraaggroei

De opstelpunten die worden geplaatst om een capaciteitstekort te kunnen opvangen (dat is ontstaan als gevolg van vraaggroei) worden naar verwachting met name in de grotere steden geplaatst (zie o.a. Figuur 21 voor een indicatie van de locaties waar de capaciteit als eerst onvoldoende is om in de vraag te kunnen voorzien).

3.2 Overige scenario's en invloeden

In het voorgaande zijn we steeds uitgegaan van het meest aannemelijke scenario op basis van (onder andere) 35% jaarlijkse groei van de vraag, een realistische geografische spreiding van de vraag en ingebruikname van de 3,5 GHz-band door alle operators. In deze paragraaf geven we de uitkomsten voor andere scenario's, waarbij op deze parameters wordt gevarieerd.

3.2.1 Andere vraagscenario's

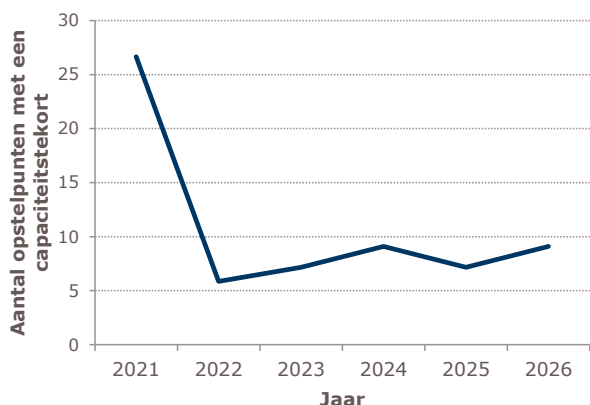
In deze scenario's ontwikkelt de vraag naar mobiele data zich anders dan in het meest waarschijnlijke scenario, waarin wordt uitgegaan van 35% (minimaal 30% en maximaal 40%) groei per jaar.

Vraag naar mobiele data stagneert

In een scenario waarin de vraag naar van mobiele data maar zeer beperkt groeit, is er nauwelijks noodzaak voor het plaatsen van nieuwe opstelpunten vanwege capaciteitstekorten (de eerder gegeven aantallen voor doorlopende netwerkverbetering en de 700 MHz-verplichtingen blijven echter aan de orde).

Figuur 20 toont het aantal nieuwe antenne-opstelpunten dat (per jaar, steeds ten opzichte van de huidige infrastructuur) nodig zou zijn bij een groei van 28% per jaar die tot en met 2026 afvlakt tot 15% per jaar. Het blijkt daarbij slechts te gaan om enkele tientallen sectoren en dus maximaal circa nieuwe 27 opstelpunten ten opzichte van 2021 (boven op de opstelpunten om te kunnen voldoen aan de dekkings- en snelheidsverplichtingen van het 700 MHz-spectrum). Met de capaciteit die er in de

komende jaren bijkomt zouden er in 2026 naar schatting maximaal 9 nieuwe opstelpunten nodig zijn.



Figuur 20 Aantal nieuwe antenne-opstelpunten nodig om een capaciteitsstekort in te vullen bij 28% vraaggroei per jaar die afvlakt tot 15% per jaar, ten opzichte van de huidige infrastructuur (bron: modellering Dialogic)

Versnelling van de vraaggroei

De groei van de vraag naar mobiele data kan uiteraard ook toenemen. De reden hiervoor kan bijvoorbeeld liggen in een "killer use case" op basis van 5G. Denk aan een nieuw type mobiel apparaat of dienst die in korte tijd massaal wordt geadopteerd en veel dataverkeer vraagt. Zoals in het eerdere hoofdstuk beschreven verwachten wij in een dergelijk scenario niet dat de vraaggroei *structureel* hoger wordt. Wel verwachten we dat jaar-op-jaar groei tot 60% denkbaar is, tot (ten minste) de volumes zijn bereikt die we ook in het regulier groeiscenario zien voor het einde van de gemodelleerde periode.

We analyseren daarom dit versnelde groeiscenario op basis van een vraaggroei van 60% (met een marge van 5%) tot en met 2024. Dit achten wij een extreem, maar nog wel enigszins realistisch scenario (ook gebaseerd op de diverse bronnen en gesprekken). Het toont daarbij goed de gevoeligheid van de parameters in onze berekeningen. Tabel 4 toont de uitkomsten voor dit versnelde groeiscenario.

Tabel 4 Het benodigde aantal nieuwe opstelpunten in de periode 2021-2024 in een versneld groeiscenario, uitgaande van 60% ($\pm 5\%$) vraaggroei per jaar (bron: modellering Dialogic; zie Bijlage 1)

Drijfveer voor nieuwe antenne-opstelpunten	Aantal nieuwe antenne-opstelpunten in versneld groeiscenario (60% vraaggroei t/m 2024)
Verplichtingen 700 MHz-vergunningen	100 - 150 in 2021-2022
Doorlopende netwerkverbeteringen	120 - 360 t/m 2024 (30 - 90 per jaar)
Capaciteitsstekort als gevolg van vraaggroei	35 - 61 t/m 2024
Totaal t/m 2024 (t.o.v. 2021)	255 - 571

De vraag naar mobiele data die de hier besproken "killer use case" oplevert kan op verschillende manieren over de mobiele netwerken verdeeld zijn. Dit heeft invloed op de manier waarop (in dit scenario) ná 2024 verdere uitrol zal plaatsvinden. Het is wat ons betreft het meest realistisch dat een dergelijke "killer use case" vooral zal leiden tot vraag op specifieke hotspots, en dus na 2024 vooral tot een verdere stijging van het aantal small cellhotspots. Bij een casus die tot meer gelijkmatige hoge vraag in binnensteden en wijken leidt zouden juist grootschalige small cellstructuren eerder denkbaar kunnen worden.

3.2.2 Externe invloeden

In deze scenario's behandelen we invloeden buiten de invloedssfeer van de operators die een impact kunnen hebben op het aantal antenne-opstelpunten.

Het aantal nieuwe macro-antenne-installaties wordt sterk beperkt of het aantal daalt

In dit scenario wordt het aantal macro-antenne-opstelpunten sterk beperkt of daalt dit zelfs. Dit zou kunnen gebeuren wanneer vergunningsaanvragen hiervoor structureel worden geweigerd, en/of wanneer locatie-eigenaren hun locatie niet meer beschikbaar willen stellen voor antenne-opstelpunten. De operators geven aan dat met name van het laatste in de afgelopen jaren in toenemende mate sprake was. Het betrof daarbij met name opstelpunten op of aan gebouwen in bebouwde gebieden. Wanneer dergelijke opzeggingen voor een groter

aantal locaties tegelijk zou plaatsvinden (bijvoorbeeld wanneer een woningcorporatie het contract met de operator opzegt) kan de impact op het aantal beschikbare antenne-installaties in een gegeven gebied groot zijn. Aedes, de vereniging van woningbouwverenigingen, geeft aan regelmatig vragen te krijgen van haar leden over 5G-antennes, waaruit we afleiden dat het onderwerp leeft onder de woningbouwverenigingen, en er voor de operators onzekerheid bestaat over continuering van deze opstelpunten. [44]

In het bijzonder in gebieden waar de afstand tussen antenne-installaties hoog is (bijvoorbeeld buiten de stad) leidt een beperking van het aantal macro-opstelpunten direct tot een dekkingstekort. In andere gebieden leidt het vaker tot een capaciteitstekort in de aangrenzende cellen.

Zoals eerder aangegeven kan een operator een *dekking*sprobleem in de praktijk alleen oplossen met het plaatsen van nieuwe (macro-)antenne-installaties (tenzij het een heel klein dekkingprobleem betreft). Een oplossing zou dan kunnen zijn om gedeeld gebruik te gaan maken van een opstelpunt van een andere operator, indien aanwezig. Dat zal echter lang niet altijd kunnen. Bij opstelpunten op gebouwen kan bijvoorbeeld de ruimte ontoereikend zijn om dat punt met een extra operator te delen. Tot slot zou het delen van actieve apparatuur een mogelijkheid zijn. ACM geeft aan de voordelen en eventuele mededingingseffecten van het delen van actieve apparatuur te zullen onderzoeken. [37]

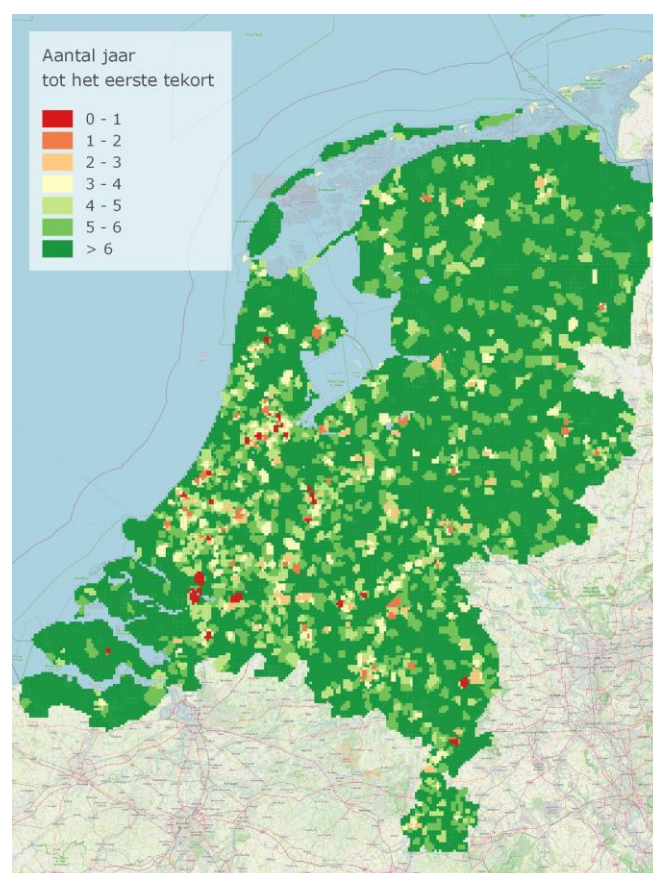
Het vinden van geschikte macro-opstelpunten wordt mogelijk steeds lastiger, onder andere omdat de 'beste' locaties hiervoor inmiddels al in gebruik zijn. Small cells kunnen in deze situatie een deel van de oplossing zijn, omdat deze technisch gezien (vanwege de afmetingen van de apparatuur) op nieuwe locaties kunnen worden ingezet.

Vertraagde inzet van het 3,5 GHz-spectrum

Uit de hierboven getoonde resultaten volgt dat het aantal opstelpunten dat nodig is als gevolg van vraaggroei beperkt is. Daarbij is de rol van de 3,5 GHz-band echter cruciaal: wanneer deze pas later of in beperktere mate inzetbaar is, zijn meer

nieuwe opstelpunten nodig op de vraaggroei te kunnen invullen.

Figuur 21 toont per vierkante kilometer het aantal jaar dat het duurt totdat ten minste één sector in dat vierkant een capaciteitstekort zal hebben. Wanneer het 3,5 GHz-spectrum bijvoorbeeld twee jaar later wordt ingezet dan op dit moment is voorzien (bijvoorbeeld pas in 2024 in plaats van eind 2022), dan ontstaat in de hier roodgekleurde gebieden een behoefte aan extra antenne-opstelpunten om aan de groeiende vraag te kunnen voldoen. Duurt het langer, dan zal dit ook gaan spelen in de gele en lichtgroene gebieden.



Figuur 21 Aantal jaar tot er een capaciteitstekort ontstaat voor ten minste één sector, per vierkante kilometer. Op basis van huidige opstelpunten, hoeveelheden spectrum, technologie (LTE) en marktaandeel.³⁵ (bron: modellering Dialogic; zie Bijlage 1)

³⁵ Relevante aannames: vraaggroei van 35% per jaar. Aan de vraagzijde is de hoogste waarde per vierkante

kilometer genomen uit de drie scenario's (spits, vrije tijd en overdag).

Tabel 5 Overzicht aantallen en locatie van te verwachten nieuwe antenne-opstelpunten, naar drijfveer (modellering Dialogic)

Verwacht aantal nieuwe antenne-opstelpunten Drijfveer voor nieuwe antenne-opstelpunten	Meest aannemelijke scenario 35% vraaggroei t/m 2026	Versneld groeiscenario 60% vraaggroei t/m 2024	Voornamelijke locatie nieuwe opstelpunten
Verplichtingen 700 MHz-vergunningen	100 - 150 in 2021-2022	100 - 150 in 2021-2022	Buiten de steden, in dunbevolkte gebieden, met name met heuvelachtig of bosrijk landschap.
Doorlopende netwerkverbeteringen	180 - 540 t/m 2026 (30 - 90 per jaar)	120 - 360 t/m 2024 (30 - 90 per jaar)	Willekeurig verspreid over gemeenten, bijvoorbeeld bij nieuwe woonwijken, bedrijven- en industrieterreinen.
Capaciteitstekort als gevolg van vraaggroei	16 - 36 t/m 2026	35 - 61 t/m 2024	Zie Figuur 21. Met name in de grotere steden.
Totaal nieuw (t.o.v. 2021)	t/m 2024 232 - 526 <i>Geen grootschalige small cellstructuren</i>	255 - 571 <i>Geen grootschalige small cellstructuren</i>	
	t/m 2026 296 - 726 <i>Geen grootschalige small cellstructuren</i>	<i>Onzeker, we verwachten relatief meer losstaande small cells bij hotspots</i>	

3.3 Onzekere factoren

Er bestaat een inherente onzekerheid met betrekking tot de parameters die in onze modellering gebruikt worden, en als gevolg daarvan kennen ook de uitkomsten van onze modellering een mate van onzekerheid. Zeker bij een complex model, zoals wij dat gebruiken, is de relatie tussen onzekerheden in de input en die uitkomsten lang niet altijd simpel en lineair. In deze paragraaf geven we daarom verder inzicht in de onzekerheden in onze uitkomsten. Het is voor het ministerie en de gemeenten zaak om de genoemde ontwikkelingen te blijven monitoren, aangezien ze aanzienlijke impact kunnen hebben op het uiteindelijke aantal benodigde nieuwe opstelpunten (in zowel positieve als negatieve zin).

Beschikbaarheid spectrum en regulering

Toekomstig beleid ten aanzien van mobiele netwerken en opstelpunten kan uiteraard grote invloed hebben op de hier getoonde aantallen. Specifiek relevant is spectrumbeleid. Uit de resultaten wordt duidelijk dat het beschikbaar komen van spectrum in de 3,5 GHz en 26 GHz-banden direct grote impact kan hebben op de capaciteit die kan worden geboden op basis van bestaande antenne-opstelpunten. Voor het 3,5 GHz-spectrum staat inmiddels vast dat het per september 2022 beschikbaar komt. De timing

voor het millimetergolfspectrum is echter nog niet zeker.

Naast deze banden is het niet uit te sluiten dat in de komende zes jaar aanvullend "sub-10 GHz"-spectrum beschikbaar komt. Zoals reeds aangegeven is er internationaal aandacht voor de 6 GHz-band. Ook ('opportunistische') inzet van (vergunningvrij) 5 GHz-spectrum is niet ondenkbaar.

In alle gevallen geldt dat hoe later aanvullend spectrum beschikbaar komt, hoe meer nieuwe (macro-)antenne-opstelpunten er uiteindelijk nodig zullen zijn en hoe eerder het kantelpunt naar grootschalige small cellstructuren komt te liggen.

Duidelijkheid over het moment van beschikbaarheid van spectrum kan ook tot gevolg hebben dat operators juist nog even wachten met de uitrol van nieuwe antenne-opstelpunten (bijvoorbeeld wanneer operators liever willen wachten met het uitrollen van small cells tot ook de 26 GHz-band kan worden ingezet in deze cellen, en een nieuwe serie basisstationapparatuur beschikbaar is).

Kosten grootschalige small cellstructuren

De kosten van small cellstructuren liggen voornamelijk hoger dan die van een macrostructuur wanneer eenzelfde (stedelijk) gebied moet worden bedekt. Zoals uit de analyse volgt verwachten we dat het

kantelpunt voor grootschalige small cellstructuren na 2026 ligt. De kosten van de apparatuur zullen tegen die tijd waarschijnlijk gedaald zijn. Als die daling fors is, dan kan het kantelpunt ook eerder komen te liggen, maar zonder directe noodzaak vanuit capaciteitsoogpunt zien we de uitrol in een dergelijk scenario niet substantieel vervroegd worden.

Toetreding

Met de toetreding van een nieuwe operator zal dynamiek ontstaan in zowel het aantal benodigde antenne-installaties als het aantal opstelpunten. Zo leidde de toetreding van Tele2 in Nederland eerder tot een groei in het aantal installaties (waarbij zij wel opstelpunten (en soms zelfs antennes) deelden met T-Mobile). Dit zal bij een nieuwe toetreder wederom het geval zijn.

Een andere mogelijkheid is de toetreding van een zogenoemde 'neutral hostpartij'. Dit wordt met name relevant ten tijde van de small cell-uitrol en reduceert juist het aantal cellen (partijen kunnen in de toekomst immers wellicht RAN-sharing inzetten). In Nederland zijn diverse partijen actief op het gebied van (site) sharing en gedeelde passieve infrastructuur, voor wie een dergelijke rol wellicht zou kunnen zijn weggelegd. In België en Ierland zagen we Dense Air, een partij die zichzelf profileert als "neutral host operator" [45], meedoen in de spectrumveiling voor 3,5 GHz [46]. In hoeverre er op dit moment sprake is van RAN-sharing in het verkregen spectrum is onbekend.

De Nederlandse operators geven aan dat RAN-sharing technisch complex is. Daarnaast spelen vraagstukken op het gebied van mededinging. De techniek wordt echter in het buitenland al toegepast: in Singapore zien we bijvoorbeeld twee operators die het RAN-netwerk delen. [47] Dichter bij huis hebben

Vodafone en TIM in Italië een overeenkomst voor RAN-sharing voor LTE en 5G gesloten [48], en in het Verenigd Koninkrijk deelt Vodafone een 5G-RAN met O2 (Telefónica) [49]. We verwachten dat RAN-sharing in de komende jaren (wereldwijd) gebruikelijker en daardoor ook eenvoudiger te implementeren zal worden.

3.4 Vergelijking met andere analyses

In deze paragraaf vergelijken we de in onze analyse gevonden resultaten met bevindingen uit de literatuur. Voor de volledigheid vatten wij onze uitkomsten nog eens samen in Tabel 6.

Inschatting operators (Monet)

De operators geven zelf (bij monde van Monet, waarin de operators verenigd zijn) aan in totaal ongeveer 10% *nieuwe* antenne-installaties³⁶ te verwachten in de komende vijf jaar. In absolute zin zou het gaan om ongeveer 1.500 nieuwe antenne-installaties³⁷. Uitgaande van het huidige niveau van site sharing zouden hiervoor ongeveer 1.186 nieuwe antenne-opstelpunten nodig zijn.³⁸ [1] [50]

De schatting van de operators ligt hoger dan de uitkomsten van onze modellering. In het meest aannemelijke scenario blijft het aantal nieuwe antenne-installaties in onze analyse tot ten minste 2027 onder de 1.500 (c.q. het aantal antenne-opstelpunten tot 2027 onder de 1.186). Het is denkbaar dat in het genoemde aantal antenne-opstelpunten zijn meegenomen die in dit onderzoek niet worden meegenomen (bijvoorbeeld in pandige small cells). Uit gesprekken met de operators concluderen we in ieder geval dat uitrol van grootschalige small cellstructuren niet in de

³⁶ Monet spreekt in haar "factsheet 5G" [1] over "circa 1.500 extra opstelpunten totaal voor de 3 operators gezamenlijk". We gebruiken in deze tekst onze eigen definities. In de brondocumenten worden andere definities gebruikt. Aan ons is bevestigd dat het in de factsheet van Monet gaat om 1.500 *antenne-installaties*. In [81] wordt het getal nogmaals genoemd en tevens vertaald naar "4.500 antennes" – precies het drievoudige van het aantal antenne-installaties. Dit getal verwijst naar een geschat aantal *sectoren* (in Nederland vaak drie per installatie). De gedachte hierachter lijkt te zijn geweest dat daarmee het aantal 'antennes' werd gegeven: per sector is immers vaak (ten minste) één 'grijze balk' gemonteerd op een antennepaal. Deze aanname is echter niet geheel juist en verandert onder andere door de komst van

actieve antennesystemen, small cells en sectorisering. In dit rapport hanteren we (onder meer omdat het lastig is om tot een eenduidige definitie voor 'antenne' te komen) nergens het begrip 'antenne' maar alleen 'opstelpunt', 'sector' of 'installatie'.

³⁷ Door Monet berekend als 10% van ongeveer 15.000 antenne-installaties in totaal, wat overeenkomt met wat het Antenneregister rapporteert (15.744 in januari 2021). [82]

³⁸ Analyse Dialogic. Het aantal antenne-installaties is vermenigvuldigd met een berekende verhouding tussen antenne-installaties en antenne-opstelpunten. (zie Bijlage 1 voor nadere toelichting).

genoemde periode wordt voorzien en dus geen deel is van het genoemde aantal.

In [1] geven de operators aan de komende vijf jaar geen grootschalige uitrol van small cellstructuren te verwachten. Wel wordt inzet van small cells verwacht op *'drukke publieke gebieden [...] zoals centrale stations, drukke winkelcentra en (voetbal)stadions'*. Dit is in lijn met onze conclusies.

Arcadis

Uit analyse van Arcadis volgt dat voor 5G in stedelijke omgeving iedere 200 meter een small cellopstelpunt nodig is. [51] Het cijfer van Arcadis is lastig te plaatsen: zo is niet duidelijk welk spectrum wordt meegenomen en hoe er is gerekend. Een belangrijke drijfveer die hierbij wordt genoemd is de toepassing van 5G voor slimme mobiliteit. Dat zou betekenen dat de infrastructuur vooral nodig is rond wegen (en dus enerzijds niet uitsluitend in stedelijk gebied, en anderzijds niet in het *volledige* stedelijke gebied even sterk).

Het is echter nog maar de vraag welk en hoeveel verkeer slimme mobiliteit oplevert voor openbare 5G-netwerken. Voertuig-voertuigcommunicatie hoeft immers niet via een netwerk te verlopen, maar kan rechtstreeks plaatsvinden, bijvoorbeeld via de ITS-frequentieband. Communicatie tussen voertuig en wegwagent zou wel via mobiele netwerken kunnen verlopen, maar de vraag is om wat voor verkeer het daarbij gaat. Te denken valt aan het downloaden van kaartmateriaal (al is de vraag of dat doorlopend en tijdens het rijden moet of dat het ook vooraf kan) en bijvoorbeeld entertainment voor de passagiers (en dan voor zover dit niet al is meegerekend onder de reguliere vraaggroei). Toepassingen als het op afstand monitoren van de voertuigen zullen ook een rol spelen, maar we zien niet direct aan mobiliteit gerelateerde toepassingen die grote hoeveelheden bandbreedte tussen voertuig en wegwagent zullen vragen.

De dichtheid die Arcadis noemt (200 meter) ligt in de buurt van het door ons gevonden aantal voor de dichtheid van een hoogwaardige, grootschalige small cellinfrastructuur. Daarbij dient echter wel de kanttekening te worden geplaatst dat het gaat om een volledige uitrol (dus ook op de plekken waar het macronetwerk voldoende capaciteit biedt) en dat het in ons geval een maximum betreft. Het is daarnaast maar net de vraag wanneer en wáár de grootschalige small cellstructuren (en dus hoge dichtheden) nodig en (voor de operator) kosteneffectief zullen zijn. Een

tweede kanttekening is dat onze inschatting van de dichtheid bij small cellstructuren is berekend voor één operator. Hoewel dat voor drie operators zou kunnen leiden tot driemaal zoveel opstelpunten, gaat het dan om een zodanige hoeveelheid opstelpunten dat er een zeer sterke prikkel ontstaat voor operators om infrastructuur te delen. Bij dergelijke small cells is site sharing, zoals dat we dat in Nederland zien bij macro-opstelpunten, veel lastiger (vanwege de kleine locaties) en is RAN-sharing nodig om een small cellopstelpunt te kunnen delen. Wij verwachten kortom dat de hoge dichtheden van small cellinstallaties die Arcadis voorziet, als het in een specifiek gebied al komt tot uitrol van grootschalige small cellstructuren, slechts op een paar specifieke plekken zal worden gehaald.

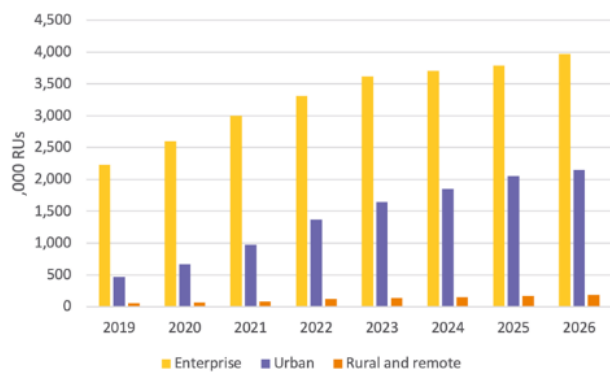
Stratix

Stratix komt in [52] tot de conclusie dat er 21.000 small cell-antennes nodig zouden zijn om overall 100 Mbit/s te kunnen bieden in stedelijke gebieden. Merk op dat de doelstelling van 100 Mbit/s fors hoger ligt dan de snelheidseisen zoals geformuleerd voor de 700 MHz-vergunning en lijkt ook in vergelijking met onze vraaganalyse aan de hoge kant.

In het aantal van Stratix is de beschikbaarheid van de 3,5 GHz-band nog niet meegenomen; de aantallen zullen volgens Stratix met die band "aanzienlijk lager liggen". Zoals uit onze analyse volgt betekent de ingebruikname van de 3,5 GHz-band inderdaad een uitstel van verdere verdichting van minimaal enkele jaren (afhankelijk van de locatie zelfs langer).

Small Cell Forum

Het Small Cell Forum (SCF) voorspelt voor de periode 2019 – 2026 wereldwijd een jaarlijkse groei van 24% van het aantal small cells in stedelijke omgeving. Daarbij moet worden aangetekend dat de groei in met name Azië en Noord-Amerika speelt en dat Europa (en daarmee Nederland) onder het wereldwijde gemiddelde zal liggen. Als bepalende (onzekere) factoren noemt SCF de (on)volwassenheid van 5G-platforms en -businessmodellen, de impact van het coronavirus en daaruit volgende recessie en onzekerheid rondom noodzakelijke AI- en cloudtechnologie.



Figuur 22 Voorspelling van de groei van het aantal small cells wereldwijd door SCF [53, pp. 6, Figure 1]

4 Impact van nieuwe antenne-opstelpunten

In het voorgaande hoofdstuk geven we een prognose van het aantal te verwachten nieuwe antenne-opstelpunten van 2021 tot en met 2026 en wáár we deze met name verwachten. In dit hoofdstuk werken we uit om wat voor opstelpunten het gaat. We kijken daarbij ook voorbij de gemodelleerde periode, en geven kwalitatief aan hoe de uitrol van antenne-opstelpunten er na dat moment (na 2026 in het meest aannemelijke scenario, en na 2024 in het versnelde groeiscenario) uit zal komen te zien.

4.1 2021 t/m 2026: nieuwe macro-antenne-opstelpunten

In het voorgaande hoofdstuk geven we een prognose van het aantal te verwachten nieuwe antenne-opstelpunten tussen 2021 en 2027. Het gaat hierbij met name om antenne-opstelpunten ten behoeve van antenne-installaties die deel uitmaken van het 'macronetwerk' van de operators. Het macronetwerk is de regelmatige, landelijke structuur van antenne-installaties die samen de basis vormen van een mobiel netwerk.

4.1.1 Plaatsing

Macro-opstelpunten voor mobiele netwerken worden sinds enkele decennia geplaatst in Nederland. We verwachten dat in de komende jaren en ook in de periode na 2026 de wijze van plaatsing van macro-opstelpunten niet substantieel zal afwijken van hoe dit tot nu toe verloopt.

We verwachten voor de komende jaren dat met name de eenvoudigere vakwerkmasten, palen en dakopstellingen relevant zullen zijn. Opstelpunten op omroepstorens en hoogspanningsmasten worden op dit moment grotendeels al ingezet. Hoewel we deze in het voorgaande hoofdstuk niet benoemen verwachten we dat de inzet van tijdelijke opstelpunten ook nog aan de orde zal zijn (bijvoorbeeld bij evenementen).

Vakwerkmasten

Een vakwerkmast is een metalen constructie van tussen de 10 en 40 meter hoog. Op een vakwerkmast is meestal voldoende ruimte voor antenne-installaties van drie of vier operators. Aan de mast zijn bovenaan de antennes bevestigd - vaak 'grijze latten' (antennepanelen met daarbinnen de antennes). Ook zien we bovenin vaak apparatuur ('schoteltjes' of kleine richtantennes) voor straalverbindingen ('microwave links') en RAN-apparatuur (o.a. Remote Radio Unit - RRU's). Soms wordt een vakwerkmast ook voor andere toepassingen gebruikt, zoals digitale televisie (DVB-T) of radio (DAB+). De (resterende) benodigde apparatuur wordt onderaan de mast geplaatst, in een apparatuurkast en/of een 'huisje'. Figuur 23 toont een voorbeeld van een vakwerkmast zoals die aangetroffen kan worden aan de rand van een middelgroot dorp.

Vakwerkmasten zijn relatief hoog en bieden relatief veel ruimte voor antennes. Ze zijn daarom bij uitstek geschikt voor het realiseren van dekking en capaciteit in dunner bevolkte gebieden. Daarnaast kan een dorp efficiënt worden afgedekt met een centraal geplaatste vakwerkmast. We vinden vakwerkmasten ook terug langs snelwegen.

Palen

Een paal ('monopole') is een smalle mast, gemaakt van metaal en vaak niet hoger dan een meter of 20. Het maximumgewicht dat een paal kan dragen is lager dan een vakwerkmast. Omdat een paal smaller is, is deze echter visueel minder opvallend. Net als bij de vakwerkmast zijn onderaan de paal vaak kasten te vinden met apparatuur.³⁹ Figuur 24 toont een voorbeeld van een paal, in dit geval geplaatst aan de rand van een stad.

Palen zijn, vanwege de hoogte, vooral geschikt voor plaatsing aan de rand van een stad, dorp, cluster huizen, kleine kern, ruraal gebied, of bijvoorbeeld langs een snelweg. Het delen van een paal door meerdere operators is mogelijk, mits de draagconstructie hiertoe in staat is.

WAS-palen

Voor het landelijke systeem van sirenepalen ('waarschuwing- en alarmeringssysteem' - WAS) wordt

geplaatst (als vierkante 'kastjes' of geïntegreerd in een iets dikkere antennebehuizing).

³⁹ Apparatuur ten behoeve van de stroomvoorziening, en indien nodig een *base-band unit* (BBU). De *remote radio units* (RRU) worden tegenwoordig vaak bij de antenne

gebruik gemaakt van een groot aantal palen op locaties die in potentie goed gebruikt zouden kunnen worden voor het plaatsen van opstelpunten (specifiek in het kader van de dekkingverplichting). Figuur 25 toont een voorbeeld van een 'WAS-paal'. Naar verwachting worden deze sirenes binnen enkele jaren uitgefaseerd. [54] Daar waar beschikbaar, is ombouw van een bestaande WAS-paal tot opstelpunt een optie (naar schatting is dit voor 15-20 gevonden locaties in onze analyse realistisch). Wanneer meer van dergelijke bestaande locaties beschikbaar komen voor mobiele operators, daalt het aantal benodigde nieuwe antenne-opstelpunten in de praktijk enigszins.

Dakopstellingen

Voor bebouwde omgevingen zijn dakopstellingen in de komende jaren de meest relevante als het gaat om het realiseren van nieuwe opstelpunten. Door antennes op daken te plaatsen kan het netwerk sterk worden verdicht op locaties waar het plaatsen van masten en palen niet mogelijk of wenselijk is. Vaak worden hogere gebouwen ingezet (zie Figuur 26 en Figuur 28); in de binnenstad kunnen daken op een vierde verdieping al interessant zijn.

We verwachten dat bestaande dakopstellingen de komende jaren verder geoptimaliseerd gaan worden op dekking en capaciteit. Zo zullen antennes dichter tegen de rand worden geplaatst, om zoveel mogelijk een 'line of sight' te creëren richting gebruikers. Een voorbeeld van zo'n aan de rand geplaatste dakinstallatie betreft die op het Hotel Krasnapolsky aan de Dam in Amsterdam (Figuur 26). Middels een dergelijke antenne (in de toekomst in combinatie met Massive MIMO) is veel capaciteit te realiseren voor gebruikers op bijvoorbeeld een aanliggend plein.



Figuur 23 Een vakwerkmast aan de rand van in Rosmalen (Empelseweg) (foto: Google)



Figuur 24 Een paal aan de rand van Utrecht (Voorveldselaan). (foto: Google)



Figuur 25 Een 'WAS-paal' (foto: T. Houdijk [wikimedia.org])



Figuur 26 Macro-antenne op de dakrand van het Grand Hotel Krasnapolsky op de Dam, Amsterdam (bron: Google)

4.2 Vanaf 2027: een beperkt aantal nieuwe macro-antenne-opstelpunten

We verwachten dat ook na 2026 nieuwe antenne-opstelpunten nodig zullen zijn ten behoeve van de macronetwerken van de operators. Omdat er veel onzekerheid is rondom de ontwikkeling van de vraaggroei is niet te zeggen in hoeverre dit gedreven zal zijn door vraaggroei. Wel verwachten we dat netwerkverbeteringen voortdurend aan de orde blijven.

Het is daarbij denkbaar dat deze netwerkverbeteringen zich in toenemende mate zullen richten op indoordekking. Er blijven, na de inspanningen die tot en met 2026 worden gedaan, immers steeds minder slecht gedekte gebieden over. Ook outdoor kunnen we ons echter redenen voorstellen waarom de operators desondanks nieuwe opstelpunten willen plaatsen. Denk bijvoorbeeld aan toepassingen die binnen een beperkt gebied veel uplinkverkeer nodig hebben. Voor de periode tot en met 2026 achten we het aannemelijk dat uplinkcapaciteit geen beperking vormt, maar naarmate de vraag groeit zou dit op enig moment daarna aan de orde kunnen komen.

4.3 Vanaf 2021: her en der invulling van 'hotspots' met losstaande small cellinstallaties

Op drukke locaties ('hotspots') maken operators in toenemende mate gebruik van small celloplösungen. Hierbij wordt in een gebied van beperkte omvang aanvullende capaciteit (en/of dekking) gerealiseerd, waarmee het macronetwerk wordt ontlast. De ontstane *small cell* is geen onderdeel van de regelmatige cellenstructuur van het macronetwerk, maar vult deze aan. Wanneer meerdere small cells samen een groter gebied bedekken en een regelmatige structuur vormen spreken we van *grootschalige small cellstructuren* (zie verderop).

Small cells zijn technisch gezien op verschillende manieren te realiseren. Inpandig kan bijvoorbeeld een antennesysteem (DAS) worden gebruikt. Buitenpandig kan het gaan om een extra, specifiek gerichte sector vanaf of gekoppeld aan een bestaand macro-opstelpunt ("remote sector") of om losstaande small cellinstallaties. Losstaande small cellinstallaties zijn een stuk kleiner dan macro-antenneinstallaties, werken met lagere vermogens, en ondersteunen vaak een beperktere hoeveelheid spectrum en aantal banden en technologieën.⁴⁰ Bij buitenpandige plaatsing van losstaande small cellinstallaties is de recente Europese richtlijn rondom small cellinstallaties relevant (zie verderop).

Small cells komen op dit moment voornamelijk voor in de Randstad.⁴¹ Ze worden met name ingezet op (semi-)inpandige locaties, zoals stations, stadions, vliegvelden (zoals Schiphol), evenementenlocaties (o.a. Jaarbeurs Utrecht), grotere kantoorgebouwen en tunnels (zoals de Westerscheldetunnel).

Operationele uitdagingen van losstaande small cellinstallaties

Losstaande small cellinstallaties zijn in uitrol en operationeel complexer voor de operators dan macro-antenneinstallaties. Het vinden van geschikte locaties (die, bij grootschalige uitrol, ook nog in een regelmatige structuur moeten passen), het realiseren van stroomvoorziening en de verbinding naar het netwerk zijn in de stedelijke omgevingen niet eenvoudig. Wanneer small cellinstallaties worden bevestigd aan straatmeubilair speelt daarnaast dat straatmeubilair regelmatig wordt verplaatst of vernield.

Van de nieuwe (vraaggedreven) antenne-opstelpunten die we de komende jaren verwachten zal een steeds groter deel worden gerealiseerd op basis van small celloplösungen. We verwachten dit met name op de hierboven genoemde soorten locaties (ook buiten de Randstad). Buitenpandig verwachten we

putdeksels. Merk op dat met name bij inzet van hogere frequentiebanden (onder andere de 26 GHz) de small celloplösungen mogelijk nog kleiner kan worden gemaakt bij dezelfde hoeveelheid geleverde capaciteit.

⁴¹ Analyse Dialogic op basis van het Antenneregister, waarbij is gekeken naar antenne-installaties op minder dan 10 meter hoog en met een vermogen kleiner dan 10 dBW.

⁴⁰ Een inventarisatie van de technische aspecten van losstaande small cellinstallaties wordt gegeven in [48]. De afmetingen van een gemiddelde inpandige small cell antenne-installatie lag destijds (2019) op 20x20x5 centimeter, en voor outdoor-antenne-installaties op 35x35x10 centimeter. Daarmee zijn small cellinstallaties iets groter dan een gemiddelde Wi-Fi-router voor consumenten. Ook werden varianten van installaties getoond die zijn verwerkt in lantaarnpalen en

toenemende inzet van losstaande small cells, bijvoorbeeld bij drukke pleinen, winkelstraten en parken, in de gebieden waar wij in het vorige hoofdstuk vraaggedreven opstelpunten verwachten. Operators zullen losstaande small cellinstallaties, vanwege de operationele uitdagingen en kosten, echter alleen uitrollen als er geen andere kosteneffectieve manier is om de benodigde capaciteit vanaf een bestaand macro-opstelpunt te realiseren. In lijn hiermee geven de operators aan op dit moment geen concrete plannen te hebben voor het indienen van verzoeken tot medegebruik van publieke infrastructuur ten behoeve van het plaatsen van small cellinstallaties in 2021.

4.4 Na 2026: grootschalige small cellstructuren denkbaar

Een grootschalige small cellstructuur is een gestructureerd geheel van small cells dat uitgerold is om een groter gebied te voorzien van (hoge) capaciteit. Denk hierbij bijvoorbeeld aan een stadscentrum, een groter park, of een hele wijk. Dit in tegenstelling tot de eerder besproken *losstaande* small cellinstallaties, die juist gericht zijn op specifieke kleinere gebieden ('hotspots').

Wanneer wordt uitrol van grootschalige small cellstructuren interessant?

In §2.4.1 hebben we toegelicht waarom een operator voor invullen van capaciteitsvraag altijd eerst het macronetwerk zal verbeteren of uitbreiden, daarna small cellhotspots zal inzetten, en pas daarna uitrol van grootschalige small cellstructuren zal overwegen. De primaire reden hiervoor zijn de kosten en complexiteit van grootschalige small cellstructuren.

Op het moment dat het macronetwerk niet verder kan worden verdicht en er in een groter gebied capaciteitsvraag speelt, ontstaat een kantelpunt waarop uitrol van grootschalige small cellstructuren interessant wordt. Waar dit kantelpunt exact ligt is lastig te zeggen: het is in ieder geval afhankelijk van de kosten van de apparatuur, uitrol en operatie, de mogelijkheden die er zijn voor plaatsing, en de gevraagde capaciteit. Daarnaast speelt RAN-sharing een belangrijke rol; daarmee zou immers ook een groot deel van de kosten kunnen worden gedeeld tussen operators.

Grootschalige small cellstructuren maakten de afgelopen jaren in een aantal specifieke gebieden

een snelle ontwikkeling door. In drukbevolkte steden als New York en Houston (VS) zien we grootschalige uitrol met tussen de 5,000 en 10,000 cellen. [55] Ook in veel grote Aziatische steden (Jakarta, Seoul, Tokyo, Singapore) zijn small cellstructuren uitgerold. Deze steden kennen echter een zodanig hoge gebruikersdichtheid dat deze niet direct vergelijkbaar zijn met de Nederlandse situatie.

Onderzoek naar grootschalige small cellstructuren in Helsinki wijst uit dat deze daar vanaf 2025 aan de orde kunnen zijn, omdat de macronetwerken dan tegen hun grenzen aanlopen. De kosten zijn dan echter nog fors. Tussen 2027 en 2029 ontstaat een kantelpunt waarbij uitrol door een *neutral host* voordeliger wordt. Merk op dat men hierbij uitgaat van een "medium to high" groeiscenario, waarbij vooral nieuwe apparaten worden voorzien die de vraaggroei drijven. Daarnaast is de dichtheid van gebruikers in Helsinki lager dan in Nederlandse steden en het (voorspelde) dataverbruik per abonnee fors hoger dan zelfs ons "versnelde groeiscenario". [56] We komen dan ook tot de conclusie dat voor Nederland uitrol van grootschalige small cellstructuren vóór 2027 zeer onwaarschijnlijk is en ook daarna alleen in specifieke gebieden aan de orde zal zijn.

4.4.1 Plaatsing

De Nederlandse operators experimenteerden in het verleden met grootschalige small cellstructuren. Zo plaatste een van de operators rond 2015 in Amsterdam 160 small cellinstallaties aan (voornamelijk) bushokjes. [57] Figuur 27 toont een voorbeeld hiervan. Doel van deze small cells is (in tegenstelling tot de eerder besproken 'hotspots') niet om alleen het verkeer rond de bushokjes af te wikkelen, maar om in een groter gebied dekking en capaciteit te realiseren. Het is niet bekend of en hoe de geïnstalleerde small cellinstallaties op dit moment worden ingezet.



Figuur 27 Small cell antenne-installatie in een tramhalte [57]

Uit deze projecten (en vergelijkbare projecten in het buitenland) kwam voor de operators een aantal leerpunten naar boven. Zo is straatmeubilair onderhevig aan allerlei invloeden (vandalisme, verplaatsing) wat beheersmatig een andere aanpak vergt dan het (statische) macronetwerk. Daarnaast is het inpassen van small cells in het macronetwerk radiotechnisch een uitdaging.

Toekomstige grootschalige small cellnetwerken

Een operator zal naar een optimum zoeken tussen de plaatsingsmogelijkheden en de bruikbaarheid van de radioverbinding: men wil zo veel mogelijk een zichtlijn naar gebruikers. Dat betekent bijvoorbeeld onder het bladerdek (en dus relatief laag) blijven. Maar tegelijkertijd wil men ook over langsrijdende auto's kunnen stralen, en beschermd zijn tegen vandalisme (hetgeen juist vraagt een hogere plaatsing). De hoogte van een 'klassieke' lantaarnpaal, oftewel vier tot zes meter of zelfs acht meter, lijkt ideaal.

Voor de plaatsing van nieuwe small cells binnen een grootschalige structuur ligt (bestaand) straatmeubilair in de toekomst waarschijnlijk nog steeds het meest voor de hand. Denk hierbij aan lantaarnpalen, verkeerslichten, bushokjes en reclamezuilen. Small cellinstallaties kunnen ook worden geplaatst op of aan gevels van gebouwen. Vooruitlopend op deze uitrol (en gelet op huidige uitrol van small cellstructuren in onder andere Azië) is in Europa een richtlijn van kracht geworden die de uitrol van small cells moet vergemakkelijken, waarbij tegelijkertijd de negatieve gevolgen worden ingeperkt.

Europese richtlijn rondom small cells

De Europese richtlijn 2020/1070 [58], bepaalt dat small cells vergunningvrij mogen worden geplaatst, mits (uitzonderingssituaties daargelaten) deze "volledig en veilig geïntegreerd [worden] in hun draagconstructie en [...] onzichtbaar [zijn] voor het publiek" (artikel 3b), of (wanneer dit niet zo is) aan de volgende eisen wordt voldaan (artikel 3b en annex A van de richtlijn):

1. Het totale volume van het voor het grote publiek zichtbare deel van een [small cell] voor gebruik door een of meer radiospectrumgebruikers bedraagt maximaal 30 liter.
2. Het totale volume van de voor het grote publiek zichtbare delen van meerdere afzonderlijke [small cells] die een infrastructuurlocatie met een afzonderlijk begrensd oppervlak delen, zoals een lantaarnpaal, een verkeerslicht, een reclamebord of een bushalte, bedraagt maximaal 30 liter.
3. Indien het antennesysteem en andere onderdelen van [de small cell] [...] afzonderlijk worden geïnstalleerd, wordt elk gedeelte daarvan dat het maximale volume van 30 liter overschrijdt, aan het zicht van het grote publiek onttrokken.
4. [De small cell] is visueel consistent met de draagconstructie, heeft een omvang die in verhouding staat tot de totale omvang van de draagconstructie, een coherente vorm, neutrale kleuren die passen bij of overgaan in de draagconstructie, en verborgen kabels, en is visueel niet storend in combinatie met andere draadloze toegangspunten met klein bereik die al zijn geïnstalleerd op dezelfde locatie of op aangrenzende locaties.
5. Het gewicht en de vorm van [een small cell] vereisen geen structurele versterking van de draagconstructie.
6. Een [small cell] van installatieklasse E10 wordt alleen geïmplementeerd in de buitenruimte of in grote binnenruimten met een minimale plafondhoogte van vier meter.

Hoe pakt deze plaatsing uit in de Nederlandse situatie? Uit onze modellering⁴² blijkt dat op basis van (voornamelijk) lantaarnpalen ook in Nederlandse binnensteden en wijken een dekkende, gelijkmatige 'grid' van small cells kan worden gerealiseerd. In delen van een centrum met kleine, bochtige straten vraagt het realiseren van volledige dekking met een grootschalige small cellstructuur meer small cellinstallaties dan in meer open omgevingen met brede straten en bijvoorbeeld grachten. De dichtheid van een dergelijke grootschalige small cellstructuur in Nederland varieert, maar ligt in ieder geval ver onder "iedere lantaarnpaal één" en waarschijnlijk op of iets hoger dan "ieder bushokje één".

4.4.2 Locaties

In tegenstelling tot de huidige macronetwerken zullen grootschalige small cellnetwerken niet landelijk worden uitgerold, maar in beperkte gebieden. Hierbij valt te denken aan (in eerste instantie) een aantal straten tot een aantal wijken of stadsdelen. Het is daarom niet alleen lastig, maar ook niet zo interessant om een totaal aantal small cell-opstelpunten uit te rekenen: niet alle gemeenten zullen er (tussen nu en 2030) mee te maken krijgen.

In het voorgaande hoofdstuk tonen we op basis van modellering waar we nieuwe opstelpunten verwachten als gevolg van capaciteitstekorten. Bij gelijke verdeling van de vraag kan worden aangenomen dat grootschalige uitrol van small cellstructuren ook in deze gebieden als eerst zal plaatsvinden. De gebieden waar de vraag relatief het hoogst is (bovenste percentiel, in 2024 in het versnelde groeiscenario) dan gaat het met name om binnensteden in de Randstad.

4.5 Conclusie

Nieuwe antenne-opstelpunten die tussen 2021 en 2027 worden geplaatst, zullen vooral hetzelfde soort macro-antenne-opstelpunten zijn zoals tot nu toe werden geplaatst. Het gaat voornamelijk om masten, palen en daken. Net als nu het geval is kunnen deze opstelpunten vaak door meerdere operators worden gedeeld.

Vanaf 2027 verwachten we jaarlijks een beperkt aantal nieuwe macro-antenne-opstelpunten, al is niet precies te zeggen hoeveel.

Voor de komende jaren verwachten we dat operators small cells zullen inzetten op drukke locaties ('hot-spots'). Dat werd tot nu toe al gedaan op (semi-)in pandige locaties zoals stations, voornamelijk in de Randstad. We verwachten dit de komende jaren ook vaker buitenpandig en ook in steden buiten de Randstad. Operators kunnen dit realiseren middels extra sectoren op bestaande macro-opstelpunten en met losstaande small cellinstallaties (conform de Europese richtlijn hiervoor). Operators zullen losstaande small cellinstallaties, vanwege de operationele uitdagingen en kosten, echter alleen uitrollen als er geen andere kosteneffectieve manier is om de benodigde capaciteit vanaf een bestaand macro-opstelpunt te realiseren.

Grootschalige small cellstructuren tot slot zullen alleen worden uitgerold door de operators wanneer er geen andere manier meer is om de nodige capaciteit te realiseren op basis van macro-opstelpunten en small cells op hotspots. Als er al uitrol plaatsvindt zal dit voor een gebied ter grootte van een stadscentrum of wijk tegelijk zijn. In Nederland zouden de binnensteden in de Randstad als eerste in aanmerking komen. Op basis van (voornamelijk) lantaarnpalen is het in de Nederlandse situatie technisch mogelijk een goed dekkende grootschalige small cellstructuur te realiseren. Het benodigde aantal small cellinstallaties in een Nederlandse stad ligt in ieder geval ver onder "één per lantaarnpaal", en naar verwachting eerder op of iets hoger dan "op ieder bushokje één". Zoals in het voorgaande hoofdstuk al werd aangegeven voorzien we tot en met 2026 geen uitrol van grootschalige small cellstructuren.

⁴² Zie Bijlage 1. Voor een Nederlandse binnenstad is onderzocht hoe uitrol van een dekkende grootschalige small cellstructuur eruit zou kunnen zien op basis van reeds aanwezig straatmeubilair.

5 Conclusie

Wat is de verwachte ontwikkeling van het aantal antenne-opstelpunten in Nederland in de komende zes jaar, ten behoeve van openbare, grootschalige mobiele communicatienetwerken?

Tabel 6 toont een overzicht van de verwachte aantallen nieuwe antenne-opstelpunten in de twee scenario's, naar drijfveer.

In de jaren 2021 t/m 2026 verwachten we dat er tussen de 296 en 726 nieuwe antenne-opstelpunten voor openbare mobiele netwerken geplaatst zullen worden in Nederland. Hierbij spelen drie drijfveren:

- **Verplichtingen uit de 700 MHz-vergunningen.** Er zijn tussen de 100 en 150 nieuwe antenne-opstelpunten nodig om de dekking en snelheid te kunnen realiseren die in de recent uitgegeven vergunningen wordt verplicht. Deze opstelpunten komen met name buiten de steden.
- **Doorlopende netwerkverbeteringen.** Deze leiden jaarlijks tot tussen de 30 en 90 nieuwe opstelpunten, verspreid door het land, bijvoorbeeld bij nieuwe woonwijken.
- **Capaciteitstekorten door vraaggroei.** Hoewel de vraag naar mobiele data toeneemt, kan deze grotendeels met nieuw spectrum en technologische verbeteringen worden ingevuld *zonder* nieuwe opstelpunten te hoeven plaatsen. De vraaggroei leidt naar verwachting dan ook tot een beperkt aantal nieuwe opstelpunten, geconcentreerd in de grotere steden.

Nieuwe antenne-opstelpunten die tussen 2021 en 2027 worden geplaatst, zullen vooral hetzelfde soort macro-antenne-opstelpunten zijn zoals tot nu toe werden ingezet.

In een versneld groeiscenario zijn er eerder meer antenne-opstelpunten nodig als gevolg van capaciteitstekorten door vraaggroei. Het gaat om maximaal 45 extra nieuwe opstelpunten als

gevolg van vraaggroei tot en met 2024, ten opzichte van het meest aannemelijke scenario.

Tabel 6 Het benodigde aantal nieuwe opstelpunten in de periode 2021 t/m 2026 binnen het meest waarschijnlijke scenario (bron: modellering Dialogic; zie Bijlage 1)

Drijfveer voor nieuwe antenne-opstelpunten	Verwacht aantal nieuwe antenne-opstelpunten	
	Meest aannemelijke scenario 35% vraaggroei t/m 2026	Versneld groei-scenario 60% vraaggroei t/m 2024 ⁴³
Verplichtingen 700 MHz-vergunningen	100 - 150 in 2021-2022	100 - 150 in 2021-2022
Doorlopende netwerkverbeteringen	180 - 540 t/m 2026 (30 - 90 per jaar)	120 - 360 t/m 2024 (30 - 90 per jaar)
Capaciteitstekort als gevolg van vraaggroei	16 - 36 t/m 2026	35 - 61 t/m 2024
Totaal nieuw (t.o.v. 2021)		
t/m 2024	232 - 526 <i>Geen grootschalige small cellstructuren</i>	255 - 571 <i>Geen grootschalige small cellstructuren</i>
t/m 2026	296 - 726 <i>Geen grootschalige small cellstructuren</i>	<i>Onzeker, we verwachten relatief meer losstaande small cells bij hotspots</i>

vanaf 2027 *Bij voortdurende vraaggroei: voortzetting trend aantal opstelpunten, met relatief meer small cellhotspots en minder macrosites. In grotere binnensteden kan uitrol van grootschalige small cellstructuren aan de orde komen zodra (1) het macro-netwerk niet verder uit te breiden is en (2) de kosten voor small cells substantieel zijn gedaald.*

Het is wat ons betreft niet mogelijk om met zekerheid voorspellingen te doen over aantallen ná 2024 in een versneld groeiscenario. Het karakter van de

⁴³ Het versneld groeiscenario is berekend tot en met 2024. Daarna overstijgt het totale volume het volume dat in 2026 wordt gehaald in het meest aannemelijke scenario, en wordt verdere voorspelling te onzeker.

onderliggende “killer use case” is namelijk sterk bepalend voor de manier waarop de vraag zal moeten worden ingevuld. We verwachten niet dat versnelde vraaggroei het kantelpunt voor grootschalige small cellstructuren vervroegt. Waarschijnlijker is dat de vraag eerst zal worden ingevuld op basis van aanvullende small cell hotspots op specifieke locaties (afhankelijk van de betreffende use case).

Naast de uitrol van macro-antenne-opstelpunten verwachten we dat tussen 2021 en 2027 ook losstaande small cellinstallaties zullen worden uitgerold. Deze zullen we terugzien op dezelfde soorten (semi-inpandige) locaties als waar ze nu te vinden zijn: stations, stadions, evenementenlocaties en luchthavens zijn voorbeelden. Waar deze nu vooral in de Randstad worden ingezet zou dit de komende jaren ook in steden daarbuiten kunnen zijn. We verwachten daarnaast in toenemende mate losstaande small cellinstallaties bij drukke locaties in de buitenlucht, zoals pleinen, winkelstraten en parken.

Vanaf 2027 verwachten we jaarlijks een beperkt aantal nieuwe macro-antenne-opstelpunten. Vanwege de onzekerheden die spelen is niet precies te zeggen hoeveel dit er zullen zijn.

Op basis van de huidige inzichten verwachten we geen uitrol van grootschalige small cellstructuren voor 2027 in het meest aannemelijke scenario. In het versneld groeiscenario voorzien we dit niet vóór 2025. Grootschalige small cellstructuren tot slot zullen alleen worden uitgerold door de operators wanneer er geen andere manier meer is om de nodige capaciteit te realiseren op basis van macro-opstelpunten en losstaande small cellinstallaties bij hotspots. De kosten en praktische nadelen van grootschalige small cellstructuren maken inzet ervan alleen interessant wanneer vraaggroei niet meer structureel kan worden opgevangen door de capaciteit van het macronetwerk te vergroten.

Als uitrol van grootschalige small cellstructuren al plaatsvindt zal dit als eerste aan de orde zijn in de centra van grotere steden in de Randstad. Dit zal dan per gebied ter grootte van een stadscentrum of wijk gebeuren. In Nederland zouden de binnensteden in de Randstad als eerste in aanmerking komen. Op basis van (voornamelijk) lantaarnpalen is het in de Nederlandse situatie technisch mogelijk een goed dekkende small cellstructuur te realiseren. Het benodigde aantal small cellinstallaties in een Nederlandse stad ligt daarbij in ieder geval ver onder

“*één per lantaarnpaal*”, en naar verwachting eerder op of iets hoger dan “*op ieder bushokje één*”.

Aanbevelingen

We adviseren gemeenten en het ministerie van Economische Zaken om de groei van de vraag naar mobiele data en de uitrol van antenne-opstelpunten door operators te monitoren. Een logisch moment hiervoor is wat ons betreft het najaar van 2023, een jaar na de ingebruikname van de 3,5 GHz-frequenties en halverwege de gemodelleerde periode. Afhankelijk van de uitkomsten op dat moment kan worden besloten om het model bij te stellen en/of nader te kijken naar de noodzaak, kosten en impact van grootschalige small cellstructuren.

Bijlage 1. Methode

In deze bijlage beschrijven we de belangrijkste kenmerken van de kwantitatieve modelleringsmethode.

Definities

In dit onderzoek hanteren we de volgende definities.

(Antenne-)opstelpunt

Een antenne-opstelpunt is een bouwwerk waarop of waaraan één of meerdere antenne-installaties zijn geplaatst. Dit is wat we in dit onderzoek primair tellen. Voorbeelden zijn (vakwerk)masten, daken en gevels van gebouwen.

Wanneer meerdere operators van één antenne-opstelpunt gebruik maken zijn er dus meerdere antenne-installaties aanwezig op dit opstelpunt. Het antenne-opstelpunt wordt dan *gedeeld*. Vanuit perspectief van de operator betreft het een *shared site* en is de eigen antenne-installatie *colocated* met die van een andere operator op hetzelfde opstelpunt.

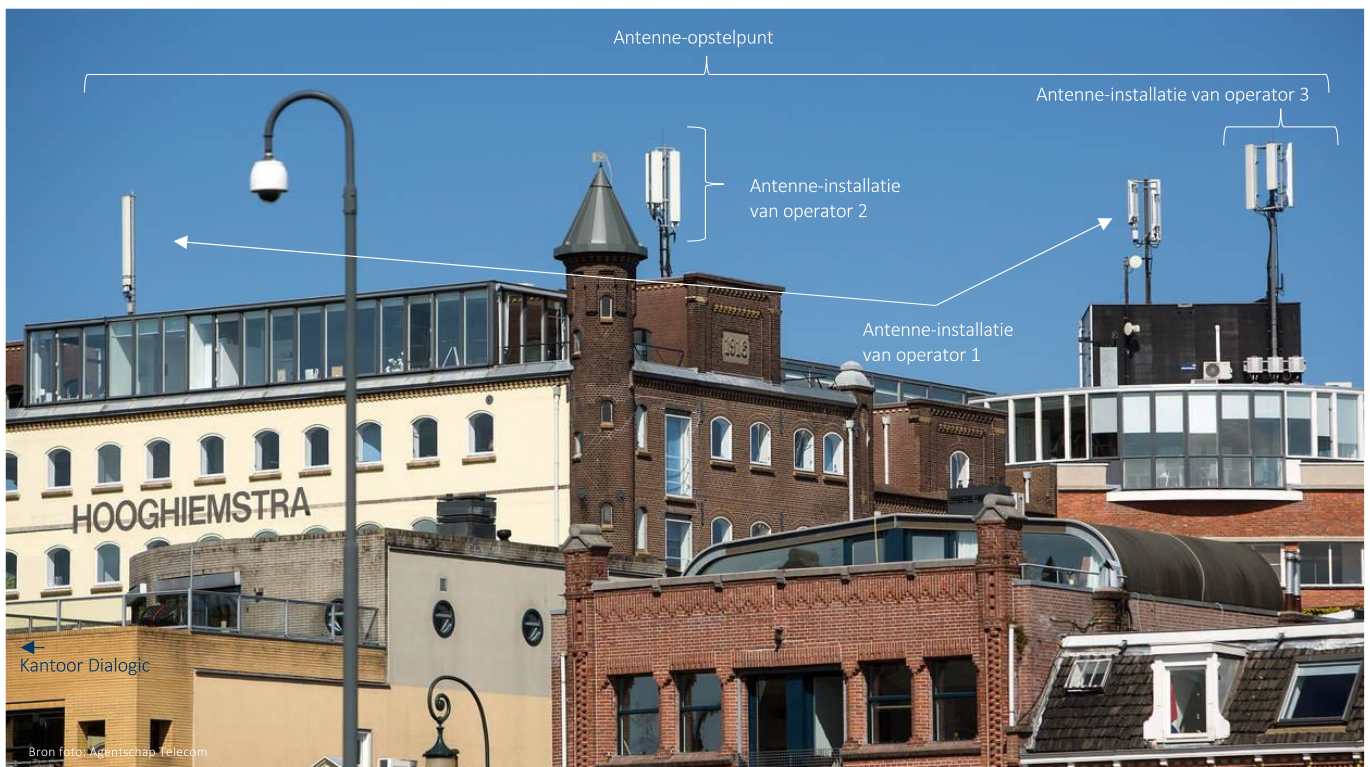
Antenne-installatie

Een antenne-installatie is de basiseenheid voor een operator in de dimensionering van een mobiel netwerk (ook wel *site* genoemd). Het begrip wordt ook door het Antenneregister gebruikt om aantallen antennes te rapporteren. We volgen de definitie van het Besluit Omgevingsrecht voor "antenne-installatie": [59]

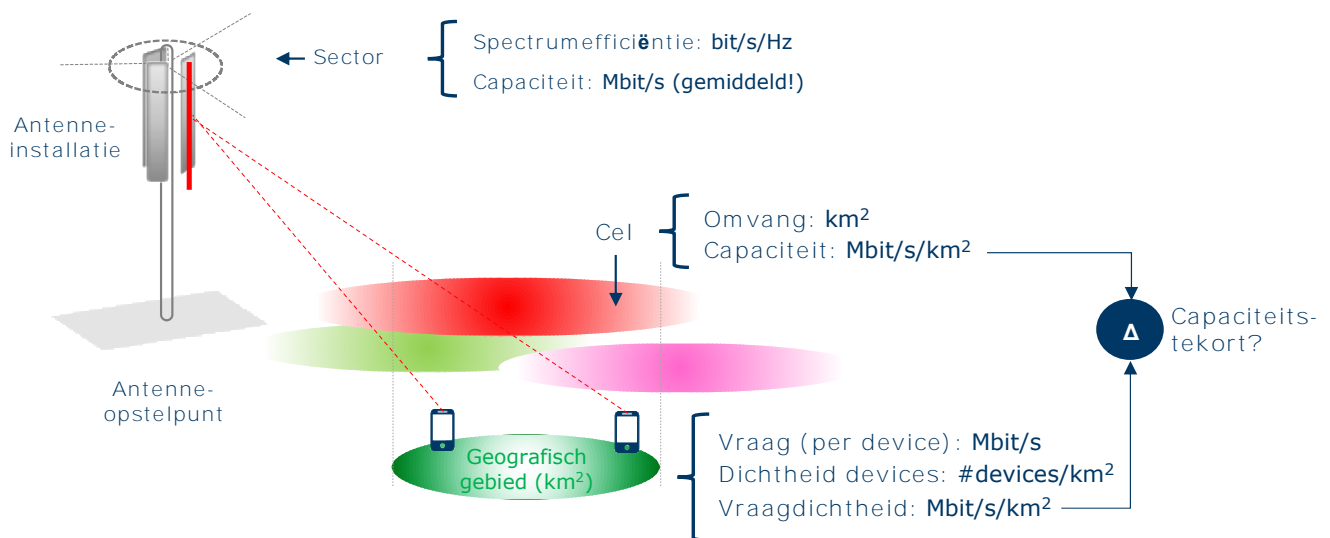
[Een antenne-installatie bestaat] uit antennes, een (of meer) antennedragers, de bedrading, de in techniekkasten opgenomen apparatuur, met de daarbij behorende bevestigingsconstructie(s) en (veiligheids)voorzieningen.

Een antenne-installatie is altijd gekoppeld aan één operator, kan gebaseerd zijn op meerdere technologieën (*toepassingen*) en bestaan uit meerdere antennes en antenne-elementen.

Figuur 28 hieronder toont de verschillende begrippen in een praktijksituatie. In Figuur 29 worden nog enkele technische termen toegelicht.



Figuur 28 Onderscheid tussen antenne-opstelpunt en antenne-installatie (bron foto: [antennebureau.nl])



Figuur 29 Overzicht definities in modellering

Operator

Met 'operator' verwijzen we in dit rapport naar de partijen die een openbaar mobiel netwerk exploiteren in Nederland op basis van eigen antenne-installaties (op dit moment zijn dat KPN, Vodafone-Ziggo en T-Mobile).

Sector

Opdeling van de gradenboog in radiotechnisch gescheiden delen, vanuit het perspectief van een antenne-installatie. Per sector zijn één of meerdere antennes in gebruik (op basis van MIMO etc.). Een omnidirectionele antenne-installatie zien we als één sector.

Cel

Een cel is het gebied dat door een antenne-installatie (en daarmee dus per operator) wordt voorzien van mobiele dekking en capaciteit. De cellen van een operator vormen (per technologie en frequentie) een (min of meer) regelmatige structuur in het *macro-netwerk*.

In onze modellering bepalen we de capaciteit per sector en kijken we daarom naar het gedekte gebied van een sector.

Small cells

Small cells zijn cellen die zich aan de (macro)structuur onttrekken en gericht zijn op het realiseren van

aanvullende capaciteit in gebieden met beperkte oppervlakte. De small cell ontlast in dat gebied het macronetwerk.

Wanneer een small cell gericht is op een specifieke drukke plek en geen deel uitmaakt van een grootschalige structuur van small cells, spreken we van een **small cell hotspot**.

Met een **grootschalige small cellstructuur** verwijzen we naar een gestructureerd geheel van small cells dat uitgerold is om een groter gebied te voorzien van (hoge) capaciteit. Een grootschalige small cellstructuur is bedoeld als primair toegangsnetwerk. Er wordt alleen teruggevallen op het macronetwerk als dat nodig is (vanwege het wegvallen van dekking).

Een **femtocel** is een zeer kleine cel gerealiseerd door een basisstation op basis van de 3GPP-standaarden voor 'HomeNodeB'. [60] Femtocel-basisstations kunnen door de operator worden verstrekt aan eindgebruikers, die ze zelf kunnen plaatsen.⁴⁴

Gemiddelde throughput / doorvoersnelheid

Datadoorvoersnelheid (netto) die een sector effectief produceert onder normale (Nederlandse praktijk)omstandigheden. We volgende definitie van ITU voor "average throughput" in de beoordeling van 5G-technologie [61, p. 9], daar gedefinieerd

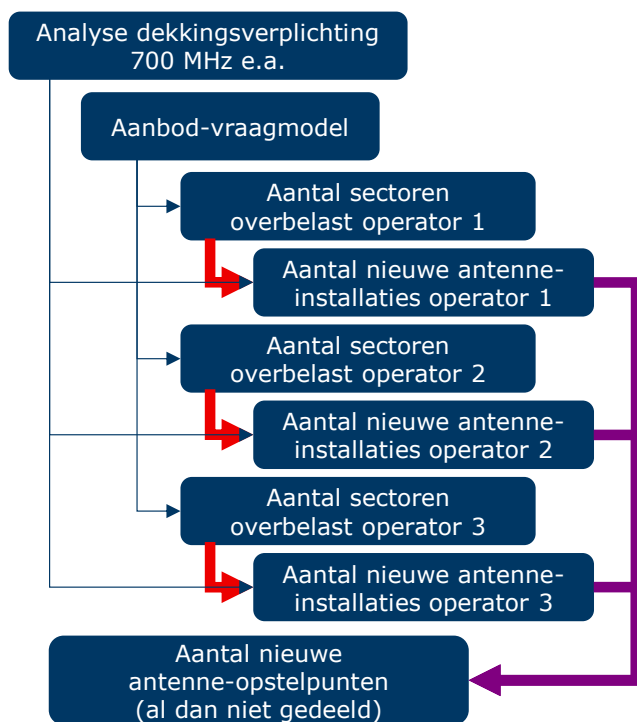
⁴⁴ Een en ander met toestemming van de operator, aangezien de femtocel (anders dan bij bijvoorbeeld Wi-Fi) gebruik maakt van aan de operator vergund spectrum.

als 'average spectrum efficiency' (bps/Hz) * spectrum (Hz).

Overzicht modellering

We modelleren het verschil tussen de vraag naar mobiele data en het aanbod daarvan (*aanbod-vraagmodel*) en berekenen hieruit een aantal benodigde nieuwe sites per operator. Daar tellen we het aantal sites bij op dat nodig is om te kunnen voldoen aan de dekking- en snelheidsverplichting voor gebruik van het 700 MHz-spectrum (*analyse dekking- en snelheidsverplichting 700 MHz*). Met een volgende rekenregel wordt het aantal nieuw benodigde sites vertaald naar het aantal nieuw benodigde antenne-opstelpunten (als gevolg van site sharing). Figuur 30 toont deze werkwijze schematisch.

Geheel los van deze analyse staat de modellering van grootschalige small cellstructuren, welke we uitvoeren om tot kengetallen en indicaties te komen voor (onder andere) de dichtheid van dergelijke structuren in Nederland.



Figuur 30 Schematisch overzicht van de modelleringmethode

Aanbod-vraagmodel

Wanneer de vraag naar mobiele data groter is dan het aanbod spreken we van een *capaciteitstekort*. Dit gegeven berekenen we per *sector*. Dit leidt tot een *aantal sectoren* met een capaciteitstekort, welke we

met een rekenregel vertalen naar een aantal nieuw benodigde antenne-installaties (rode pijlen in Figuur 30). Dit aantal vertalen we met een andere rekenregel (gecombineerd met de resultaten uit de analyse van de dekking- en snelheidsverplichting) tot een aantal nieuwe-opstelpunten (paarse pijlen in Figuur 30).

Telecomnetwerken worden (net als andere gedeelde infrastructuren, zoals bijvoorbeeld snelwegen) over het algemeen niet gedimensioneerd op basis van *piekcapaciteit*, maar op een bepaald percentiel daarvan. Door op deze wijze te modelleren kan een operator met een bepaalde zekerheid (afhankelijk van het gekozen dimensioneringspercentiel) capaciteit op haar dienst bieden. In onze modellering volgen we dit principe door te kijken naar het *busy hour*. Dit is het uur op een dag waarin een cel in het mobiele netwerk het meeste verkeer verwerkt. We bekijken dit *busy hour*-verkeer in verschillende scenario's en nemen dan, per cel, het meest pessimistische (dus hoogste) cijfer voor het busy hour-verkeer tussen de scenario's.

Vraag

Scope

In dit onderzoek beperken we ons tot de vraag die plaatsvindt op openbare mobiele netwerken in Nederland. Daaronder vallen ook (voor zover van toepassingen) diensten als IPTV die door een MNO worden aangeboden. Vast-draadloos internet (FWA) dat niet via de openbare mobiele netwerken verloopt (denk aan o.a. Greenet in Nederland) laten we buiten beschouwing.

Specifieke use cases

Ten aanzien van een aantal specifieke use cases hebben we specifieke keuzes gemaakt in de modellering van de vraag.

ITS/connected cars

Voor ITS komt in de toekomst mogelijk de 5,9 GHz-band beschikbaar. Omdat deze band niet wordt ingezet voor openbare mobiele netwerken valt deze buiten de scope van dit onderzoek. Hoe de 5,9 GHz zich precies zal ontwikkelen is nog wat onzeker. De FCC heeft van de oorspronkelijke 75 MHz vorig jaar zo'n 45 MHz "unlicensed" gemaakt waardoor er in de VS maar 30 MHz dedicated voor ITS overblijft.

Connected cars kunnen echter wel veel datavraag genereren, door zaken als entertainment en uitgebreide navigatie diensten meenemen. Dat verkeer

valt dan op de wegen en maakt gebruik van de openbare mobiele netwerken en bijbehorend spectrum.

MMTC en (massive) IoT

Voor IoT geldt dat niet zozeer het datavolume maar de capaciteit ten aanzien van het aantal verbonden apparaten (bepaald door overhead in het radioprotocol) de beperkende factor vormt. We zien dat de operators voor IoT specifieke technologieën en frequentieruimte inrichten (o.a. op basis van NB-IoT, LTE-M en LoRa). We nemen dit daarom niet mee in onze vraagmodellering.

Camerabewaking

Videocamera's vragen veel uplinkbandbreedte, zeker wanneer het om beelden met een hoge resolutie gaat. Niet voor niets wordt hiervoor op dit moment op zekere schaal de 3,5 GHz-band ingezet. Het is denkbaar dat voor deze toepassingen en voor nieuwe vormen van camerabewaking openbare (5G-)netwerken worden ingezet. Uit gesprekken met camerapartijen leiden we af dat mobiele data vooralsnog niet kosteneffectief kan worden ingezet, vanwege (primair) het feit dat naar volume wordt afgerekend. Grootschalige inzet achten we dan ook niet aannemelijk. Incidentele inzet van mobiele netwerken voor camerabewaking leiden daarnaast waarschijnlijk niet tot capaciteitsproblemen, omdat er over het algemeen overcapaciteit bestaat in de uplinkrichting.⁴⁵ We achten het waarschijnlijker dat cameranetwerken gebruik zullen gaan maken van de 2x 50 MHz TDD-spectrum in de 3,5 GHz-band die is gereserveerd voor lokale netwerken.

Relevante aannames

1. De verhouding tussen uplink- en downlinkverkeer op Nederlandse mobiele netwerken is substantieel 'scheef' (1:9 – 1:10) dat mag worden aangenomen dat er in de uplinkrichting (in FDD-spectrum) vooralsnog overcapaciteit is. In de modellering wordt dus uitsluitend gekeken naar downlinkvolumes.
2. Gemiddeld zijn 15-20% van de antenne-installaties in een mobiel netwerk verantwoordelijk voor 50% van het verkeer. Over een dag bezien vindt ongeveer 6-8% van het verkeer plaats in het

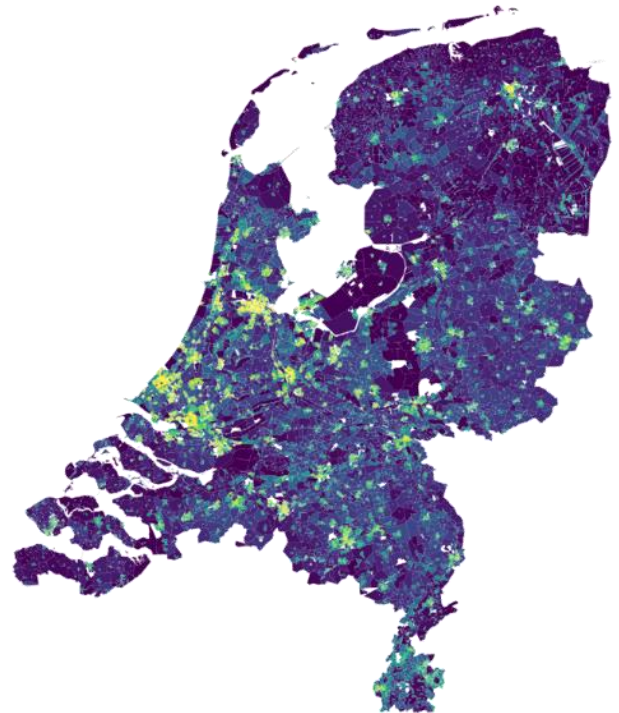
drukste uur van de dag ('busy hour'). Aan de hand van deze aanname toetsen we onze resultaten (met name de verdeling van de gemodelleerde vraag over het gemodelleerde netwerk).

Scenario's

In het model gaan we uit van een bepaalde gemiddelde vraag per gebruiker (in termen van datavolume per dag). Deze vraag is zowel geografisch als in tijd verdeeld over de mobiele netwerken in Nederland. Door deze verdeling te modelleren schatten we per antenne-installatie het 'busy hour'-verkeer (gemiddelde hoeveelheid data per seconde in het drukte uur van de dag).

We onderscheiden vraag naar vier locatietypen:

1. **Thuislocaties.** De geografische verdeling van personen wordt hierbij bepaald door de verdeling van het aantal inwoners over buurten in Nederland volgens het CBS (Figuur 31).



Figuur 31 Bevolkingsdichtheid per buurt. Blauw: dun bevolkt, groen: dichtst bevolkt. Bron: CBS (2020). Wijk- en buurtkaarten. Bewerking Dialogic.

⁴⁵ Het huidige gebruik is sterk downlink-gericht terwijl er, in FDD-banden, evenveel spectrum voor uplink en downlink beschikbaar is. Zelfs wanneer rekening wordt gehouden met het feit dat uplinkverkeer minder spectrumefficiënt wordt overgebracht is er relatief meer

uplinkcapaciteit dan downlinkcapaciteit beschikbaar ten opzichte van respectievelijk de vraag naar uplink- en downlinkverkeer.

2. **Werklocaties.** De geografische verdeling van personen wordt hier bepaald op basis van het aantal werknemersbanen per gemeente, en de verdeling van kantoorpanden tussen buurten binnen iedere gemeente.
3. **Openbaar vervoer.** De geografische verdeling van personen wordt bepaald op basis van de druktecijfers per OV-station in Nederland.
4. **Wegen.** Hier is gekeken naar snelwegen en provinciale wegen. Per wegsegment bepalen we een gewicht aan de hand van de file-informatie van februari 2020.

Per scenario wordt een bepaalde verdeelsleutel bepaald voor de verdeling van personen over deze vier locatietypen (Tabel 7). Dit leidt uiteindelijk tot een bepaalde geografische verdeling van personen en daarmee verdeling van vraag over antenne-installaties van de mobiele operators.

Tabel 7 Verdeelsleutel vraagmodellen naar tijdstip

Tijdstip Locatie	Spits	Vrij/avond	Overdag/ werk
Thuis	51,9% ⁴⁶	100%	52,0%
Kantoor	31,2% ⁴⁷	0%	48,0% ⁴⁸
OV	2,9% ⁴⁹	0%	0%
Snelweg	13,9% ⁵⁰	0%	0%
Evenement	0,0%	0%	0%

In alle analyses is (tenzij anders vermeld) een combinatie van deze scenario's gehanteerd. Dit betekent dat de vraag is berekend voor de drie tijdstippen (spits, vrij/avond en overdag/werk) en dat per vierkante kilometer de hoogste vraag is genomen.

Aanbod

De capaciteit van een mobiel netwerk wordt per cel (gebied dat door een sector wordt 'bediend') geschat als aantal Mbit/s/km² dat gemiddeld zal worden 'geproduceerd' door de cel. Hierbij wordt de indeling van de cellen afgeleid van informatie over de antennes van de operators (hoogte, frequentie, richting,

zendvermogen) uit het Antenneregister. Op basis van het Hata-Okumura COST 231-model [62] [63] [64] wordt bepaald wat de maximumomvang van een cel is. Vervolgens wordt op basis van een Voronoiesselatie bepaald waar de grenzen tussen cellen liggen. Tot slot worden de cellen opgedeeld per sector. Per analysegebied (vierkante kilometer, gemeente, etc.) kan vervolgens worden bepaald welke (delen van sectoren) verantwoordelijkheid voor dekking in het gebied, en hoeveel capaciteit beschikbaar is.

De methode is ontwikkeld door Dialogic in opdracht van het Agentschap Telecom. [65] Buiten de inschatting van de maximumgrootte van een sector wordt is geen propagatie gemodelleerd.

Relevante aannames

Verkrijgen van spectrum

We nemen het volgende aan over de verdeling van (nieuw) spectrum over operators:

1. In Nederland verkrijgen de drie operators er naar verwachting tussen de 60 - 120 MHz aan spectrum bij per 2022 (3,5 GHz).⁵¹ Een eventuele toetreder zou 40 - 80 MHz kunnen verkrijgen.
2. We nemen aan dat er 1 GHz aan millimetergolfspectrum beschikbaar komt per 2022, en dat iedere operator gemiddeld 300 MHz zal verkrijgen.
3. We nemen aan dat nieuwe frequentiebanden (waaronder in de 6 GHz-band) niet in de modeleringsperiode beschikbaar en breed geadopteerd wordt. Zoals eerder besproken wordt het 6 GHz-spectrum waarschijnlijk in 2023 behandeld tijdens het WRC; implementatie en adoptie zal in de jaren daarna plaatsvinden.

Inzet van spectrum

1. Operators zetten zoveel mogelijk spectrum dat zij al (2020) in bezit hebben in op basis van LTE of 5G NR, met een beperkte hoeveelheid GSM/UMTS ($\pm 5-10$ MHz gepaard). Het is

⁴⁶ Overige bevolking (niet werkend)

⁴⁷ Op basis van acht miljoen werkenden, minus het aantal mensen onderweg. [cbs.nl]

⁴⁸ Op basis van acht miljoen werkenden [cbs.nl]

⁴⁹ 0,5 miljoen mensen in OV. [cbs.nl]

⁵⁰ 2,4 miljoen mensen op de weg. [cbs.nl]

⁵¹ Het maximum is gegeven door de capregeling waarvan we aannemen dat die toepassing zal blijven. De ondergrens volgt uit eerder onderzoek van Dialogic. [22]

denkbaar dat tegen 2026 nog ± 5 MHz in gebruik is voor GSM/UMTS.

2. Het spectrum dat operators in 2020 *nieuw* verkrijgen bij de Multibandveiling, en het 3,5 GHz-spectrum dat zij eventueel verkrijgen in 2022, wordt exclusief ingevuld met 5G NR. In de 2100 MHz-band (die opnieuw werd geveild) behouden operators initieel LTE.⁵²
3. Operators zetten (massive) MIMO in naargelang de capaciteitsvraag van de antenne-installatie. We zien vooral toepassing van 8T8R in FDD-spectrum. Massive MIMO wordt uitsluitend ingezet in TDD-banden, die bij uitstek geschikt zijn voor toepassing van (MU-)MIMO.^{53,54} We verwachten vooral 16T16R- en 32T32R-configuraties. Hogere orde varianten (64T64R en verder) zien we in Nederland nauwelijks terug, omdat er maar weinig locaties zijn waar gebruikers ook verticaal verspreid zijn (zoals wel het geval in 'high-rise' stadscentra in o.a. Azië).
4. We nemen aan dat millimetergolfspectrum beschikbaar komt per 2022 (in totaal 1 GHz, verdeeld als 300 MHz per operator).

Modellering

1. De backhaulverbindingen voor antenne-installaties mogen worden aangenomen te worden geüpgraded om te kunnen voorzien in de capaciteitsvraag (en vormen modelmatig geen beperking van de capaciteit).

⁵² LTE eventueel in combinatie met 5G NR, door middel van DSS. In de 1400 MHz-band (*supplementary downlink*) wordt initieel LTE ingezet.

⁵³ Bij MIMO worden, door aan beide kanten meerdere antennes te gebruiken, meerdere propagatiepaden gebruikt om de netto capaciteit te vergroten. Bij MU-MIMO kunnen, door het gebruiken van meerdere antennes, meerdere signalen op dezelfde frequentie gelijktijdig in een specifieke richting worden gestuurd. Daarmee kan hetzelfde frequentieblok dus voor meerdere verschillende gebruikers gelijktijdig worden ingezet, waarmee de efficiëntie toeneemt.

Massive MIMO leent zich bij uitstek voor toepassing in de 3,5 GHz-band met 5G NR. 100 MHz bij gemiddeld 5 bps/Hz levert een extra capaciteit op van 500 Mbit/s/sector (nu: 100-200 Mbit/s/sector), en dus een verveelvoudiging van de capaciteit.

Bij TDD kan voor het schatten van de juiste parameters voor een 'downlink' propagatiepad informatie worden

2. Het gebied dat door een antenne in het macronetwerk wordt 'bediend' kan worden benaderd met een Voronoïtesselatie. Het gebied dat door een antenne in het macronetwerk wordt 'bediend' is begrensd in maximale afstand (en dus geografisch een 'taartpunt'). De maximale afstand kan worden gemodelleerd (bijvoorbeeld op basis van Hata-Okumura; de frequentie, de hoogte van zender en ontvanger, het zendvermogen en de mate van bebouwing spelen een rol). In Nederland is deze afstand over het algemeen vele malen groter dan de afstand tussen antenne-installaties (ISD: inter-site distance).
3. We nemen aan dat er geen fysieke beperkingen zijn waardoor nieuwe opstelpunten nodig zijn bij inzet van nieuw spectrum. We verwachten op dit vlak overigens innovatie; zie onder andere oplossingen waarbij actieve en passieve antennesystemen worden gecombineerd. [66]

Efficiëntie

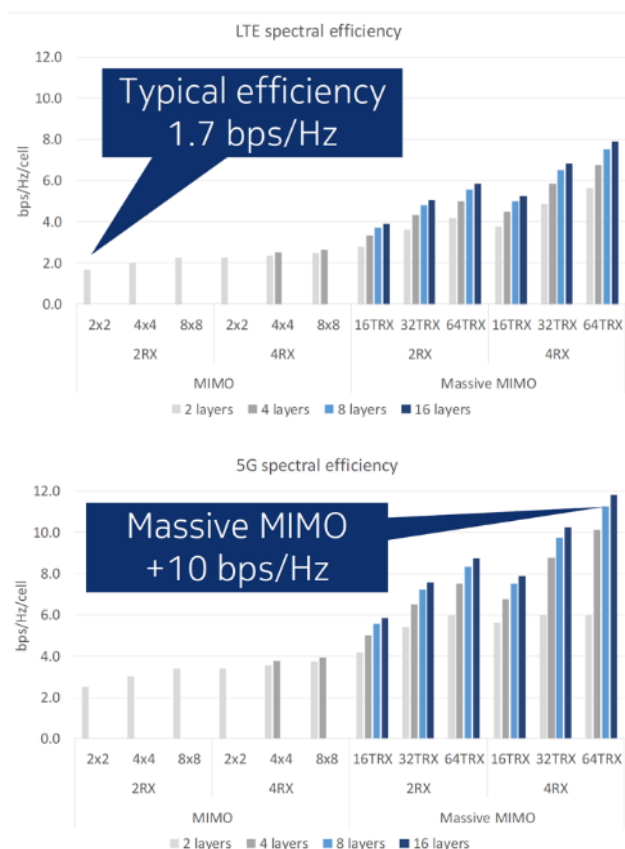
Voor wat betreft de efficiëntie van de radiotechnologieën hebben we ons gebaseerd op literatuur en feedback van de operators in gesprekken. De spectrale efficiëntie (die we bekijken op niveau van een enkele sector en radiolaag) is primair afhankelijk van de technologiegeneratie (LTE of 5G NR) en de gehanteerde vorm van MIMO. Bij MIMO wordt gebruik gemaakt van meerdere verzend- en ontvangstantennes om de capaciteit van verschillende propagatiepaden tegelijkertijd te kunnen gebruiken.

gebruikt van de even daarvoor ontvangen 'uplink'-signalen (UL-SRS). Omdat dit signaal binnen dezelfde band wordt verzonden gelden zeer vergelijkbare propagatieparameters. [74]

⁵⁴ Ook op de (veel) hogere millimetergolffrequenties (bijvoorbeeld 26 GHz) wordt (MU-)MIMO toegepast in 5G. De golflengte is daarbij echter veel kleiner vergeleken met de 3,5 GHz-frequenties, waardoor antenne-elementen dichter op elkaar moeten worden geplaatst. Dat maakt weliswaar dat er meer antenne-elementen kunnen worden gebruikt bij een antenne (c.q. een terminal) van dezelfde omvang, maar de mogelijkheden voor o.a. filtering zijn weer beperkter. Daarnaast is het bereik van de millimeterfrequenties veel beperkter dan de 3,5 GHz-frequenties, waardoor er relatief minder efficiëntie gehaald hoeft te worden uit het spectrum: het spectrum kan immers op een kortere afstand hergebruikt worden. Juist bij de 3,5 GHz-band is de hergebruikafstand relatief groot, en is de rol van (MU-)MIMO van belang om hoge capaciteit te behalen.

Voor MIMO is de antenneconfiguratie aan de kant van de antenne-installatie (aantal verzend- en ontvangstantennes, aangegeven met de notatie 'xTxR') het meest bepalend voor de sectorcapaciteit. Ook de specificatie aan de terminalkant (2R of 4R is gangbaar) is bepalend (en leidt tot een verschil in efficiëntie tussen terminals). Hoe groter het percentage terminals met een hogere orde MIMO-variant, hoe hoger de spectrale efficiëntie van de sector als geheel.

ITU geeft voor 5G-technologie (IMT-2020) een aantal richtgetallen. [67] Hoewel de standaarden aan deze richtgetallen voldoen worden de doorvoersnelheden in de praktijk niet altijd onder alle omstandigheden gehaald. Onderstaande Figuur 32 toont inschattingen van Nokia ten aanzien van de spectrale efficiëntie van verschillende radiotechnieken bij verschillende vormen van MIMO. Ook deze cijfers moeten worden gezien als een hoogst haalbare efficiëntie in ideale praktijksituaties. Hierin is de invloed van de MIMO-variant aan beide zijden overigens zeer goed zichtbaar.



Figuur 32 Inschattingen spectrale efficiëntie van verschillende radiotechnieken bij verschillende vormen van MIMO (bron: [68])

In de modellering hanteren we steeds een iets conservatievere schatting, die we vaststellen op basis van feedback van de operators en hun (praktijk)ervaring. De belangrijkste kengetallen die in onze modellering zijn gehanteerd zijn de volgende.

LTE

In de modellering is (tenzij anders aangegeven) een gemiddelde van 1,73 bps/Hz gehanteerd voor LTE (2020).

In een stedelijk scenario komt LTE uit op *maximaal* ±5,12 bit/s/Hz/cel bij 32T32R. Bij 16T16R (met een terminal met 4T4R) komt LTE uit op 1,2-1,7 bit/s/Hz/cel (bij ISD van 750 meter). In Massive MIMO-scenario's (64T64R) is op basis van LTE tot 7-8 bit/s/Hz/cel haalbaar.

5G NR

In de modellering is (tenzij anders aangegeven) een gemiddelde van 5 bps/Hz gehanteerd voor 5G NR.

5G NR haalt *maximaal* een gemiddelde doorvoersnelheid van 7,73 bit/s/Hz/cel in de downlink in stedelijke omgevingen bij 32T32R (uplink: 5,54 bit/s/Hz/cel). Met inzet van 'Massive MIMO' (64T64R) en kleine afstanden tussen antenne-installaties (ISD van ~200 meter) is 12,75 bps/Hz/cel een haalbare waarde, wanneer er voldoende verticale spreiding van gebruikers is. Op basis van 4T4R haalt 5G NR maximaal ongeveer 2,8-3,8 bit/s/Hz/cel (bij 2R aan de terminalkant ongeveer 3 bit/s/Hz/cel).

We gaan ervan uit dat in de periode 2021 t/m 2026 het huidige LTE-spectrum geleidelijk zal worden ingezet op basis van 5G NR. De gemodelleerde efficiëntie voor dit spectrum laten we navenant stijgen door de jaren. Inzet van DSS (dynamic spectrum sharing tussen LTE en 5G NR) verandert niets aan deze modellering; DSS maakt het voor operators mogelijk om niet per band te hoeven kiezen tussen 5G NR of LTE, wat de efficiëntie als het ware nog beter mee laat groeien met de adoptie van 5G NR in toestellen (een DSS-carrier waarvan voornamelijk LTE-toestellen gebruik maken is iets minder efficiënt dan een reguliere LTE-carrier vanwege de overhead van de 5G NR-carrier).

Inzet van technologie

Massive MIMO

Ten aanzien van inzet van Massive MIMO door de operators nemen we in de modellering het volgende aan:

1. Massive MIMO wordt uitsluitend ingezet op drukke locaties (in Nederland in de praktijk evenementenlocaties, stadscentra, stations, et cetera). Het betreft 15% van de locaties (samen verantwoordelijk voor 50% van het verkeer).
2. Operators hebben (na de Multibandveiling 2020) beperkt spectrum vrij voor 5G en kunnen dit zeer beperkt inzetten met MIMO (beperkt tot 4T4R of 8T8R).

Small cells

Ten aanzien van de uitrol van small cells door de operators nemen we in de modellering aan dat een small cellstructuur voor een operator interessant wordt zodra de macrocellaag niet verder geüpgraded kan worden om aan de vraag te voldoen (een operator zal deze enkele jaren vooruit anticiperen).

Millimetergolfspectrum

We nemen aan dat operators millimetergolfspectrum inzetten vanaf macrosites zodra dit beschikbaar is en nodig is vanuit capaciteitsoogpunt. Door deze inzet kan een deel van de vraag worden afgewikkeld via het 26 GHz-spectrum, waardoor andere banden worden ontlast. De hoeveelheid verkeer die kan worden afgewikkeld via de 26 GHz-band hangt af van twee parameters: (1) de dekking van de 26 GHz-band en (2) de adoptie van de 26 GHz-band in toestellen. Het percentage verkeer dat wordt afgewikkeld via de 26 GHz-radiolaag is naar schatting de vermenigvuldiging van deze twee percentages (met uiteraard een behoorlijke mate van variatie vanuit gebruikersperspectief: buiten de stad, inpandig en tussen hoge gebouwen zal de dekking direct wegvallen).

Dekking van de 26 GHz-band

Op basis van een analyse stellen we vast dat *maximaal* ongeveer 50% van het totale verkeer zou kunnen worden afgewikkeld via de 26 GHz-band, wanneer alle toestellen deze band zouden ondersteunen. Hierbij is gekeken naar het percentage oppervlakte dat gedekt zou worden door een dergelijke uitrol. We gaan hierbij uit van de binnenstad van Amsterdam en de (huidige) macrosites van de operator met het hoogste aantal opstelpunten in dat gebied. Andere operators hebben minder macro-antennes en komen op een lager percentage uit (aanname: 20%). Wanneer we deze percentages wegen naar rato van marktaandeel schatten we dat in het beste geval, in de binnenstad van Amsterdam en op basis van de huidige (macro-)antenne-opstelpunten van de operators, de gemiddelde dekking circa 33% bedraagt. Vermenigvuldigd met het

adoptiecijfer (percentage toestellen dat de 26 GHz-band ondersteunt) leidt dit tot een netto percentage van het verkeer dat via de 26 GHz-laag kan worden verwerkt.

Adoptie van de 26 GHz-band in toestellen

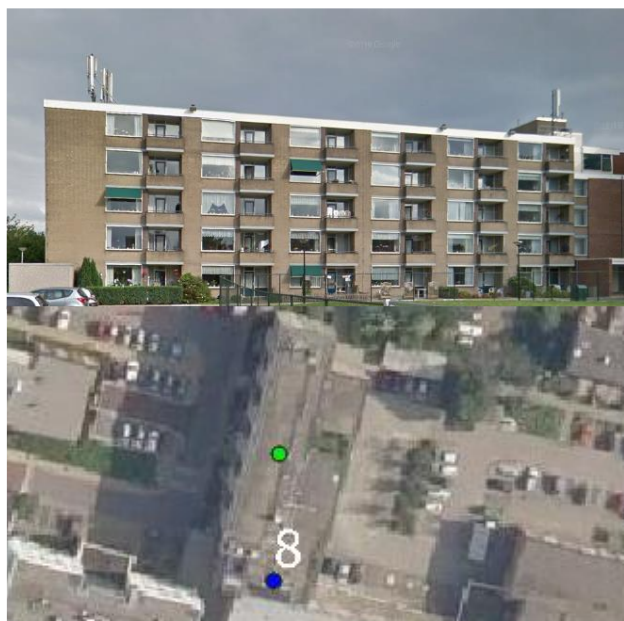
Op dit moment is ondersteuning voor de 26 GHz-band alleen aanwezig in specifieke versies van high-end toestellen. Voor onder andere de iPhone die eind 2022 zal worden aangekondigd wordt verwacht dat dit zo blijft. Mid- en low-end toestellen met ondersteuning verwachten we 1 tot 2 jaar later. De reden hiervoor is primair dat de hardware en bijbehorende licenties nog relatief duur zijn. We verwachten dat de adoptie versnelt zodra uitrol van 26 GHz op grote schaal plaatsvindt (bijvoorbeeld in Azië; in Noord-Amerika wordt de 28 GHz-band gebruikt, dit zou een effect kunnen hebben wanneer de industrie tendeert naar één serie hardware met ondersteuning voor beide banden). Vanwege de vervangingscyclus van toestellen (tegenwoordig tussen de 3 á 4 jaar) duurt het even voordat alle toestellen de 26 GHz-band zullen ondersteunen. We modelleren de adoptie als een S-curve die loopt van 5% in 2022 tot 80% in 2027.

Clustering van antenne-installaties

De installaties uit het Antenneregister worden op twee manieren geclusterd:

1. Antenne-installaties die gezamenlijk op een pand staan (dakopstellingen) worden tot één antenne-opstelpunt gerekend.
2. Antenne-installaties die niet op een dak staan, worden geclusterd tot een straal van 40 meter. Dit is met name om afwijkingen in de coördinaten in het antenneregister te corrigeren. In heel veel gevallen staan de verschillende antenne-installaties van bijvoorbeeld één vakwerkmast op net afwijkende coördinaten geregistreerd.

Hierna volgens enkele voorbeelden om de uitkomsten van deze clustering inzichtelijk te maken.



Figuur 33 Clustering van antenne-installaties op een gezamenlijk pand (bron: Google Maps, Antenneregister en analyse Dialogic)

Op de locatie uit Figuur 33 staan in totaal acht installaties geregistreerd op twee puntlocaties. Deze clusteren wij tot één antenne-opstelpunt (blauw), aangezien zij op één dak gesitueerd zijn.



Figuur 34 Clustering van antenne-installaties binnen een straal van 40 meter (bron: Google Maps, Antenneregister en analyse Dialogic)

Op de locatie uit Figuur 34 staan in totaal tien installaties geregistreerd op drie puntlocaties. Deze clusteren wij tot één antenne-opstelpunt (geel), aangezien zij op allemaal binnen een straal van 40 meter van elkaar geregistreerd zijn. Dit komt ook overeen met de werkelijkheid, aangezien zij allemaal aan één vakwerkmast (en dus één opstelpunt) zijn bevestigd.



Figuur 35 Clustering van antenne-installaties binnen een straal van 40 meter op twee dichtbij zijnde locaties (bron: Google Maps, Antenneregister en analyse Dialogic)

Op de locaties uit Figuur 35 ontstaan na de analyse twee clusters met respectievelijk drie en vier antenne-installaties. Dit blijkt een juiste uitkomst, aangezien het in de praktijk ook echt twee opstelpunten betreft: een vakwerkmast (oranje cirkel) en een variant waarbij de antenne-installaties in een reclamezuil (paarse cirkel) zijn verwerkt.

Vertaling aantal sectoren met capaciteitstekort naar aantal installaties

Om het aantal sectoren met een capaciteitstekort te vertalen naar het aantal benodigde antenne-installaties (rode pijlen in Figuur 30), hanteren wij de volgende rekenregels:

1. Als één sector afzonderlijk een capaciteitstekort kent, dan wordt hier één nieuwe antenne-installatie voor gerekend.
2. Indien twee aaneengesloten sectoren een capaciteitstekort kennen, dan wordt hier één nieuwe antenne-installatie voor gerekend.
3. Indien drie aaneengesloten sectoren een capaciteitstekort kennen, dan tellen we 1½ opstelpunt.
4. Indien vier of meer aaneengesloten sectoren een capaciteitstekort kennen, dan delen wij het aantal volgelopen sectoren door drie om tot het

aantal nieuwe installaties te komen, waarbij wij dit getal naar boven afronden.

Vertaling antenne-installaties naar antenne-opstelpunten

Het vraag-aanbodmodel en de analyse van de dekings- en snelheidsverplichting leiden tot een aantal benodigde nieuwe antenne-installaties. Om het aantal benodigde antenne-installaties om te rekenen in het aantal benodigde opstelpunten, passen wij een correctiefactor voor site sharing toe (de parse pijlen in Figuur 30).

Gemiddeld deelt een operator in 36% (variërend van 24% tot 46%) van de gevallen een opstelpunt met één andere operator en in 22% (variërend van 18% tot 25%) van de gevallen een opstelpunt met twee andere operators. Dit heeft Dialogic berekend op basis van het Antenneregister en de eerder uitgelegde clustering.

We verdelen de realisatie van de nieuwe gedeelde opstelpunten gelijk over de deelnemende operators. Dat betekent dat een operator een derde van de 22% van de (met drie gedeelde) masten realiseert en de helft van de 36% van de (met twee gedeelde) masten realiseert. Netto komt dit op een correctiefactor tussen de 0,6 en 0,7 bij de realisatie van nieuwe opstelpunten. Dat betekent dat wanneer de operators samen 100 nieuwe antenne-installaties nodig hebben, er tussen de 60 en 70 nieuwe opstelpunten worden gerealiseerd. We gaan er hierbij vanuit dat site sharing in dezelfde mate plaatsvindt als tot en met 2020 het geval was. Het aantal antenne-installaties blijft echter altijd de bovengrens. In het voorbeeld van 100 antenne-installaties zijn dus maximaal 100 antenne-opstelpunten nodig.

Kijken we naar de data voor september 2020, dan zien we naar schatting 11.500 antenne-opstelpunten (voor LTE, op basis van clustering; zie Figuur 10). Op hetzelfde meetmoment telden we 15.682 antenne-installaties. Het aantal antenne-opstelpunten ligt hier 27% lager dan het totaal aantal antenne-

installaties. De correctiefactor zou daarmee op 0,73 uitkomen.

Verplichtingen van de 700 MHz-vergunningen

Het door Agentschap Telecom opgestelde meetprotocol beschrijft de wijze waarop de dekingsverplichtingen uit de 700 MHz-vergunningen worden getoetst. [19] Kort samengevat bepaalt het protocol dat er vanuit een auto op verschillende locaties een download wordt uitgevoerd. Minimaal 98% van de downloads moet daarbij een gemiddelde snelheid van 10 Mbit/s of hoger halen. Onze analyse is erop gericht om te bepalen hoeveel antenne-opstelpunten er nodig zijn om deze toets te laten slagen voor de drie operators.

Om een meting te laten slagen moet het mobiele netwerk aan twee eisen voldoen: dekking en capaciteit.

Dekking

Er moet dekking zijn van een combinatie van spectrum en technologie waarmee 10 Mbit/s of meer kan worden gehaald. Hoe groter de afstand tussen gebruiker en antenne-installatie, hoe lager de maximaal haalbare snelheden. Gelet op de efficiëntie van LTE⁵⁵ en de gemiddelde afstanden tussen antenne-installaties in Nederland stellen we vast dat wanneer er dekking is gerealiseerd, 10 Mbit/s in alle gevallen theoretisch haalbaar is. De capaciteit van de cel speelt in deze gebieden geen beperkende rol.

Om te bepalen hoeveel nieuwe antenne-opstelpunten de operators (ongeveer) nodig zullen hebben om te voldoen aan de dekingsverplichting gekoppeld aan de 700 MHz-vergunningen, is voor één operator handmatig geanalyseerd welke nieuwe antenne-installaties er nodig zouden zijn. Voor deze operator is de eigen (openbare) dekingskaart voor 4G (LTE⁵⁶) als uitgangspunt genomen. Hierin is per dekingsgat gekeken wat er nodig zou zijn, vanuit het perspectief van een netwerkplanner, om de dekking te verbeteren. Het streven daarbij is zo goed als volledige

⁵⁵ We redeneren vanuit LTE omdat dit in de periode 2021-2022 de dominante technologie zal blijven. Inzet van 5G NR verhoogt weliswaar de theoretische snelheid dicht bij de mast, maar presteert aan de celranden vergelijkbaar met LTE.

⁵⁶ Er is ook gekeken naar de 2G- en 3G-dekkingskaarten. Wanneer een operator op een bepaalde locatie wel

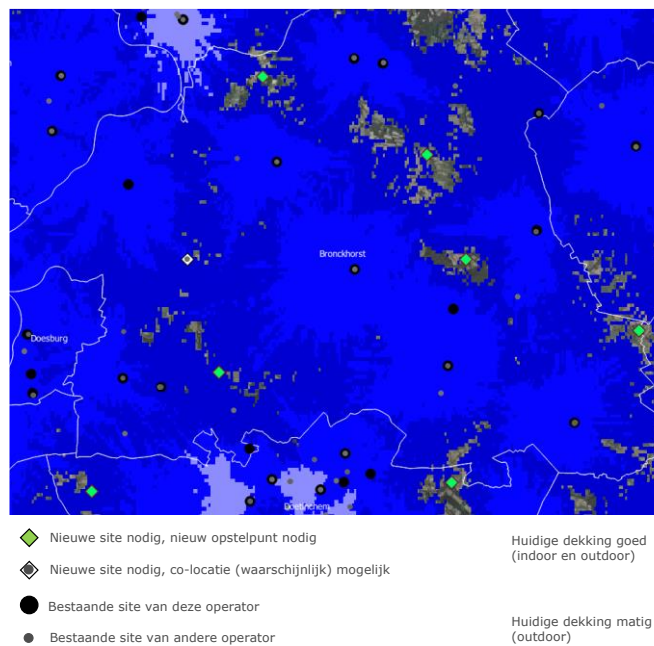
2G/3G-dekking kon realiseren maar geen LTE-dekking is aangenomen dat ook LTE-dekking kan worden gerealiseerd door LTE-apparatuur te plaatsen op de betreffende opstelpunten waar de operator al wel 2G/3G-apparatuur heeft staan.

outdoordekking. Dit is hoger dan het in de vergunning vereiste niveau. De analyse is uitdrukkelijk zo uitgevoerd om een bovengrens te kunnen stellen aan het aantal nieuw benodigde antenne-opstelpunten.

Zoals in het meetprotocol wordt toegelicht zijn Natura 2000-gebieden uitgesloten van de dekkings- en snelheidsverplichting. In onze analyse is hier rekening mee gehouden: we hebben dekkingsgaten die volledig in een Natura 2000-gebied vallen, niet 'ingevuld'. Dekkingsgaten die deels in een Natura 2000-gebied vallen, maar ook bewoonde gebieden bedekken, zijn wel ingevuld.

Eventueel nodige nieuwe antenne-installaties worden, waar mogelijk, geplaatst op een al bestaand antenne-opstelpunt. Waar dit niet kon is een nieuw antenne-opstelpunt getekend op de kaart. Hierbij is, waar mogelijk, rekening gehouden met de beschikbaarheid van WAS-palen die mogelijk kunnen worden omgebouwd tot antenne-opstelpunt voor mobiele netwerken.

Figuur 36 toont een voorbeeld van deze analyse in de gemeente Bronckhorst. Rondom de bebouwde kern zijn enkele dekkingsgaten te zien. In één van de dekkingsgaten kan deze operator het dekkingsgat invullen door een opstelpunt te delen (het is uiteraard nog wel de vraag of dit ook fysiek mogelijk is: er moet 'plek' zijn op een mast, bijvoorbeeld). In de andere dekkingsgaten is een nieuw opstelpunt nodig.



Figuur 36 Voorbeeld modellering nieuwe opstelpunten ten behoeve van dekkingsverplichting 700 MHz voor een operator

Uiteraard kunnen de operators nieuw te plaatsen antenne-opstelpunten delen. Op basis van de dekkingskaarten van de operators concluderen we zelfs dat veel van de 'dekkingsgaten' voor de verschillende operators overlappen. Als er een nieuwe mast moet worden geplaatst kan deze dus door alle betreffende operators worden gebruikt. In de totale schatting van het aantal daadwerkelijk benodigde *nieuwe* antenne-opstelpunten is dit uiteraard meegenomen.

Capaciteit

Er moet genoeg *capaciteit* in de betreffende cel zijn om daadwerkelijk 10 Mbit/s te kunnen leveren. Om aan een gebruiker aan de rand van een cel 10 Mbit/s te leveren is meer radiocapaciteit nodig dan aan een gebruiker die zich vlak naast de mast bevindt. In het capaciteitsmodel (zie elders) rekenen we daarom met een *gemiddelde* capaciteit, die rekening houdt met de verdeling van de vraag over een cel.

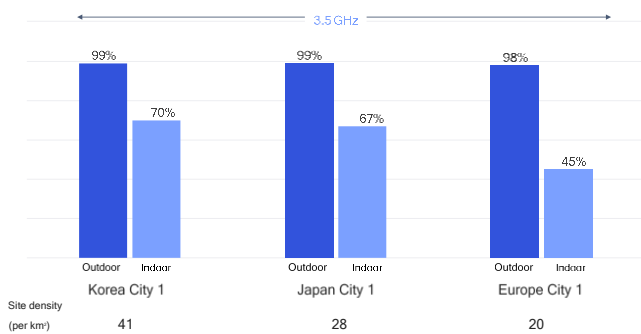
Het meetprotocol schrijft voor dat op willekeurige punten wordt gemeten. De verdeling over de cel zou dan dus gelijkmatiger zijn dan in de praktijk (waarbij gebruikers zich concentreren rond bijvoorbeeld kerren en centra). Het meetprotocol sluit echter ook bepaalde gebieden (zoals Natura2000-gebieden) uit en meet steeds vanaf (een maximale afstand van) de openbare weg. Aan de andere kant is de gemiddelde verdeling van de vraag conservatief (in ons model rekenen we bijvoorbeeld met de hoogst denkbare vraag per vierkante kilometer – in de praktijk zal de hoogst denkbare vraag echter nooit gelijktijdig kunnen voorkomen voor alle vierkante kilometers). We achten het daarom realistisch om de gemiddelde capaciteit als uitgangspunt te nemen. Een meting slaagt wanneer er ten minste 10 Mbit/s *gemiddelde* capaciteit is in de betreffende cel. In het extreme geval waarin een cel volledig gebruikt wordt, zou er 10 Mbit/s overcapaciteit moeten zijn ten opzichte van de vraag op moment van meten.

Op basis van ons model stellen we vast dat het aannemelijk is dat er in 2022, na het bouwen van de (op basis van dekking bepaalde) extra opstelpunten, er in meer dan 98% van de cellen minimaal 10 Mbit/s overcapaciteit is in het meest pessimistische scenario (hoogste waarde in het combinatiescenario).

Dekking van 5G NR in 3,5 GHz

De downlinkdekking van 3,5 GHz wordt aangenomen vergelijkbaar te zijn met de uplinkdekking van LTE 1800. [69]

Wij stellen niet dat er echte verdichting (cell spit) nodig zal zijn, maar stellen wel dat we her en der wat invulantenne-installaties verwachten i.v.m. dekingsissues op 3,5 GHz. In sommige cellen is er wel capaciteit nodig, en bevindt een deel van de vraag zich (inpartidig) buiten de 3,5 GHz-dekking, waardoor de lagere banden overbelast kunnen raken. Een extra invulantenne-installatie brengt dan goede 3,5 GHz-dekking in dat gebied. Figuur 31 onderbouwt deze aanname; getoond wordt een onderzoek van Qualcomm naar de dekking van een 3,5 GHz-radio-laag op basis van bestaande opstelpunten.



Figuur 37 Resultaten experiment dekking (downlink) van 5G NR op 3,5 GHz op basis van co-siting met outdoor LTE-infrastructuur (bron: [70])

Small cellstructuren

Structuur

Om de dekking van een small cellstructuur te kunnen modelleren wordt allereerst een small cellstructuur gedefinieerd. In de analyse is door een radioplanner in Amsterdam een netwerk ingetekend op basis van bestaande lantaarnpalen en incidenteel andere vormen van straatverlichting (denk aan verlichting aan kabels, waarbij het aankoppelpunt van de kabel is gebruikt als opstelpunt). Hierbij zijn modelmatig antennes op een hoogte van vier meter geplaatst. In sommige gevallen wordt afgeweken van deze hoogte, bijvoorbeeld voor lantaarnpalen op bruggen.

Niet alle potentiële opstelpunten zijn voorzien van een antenne-installatie: er zijn zoveel lantaarnpalen gebruikt als (subjectief) nodig voor een bijna-line-of-sight-dekking. Veelal zijn dit de lantaarnpalen op kruisingen (zodat in meerdere straten tegelijk dekking kan worden gerealiseerd).

Vervolgens is het dekkingsmodel (zie hieronder) uitgevoerd op basis van de initiële structuur, en is de structuur aangepast om tot een definitieve structuur te komen.

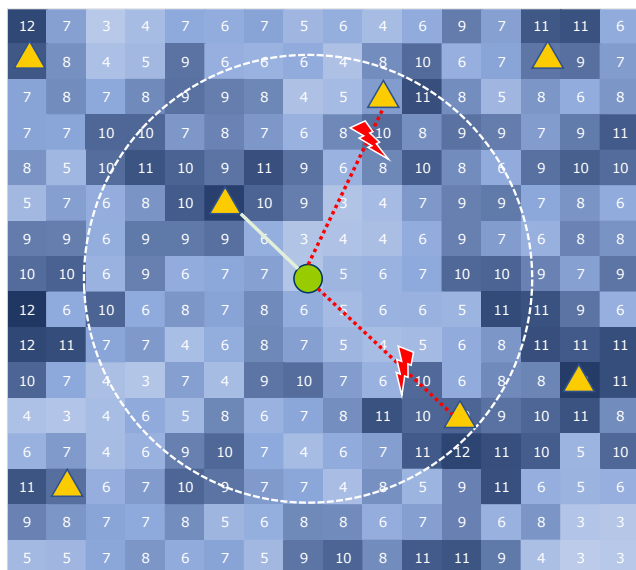
We gebruiken de modellering om inzicht te krijgen in de vorm die uitrol van grootschalige small cellstructuren in Nederland zou kunnen krijgen. Omdat we redeneren vanuit dekking en niet vanuit capaciteit is het gemodelleerde small cellnetwerk veel uitgebreider dan in de praktijk mag worden verwacht. De gevonden aantallen small cellinstallaties geven hooguit een bovengrens. We beschouwen de uitkomsten daarom uitsluitend kwalitatief (rekening houdend met de beperkingen van het model).

Dekking

De dekking van small cellstructuren is gemodelleerd op basis van een 'ray tracing'-model. Hierbij wordt vanaf een groot aantal puntlocaties gecontroleerd of er een line-of-sight bestaat naar een antenne-installatie. Tussen de puntlocaties ('samples') wordt het resultaat geïnterpoleerd. De resulterende kaart toont de 'viewshed' of 'radioschaduw' en daarmee de dekking van een netwerk op basis van line-of-sight.

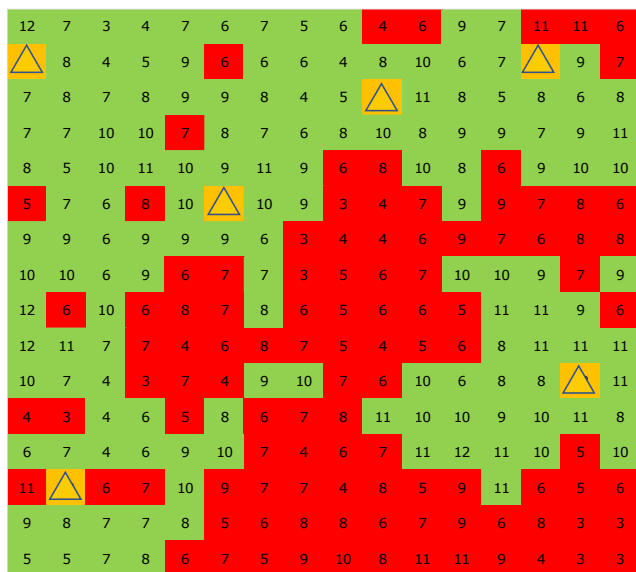
Omdat een radiosignaal in de praktijk uitdooft naarmate de afstand tussen ontvanger en zender groter wordt, hanteren we een maximumafstand. Dat betekent dat bij de bepaling van de lines-of-sight alleen antenne-installaties binnen een bepaalde afstand van het samplepunt worden meegenomen.

Figuur 38 toont schematisch de werking van het model. De blauwe vlakken geven steeds de hoogte aan van dat vlak. Vanuit een ontvanger (in dit voorbeeld op maaiveldniveau) worden zichtlijnen getrokken naar de ontvangers binnen de maximale afstand (witte stippellijn). Wanneer er zicht geen obstakels op de route bevinden (hier het geval voor één antenne-installatie) is het punt 'gedekt'. Zijn alle zichtlijnen verstoord (zoals hier naar de twee andere antenne-installaties), dan is het punt 'niet gedekt'.



Figuur 38 Schematisch voorbeeld modellering small cell-structuren op basis van zichtlijnen en hoogte-informatie (illustratie: Dialogic)

Figuur 39 toont een voorbeeld van een 'dekkingskaart' die ontstaat door vanaf alle punten (waar geen antenne-installatie staat) bovenstaande exercitie uit te voeren.



Figuur 39 Resulterende 'dekkingskaart' (groen: er is een zichtlijn vanaf dat punt tot een antenne-installatie binnen bereik) (illustratie: Dialogic)

Vanaf de samplepunten wordt een volgende slag worden gemaakt om ook dekking als gevolg van reflecties mee te nemen. Hierbij wordt opnieuw bepaald of er (vanaf de nog niet bedekte punten) een zichtlijn bestaat, maar nu naar een ánder punt dat al wel gedekt is. Daarbij wordt vervolgens een demping van het signaal berekend. In het rapport noemen we

dit steeds "bijna-line-of-sight". In de praktijk zou dit overeen moeten komen met dekking van het small cellnetwerk.

Om de zichtlijnen op een accurate manier te kunnen bepalen maken we gebruik van een hoogtebestand (AHN3 [71]). Op basis van deze dataset wordt de hoogte van de 'gebruiker' bepaald (samplepunt plus 1,5 meter). Vervolgens wordt de data gebruikt om te bepalen of er zich obstakels bevinden in de zichtlijn tussen de gebruiker en antenne-installatie.

De hoogte van de antenne-installatie wordt overgenomen uit het Antenneregister (indien van toepassing) en gecorrigeerd aan de hand van het hoogtebestand (de hoogtes in het Antenneregister zijn relatief aan het maaiveld, AHN3 hanteert een absolute hoogtereferentie). Voor hypothetische antenne-installaties hanteren we een vaste hoogte (o.a. 4 meter voor een lantaarnpaal-opstelpunt).

Bijlage 2. Uitkomsten vraag-aanbodmodellering

Onderstaande tabel toont de groei in het aantal sectoren met een capaciteitstekort, het aantal benodigde nieuwe antenne-installaties en het aantal benodigde nieuwe antenne-opstelpunten voor de verschillende groeipercentages. Alle getoonde cijfers zijn ten opzichte van 2020. Dat betekent dat het getoonde aantal nieuwe opstelpunten zou moeten worden gerealiseerd om aan de vraag te kunnen voldoen, in de hypothetische situatie waarin de operators in de voorafgaande jaren geen nieuwe opstelpunten zouden hebben gerealiseerd. We gaan er wel vanuit dat er in deze jaren upgrades worden doorgevoerd, waaronder de ingebruikname van de 3,5 GHz-band en 5G NR. De afname tussen 2021 en 2022 wordt verklaard door de ingebruikname van het 3,5 GHz-spectrum.

Tabel 8 Uitkomsten vraag-model in aantallen sectoren, antenne-installaties en antenne-opstelpunten. Alle cijfers zijn ten opzichte van de situatie (en op basis van de infrastructuur) in september 2020. (bron: modellering Dialogic).

Vraag-groei	Jaar	Aantal sectoren met een capaciteitstekort	Benodigd aantal nieuwe antenne-installaties	Benodigd aantal nieuwe antenne-opstelpunten
Meest aannemelijke scenario – 35% vraaggroei (±5%p)				
30%	2021	49	43	28
30%	2022	10	10	7
30%	2023	15	14	9
30%	2024	20	19	12
30%	2025	20	19	12
30%	2026	27	24	16
35%	2021	52	45	29
35%	2022	12	12	8
35%	2023	18	17	11
35%	2024	23	20	13
35%	2025	25	22	14
35%	2026	39	36	23
40%	2021	55	48	31
40%	2022	15	14	9

Vraag-groei	Jaar	Aantal sectoren met een capaciteitstekort	Benodigd aantal nieuwe antenne-installaties	Benodigd aantal nieuwe antenne-opstelpunten
40%	2023	22	19	12
40%	2024	27	24	16
40%	2025	33	30	20
40%	2026	63	56	36
Versneld groeiscenario: 60% vraaggroei (±5%p)				
55%	2021	71	64	41
55%	2022	20	19	12
55%	2023	31	28	18
55%	2024	62	55	35
60%	2021	76	67	43
60%	2022	23	20	13
60%	2023	38	35	23
60%	2024	77	67	43
65%	2021	82	69	45
65%	2022	23	20	13
65%	2023	43	39	25
65%	2024	113	94	61
Scenario met afvlakking vraaggroei - 25% naar 15% in zes jaar				
25%	2021	47	41	27
23%	2022	9	9	6
20%	2023	11	11	7
18%	2024	14	14	9
15%	2025	11	11	7
15%	2026	15	14	9

Bijlage 3. Verantwoording

Betrokken belanghebbenden

In het onderzoek zijn diverse belanghebbenden betrokken. Het verkrijgen van inzichten en informatie van deze belanghebbenden is cruciaal om tot een breed gedragen en realistisch resultaat te komen. Primair betreft het de informatie waarover alleen de operators beschikken (technisch, maar ook ten aanzien van de strategie).

De input van de diverse belanghebbenden is door de onderzoekers zorgvuldig gewogen en waar mogelijk meegenomen. Uiteraard is hierbij rekening gehouden met eventuele (strategische en economische) belangen van de bevroegde partijen. Dat betekent dat aangeleverde gegevens zoveel mogelijk zijn vergeleken tussen operators, met literatuur, en met andere modelleringen en analyses van Dialogic.

Deelname aan het onderzoek door genoemde partijen dient niet te worden geïnterpreteerd als impliciete ondersteuning van de onderzoeksresultaten door deze partijen.

Klankbordgroep

Door de opdrachtgever is een klankbordgroep gevormd. Aan deze groep zijn tussenresultaten van het onderzoek gepresenteerd en is de mogelijkheid geboden hierop te reageren. De operators, VNG en Monet hebben van deze mogelijkheid gebruik gemaakt. Het ministerie van EZK heeft gereageerd op alle tussenversies. Tabel 9 geeft een overzicht van de samenstelling van de klankbordgroep.

Tabel 9 Overzicht leden klankbordgroep

Naam	Organisatie
Brian Benjamin	Gem. Almere
Burcu Kuzlak	Gem. Amsterdam
David Yoshikawa	Min. EZK
Eveline Santifort	MONET (APPR)
Han van Bussel	T-Mobile NL
Jim Walda	Gemeente Rotterdam
John van der Lee	T-Mobile NL
Jose Pedro Moure Sanchez	KPN
Maarten van Waveren	Min. EZK
Margret Leenarts	VodafoneZiggo
Marloes van Caspel	KPN
Max van Meerten	Gem. den Haag

Naam	Organisatie
Mirjam van Beek	Gem. Haarlemmermeer
Mirjam van Deursen	T-Mobile NL
Onno Mantel	Min. EZK
Petra Mesken	VNG
Rob Bongenaar	MONET
Rudolf van der Berg	Stratix / VNG
Vera Kuipers	Gem. Rotterdam
Walter Kroeze	VodafoneZiggo
Yvonne Trenning	Antennebureau

Interviewrespondenten

Aan de operators is voorafgaand aan de interviews, en in een enkel geval achteraf, een document toegezonden met voorlopige modelaannames van Dialogic (gebaseerd op literatuur). De operators hebben de mogelijkheid gekregen hierop te reageren. Eventuele reacties zijn door Dialogic verwerkt in haar definitieve modelaannames. Tabel 10 geeft een overzicht van de interviewrespondenten. Merk op dat buiten deze set ook andere partijen/personen zijn benaderd voor een gesprek.

Tabel 10 Overzicht interviewrespondenten

Naam	Organisatie
Ties Dammers	Agentschap
Paul Dingenouts	Telecom
Yvonne Trenning	Antennebureau
Joop Verhagen	Arcadis
Martin Standaart	
Marloes van Caspel	KPN
Gerard de Groot	
Eric Smeitink	
Jose Pedro Moure Sanchez	
Anne van Otterlo	Nokia
Jeroen Thijsen	
Rosalie Weijers	NOVEC
Rob Brown	
Fred Herrebout	T-Mobile
John van der Lee	
Miriam van Deursen	
Han van Bussel	
Jasper Rothuizen	
Ruud Koeyvoets	VodafoneZiggo
Margret Leenarts	
Michel Lenoir	
Walter Kroeze	
Sander van der Zande	

De input van interviewrespondenten is steeds vertrouwelijk behandeld en is geaggregeerd verwerkt in het onderzoek. Wanneer er sprake was een geheimhoudingsovereenkomst werd deze zodanig opgesteld dat deze de resultaten van het onderzoek niet hebben kunnen beïnvloeden.

Verwijzingen

- [1] Monet (2019). *Factsheet 5G. Wat betekent de komst van 5G voor uw gemeente?* [[vng.nl](#)]
- [2] Hofmans, T. (2021). *KPN verwerkte tijdens nieuwjaarsnacht record van 248 terabyte aan mobiele data* [[tweakers.net](#)]
- [3] ACM (2020). *Telecommonitor Q2 2020. Openbare rapportage* [[www.acm.nl](#)] Den Haag: ACM.
- [4] Bremmer, D. (2019). *Nederlandse mobiele netwerken beste en snelste van de wereld* [[www.ad.nl](#)]
- [5] Vodafone (2020). *Netwerk en dekking* [[www.vodafone.nl](#)]
- [6] KPN (2020). *Dekkingskaart mobiel bellen en internetten* [[www.kpn.com](#)]
- [7] T-Mobile (2020). *Coverage portal* [[dekkingskaart.t-mobile.nl](#)]
- [8] Telecompaper (2020). *T-Mobile zet Tele2 klanten over naar T-Mobile-netwerk* [[www.telecompaper.com](#)]
- [9] ACM (2020). *Telecommonitor tweede halfjaar 2019* [[www.acm.nl](#)] Den Haag,
- [10] Dialogic, van der Vorst, T., Brennenraedts, R., van Kerkhof, D., en Bekkers, R. (2014). *Fast forward : How the speed of the internet will develop between now and 2020* [[research.tue.nl](#)] Den Haag: NLkabel.
- [11] Dialogic, van der Vorst, T., Brennenraedts, R., Driessse, M., en Bekkers, R. (2016). *Beyond fast* [[www.dialogic.nl](#)] Den Haag: NLconnect.
- [12] KPN. *Snel internet in het buitengebied* [[www.kpn.com](#)]
- [13] Telecoms.com (2020). *Three UK reports 50 percent surge in mobile data usage* [[telecoms.com](#)]
- [14] AG Connect (2020). *Coronacrisis drukt mobiel dataverkeer* [[www.agconnect.nl](#)]
- [15] KPN (2020). *Stand van het netwerk, december 2020. Impact thuiswerken zichtbaar op netwerk KPN* [[www.overons.kpn](#)] Den Haag: KPN.
- [16] Ericsson (2020). *Ericsson Mobility Report. November 2020* [[www.ericsson.com](#)] Ericsson.
- [17] OECD (2019). *1.13. Mobile data usage per mobile broadband subscription (Dec. 2019)* [[oe.cd](#)]
- [18] Agentschap Telecom (2020). *KPN, T-Mobile en VodafoneZiggo verwerven frequenties via Multibandveiling* [[www.agentschaptelecom.nl](#)]
- [19] Agentschap Telecom (2020). *Meetprotocol dekkings- en snelheidsverplichting 700 MHz-vergunningen* [[www.agentschaptelecom.nl](#)] Groningen: Agentschap Telecom.
- [20] Keijzer (Staatssecretaris van Economische Zaken en Klimaat), M. (2020). *Kamerbrief over verdeling 3,5 GHz-band* [[www.rijksoverheid.nl](#)]
- [21] Dialogic, van der Vorst, T., en van Rees, J. (2019). *Onderzoek kavelgrootte veiling 3,5 GHz-vergunningen* [[www.rijksoverheid.nl](#)] Den Haag: Ministerie van Economische Zaken en Klimaat.
- [22] Dialogic, van der Vorst, T., Lelie, T., Veldman, J., Brennenraedts, R., en Smulders, P. (2018). *De behoefte aan spectrum voor specifieke, professionele breedbandige toepassingen* [[www.dialogic.nl](#)] Den Haag: Ministerie van Economische Zaken en Klimaat.
- [23] EC (2019). *European Commission to harmonise the last pioneer frequency band needed for 5G deployment* [[ec.europa.eu](#)]
- [24] EC (2019). *Uitvoeringsbesluit (EU) 2019/784 van de Commissie inzake de harmonisatie van de frequentieband 24,25-27,5 GHz voor terrestrische systemen die draadloze breedbanddiensten voor elektronische communicatie kunnen leveren in de Unie* [[eur-lex.europa.eu](#)]
- [25] Shi, W. (2020). *Vendors and operators demand 6GHz for 5G* [[telecoms.com](#)]
- [26] ITU (2019). *Resolution 245 (WRC-19). Studies on frequency-related matters for the terrestrial component of International Mobile Telecommunications identification in the frequency bands 3 300-3 400 MHz, 3 600-3 800 MHz, 6 425-7 025 MHz*, [[www.itu.int](#)] ITU.
- [27] Tweakers.net (2013). *KPN begint proef met 'minizendmasten' om capaciteit netwerk te vergroten* [[tweakers.net](#)]
- [28] Tweakers.net (2013). *'Mini-zendmasten' moeten mobiel internet Vodafone verbeteren* [[tweakers.net](#)]
- [29] Tweakers.net (2020). *NS en providers claimen beter bereik op Utrecht Centraal - update* [[tweakers.net](#)]
- [30] Vodafone (2018). *Vodafone stopt ondersteuning privézendmast SignaalPlus* [[tweakers.net](#)]

- [31]Tweakers.net (2013). *Ongeveer 80 procent klanten kan niet op wifi-hotspots T-Mobile in Rotterdam* [tweakers.net]
- [32]Ziggo (2020). *Ziggo Wifispots* [www.ziggo.nl]
- [33]KPN (2019). *Mobiel bellen via wifi van KPN* [www.kpn.com]
- [34](2010). *Convenant in het kader van het Nationaal Antennebeleid inzake de plaatsing van vergunningvrije antenne-installaties voor mobiele communicatie* [www.antennebureau.nl] Antennebureau.
- [35]Ericsson (2020). *Ericsson Mobility Report: 5G device outlook* [www.ericsson.com]
- [36]Tweakers.net (2020). *Veel incrementele updates. De smartphones van 2020 en 2021* [tweakers.net]
- [37]ACM (2021). *Leidraad. Het delen van mobiele netwerken* [www.acm.nl] Den Haag,
- [38]Agentschap Telecom (2020). *KPN, T-Mobile en VodafoneZiggo verwerven frequenties via Multibandveiling* [www.agentschaptelecom.nl]
- [39]Agentschap Telecom. *Antenneregister* [antenneregister.nl]
- [40]PA Consulting (2019). *Study on the coverage obligation for licenses and the transition period for licenses in the 2100 MHz band* [www.rijksoverheid.nl] Den Haag: Ministerie van Economische Zaken.
- [41]PA Consulting (2019). *Study on coverage obligations relating to 700 MHz band licenses* Den Haag: Ministerie van Economische Zaken.
- [42]Antennebureau (2020). *Plaatsing van antennes: uw rol als gemeente* [www.antennebureau.nl]
- [43]De Nieuwe Kaart van Nederland (2020). *Downloads* [nieuwekaartnl.nl]
- [44]Aedes (2020). *5G – wat betekent dat voor uw corporatie?* [www.aedes.nl]
- [45]Dense Air (2018). *Dense Air* [denseair.net]
- [46]De Tijd (2019). *Britten dingen mee naar stuk Belgisch 5G-netwerk* [www.tijd.be]
- [47]Nokia (2021). *Nokia deploys first 5G standalone RAN Sharing network for M1-StarHub Joint Venture in Singapore* [www.globenewswire.com]
- [48]Vodafone IT (2019). *Vodafone finalises network sharing partnership with Telecom Italia and agrees to combine italian towers with INWIT* [www.vodafone.com]
- [49]SDXCentral (2020). *Vodafone UK Activates 5G Multi-Operator RAN* [www.sdxcentral.com]
- [50]Monet (2020). *Welke rol kunnen woningbouwcorporaties spelen bij het realiseren van goed mobiel bereik en wat betekent de komst van 5G?* [dkvwwg750av2j6.cloudfront.net]
- [51]KIVI (2020). *5G-netwerk wordt mogelijk planologische nachtmerrie* [www.kivi.nl]
- [52]Stratix (2019). *Small cells en massive MIMO. Een verkenning (deskresearch)* Hilversum: Stratix.
- [53]SCF (2020). *SCF market status report July 2020* [scf.io] SCF.
- [54]Grapperhuis, F. (2019). *Uitfasering van het Waarschuwings- en Alarmeringssysteem* [www.rijksoverheid.nl] Den Haag: Ministerie van Justitie en Veiligheid.
- [55]Sbeglia, C. (2020). *Small cell market spotlight: New York City* [www.rcrwireless.com]
- [56]Benseny, J., Walia, J., Finley, B., en Hämmäinen, H. (2019). *Feasibility of the City-driven Neutral Host Operator: The case of Helsinki* Helsinki: ITS.
- [57]Vodafone Netherlands / Vodafone Group (2015). *Urban Small Cell Backhaul in Vodafone Netherlands. Small Cell Industry Awards 2015 Vodafone Entry* [www.smallcellforum.org]
- [58]EC (2020). *Uitvoeringsverordening (EU) 2020/1070 van de Commissie* [eur-lex.europa.eu] vol. L 234/11,
- [59](2020). *Besluit omgevingsrecht* [wetten.overheid.nl]
- [60]3GPP (2009). *TR 23.830. Architecture aspects of Home Node B (HNB) / Home enhanced Node B (HeNB)* [portal.3gpp.org]
- [61]Mohyeldin, E. (2016). *Minimum Technical Performance Requirements for IMT-2020 radio interface(s)* [www.itu.int]
- [62]Okumura, Y., Ohmori, E., Kawano, T., en Fukuda, K. (1968). *Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile service* vol. 16, pp. 825-783.
- [63]Hata, M. (1980). *Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services* vol. 29, pp. 317-325.
- [64]. *Okumura-Hata propagation prediction model for UHF range* Geneva: ITU. pp. 529-2.
- [65]Dialogic; van der Vorst, Tommy; van Rees, Jan; Veldman, Jasper; Brennenraedts, Reg (2016). *Mobile network capacity model* Groningen: Agentschap Telecom.

- [66]BusinessWire (2020). *CommScope Collaborates with Nokia on New Interleaved Passive-Active Antenna Supporting 5G Rollouts* [www.businesswire.com]
- [67]Mohyeldin, E. (2016). *Minimum Technical Performance Requirements for IMT-2020 radio interface(s)* [www.itu.int] Nokia.
- [68]Cho, B.B. Y. (2018). *Enabling Technologies for 5G. The next generation network* [www.waseda.jp] Nokia.
- [69]Nokia (2018). *5G deployment below 6 GHz. Ubiquitous coverage for critical communication. White paper.* [www.rrt.lt]
- [70]Qualcomm (2018). *How do we plan for 5G NR deployments?* [www.qualcomm.com]
- [71]Rijkswaterstaat (2020). *Dataset: Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN3)* [www.pdok.nl]
- [72]Kwink groep (2019). *Antennes, 5G en welstand. Een onderzoek naar belemmeringen en oplossingsrichtingen bij de plaatsing van antenne-installaties*
- [73]Verhulst, F. (2020). *Mysterie in Roosendaal: Wat zijn deze witte kastjes? Ook de burgemeester moet het opzoeken* [www.ad.nl] Roosendaal: AD.
- [74]Small Cell Forum (2017). *Simplifying small cell installation. Harmonized principles for compliance* [www.smallcellforum.org]
- [75]Commscope (2020). *4G/5G Outdoor Small Cell Solutions* [www.commscope.com]
- [76]Verkuijlen, J. (2020). *Lelijke gsm-antennes verstoort in monumentale gebouwen, kan jij ze zien?* [www.omroepbrabant.nl]
- [77]Compass Lexecon (2019). *When are departures from a market-based approach to spectrum licensing warranted?*Vodafone Group.
- [78]Dialogic, van der Vorst, T., en van Rees, J. (2019). *Technisch onderzoek synchronisatie 5G in 3400-3800 MHz*Groningen: Agentschap Telecom.
- [79]Antennebureau (2020). *Factsheet 'Lokaal beleid en kleine antennes'* [www.antennebureau.nl] Groningen: Agentschap Telecom.
- [80]PwC (2018). *Why 5G can't succeed without a small cell revolution* [gsma.force.com]
- [81]Telecompaper (2021). *MVNO List Netherlands* [www.telecompaper.com]
- [82]T-Mobile (2021). *T-Mobile gaat stoppen met ondersteuning 2G* [www.t-mobile.nl]
- [83]VodafoneZiggo (2019). *Vodafone schakelt 3G uit vanaf 4 februari 2020* [www.vodafoneziggo.nl]
- [84]KPN (2018). *We nemen afscheid: 3G wordt in 2022 vervangen door 4G* [forum.kpn.com]
- [85]Polese, M., Giordani, M., Zugno, T., Roy, A., Goyal, S., Castor, D., en Zorzi, M. (2019). *Integrated Access and Backhaul in 5G mmWave Networks: Potentials and Challenges* [arxiv.org] IEEE.
- [86]Staatssecretaris van Economische Zaken en Klimaat (2019). *Voortgangsrapportage Actieplan Digitale Connectiviteit* [www.rijksoverheid.nl] Den Haag,
- [87]Antennebureau (2021). *Aantal antenne-installaties voor mobiele communicatie* [www.antennebureau.nl]
- [88]Agentschap Telecom (2020). *KPN, T-Mobile en VodafoneZiggo verwerven frequenties via Multibandveiling* [www.agentschaptelecom.nl]
- [89](2020). *Regeling van de Staatssecretaris van Economische Zaken en Klimaat van 6 maart 2020, nr. WJZ/20063207, tot vaststelling van de maximale hoeveelheid frequentieruimte voor mobiele communicatie (Capregeling frequenties mobiele communicatie 2020)* [zoek.officielebekendmakingen.nl]
- [90](2021). *mmWave 5G in Europe. GSA Insight Webinar* [gsacom.com]
- [91](2020). *Regeling van de Staatssecretaris van Economische Zaken en Klimaat van 6 maart 2020, nr. WJZ/20063207, tot vaststelling van de maximale hoeveelheid frequentieruimte voor mobiele communicatie (Capregeling frequenties mobiele communicatie 2020)* [zoek.officielebekendmakingen.nl]



Contact:

Dialogic innovatie & interactie
Hooghiemstraplein 33
3514 AX Utrecht
Tel. +31 (0)30 215 05 80
dialogic.nl

