



Energiegebruik 5G-netwerk



Committed to the Environment

Energiegebruik 5G-netwerk

Dit rapport is geschreven door:

Thijs Scholten, Sjoerd van der Niet, Isabel Nieuwenhuijse en Joeri Vendrik

Delft, CE Delft, augustus 2020

Publicatienummer: 20.200122.102

Energie / Verbruik / Netwerken / Telecommunicatie / Technologie / Vraag / Toekomst

Opdrachtgever: Milieudefensie

Alle openbare publicaties van CE Delft zijn verkrijgbaar via www.ce.nl

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider Thijs Scholten (CE Delft).

© copyright, CE Delft, Delft

CE Delft

Committed to the Environment

CE Delft draagt met onafhankelijk onderzoek en advies bij aan een duurzame samenleving. Wij zijn toonaangevend op het gebied van energie, transport en grondstoffen. Met onze kennis van techniek, beleid en economie helpen we overheden, NGO's en bedrijven structurele veranderingen te realiseren. Al 40 jaar werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.

Inhoud

	Samenvatting	3
1	Inleiding	6
	1.1 Aanleiding en achtergrond	6
	1.2 Doel van het onderzoek	6
	1.3 Methode en afbakening	7
	1.4 Leeswijzer	8
2	Introductie 5G	9
	2.1 Wat is 5G?	9
	2.2 Mobiele netwerken en 5G in Nederland	9
	2.3 5G-infrastructuur	10
	2.4 Mogelijkheden 5G	11
	2.5 Alternatieven voor 5G	11
3	Energiegebruik 5G-netwerk	13
	3.1 Introductie	13
	3.2 Vraagontwikkeling 5G-data	13
	3.3 Energieverbruik 5G mobiele netwerk	16
	3.4 Energiegebruik in vergelijking met 4G	19
	3.5 Conclusie	20
4	Energiegebruik 5G-toepassingen	21
	4.1 Introductie	21
	4.2 Use case 1: Ultra Reliable Low Latency Communication (uRLLC)	21
	4.3 Use case 2: Massive Machine Type Communication (mMTC)	25
	4.4 Use case 3: Enhanced Mobile Broadband (eMBB)	29
	4.5 Conclusie	33
5	Overzicht energiegebruik door 5G	36
	5.1 Inleiding: verkenning met tal van onzekerheden	36
	5.2 Onderzoeksvraag 1: Energiegebruik van het 5G-netwerk	36
	5.3 Onderzoeksvraag 2: Energiegebruik van 5G-toepassingen	39
	5.4 Energiegebruik 5G in een breder perspectief	41
	Bibliografie	42
A	Energie en ICT-studie 2016	46
B	Lijst met geïnterviewde personen	47
C	Lijst met eenheden & afkortingen	48



Samenvatting

In dit rapport presenteren we een globale scenarioverkenning van het energiegebruik van het 5^{de} generatie mobiele netwerk (5G) en de voornaamste 5G ICT-toepassingen in 2030. Verschillende teleco-aanbieders rollen vanaf de zomer van 2020 hun 5G-netwerken uit in Nederland. De verwachting is dat het mobiele netwerk in 2030 helemaal is overgestapt op 5G. Dit zet de volgende stap naar snellere mobiele communicatie en maakt nieuwe ICT-toepassingen mogelijk.

In dit rapport staan de volgende twee onderzoeksvragen centraal:

1. Wat is het energiegebruik van het *5G mobiele netwerk* ten opzichte van de huidige mobiele netwerken, in 2030?
2. Hoe neemt in 2030 het energiegebruik van de ICT-sector toe als gevolg van *nieuwe ICT-toepassingen* die door 5G mogelijk worden gemaakt?

Voor de tweede vraag beschrijven we de hele keten van de toepassing, inclusief het gebruik van het 5G-netwerk door die toepassing. De resultaten van beide vragen kunnen daarom niet bij elkaar worden opgeteld.

Duidelijk is dat er richting 2030 tal van onzekerheden zijn. In de literatuur en onder experts zijn er toekomstvisies, maar de kwantitatieve onderbouwing hiervan ontbreekt vaak of laat zich niet goed vertalen naar Nederland. Voor beide onderzoeksvragen hebben daarom zowel een *laag* als een *hoog* scenario voor 2030 ontwikkeld.

Onderzoeksvraag 1: Energiegebruik van het 5G-netwerk

De energie-efficiëntie van het 5G-netwerk, uitgedrukt in energiegebruik per GB data, is in 2030 ongeveer een factor zeven lager dan van het 4G-netwerk en zijn voorgangers, zie Figuur 1. Dat betekent dat bij gelijkblijvend dataverbruik het energiegebruik van mobiele netwerken sterk zal dalen ten opzichte van nu. Op dit moment is het 5G-netwerk echter nog minder energiezuinig dan het 4G- en 3G-netwerk (ING Economics Department, 2019). Op korte termijn kan het 5G-netwerk dus wel voor een hoger energiegebruik zorgen, al is het 5G-dataverbruik nog beperkt in vergelijking met 2030.

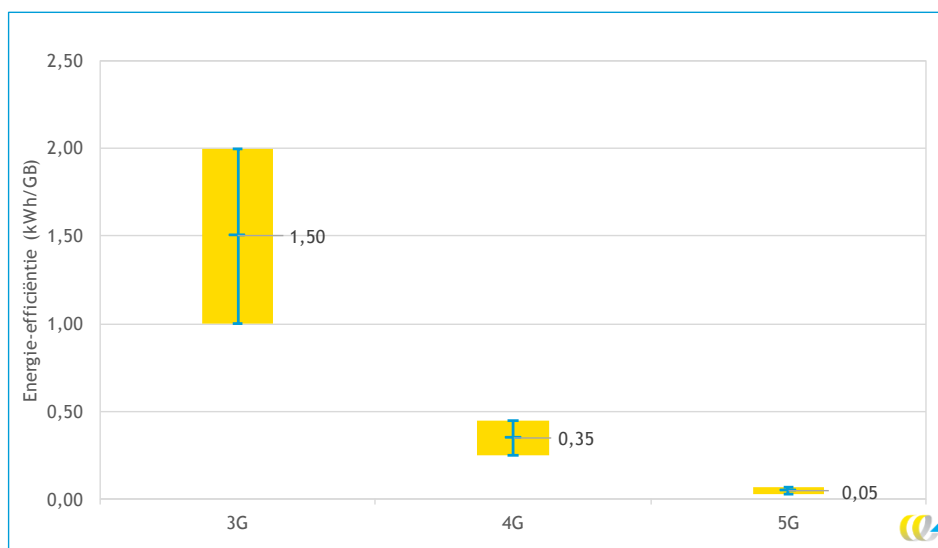
Richting 2030 zal het mobiel dataverbruik toenemen. Dat is deels een voortzetting van de huidige trend die ook zonder 5G gerealiseerd zal worden. De mogelijkheden die 5G biedt zorgen er echter voor dat het dataverkeer meer zal toenemen dan zonder de opkomst van 5G. Deze groei van het dataverkeer doet de verbeteringen van de energie-efficiëntie teniet. Voor 2019 is de inschatting dat het energiegebruik van het mobiele netwerk tussen 0,2 en 0,4 TWh/jaar ligt, in 2030 verwachten we dat dit bij een volledig 5G-netwerk tussen 0,3 en 2,7 TWh/jaar uitkomt. Het energiegebruik van mobiele netwerken neemt dus toe, mogelijk zelfs fors. Om de genoemde cijfers in perspectief te plaatsen: het verwachte (finale) elektriciteitsverbruik van Nederland in 2030 is 109 TWh/jaar (4% hoger dan nu) (PBL, 2019). In 2016 is het energiegebruik van de ICT-sector in 2030 geraamd op 7,3 tot 10,7 TWh/jaar (CE Delft, 2016), deze cijfers zijn inmiddels wel wat achterhaald en bevatten slechts deels de 5G-ontwikkelingen.



Maar ook zonder 5G-netwerk zou het energiegebruik toenemen als het 4G-dataverbruik zich blijft ontwikkelen volgens de huidige trend. Doordat het 4G-netwerk minder energie-efficiënt is dan het 5G-netwerk, zal dit energiegebruik naar verwachting zelfs hoger zijn in 2030 bij een volledig 4G-netwerk dan bij een 5G-netwerk.

In Figuur 1 is de energie-efficiëntie van de verschillende generaties netwerken gegeven. De resultaten van het totale energiegebruik van het netwerk zijn weergegeven in Figuur 2, voor onze scenario's van het dataverbruik: lage groeiverwachting en de hoge groeiverwachting van het dataverkeer. In beide scenario's groeit het dataverbruik bij 5G overigens aanzienlijk sterker dan bij 4G, onder andere door nieuwe 5G-toepassingen.

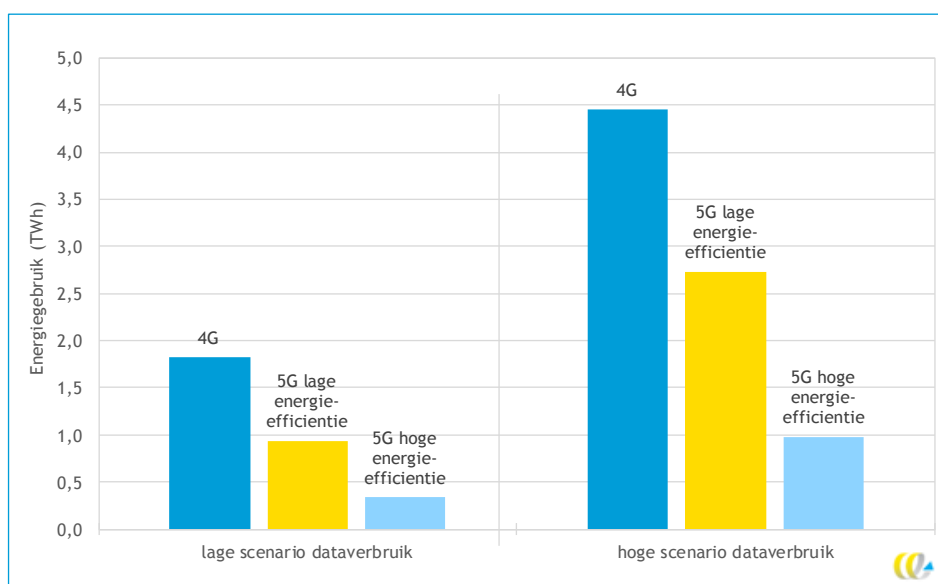
Figuur 1 - Energie-efficiëntie verschillende generaties mobiele netwerken in kWh/GB



Bronnen: (ING Economics Department, 2019; IEA, 2017; STL Partners, 2019).

De gele balkjes geven de bandbreedte aan, de genoemde cijfers zijn de middenwaarden.

Figuur 2 - Vergelijking energieverbruik 4G en 5G mobiele netwerk 2030 in TWh/jaar



Onderzoeksvraag 2: Energiegebruik van 5G-toepassingen

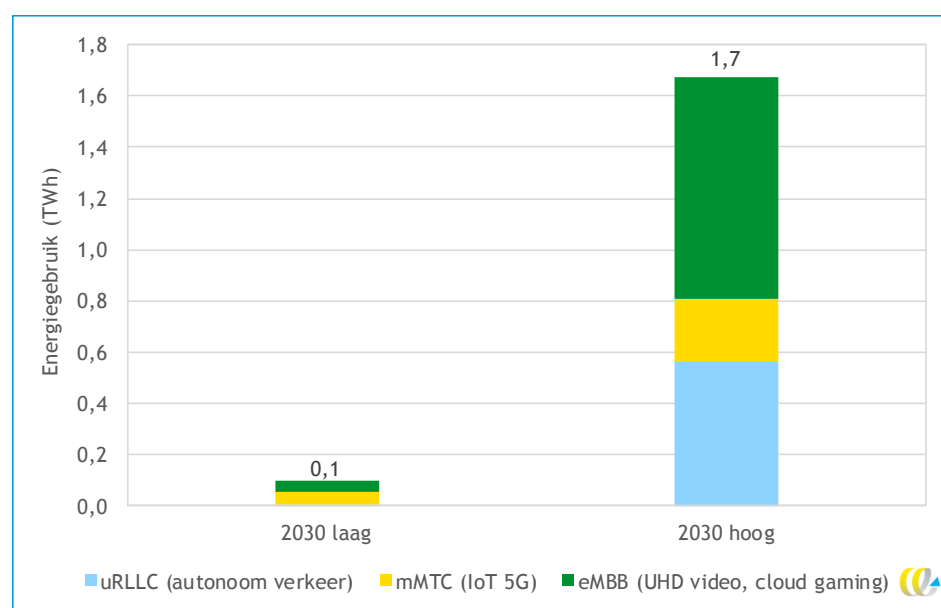
5G kan zorgen voor een flinke toename van energiegebruik van de ICT-sector vanwege de nieuwe mogelijke toepassingen (*use cases*) die door 5G gerealiseerd kunnen worden. In deze studie kijken we naar drie belangrijke toepassingen van 5G:

- Ultra Reliable Low Latency Communication (uRLLC): zelfsturend verkeer;
- Massive Machine Type Communication (mMTC): Internet-of-Things (IoT);
- Enhanced Mobile Broadband (eMBB): Ultra HD video en cloud gaming.

Deze toepassingen zorgen voor een toename in het dataverbruik en het gebruik van clouddiensten (datacenters). Het energiegebruik van de apparaten zelf is alleen voor IoT meegenomen, omdat in de andere gevallen het additionele energiegebruik moeilijk is vast te stellen.

Alle drie 5G *use cases* samen zorgen voor een forse toename in het dataverkeer en het gebruik van datacenters in 2030. De mogelijke gevolgen voor het energiegebruik van de ICT-sector in 2030 zijn weergegeven in Figuur 3. Het energiegebruik van de ICT-sector neemt naar onze inschatting toe met 0,1 tot 1,7 TWh/jaar door de ontwikkelingen binnen de nieuwe 5G *use cases*. De relatief grote range wordt voornamelijk veroorzaakt door onzekerheid in de mate waarin zelfsturend verkeer zich ontwikkelt en het gebruik van hoge kwaliteit video's. Het gaat om additioneel energiegebruik als gevolg van nieuwe mogelijkheden die door het 5G-netwerk gerealiseerd worden, bovenop het overige energiegebruik van de ICT-sector in 2030.

Figuur 3 - Additioneel energiegebruik door 5G ICT toepassingen (*use cases*) in 2030 in TWh/jaar



Opmerking: Dit energiegebruik is inclusief het energiegebruik van netwerk en datacenter behorend bij de dataoverdracht, deze cijfers zijn dus niet simpelweg op te tellen bij het energiegebruik van het 5G-netwerk (Onderzoeksvraag 1).

In een breder perspectief kan opgemerkt worden dat nieuwe ICT-toepassingen ook kunnen bijdragen aan energiebesparingen in andere sectoren, bijvoorbeeld doordat verkeer efficiënter verloopt. Dit is in deze studie niet verder onderzocht.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en achtergrond

ICT-apparaten zijn de afgelopen jaren energie-efficiënter geworden, tegelijkertijd is het gebruik van ICT de laatste decennia sterk toegenomen. Er is een trend naar meer data-verbruik, automatisering (zoals zelfrijdende auto's) en steeds sneller internet. De ontwikkeling van 5G, de 5^{de} generatie mobiele netwerken die nog sneller mobiel internet en verdere automatisering mogelijk moet maken, past in deze trend.

Vanaf 2020 wordt in Nederland geleidelijk het 5G mobiele communicatienetwerk uitgerold door verschillende telecomaandbieders. De uitrol van 5G zet de volgende stap naar snellere mobiele communicatie en een grotere bandbreedte voor dataoverdracht. Dit maakt nieuwe ICT-toepassingen mogelijk, waardoor naar verwachting het dataverbruik verder zal gaan toenemen. Afhankelijk van de behaalde efficiëntieverbeteringen, zal dit naast het energiegebruik van het 5G-netwerk ook gevolgen hebben voor energiegebruik van de ICT-sector.

In dit onderzoek is op hoofdlijnen in beeld gebracht wat het effect is van 5G op het energiegebruik van de ICT-sector in Nederland in 2030.

1.2 Doel van het onderzoek

Dit onderzoek heeft als doel om op hoofdlijnen antwoord te geven op de volgende twee vragen:

1. Wat is het energiegebruik van het *5G mobiele netwerk* ten opzichte van de huidige mobiele netwerken in 2030?
2. Hoe neemt in 2030 het energiegebruik van de ICT-sector toe als gevolg van *nieuwe ICT-toepassingen* die door 5G mogelijk worden gemaakt?

Merk op dat de twee onderzoeksvragen los van elkaar staan. Hoewel ze samen een beeld geven van de energie-impact van 5G, zijn de resultaten niet op te tellen omdat er een gedeeltelijke overlap is. De toename van energiegebruik van de ICT-sector door 5G-toepassingen omvat immers ook voor een deel het energiegebruik van het 5G-netwerk naar rato van het gebruik van het 5G-netwerk door die toepassing. De hele ICT-keten is hier per toepassing beschouwd.

Het 5G-netwerk is in staat om efficiënt met energie om te gaan, maar wordt in eerste instantie naast bestaande 2G/3G/4G-antennes geplaatst. Het levert hierdoor op de korte termijn deels additioneel energieverbruik op. Uitrol van het netwerk kost tijd en het aantal apparaten dat gebruik maakt van 5G zal geleidelijk groeien. We kijken daarom naar het verwachte energiegebruik in 2030. Dit sluit aan bij de zichtperiode van onze eerdere studie *Trends ICT en Energie 2013-2030* (CE Delft, 2016).

1.3 Methode en afbakening

Op basis van literatuur en interviews met experts zijn gegevens verzameld om een beeld te vormen over het energiegebruik van een landelijk 5G-netwerk in Nederland en het directe en indirecte energiegebruik (zoals cloud services) van 5G-apparaten. Hiermee is op hoofdlijnen een zo goed mogelijke inschatting gemaakt van het effect op het energiegebruik van mobiele netwerken en de nieuwe ICT-toepassingen die het mogelijk maakt.

Scenario's

Tien jaar vooruitkijken in een snel ontwikkelende ICT-sector is lastig, daarom werken we met twee scenario's. De scenario's geven een beeld van de mogelijke richtingen waarop het energiegebruik van 5G zich kan ontwikkelen, gegeven alle onzekerheden die er zijn. We hanteren twee scenario's die samen een realistische bandbreedte van de mogelijke ontwikkelingen weergeven. In het *hoge scenario* gaan we uit van een sterke groei van het aantal gebruikers, apparaten en het dataverbruik, terwijl de energie-efficiëntie en energiegebruik van apparaten zich ontwikkelen volgens de minst gunstige raming. In het *lage scenario* gaan we uit van een minder forse groei van het aantal gebruikers, apparaten en het dataverbruik, terwijl de energie-efficiëntie en energiegebruik van apparaten zich ontwikkelen volgens de meest gunstige raming.

Afbakening

Dit onderzoek richt zich op een verkenning van het energiegebruik van het 5G-netwerk en het aan 5G gerelateerde energiegebruik van de ICT-sector in Nederland in 2030. Het gaat hierbij om de energievraag als gevolg van Nederlandse ICT-toepassingen. Omdat internet en clouddiensten wereldwijd verspreid zijn, is het niet bekend of dit deel van de energievraag ook daadwerkelijk zal leiden tot energieverbruik in Nederland. Anderzijds zullen ook 5G-toepassingen in het buitenland zorgen voor energiegebruik bij bijvoorbeeld Nederlandse datacenters. Dit aspect valt buiten beschouwing van deze studie.

Voor de afbakening van de ICT-sector is aangesloten bij de definitie zoals gehanteerd in de studie *Trends ICT en Energie 2013-2030* (CE Delft, 2016). Ruwweg betekent dit dat IT-, telecom en multimedia-apparatuur onderdeel zijn van de ICT-sector. Dat betekent dat de telecommodule van een zelfsturend voertuig onder het energiegebruik van ICT-sector valt, maar het energiegebruik van het voertuig niet. Buiten de ICT-sector kunnen 5G-toepassingen zorgen voor energiebesparing in de sectoren waar het wordt toegepast, bijvoorbeeld doordat automatisering zorgt voor efficiëntere processen. Indien dit overduidelijk het geval is, hebben we dit kwalitatief besproken. Omdat we ons richten op de ICT-sector is de verdere uitwerking hiervan buiten de scope van deze studie.

Raamwerk kwantificering

Voor de kwantificering richten we ons op het energiegebruik van de 5G mobiele netwerk (de infrastructuur), de 5G-toepassingen (de apparaten) en het extra energiegebruik van datacenters (clouddiensten) door die toepassingen. We schatten het additionele energieverbruik in door bijvoorbeeld te kijken naar de typische waarden voor vermogen van de ICT-apparaten die gebruik gaan maken van 5G, de gebruiksduur, het verwachte aantal devices, de dataoverdracht en de energie-efficiëntie (kWh/GB).



Dit is uitgewerkt in drie *use cases*, waarin een toepassing centraal staat en is uitgewerkt:

- Use case 1: Ultra Reliable Low Latency Communication (uRLLC).
- Use case 2: Massive Machine Type Communication (mMTC).
- Use case 3: Enhanced Mobile Broadband (eMBB).

Binnen de *use cases* zijn andere toepassingen niet of in minder detail uitgewerkt. In welke mate het energiegebruik van deze use cases toegerekend kan worden aan 5G hangt af van het alternatieve communicatiekanaal (wifi, 4G, kabel, etc.) dat eventueel gebruikt zou worden als 5G niet aanwezig is. We maken op hoofdlijnen inschattingen of het energiegebruik additioneel is als gevolg van 5G.

1.4 Leeswijzer

In het eerstvolgende hoofdstuk zullen we een introductie geven op 5G met antwoorden op de vragen: wat is het, wat zijn de mogelijkheden en zijn er alternatieven? Hierna gaan we in Hoofdstuk 3 in op het energiegebruik van het 5G mobiele netwerk (de infrastructuur) en geven we antwoord op de eerste onderzoeksvraag. In Hoofdstuk 4 gaan we in op de onderscheidende toepassingen (*use cases*) van 5G en geven we antwoord op de tweede onderzoeksvraag. Tot slot brengen we alles samen in Hoofdstuk 5 waar we een totaaloverzicht geven van het energiegebruik door 5G.

2 Introductie 5G

2.1 Wat is 5G?

5G is de nieuwe generatie (5^e generatie) standaard van mobiele netwerken en is de opvolger van het 4G mobiele netwerk. 5G-netwerken worden ook wel NR (New Radio) netwerken genoemd. Ten opzichte van het huidige 4G-netwerk zal een 5G-netwerk een stuk sneller zijn¹, kan het meer data versturen en is het betrouwbaarder. Het 5G-netwerk zal op andere frequenties actief zijn dan de voorgaande generaties, voornamelijk op 700 MHz, 26 GHz en vanaf 2022 ook 3,5 GHz.

Door de verbeterde eigenschappen van 5G zullen er nieuwe toepassingen mogelijk zijn en zal naar verwachting het dataverkeer en het aantal verbindingen tussen telecommunicatietoepassingen sterk toenemen. Daarnaast is de snelheid en betrouwbaarheid van 5G zo hoog dat het kan concurreren met vast internet via een kabel.

2.2 Mobiele netwerken en 5G in Nederland

In Nederland wordt 5G momenteel alleen door Vodafone op commerciële schaal aangeboden (sinds eind april). Er wordt al wel langere tijd mee geëxperimenteerd in Nederland. Zo wordt 5G getest in een proeftuin in Noord-Groningen. In deze proeftuin worden verschillende toepassingen van 5G getest².

In Nederland worden er mobiele netwerken beheerd door T-mobile, KPN en VodafoneZiggo. Zij zijn al begonnen met het geschikt maken van het netwerk voor 5G. Deze zomer worden de eerste set beschikbare frequentiebanden geveild, waarna de 5G-netwerken snel beschikbaar kunnen komen.

Momenteel maakt het grootste gedeelte van de mobiele gebruikers in Nederland gebruik van het 4G-netwerk. Er worden nog steeds nieuwe 4G-antennes bijgeplaatst, aangezien het dataverkeer van smartphones en tablets groeit. Naast het 4G-netwerk zijn ook het 2G- en het 3G-netwerk nog actief in Nederland³. Deze netwerken zijn nog actief omdat er nog steeds apparaten zijn die er gebruik van maken. Op den duur zullen deze netwerken uitgeschakeld worden. De grote providers zijn al bezig met het geleidelijk uitfasen van 2G- en 3G-netwerken, dit zal naar verwachting uiterlijk 2025 zijn afgerond⁴. Het 4G-netwerk zal na de implementatie van het 5G-netwerk ook nog langere tijd actief blijven, al is nog onduidelijk hoe lang. Op den duur zouden de frequenties die hiermee vrijkomen ingezet kunnen worden voor 5G, om te voldoen aan de groeiende vraag naar datacapaciteit.

¹ Het is de verwachting dat de snelheid van 5G in 2023 13 keer hoger is dan de snelheid van 4G (Cisco, 2020).

² [Over 5Groningen](#) [Over 5Groningen](#)

³ Het 2G-netwerk (GSM) is in Nederland geïntroduceerd in 1992. Met dit netwerk kun je bellen en korte tekstberichten versturen. Het 3G-netwerk (UMTS) werd geïntroduceerd in 2001. Hiermee kunnen grotere hoeveelheden data verstuurd worden en hiermee kun je ook gebruik maken van het internet.

⁴ [Joulz: Meest gestelde vragen | Uitfasering 2G](#) [Joulz: Meest gestelde vragen | Uitfasering 2G](#)



2.3 5G-infrastructuur

Voor de aanleg van nieuwe 5G-infrastructuur kan gedeeltelijk gebruik gemaakt worden van de huidige zendmasten. De nieuwe 5G-antennes kunnen bij de bestaande 2G-, 3G- en 4G-antennes gehangen worden en worden aangesloten op de bestaande basisstations en infrastructuur. Ook kunnen de 4G-antennes worden vervangen door 4G/5G-combinatie-antennes. 5G maakt gebruik van hogere frequenties dan de eerdere generaties mobiele netwerken, waardoor het signaalbereik (dekking) van de antenne kleiner is. In eerste instantie zullen er vooral macro-antennes geplaatst worden die gebruik maken van de lagere frequentiebanden. Later, na 2026, zullen er mogelijk ook small-scale antennes geplaatst worden die gebruik maken van mmWave (26 GHz) frequenties. Deze hebben veel capaciteit, maar weinig bereik. Het is de verwachting dat deze alleen voor specifieke toepassingen gebruikt zullen worden, zoals op drukke locaties, denk aan voetbalstadions. Bij een kleiner bereik zullen meer antennes nodig zijn om een goede dekking te bereiken.

Het is noodzakelijk dat er slimmere antennes komen die slimmer omgaan met energie en daardoor efficiënter zijn, om te voorkomen dat het elektriciteitsgebruik sterk stijgt door de stijging in het dataverkeer. Momenteel zenden antennes een uniform signaal uit onder een hoek van 120 graden, zodat het bereik het grootst is. Dit betekent dat het signaal rondom de antenne op gelijke afstand overal even sterk is, ondanks dat het mobiele dataverbruik niet overal gelijk is. Daarom zijn er 5G-antennes ontwikkeld die bundels maken die gebruikers die veel data verbruiken actief volgen (*beam-forming*). Deze zogenaamde massive mimo-antennes (multiple input, multiple output) kunnen op drukke plekken gebruikt worden om gericht gebruikers te bereiken.

Figuur 4 - Illustratie van de huidige type zendmasten (links) en massive mimo-antennes (rechts)



Naast 5G-antennes is er ook een glasvezelnetwerk nodig waar de antennes op aangesloten worden. Hiervoor kan het huidige glasvezelnetwerk van 4G gebruikt worden. Het is de verwachting dat er weinig aanpassingen nodig zijn.

De data die getransporteerd worden in het 5G-netwerk wordt vervolgens in veel gevallen ook opgeslagen in servers in datacenters. In de toekomst zal daarvoor vaker gebruik worden gemaakt van 'Edge Computing'. Hierbij wordt de data niet opgeslagen in een centraal datacenter, zoals nu het geval is, maar wordt het dichterbij de bron verwerkt, bijvoorbeeld bij een decentraal datacenter nabij de 5G-antenne. Dit vermindert de vertraging in de communicatie. Bij Edge Computing wordt de data verwerkt in kleine datacenters of in antennes of de apparaten zelf.

2.4 Mogelijkheden 5G

Door de implementatie van een 5G-netwerk wordt de snelheid van het datatransport flink hoger ten opzichte van een 4G-netwerk. Daarnaast wordt de vertraging (latentie) lager en heeft een 5G-netwerk een hogere betrouwbaarheid. De betrouwbaarheid van mobiele netwerken (ook 2G/3G/4G) is al hoger dan van bijvoorbeeld wifi, aangezien er gebruik gemaakt wordt van gelicenseerde frequenties en het is de verwachting dat deze betrouwbaarheid nog hoger wordt door 5G. Daarnaast kan er een grote dichtheid aan apparaten verbonden zijn met het netwerk zonder dat dit problemen oplevert.

De verbeteringen op deze gebieden zorgen ervoor dat nieuwe ICT-diensten mogelijk worden. Deze nieuwe mogelijkheden kunnen in drie hoofdcategorieën verdeeld worden:

1. Het transport van grotere hoeveelheden data maakt nieuwe mobiele toepassingen mogelijk zoals Ultra HD video streamen (4K/8K), virtual en augmented reality (VR en AR) en cloud gamen. Deze vallen onder de eerste hoofdcategorie, **enhanced Mobile Broadband (eMBB)**.
2. De verbeteringen op het gebied van vertraging en betrouwbaarheid (latentie) maken ook nieuwe toepassingen mogelijk, zoals zelfsturend rijden. Bij zelfsturend rijden is snelle en betrouwbare communicatie tussen de voertuigen nodig om onveilige situaties te voorkomen. Deze toepassing valt onder de categorie **Ultra Reliable Low Latency Communication (uRLLC)**.
3. Tot slot kan een 5G-netwerk bijdragen aan verdere ontwikkeling van zelfstandige communicatie tussen apparaten (**Massive Machine Type Communication, oftewel mMTC**). Deze zelfstandige communicatie tussen apparaten leidt tot een zogenaamde Internet-of-Things (IoT), waarbij apparaten data verzamelen met sensoren en deze data onderling uitwisselen en zelfsturend handelen op basis van deze data. Mogelijke toepassingen hiervan zijn een slimme huizen, slimme fabrieken, smart grids of omgevingsmonitoring.

2.5 Alternatieven voor 5G

Door de hogere snelheid, lagere latentie en hogere betrouwbaarheid van 5G worden nieuwe ICT-diensten mogelijk. 5G is echter niet in alle gevallen een vereiste voor deze toepassingen, in sommige gevallen voldoet 4G ook of kan er gebruik gemaakt worden van vaste netwerken of wifi.

Bij eMBB-toepassingen, zoals VR/AR of Ultra HD video streamen, is de capaciteit van 4G niet voldoende. Voor een deel van deze toepassingen kan wel gebruik gemaakt worden van wifi of vaste netwerken.

Bij uRLLC-toepassingen zoals zelfsturend rijden, slimme industrie of smart grids kan geen of beperkt gebruik gemaakt worden van 4G, wifi of vast internet. Dit komt doordat er bij deze toepassingen strenge eisen zijn aan de latentie en betrouwbaarheid, waar op dit moment alleen 5G aan kan voldoen.

Bij mMTC-toepassingen is 5G vaak geen noodzaak. Momenteel wordt er in veel gevallen gebruik gemaakt van wifi of andere niet-mobiele netwerken en ook in de toekomst zal dit zo zijn. Dit geldt bijvoorbeeld bij IoT-toepassingen in woningen. Er zijn echter ook IoT-toepassingen waarbij er hoge eisen zijn wat betreft latentie en betrouwbaarheid, zoals robotica, zelfsturende toepassingen en bepaalde realtime mens-machine interacties. Voor deze toepassingen zal 5G noodzakelijk zijn. Daarnaast zijn er IoT-toepassingen waarbij



het aantal verbindingen per oppervlakte-eenheid erg groot is. Ook voor deze toepassingen is 5G een logischere keuze. Tot slot zal 5G bij zakelijke gebruikers vaak de voorkeur hebben aangezien de betrouwbaarheid hoger is, onder andere omdat er gebruik gemaakt wordt van gelicenseerde frequenties.



3 Energiegebruik 5G-netwerk

3.1 Introductie

In dit hoofdstuk beschouwen we de eerste onderzoeksvraag: wat is het energiegebruik van het *5G mobiele netwerk* ten opzichte van de huidige mobiele netwerken in 2030?

Bij het energieverbruik van een 5G mobiele netwerk gaat het om het energieverbruik van de infrastructuur die noodzakelijk is om het 5G-netwerk te laten werken. Het gaat hierbij voornamelijk om het energieverbruik van de zendapparatuur. Deze bestaat uit een basisstation en een radiodeel welke het signaal uitzendt. Daarnaast zijn er nog andere componenten die ook energie verbruiken, zoals het glasvezelnetwerk waar de zendapparatuur op aangesloten is.

Het energieverbruik van de zendapparatuur wordt door twee factoren bepaald. Enerzijds door het dataverbruik (uitgedrukt in byte) en anderzijds door de energie-efficiëntie van de apparatuur (in kWh per byte). Het energieverbruik van het netwerk is het product van deze twee.

Het dataverbruik stijgt al jarenlang exponentieel en het is de verwachting dat dit in de toekomst door zal zetten. Aan de andere kant worden er ook grote stappen gezet op het gebied van energie-efficiëntie. Hoe deze ontwikkelingen zich ten opzichte van elkaar verhouden en wat het effect is op het totale energieverbruik van de 5G-infrastructuur wordt in dit hoofdstuk besproken. We beginnen met de vraagontwikkeling naar 5G-data en daarna kijken we naar de energie-efficiëntie van het 5G-netwerk, ook in relatie tot de huidige mobiele netwerken.

3.2 Vraagontwikkeling 5G-data

Aantal verbindingen

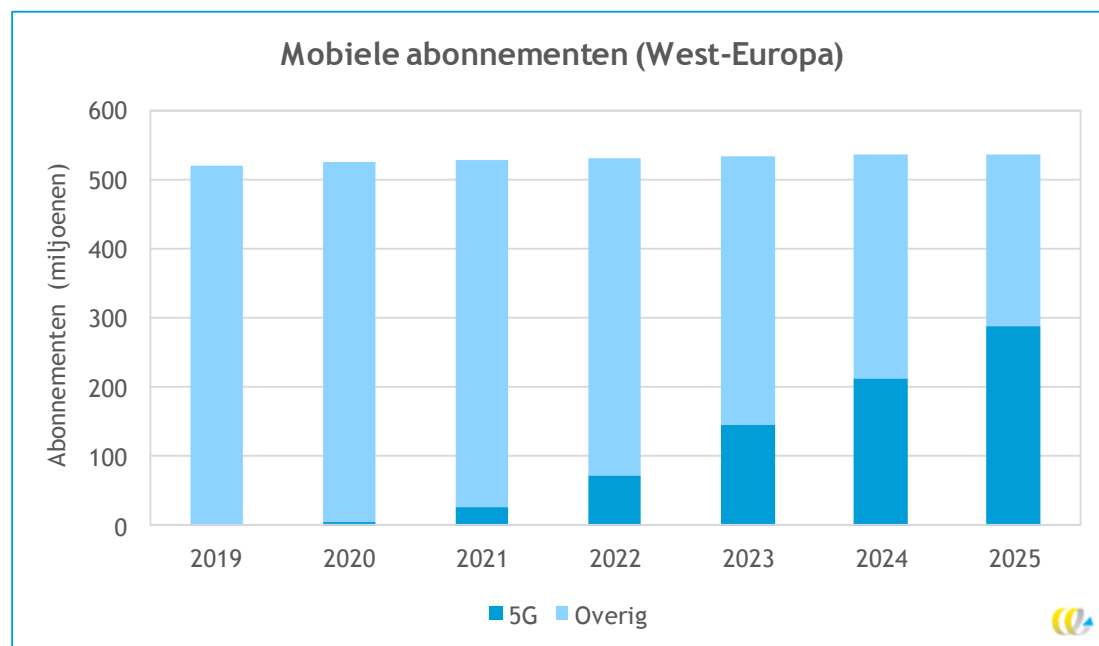
Op den duur zal het 5G-netwerk de oudere generaties mobiele netwerken steeds meer gaan vervangen. Het is echter de verwachting dat de overstap van 4G naar 5G langzaam op gang zal komen. Deze gestage overstap van 4G naar 5G heeft verschillende oorzaken. Ten eerste zullen de eigenschappen van 5G in de eerste jaren nog niet kunnen voldoen aan de potentie, waardoor 4G in die periode nog nauwelijks zal onderdoen voor 5G. Het is de verwachting dat dit zal veranderen als de 3,5 GHz frequentieband beschikbaar komt, dit moet de belangrijkste 5G-band worden. Deze band komt pas in de tweede helft van 2022 beschikbaar⁵. Daarnaast hebben mobiele apparaten nieuwe chips nodig om gebruik te kunnen maken van 5G. Dit betekent dat je een nieuwe telefoon moet kopen om hier gebruik van te kunnen maken, tegen 2030 zal dit bij alle mobiele telefoons naar verwachting wel het geval zijn.

De ontwikkeling van het aantal mobiele abonnementen met 5G in West-Europa is te zien in Figuur 5 (Ericsson, 2019b). In 2025 zal 5G naar verwachting bijna 60% van de mobiele abonnementen beslaan.

⁵ [NOS: 5G komt dit jaar naar Nederland, maar kent langzame start](#)



Figuur 5 - Prognose ontwikkeling mobiele abonnementen West-Europa⁶



Bron: (Ericsson, 2019b).

Opmerking: Het totaal aantal mobiele abonnementen in West-Europa zal nog maar zeer beperkt groeien.

Voor 2030 verwachten we dat alle mobiele abonnementen gebruik maken van 5G. Daarnaast is het de verwachting dat het aantal mobiele abonnementen gelijk blijft na 2025, omdat de markt dan verzadigd is. Als we deze groei doorvertalen naar Nederland, waar momenteel 19,8 miljoen mobiele bundels zijn (ACM, 2019), betekent dit dat er in 2030 ruim 20 miljoen mobiele abonnementen met 5G zijn.

In andere toepassingen, zoals IoT en zelfsturend verkeer, zal het aantal verbindingen wel sterk toenemen. In 2019 waren er ongeveer 6 miljoen IoT-verbindingen in Nederland (ACM, 2019). Dit aantal zal naar verwachting groeien naar 40 tot 105 miljoen verbindingen in 2030 (zie Paragraaf 4.3). Het aantal mobiele verbindingen voor zelfsturend verkeer is momenteel verwaarloosbaar. Dit zal naar verwachting groeien naar 96 duizend tot 1 miljoen verbindingen in 2030 (zie Paragraaf 4.2).

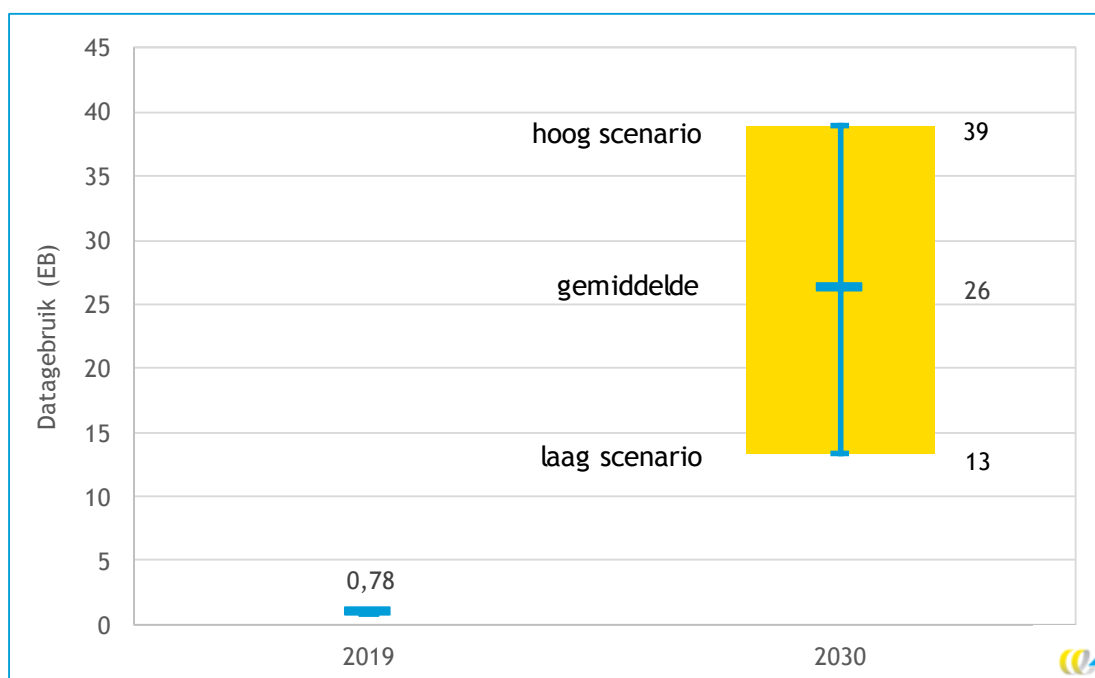
Dataverkeer

Met het aantal verbindingen zal ook het dataverbruik toenemen. Het mobiele dataverbruik groeit al jarenlang exponentieel. In de afgelopen drie jaar is het dataverbruik in West-Europa elk jaar met gemiddeld 40% gegroeid (Cisco, 2020). Dit komt niet doordat het aantal mobiele gebruikers toeneemt, maar doordat het dataverbruik per gebruiker stijgt. Het is de verwachting dat deze trend zich met enige afvlakking de komende jaren door gaat zetten (Cisco, 2020; Ericsson, 2019b). Deze groei wordt versterkt door de grotere bandbreedte, de hogere snelheid en de nieuwe mogelijkheden van een 5G-netwerk.

⁶ Dit omvat op basis van de kaart van Ericsson: Andorra, België, Cyprus, Denemarken (incl. Groenland), Duitsland, Finland, Frankrijk, Griekenland, Ierland, IJsland, Italië, Liechtenstein, Luxemburg, Malta, Monaco, Nederland, Noorwegen, Oostenrijk, Portugal, Spanje, Verenigd Koninkrijk, Zweden en Zwitserland.

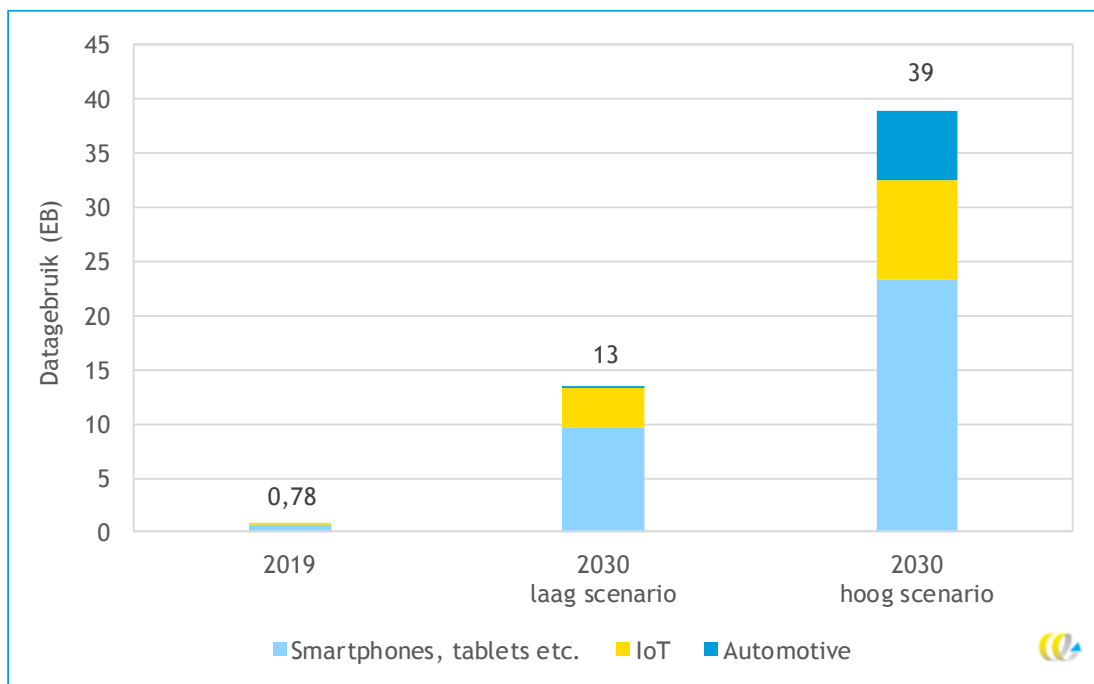
In 2019 was het mobiele dataverkeer in Nederland circa 0,78 EB (ACM, 2019)⁷, inclusief IoT-toepassingen. Voor een inschatting van het dataverbruik in 2030 is gebruik gemaakt van verschillende prognoses (Cisco, 2020; Ericsson, 2019b; ING Economics Department, 2019). Deze prognoses hebben we geëxtrapoleerd naar 2030. Bij deze prognoses is alleen het dataverbruik van mobiele apparaten meegenomen (voornamelijk smartphones, tablets, etc.). Daarom is het dataverbruik van IoT-toepassingen en zelfsturend verkeer, zoals becijferd in het volgende hoofdstuk, hierbij opgeteld. Op basis hiervan verwachten we in 2030 ruim 13 EB aan dataverkeer in het *lage scenario* en bijna 39 EB aan dataverkeer in het *hoge scenario* in Nederland. De verwachte ontwikkeling van mobiel dataverkeer in 2030 is in Figuur 6 weergegeven in vergelijking met 2019. Er is een grote bandbreedte in de prognose voor het dataverbruik in 2030, dit komt door de uiteenlopende prognoses van Cisco en Ericsson wanneer deze geëxtrapoleerd worden en door de onzekerheid in de ontwikkeling van het dataverbruik van met name zelfsturend verkeer. De opsplitsing in de verschillende verbruikscategorieën is weergegeven in Figuur 6.

Figuur 6 - Prognose mobiel dataverkeer Nederland 2030 ten opzichte van 2019 in EB



⁷ Een EB, oftewel Exabyte, is gelijk 10^{18} bytes oftewel 1 miljard Gigabytes. Voor de beeldvorming: dat staat gelijk aan ongeveer 333 miljoen uur Netflix kijken op HD-kwaliteit.

Figuur 7 - Opsplitsing mobiel dataverkeer 2030 lage en 2030 hoge scenario in EB



Opmerking: Zonder 5G ontwikkelt het mobiele dataverkeer zich minder snel, zie Paragraaf 3.4.

3.3 Energieverbruik 5G mobiele netwerk

Energie-efficiëntie

Het is de verwachting dat het dataverbruik sterk zal toenemen in een 5G-netwerk ten opzichte van de eerdere generaties netwerken. Dit betekent dat de energie-efficiëntie van het netwerk flink moet verbeteren, anders zal het energieverbruik van het mobiele netwerk enorm stijgen (evenals de energierekening van de providers).

Bij de ontwikkeling van voorgaande netwerken, zoals 3G en 4G, was energie-efficiëntie geen concrete doelstelling maar werd aangenomen dat deze efficiëntie vanzelf beter werd door technologische ontwikkeling. Voor 5G zal deze autonome efficiëntieverbetering echter te langzaam gaan om te compenseren voor de toename in het dataverkeer. Dit betekent dat energie-efficiëntie een van de belangrijkste aandachtspunten is voor 5G, ook omdat er door de hogere frequenties meer zendmasten en apparatuur nodig is om dezelfde dekking als 4G te krijgen. Zo heeft Ericsson, een producent van telecomnetwerkapparatuur, de ambitie gesteld dat het 5G-netwerk in 2022 tien keer efficiënter moet zijn dan het 4G-netwerk in 2017 (Ericsson, 2019b).

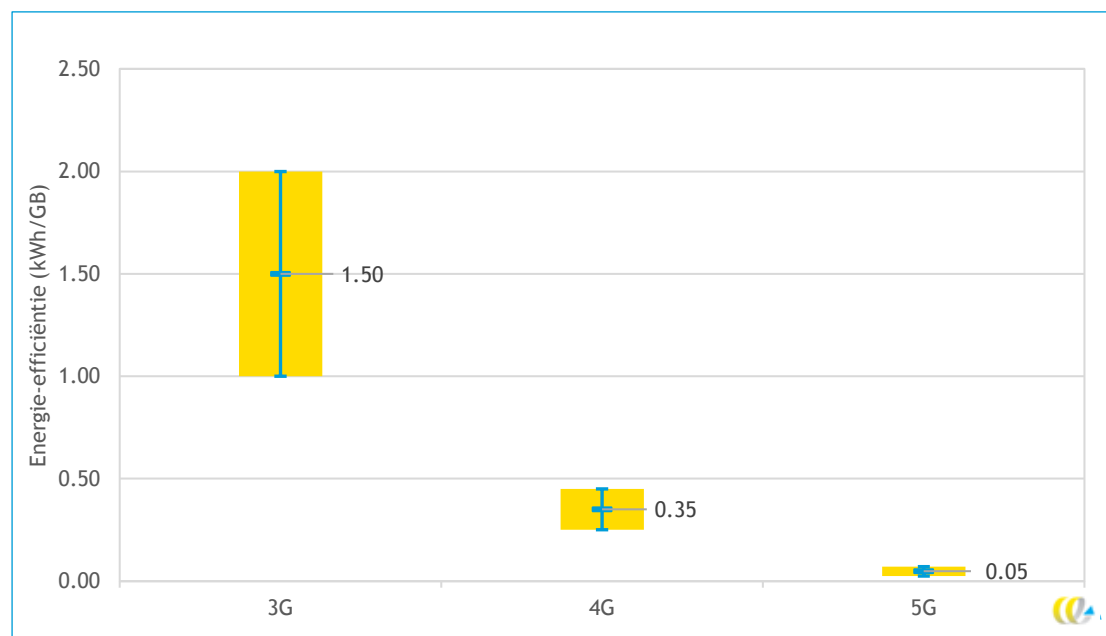
Er zijn verschillende innovaties die de energie-efficiëntie verhogen. Zo kan er bij 5G gebruik gemaakt worden van *beam-forming*, waardoor de het radiosignaal gericht naar ontvangers gestuurd kan worden. Dit in tegenstelling tot de huidige 4G-masten die ten alle tijden het signaal alle richtingen uitzenden. Daarnaast zijn er ontwikkelingen op software gebied, waardoor zendapparatuur in slaapstand gezet kan worden als dit mogelijk is. Tot slot wordt er bij 5G gebruik gemaakt van grotere frequentiebanden, waardoor er meer

data uitgezonden wordt per radiostation. Daarnaast zijn er innovaties die tot kleinere efficiëntieverbeteringen kunnen leiden.

Naast bovenstaande efficiëntieverbeteringen, die voornamelijk veroorzaakt worden door de overstap naar een 5G-netwerk, zijn er ook autonome efficiëntieverbeteringen die niet veroorzaakt worden door de overstap naar een nieuwe generatie netwerk. Zo wordt de hardware die gebruikt wordt steeds efficiënter en worden er continu softwareverbeteringen doorgevoerd.

De energie-efficiëntie van de verschillende generaties mobiele netwerken (3G, 4G en 5G) is weergegeven in Figuur 8. Het energieverbruik van alle netwerkelementen is hierin meegenomen. In de figuur is te zien dat de efficiëntie bij elke nieuwe generatie flink verbeterd is. Zo is het 5G-netwerk zo'n 14 tot 89 keer efficiënter dan het 3G-netwerk en zo'n 4 tot 18 keer efficiënter dan het 4G-netwerk. Het 4G-netwerk was al zo'n 30 tot 100 keer efficiënter dan 2G (ING Economics Department, 2019).

Figuur 8 - Energie-efficiëntie verschillende generaties mobiele netwerken in kWh/GB



Bron: (ING Economics Department, 2019; IEA, 2017; STL Partners, 2019).

Opmerking: De gele balkjes en blauwe staafjes geven de banbreedte aan, de genoemde cijfers zijn de middenwaarden.

Het is de verwachting dat de energie-efficiëntie van 5G in 2030 uit zal komen tussen de 0,025 kWh per GB en de 0,07 kWh per GB (ING Economics Department, 2019; IEA, 2017; STL Partners, 2019). De uiteindelijke efficiëntie hangt af van de ontwikkeling van de netwerktechnologie, de mate waarin de capaciteit van het netwerk optimaal benut wordt, het aantal gebruikers en de hoeveelheid data die verstuurd worden. We hanteren de ondergrens voor het *lage scenario* en de bovengrens voor het *hoge scenario*.

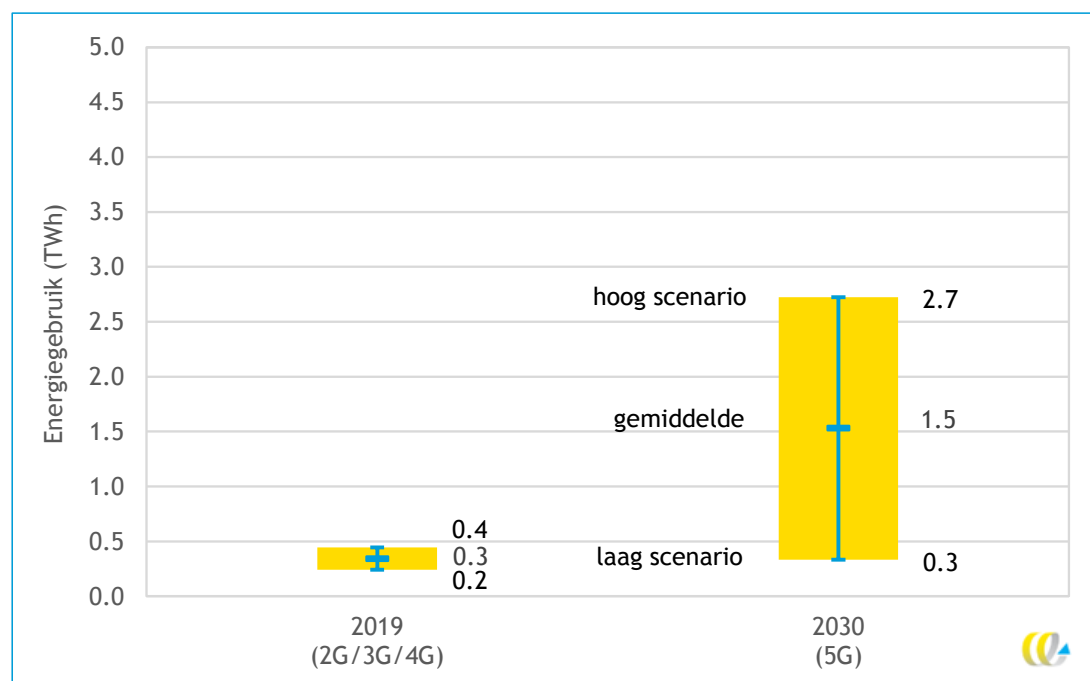
Een belangrijke kanttekening is wel dat de energie-efficiëntie van het huidige 5G-netwerk nog niet het niveau van 2030 bereikt heeft. Op dit moment is het 5G-netwerk nog minder energiezuinig dan het 4G- en 3G-netwerk (ING Economics Department, 2019). Op de korte termijn kan het 5G-netwerk dus wel voor een (relatief) hoger energieverbruik zorgen.

Energieverbruik

Het energieverbruik van het 5G-netwerk wordt door twee factoren bepaald: de energie-efficiëntie en het dataverkeer. In 2019 was het energieverbruik van het mobiele netwerk naar schatting 0,24 tot 0,45 TWh per jaar⁸. Ter vergelijking, het totale elektriciteitsverbruik van Nederland is momenteel ongeveer 120 TWh/jaar (PBL, 2019). Van het energieverbruik van het huidige mobiele netwerk wordt ongeveer driekwart veroorzaakt door 4G en de rest door 2G en 3G⁹.

Voor 2030 verwachten we dat het energieverbruik van het mobiele netwerk uitkomt op 0,3 TWh per jaar voor het *lage scenario* en op 2,7 TWh per jaar in het *hoge scenario*. Deze grote bandbreedte wordt veroorzaakt doordat er onzekerheden zijn in zowel de verwachte energie-efficiëntie als in het verwachte dataverkeer. Figuur 9 toont de verwachte ontwikkeling van het energieverbruik van het mobiele netwerk, van 2G/3G/4G nu, naar 5G in 2030.

Figuur 9 - Prognose energieverbruik mobiel netwerk 2019-2030 in TWh/jaar



⁸ Deze inschatting volgt uit de energie-efficiëntie van het 3G/4G-netwerk (ING Economics Department, 2019; IEA, 2017) en het bijbehorende dataverbruik in Nederland volgens de ACM (ACM, 2019).

⁹ 2G en 3G zijn verantwoordelijk voor slechts 8% van het dataverbruik (ACM, 2019), maar door de lagere efficiëntie is het aandeel in het energieverbruik een stuk hoger.

Naast antennes zijn er ook nog andere onderdelen binnen het 5G mobiele netwerk. Zo moeten alle zendmasten aangesloten worden op een glasvezelnet. Hiervoor kan grotendeels het huidige glasvezelnet voor 4G gebruikt worden, aangezien de nieuwe 5G-zendapparatuur in eerste instantie in dezelfde masten geplaatst wordt. Alleen voor nieuwe zendmasten moet het glasvezelnet uitgebreid worden. Het energieverbruik per GB van dit glasvezelnet is echter klein ten opzichte van dat van de zendapparatuur. Daarnaast blijft dit energieverbruik nagenoeg gelijk bij de overstap naar 5G. Het energieverbruik van het glasvezelnet is meegenomen in de cijfers van het energieverbruik van het mobiele netwerk.

Daarnaast wordt een deel van de data die verstuurd wordt opgeslagen in datacenters. Momenteel wordt de data opgeslagen in grote datacenters, maar als bij 5G de lage responstijd (latentie) extra belangrijk wordt, wordt er naar verwachting meer gebruikt gemaakt van Edge Computing. Bij Edge Computing wordt de data dichterbij de bron opgeslagen en verwerkt, wat onder meer zorgt voor minder latentie. Enerzijds hoeft de data door deze ontwikkeling minder ver getransporteerd te worden, maar anderzijds zijn er wel meer opslaglocaties nodig, wat mogelijk minder efficiënt is. Daarom is het effect van Edge Computing op het energieverbruik in 2030 nog lastig om vast te stellen, maar de verwachting is dat deze effecten klein zullen zijn ten opzichte van het energieverbruik van de antennes. Daarom wordt ook dit buiten beschouwing gelaten. De extra opslag van data door toename van het dataverkeer wordt wel meegenomen bij de *use cases*.

3.4 Energiegebruik in vergelijking met 4G

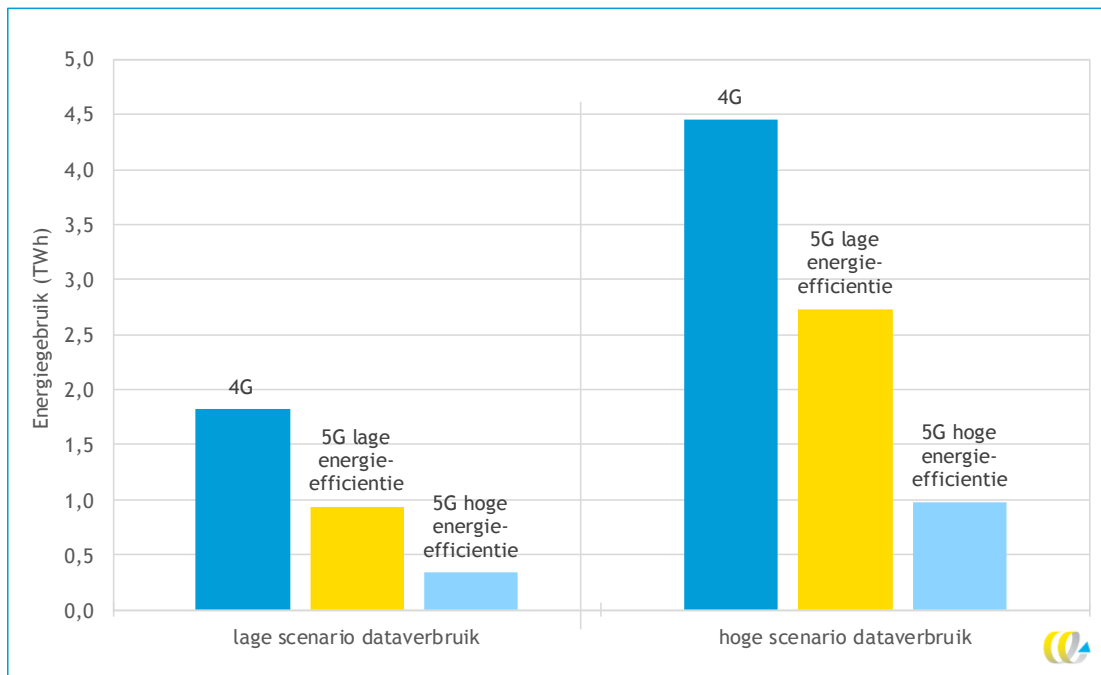
Een alternatief voor het implementeren van een 5G-netwerk is gebruik blijven maken van het 4G-netwerk. Dit zal leiden tot minder groei in het dataverkeer, immers bepaalde toepassingen zijn dan niet mogelijk over het mobiele netwerk. Al zal het dataverkeer ook flink stijgen als Nederland niet overstapt naar 5G, aangezien er sprake is van autonome groei. Naar verwachting zorgt de overstap naar 5G voor een additionele datagroei van ongeveer een factor twee (Ericsson, 2019b)¹⁰, exclusief zelfsturend verkeer.

Anderzijds is het 4G mobiele netwerk minder efficiënt dan het 5G mobiele netwerk door verschillende innovaties in 5G. 4G zal in 2030 echter wel efficiënter zijn dan op dit moment door verbeteringen aan de hardware en software. Daarnaast zullen er grotere bandbreedtes gebruikt worden, wat ook leidt tot verbeterde efficiëntie. Daarom veronderstellen we een efficiëntie aan de ondergrens van de range voor 4G, namelijk 0,25 kWh/GB in 2030. Gecombineerd met het verwachte dataverkeer leidt dit tot een energieverbruik van 1,8 tot 4,5 TWh per jaar. Daarmee is bij een vergelijkbaar scenario voor het dataverbruik, het 5G-netwerk altijd energiezuiniger dan het 4G-netwerk, zowel bij de energie-efficiëntie van het lage scenario als die van het hoge scenario. Dit is weergegeven in Figuur 10.

¹⁰ Dit hebben we bepaald op basis van deze bron. Het is het verschil in het datagebruik van een 5G- en een 4G-gebruiker in 2025.



Figuur 10 - Vergelijking energieverbruik 4G en 5G mobiele netwerk bij 2030 dataverbruik, in TWh/jaar



3.5 Conclusie

Figuur 10 geeft in het kort de antwoord op de vraag: wat is het energieverbruik van het 5G mobiele netwerk ten opzichte van de huidige mobiele netwerken in 2030? Afhankelijk van de ontwikkeling van het dataverbruik ligt het energieverbruik van het 5G mobiele netwerk tussen 0,3 en 2,7 TWh per jaar, dat is minder dan het energieverbruik dat je bij een 4G-netwerk zou verwachten.

4 Energiegebruik 5G-toepassingen

4.1 Introductie

In dit hoofdstuk beschouwen we de tweede onderzoeksvraag: hoe neemt in 2030 het energiegebruik van de ICT-sector toe als gevolg van *nieuwe ICT-toepassingen* die door 5G mogelijk worden gemaakt?

We kijken hiervoor naar het energiegebruik van de nieuwe ICT-toepassingen die door 5G mogelijk worden gemaakt. Zoals besproken in Paragraaf 2.4 beschouwen we hiervoor drie typische *use cases* voor 5G:

- Use case 1: Ultra Reliable Low Latency Communication (uRLLC).
- Use case 2: Massive Machine Type Communication (mMTC).
- Use case 3: Enhanced Mobile Broadband (eMBB).

Deze *use cases* zijn toepassingen die dankzij 5G mogelijk worden gemaakt, omdat ze een beroep doen op de unieke eigenschappen van 5G: lage latentie, grote bandbreedte en meer betrouwbaarheid.

In dit hoofdstuk worden de drie *use cases* beschreven en maken we een inschatting van het typische energiegebruik in de twee scenario's. Binnen de *use cases* wordt één belangrijke toepassing uitgewerkt en zijn andere toepassingen in minder detail uitgewerkt. Zoals duidelijk zal worden, maken sommige toepassingen gebruik van meerdere *use cases*.

4.2 Use case 1: Ultra Reliable Low Latency Communication (uRLLC)

In deze use case staan toepassingen centraal die in het bijzonder gebruik maken van de lage vertraging en hoge betrouwbaarheid (low latency) eigenschap van 5G. Wij beschouwen een van de belangrijkste toepassingen: zelfsturend verkeer.

4.2.1 Zelfsturend verkeer

Een belangrijke trend die voorzien wordt, is de ontwikkeling van zelfsturend verkeer: voertuigen die in meer of mindere mate zelfrijdend zijn. Er wordt veel onderzoek naar zelfsturend verkeer gedaan, vooral vanwege de potentiële voordelen op het gebied van veiligheid en tijdsefficiëntie. Er zijn verschillende niveaus van autonomie in zelfsturend verkeer gedefinieerd (zie tekstkader). Momenteel worden Level 2 en 3 auto's geïntroduceerd op de markt, vanaf 2021 worden de eerste Level 4 auto's verwacht (KPMG, 2019).

Verschillende niveaus van autonomie in zelfsturend verkeer

De volgende levels worden onderscheiden, waarbij we voorbeelden geven voor auto's, de voorbeelden voor vrachtwagens en bussen kunnen net iets anders zijn:

Level 0: Geen autonomie.

Level 1: Driver assistance/ondersteuningssysteem voor bestuurders: o.a. adaptieve cruisecontrol, ondersteuning bij behouden rijbaan en veranderen rijbaan.

Level 2: Gedeeltelijke autonomie: onder andere ondersteuning bij (in)parkeren en ondersteuning bij filerijden.

Level 3: Voorwaardelijke autonomie: onder andere auto is bestuurder in file, auto is bestuurder op de snelweg.

Level 4: Verregaande autonomie: autopilot op snelweg en in urban/sub-urban gebieden ('geo fenced zelfsturend rijden' - dus alleen in bepaalde gebieden, maar wel volledig zelfsturend).

Level 5: Volledige autonomie: deur-tot-deur zelfsturend rijden.



Het verschil tussen zelfsturend verkeer nu en zelfsturend verkeer in de toekomst is *connectivity* (connectiviteit). Momenteel rijden (de meeste) zelfrijdende voertuigen op visuele eigenschappen op basis van informatie van sensoren en camera's, vergelijkbaar met zoals de mens dat doet. In de toekomst zullen voertuigen op basis van V2X-technologie (vehicles-to-everything technologie) met onder andere elkaar en hun omgeving (de infrastructuur) kunnen communiceren. Daardoor kunnen ze (volledig) zelfsturend rijden, ze zijn daarmee dus zowel zelfsturend als *connected*. De huidige commercieel verkrijgbare zelfrijdende voertuigen zijn nog niet volledig zelfsturend: de chauffeur moet als dat nodig is bijspringen in bepaalde situaties of gebieden.

Voor deze connectiviteit is 5G vereist, dat naast de hogere bandbreedte dan 4G vooral voordelen heeft vanwege de hoge betrouwbaarheid en kleine vertraging (*ultra-reliable low-latency communication*). Voertuigen moeten *real time*, zonder vertraging met elkaar en de omgeving kunnen communiceren en daar op reageren. Daarnaast kan het zijn dat een voertuig toch in een situatie beland waar deze niet meer zelf uit kan komen en besturing op afstand nodig is. Dit betekent dat de data-uitwisseling snel en ongestoord moet kunnen plaatsvinden, wat URLLC kan faciliteren.

V2V (*vehicle-to-vehicle*) en V2I (*vehicle-to-infrastructure*) zijn momenteel de belangrijkste V2X-technologieën om te ontwikkelen en uit te rollen om te komen tot een volledig zelfsturend transportsysteem. Dit is nog niet zomaar gedaan: de kosten zijn hoog en het omgaan met een overgangperiode is ingewikkeld (vanwege de levensduur van het wagenpark is niet gelijk ieder voertuig op hetzelfde niveau van autonomie). Het is ook de vraag op welke schaal je dit uitrolt: wanneer Nederland voorloopt, moet men over de grens wel nog conventioneel kunnen rijden. Daarnaast moeten niet alleen het wagenpark en de infrastructuur worden aangepast, maar moet ook worden nagedacht over de connectiviteit van bijvoorbeeld fietsers en wandelaars (V2P, *vehicle-to-pedestrian*). De veiligheid van het netwerk is ook van belang: een hack van voertuigen op afstand kan grote schadelijke gevolgen hebben (degene die hackt kan die voertuigen dan op afstand besturen). Tot slot zijn consumentenacceptatie, wetgeving en ethiek erg belangrijk voor dit onderwerp.

De vierde aan 5G gerelateerde V2X-technologie is V2N (*vehicle-to-network*). Hiermee kan de auto contact maken met het mobiele netwerk. Hiermee kan (nu al) actuele verkeersinformatie worden binnengehaald of muziek worden gestreamd via 4G of 5G, maar in de toekomst kunnen ook V2N-toepassingen bij de verhoogde snelheid en betrouwbaarheid van 5G zijn gebaat. De reden hiervoor is dat wanneer een auto steeds autonomer wordt, de mensen die erin zitten de auto meer als werk- of ontspanningsruimte gaan zien. Ze willen dus kunnen gamen, online werken of films streamen onderweg. Hierbij zal gebruik worden gemaakt van 5G. In feite zorgt zelfsturend verkeer dan voor een hogere gebruikstijd en meer dataverbruik bij andere ICT-toepassingen.

Er wordt vaak gezegd dat zelfsturend verkeer ook voor zuiniger verkeer zorgt, omdat er met constantere snelheden kan worden gereden en wellicht kan worden gecombineerd met autodelen. Het is echter de vraag of dit in de praktijk ook zo werkt: auto's worden breder toegankelijk (ook voor bijvoorbeeld ouderen of gehandicapten die momenteel niet kunnen rijden) en auto's worden aantrekkelijker voor mensen die nu met het OV gaan omdat ze daar kunnen werken of ontspannen (dat kan in een zelfsturende auto ook). De inschattingen op dit gebied lopen dan ook uiteen.



4.2.2 Overige uRLLC-toepassingen

uRLLC heeft ook toepassingen in de gezondheidszorg (opereren op afstand, bijvoorbeeld wanneer de patiënt nog in de ambulance ligt), de industrie (slimme fabriek/automatisering via onder andere machine-machinecommunicatie en robotische besturing), entertainment (bijvoorbeeld online gamen) en in de energiesector, *smart grids* en *smart energy*. Veel van deze toepassingen hebben overlap met andere *use case*-toepassingen. In dit rapport worden bijvoorbeeld entertainment en de slimme fabriek (IoT) in paragrafen van andere *use cases* beschreven.

4.2.3 Verwacht aantal en energiegebruik in 2030

Er zijn verschillende scenario's mogelijk voor de uitrol van zelfsturend wegverkeer in Nederland. Dit is van een heleboel verschillende factoren afhankelijk: niet alleen technische ontwikkeling op zowel netwerk- als voertuiggebied zijn belangrijk, maar ook zaken als ontwikkeling van wet- en regelgeving en acceptatie bij consumenten. Daarnaast hebben we te maken met de verschillende niveaus van autonomie zoals beschreven in Paragraaf 4.2.1. 5G is niet voor alle autonome functies en niveaus een vereiste, ook al zullen ook die functies waarbij het geen vereiste is gebruik maken van 5G wanneer het er is.

Hoeveelheid zelfsturend verkeer in 2030

Om een inschatting te maken van het aantal zelfsturende auto's in 2030 in Nederland is de studie *Development and transport implications of automated vehicles in the Netherlands Scenarios for 2030 and 2050* (Milakis, et al., 2017), uitgevoerd door de TU Delft, als basis gebruikt. Hierin zijn verschillende factoren die de ontwikkeling van zelfsturend verkeer in Nederland beïnvloeden in kaart gebracht en zijn in samenwerking met meerdere experts op dit gebied scenario's opgesteld voor deze ontwikkeling. Hieruit kwam een penetratiegraad van 1-11% zelfsturende auto's in 2030, waarbij het vooral gaat om Level 3 en 4 zelfsturende auto's. Dit laatste is in lijn met verschillende andere bronnen waaruit blijkt dat volledig autonome en communicerende voertuigen (Level 5) pas in 2030 op de markt zullen komen (KPMG, 2019; ERTRAC, 2019; VerkeersNet, 2019). Volgens een ander onderzoek zullen er in 2030 ongeveer 4 miljoen Level 4/5 zelfsturende auto's in Europa zijn, wat neerkomt op ongeveer 1,8% als je uitgaat van de huidige hoeveelheid auto's in Europa (Automobiel Management, 2019). Dit ligt in lijn met de 1-11% die door (Milakis, et al., 2017) wordt genoemd specifiek voor Nederland en in combinatie met de bovengenoemde verwachting dat Level 5 nog niet/net op de markt is in 2030, gaan we van die cijfers uit.

In Tabel 1 de door ons ingeschatte hoeveelheid zelfsturende personenauto's in Nederland voor het lage en hoge scenario weergegeven.



Tabel 1 - Inschatting hoeveelheid zelfsturende personenauto's (ZA's) in Nederland in 2030 voor scenario Laag en Hoog

Wat?	Hoeveel ¹¹
Penetratiegraad ZA's - Laag	1%
Penetratiegraad ZA's - Hoog	11%
Aantal auto's NL 2018	8,5 miljoen
Aantal auto's NL 2030	9,6 miljoen ¹²
Aantal ZA's in NL in 2030 - Laag	0,1 miljoen
Aantal ZA's in NL in 2030 - Hoog	1 miljoen

Energiegebruik zelfsturend verkeer in 2030

Om het energiegebruik van de 5G ICT-component van zelfsturend personenverkeer in 2030 in Nederland in te schatten, moet eerst worden bepaald hoeveel data er wordt geproduceerd door de V2X-technologieën. En vervolgens welk deel van die data het voertuig verlaat en over het 5G-netwerk wordt gecommuniceerd naar de cloud of een (edge) datacenter wordt overgedragen.

Cijfers over door zelfsturende auto's zelf gegenereerde en overgedragen data zijn lastig te vinden. Dit komt omdat er nog veel onzekerheden zijn. De technologie voor de meest geavanceerde vormen van zelfsturend rijden en daarmee het deel wat de meeste data zal genereren en overdragen, zijn immers nog niet volledig uitontwikkeld. Op basis van verschillende bronnen hebben we een inschatting gemaakt van de dataoverdracht van een zelfsturend voertuig. We zijn ervan uitgegaan dat de gegevens die we hebben van toepassing zijn op alle 1-11% zelfsturende voertuigen in 2030. In realiteit hoeft dit niet het geval te zijn omdat het gaat om een mix van Level 3 en 4 zelfsturende auto's, terwijl voor de datagegevens die we hebben niet altijd duidelijk is voor welk Level deze gelden.

In Tabel 2 zijn de gevonden datagegevens en de daaraan verbonden 5G-energiegebruiksgegevens gepresenteerd. In het hoge scenario is zowel het gebruik van zelfsturende auto's hoog als het energiegebruik van 5G. In het lage scenario is van beide componenten de lage inschatting gebuikt. Uit dit resultaat volgt dat de bandbreedte tussen het hoge scenario en het lage scenario er groot is: tussen de 0,0007 TWh/jaar en 0,6 TWh/jaar.

¹¹ Deze getoonde hoeveelheden zijn afrondingen van de in de berekeningen gebruikte getallen.

¹² Dit is een inschatting gebaseerd op een gemiddeld aantal voertuigkilometers van 13.000 km/jaar (CBS, 2019) en de toename van het aantal gereden voertuigkilometers in 2018 en verwachte aantal gereden voertuigkilometers in 2030 volgens (PBL ; CPB, 2020). Deze toename is hier gebruikt om de toename in het aantal personenauto's te bepalen.

Tabel 2 - Inschatting data- en energiegebruik zelfsturende auto's in 2030

Gevonden datagebruik	Data naar cloud (EB / jaar) ¹³	Energiegebruik (TWh/jaar) ¹⁴
20 GB/maand/voertuig (AECC, 2020) ¹⁵	Laag: 0,02 Hoog: 0,25	Laag: 0,0007 Hoog: 0,02
50-500 GB/maand/voertuig (FierceWireless, 2018) ¹⁶	Laag: 0,06-0,6 Hoog: 0,6-6	Laag: 0,0002-0,002 Hoog: 0,06-0,6
2.5 GB/uur/voertuig (Design World, 2019) ^{17,18}	Laag: 0,1 Hoog: 1	Laag: 0,003 Hoog: 0,1

Idealiter zouden we ook een inschatting maken van het datagebruik en daarmee samenhangende energiegebruik van V2I-, en V2P-technologies. Er is hierover echter weinig bekend. Bovendien gaat het vooral om niet-visueel dataverkeer tussen de apparaten, dat ten opzichte van het dataverkeer door camerabeelden van zelfsturende voertuigen beperkt is. We zijn er daarom vanuit gegaan dat dit deel van het datagebruik over 5G voor zelfsturend rijden erg klein is in vergelijking met het datagebruik over 5G door de auto's zelf.

4.2.4 Energiegebruik bij alternatief communicatienetwerk

De hoge levels van zelfsturend rijden vereisen de lage vertraging, hoge betrouwbaarheid en grote capaciteit die 5G kan bieden. Met 4G kunnen de hoge levels van zelfsturende voertuigen niet worden ondersteunt. Hoewel er partijen zijn die zeggen dat zelfsturend rijden ook zonder 5G-netwerk mogelijk is, lijkt dit niet direct voor de hand te liggen en is het alternatief niet helder. We laten dit daarom buiten beschouwing en veronderstellen dat al het energiegebruik van zelfsturend rijden gerelateerd is aan 5G.

4.3 Use case 2: Massive Machine Type Communication (mMTC)

Bij de use case Massive Machine Type communication (mMTC) is er sprake van zogenaamde Machine-to-Machine (M2M) communicatie, oftewel communicatie tussen apparaten. De communicatie tussen deze apparaten vindt plaats zonder menselijke invloed. Wij beschouwen een van de belangrijkste toepassingen: Internet-of-Things.

¹³ Voor het scenario Laag is gerekend met de ondergrens van zelfsturend auto-gebruik in 2030 (1%) en voor het scenario Hoog met de bovengrens (11%), zie Tabel 1.

¹⁴ Voor het scenario Laag is gerekend met de lage datagegevens en het lage energiegebruik voor 5G in 2030 uit Tabel 2 en voor het scenario Hoog met de hoge datagegevens en het hoge energiegebruik voor 5G in 2030 uit Tabel 2.

¹⁵ Voor een voertuig in 2025 - waarschijnlijk Level 4.

¹⁶ Voor een voertuig in 2050 - waarschijnlijk Level 5.

¹⁷ We hebben uit deze bron alleen de onderwaarde (huidig, waarschijnlijk Level 3/4) meegenomen omdat de bovenwaarde (Level 5 - daarom buiten beschouwing gelaten voor 2030) erg hoog was vergeleken met de andere bronnen: in plaats van 2,5 GB/uur/auto zou er 50 GB/uur/auto worden gecommuniceerd. Dit hangt samen met een energiegebruik door 5G van 1,3 TWh in het scenario Hoog. Deze grote verschillen in data laten zien dat er nog veel onzeker is in deze use case.

¹⁸ Het genoemde datagebruik in het artikel is eigenlijk 25-500 GB/uur. Hierbij is niet aangegeven welk deel van deze data ook naar de cloud wordt gecommuniceerd. Op basis van (Tuxera, sd) hebben we aangenomen dat dat deel 10% is. We gaan er vanuit dat een auto gemiddeld 1 uur per dag gebruikt wordt.

4.3.1 Internet-of-Things

Een groot netwerk van apparaten die onderling met elkaar communiceren wordt het Internet-of-Things (IoT) genoemd. Bij het IoT verzamelen apparaten data door middel van sensoren en wisselen deze onderling uit. Op basis van deze data kunnen de apparaten zelf handelen of de gebruiker van het apparaat inzicht verschaffen om te handelen.

Apparaten zijn continu op de hoogte van de omgeving van het product om de werking en het gebruik te verbeteren. Een voorbeeld is een slimme thermostaat die weet waar je bent (bijvoorbeeld via de locatie van je smartphone, of aan de CO₂-concentratie in de ruimte) en op basis van die informatie alleen het deel van het huis verwarmt waar dat nuttig is.

IoT-toepassingen zijn erg divers en kunnen in verschillende sectoren gebruikt worden. IoT-toepassingen kunnen grofweg in vier categorieën verdeeld worden (Ericsson, 2020):

- **Narrowband IoT:** hier gaat het om grote hoeveelheden kleine apparaten die kleine hoeveelheden data versturen en een laag energieverbruik hebben. Een mogelijke toepassing hiervan zijn sensoren op individuele planten in de glastuinbouw.
- **Broadband IoT:** hier worden grote hoeveelheden data verstuurd met een grote snelheid. De grotere bandbreedte bij dit type toepassingen is bijvoorbeeld noodzakelijk als er videobestanden verstuurd moeten worden.
- **Critical IoT:** hier is grote betrouwbaarheid en lage latentie nodig. Hier vallen sommige toepassingen uit de eerste use case (uRLLC) onder.
- **Industrial Automation IoT:** onder deze categorie valt onderlinge communicatie tussen industriële infrastructuur. Hierdoor kunnen processen geautomatiseerd en daardoor efficiënter worden.

Internet-of-Things-apparaten kunnen zowel met mobiele netwerken als vaste netwerken (zoals wifi) verbonden zijn. In 2018 was circa 20% van de mondiale IoT-apparaten verbonden met een mobiel netwerk (Ericsson, 2019b). Het gaat hierbij om zowel 2G-, 3G- als 4G-verbindingen. Het is de verwachting dat het aandeel mobiele verbindingen bij IoT in de toekomst zal stijgen.

Voor sommige toekomstige Broadband en Critical IoT-toepassingen zal 5G noodzakelijk zijn, vanwege vereisten aan de snelheid van het datatransport, de latentie en de betrouwbaarheid en veiligheid. Voor andere toepassingen, zoals Narrowband IoT, is 5G niet noodzakelijk. Toch is het de verwachting dat 5G ook hiervoor op grote schaal gebruikt gaat worden. Deels omdat 5G de nieuwe standaard in mobiele netwerken zal worden en deels omdat 5G enkele voordelen heeft, zowel ten opzichte van eerdere generaties mobiele netwerken als ten opzichte van andere IoT-netwerken zoals wifi. Zo zijn er bij 5G gelicenseerde frequenties, waardoor je geen gevaar loopt dat er andere gebruikers gebruik maken van dezelfde frequentie zoals bij wifi. Daarnaast kan er een grote dichtheid aan apparaten verbonden zijn met het netwerk zonder dat dit problemen oplevert. Tot slot levert het voordelen op als overal hetzelfde type netwerk gebruikt wordt.

4.3.2 Verwacht aantal en energiegebruik in 2030

Aantallen

Het is de verwachting dat het aantal mobiele IoT-verbindingen fors zal stijgen in de komende jaren. Gedeeltelijk zal dit komen door een toename in het gebruik van huidige IoT-toepassingen. Daarnaast zullen er nieuwe toepassingen komen door 5G. In 2018 waren er naar schatting 32 miljoen IoT-connecties in Nederland, waarvan ruim 6 miljoen mobiele

verbindingen (circa 19%). In de toekomst zal naar verwachting een groter aandeel van de IoT-connecties gebruik maken van mobiele netwerken (Ericsson, 2019b).

Voor 2030 verwachten we dat het aantal mobiele IoT-verbindingen groeit naar 40 tot 105 miljoen verbindingen. Hierbij is gebruik gemaakt van prognoses van Cisco en Ericsson (Cisco, 2020; Ericsson, 2019b). In het lage scenario nemen we aan dat het aandeel mobiele IoT-verbindingen ten opzichte van het totale aantal IoT-verbindingen gelijk blijft. In het hoge scenario is er wel sprake van een groei in het aandeel mobiele verbindingen bij IoT-toepassingen. In het lage scenario gaan we uit van een jaarlijkse groei van 19% en in het hoge scenario van een jaarlijkse groei van 30%.

Naar verwachting gaat het bij 65% van deze verbindingen om Narrowband IoT en bij 35% om Broadband of Critical IoT (Ericsson, 2019b). IoT-toepassingen die gebruik maken van andere verbindingen, zoals wifi, zijn niet meegenomen in deze prognoses.

Data

Niet alleen het aantal IoT-verbinding stijgt fors, ook de hoeveelheid data die uitgewisseld wordt tussen de apparaten stijgt fors. Zo is het de verwachting dat het dataverkeer per IoT-verbinding 2,5 keer zo groot wordt tussen 2017 en 2022 (Cisco, 2019). Dit komt onder meer doordat er steeds meer gebruik gemaakt wordt van video en van andere toepassingen die een grote bandbreedte nodig hebben. Naar verwachting zal het jaarlijks dataverkeer per verbinding groeien met 20% per jaar en stijgen tot 87 GB in 2030. Het totale dataverkeer van IoT-toepassingen zal daardoor tussen de 3,6 en 9,2 EB liggen in Nederland in 2030. Van het M2M (machine-to-machine) dataverkeer wordt circa 1% opgeslagen in datacenters (Cisco, 2016), oftewel 0,04 tot 0,09 EB. De overige data worden alleen tussen machines uitgewisseld en verwerkt, maar niet verder opgeslagen.

Energieverbruik

Het energieverbruik van IoT toepassingen kan verdeeld worden in verschillende categorieën. Ten eerste het energieverbruik van de apparaten. Dit verschilt heel erg per IoT-toepassing. Bij Narrowband IoT worden kleine hoeveelheden data verstuurd. Deze apparaten werken meestal op batterijen, waardoor ze een laag energieverbruik moeten hebben omdat de batterijen anders vaak vervangen moeten worden. Er worden zelfs apparaten ontwikkeld die hun eigen energie opwekken. Het gemiddelde energieverbruik van deze apparaten wordt ingeschat op 5 Wh per jaar (Ericsson, 2020). Bij Broadband en critical IoT worden veel grotere hoeveelheden data verstuurd. Daardoor zal het energieverbruik ook een stuk groter zijn. Het energieverbruik van deze apparaten wordt ingeschat op 9 kWh per jaar (CE Delft, 2016). Dit leidt tot een totaal energieverbruik van 130 tot 330 GWh per jaar voor de apparaten.

Daarnaast wordt er energie gebruikt door het 5G mobiele netwerk vanwege het dataverkeer tussen de IoT-apparatuur. We nemen aan dat alle mobiele IoT-verbindingen in 2030 gebruik maken van 5G. Het energieverbruik van het 5G mobiele netwerk ligt naar verwachting tussen de 0,025 en 0,07 kWh/GB in 2030 (zie Paragraaf 3.3). Dit leidt tot een energieverbruik tussen de 90 en 640 GWh voor IoT over het 5G-netwerk.

Tot slot wordt er energie verbruikt door de datacenters, aangezien een deel van de data die uitgewisseld wordt tussen de IoT-apparaten, opgeslagen moet worden. Datacenters worden steeds efficiënter. Naar verwachting worden datacenters jaarlijks gemiddeld 16% efficiënter in de periode 2018 tot 2030 (ING Economics Department, 2019). Een datacenter



gebruikt naar verwachting 0,005 en 0,019 kWh per GB (zie volgende paragraaf). Dit leidt tot een totaal energieverbruik van 0,2 en 1,7 GWh per jaar.

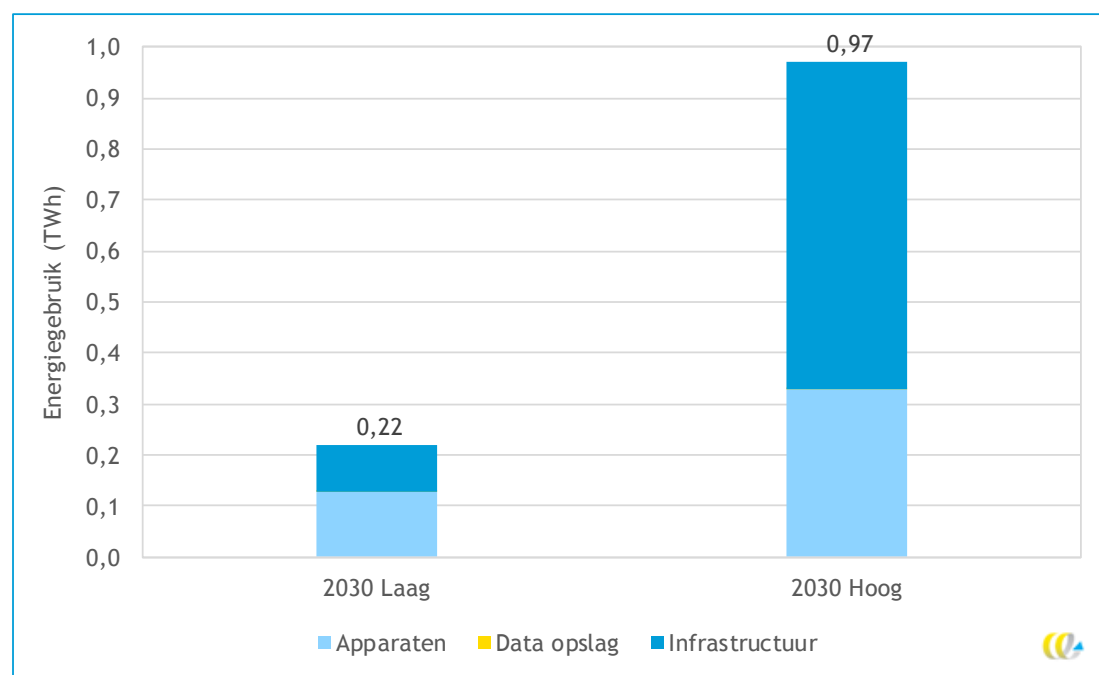
Dit betekent dat we verwachten dat het directe en indirecte energieverbruik van IoT-toepassingen in 2030 in totaal 220 tot 970 GWh per jaar zal bedragen, wat overeenkomt met 0,2 tot 0,8% van het totale elektriciteitsverbruik van Nederland in 2030 (PBL, 2019). In Tabel 3 zijn de uitkomsten weergegeven.

Tabel 3 - Uitkomsten 2030 hoog en 2030 laag scenario

	Aantal connecties	Dataverkeer (EB)	Energieverbruik (GWh)
2030 Hoog scenario	105.000.000	9,2	970
2030 Laag scenario	40.000.000	3,6	220

In Figuur 11 is de opsplitsing van het energieverbruik van IoT-toepassingen gegeven.

Figuur 11 - Opsplitsing energieverbruik mobiele IoT-toepassingen (TWh/jaar)



Opmerking: Dataopslag vormt een heel klein onderdeel en is daardoor niet zichtbaar in de grafiek.

4.3.3 Energiegebruik bij alternatief communicatienetwerk

Voor veel IoT-toepassingen is het niet noodzakelijk om gebruik te maken van 5G. Voor sommige IoT-toepassingen is het logischer om gebruik te maken van wifi. Bijvoorbeeld bij IoT-toepassingen in huizen, zoals slimme meters, aangezien hier meestal toch al wifi-verbinding aanwezig is. Deze toepassingen zijn ook niet meegenomen in de prognoses voor IoT-toepassingen met 5G.

Er zijn echter ook IoT-toepassingen waarbij zowel wifi als 5G gebruikt kan worden. Het gaat hier voornamelijk om Broadband IoT en Industrial Automation IoT-toepassingen. Voor critical IoT is de latentie van wifi te hoog en de betrouwbaarheid te laag. Bij Narrowband IoT is een groot bereik en een groot aantal verbindingen nodig, waarvoor wifi minder geschikt is. Ook bij sommige Industrial Automation IoT-toepassingen is er lage latentie en hoge betrouwbaarheid nodig, waardoor wifi daar ook niet de logische keuze is. Mogelijk kunnen innovaties op het gebied van wifi er voor zorgen dat het in de toekomst wel voor deze toepassingen gebruikt kan worden, maar vooralsnog lijkt 5G de logischere keuze.

Bij Broadband IoT-toepassingen kan wifi wel een goed alternatief zijn. Bij deze toepassingen, bijvoorbeeld toepassingen die gebruik maken van video, wordt veel data verbruikt. Daarom kan het bij deze toepassingen efficiënter zijn om wifi te gebruiken. Het energieverbruik van wifi-routers is namelijk minder afhankelijk van het datagebruik dan bij mobiele netwerken (Gray, et al., 2015). Dit betekent dat hoe groter het dataverbruik van de IoT-toepassing, hoe efficiënter het is om wifi te gebruiken. Het speelt hierbij ook nog een rol of de wifi-router ook nog voor andere toepassingen gebruikt wordt. Wifi is alleen een alternatief bij Broadband IoT-toepassingen als er geen hoge vereisten zijn voor de betrouwbaarheid en de latentie.

4.3.4 Additionaliteit van het IoT-energiegebruik

De ontwikkeling van IoT en 5G lopen door elkaar heen. Hoewel IoT zich ook zonder 5G zal blijven ontwikkelen en groeien, zorgt 5G ook voor een extra groei. McKinsey (McKinsey, 2020) maakt in een recente studie over 5G-IoT onderscheid tussen onderscheidende 5G-toepassingen, toepassingen waar 5G noodzakelijk is, en toepassingen waar 5G wordt toegepast als nieuwe standaard zonder dat het essentieel is. In deze studie presenteren ze verwachtingen over de ontwikkeling van de verkopen van zakelijke 5G-IoT-apparaten en het aandeel van onderscheidende 5G-IoT-toepassingen hierin. Op basis van een analyse op deze cijfers verwachten wij dat circa 25% van de IoT-apparaten in 2030 wordt gebruikt voor onderscheidende 5G-toepassingen in de IoT. Het gaat dan bijvoorbeeld om toepassingen in de industrie (*Industry 4.0*), smart cities/energy en mobiele medische monitoring.

De onderscheidende 5G-toepassingen zijn additionele IoT-toepassingen die voortkomen uit de beschikbaarheid van 5G en leveren daarmee een bijdrage aan het additionele elektriciteitsgebruik door 5G. We passen het percentage van 25% toe op de cijfers uit de vorige paragraaf en komen daarmee tot het additionele energiegebruik door 5G-IoT in 2030, zie Tabel 4.

Tabel 4 - Uitkomsten 2030 Hoog en 2030 Laag scenario

	Energieverbruik (GWh)
2030 Hoog scenario	244
2030 Laag scenario	55

4.4 Use case 3: Enhanced Mobile Broadband (eMBB)

Enhanced Mobile Broadband is een use case die betrekking heeft op data-gedreven toepassingen. Het gaat om toepassingen waarbij een hoge datasnelheid nodig is om grote hoeveelheden data naadloos over te dragen. Het wordt gezien als het eerste toepassingsgebied van 5G dat in het verlengde ligt van huidige toepassingen van mobiele communicatie.

Typische toepassingen van de use case eMBB zijn:

- Ultra HD video streaming;
- Real-time live videostreaming van bijvoorbeeld (sport)evenementen;
- Virtual Reality (VR) en Augmented Reality (AR) toepassingen;
- Mobiele cloud gaming.

In deze paragraaf gaan we het voorbeeld van Ultra HD videostreaming verder uitwerken, wat ook real-time live videostreaming in Ultra HD omvat. In een enquête van IHS Market (IHS Market, 2019) geven mensen aan dat video streaming de belangrijkste eMBB-service is die ze zullen gebruiken met 5G. Bovendien is deze toepassing op dit moment het beste te kwantificeren.

4.4.1 Ultra HD video streamen

Dataverbruik

Er is al tijden een trend gaande naar steeds betere kwaliteit video's die ook steeds vaker op mobiele apparaten bekeken en gestreamd worden. Waar nu 4K resolutie Ultra HD steeds meer mainstream wordt, dienen de eerste 8K resolutie tv's, camera's en smartphones zich aan op de markt. De hogere beeldkwaliteit kost meer data: het streamen van SD video's van Netflix kost zo'n 0,7 GB/uur, HD zo'n 3 GB/uur en 4K UHD 7 GB/uur (Netflix, 2020).

De nieuwe Samsung Galaxy S20 Ultra is in staat om 8K video opnames te maken wat circa 46 GB/uur kost (The Verge, 2020). Omdat mobiele databundels steeds groter of zelfs onbeperkt worden, staat de deur open om ook onderweg video's in hoge kwaliteit te bekijken. Het vormt op dit moment de voornaamste drijfveer achter het stijgende dataverbruik (Emerce, 2019). In 2019 bereikte het gemiddelde dataverbruik per mobiele aansluiting de 3 GB/maand (ACM, 2019; Telecompaper, 2019). Het totale Nederlandse dataverbruik voor 3G- en 4G-data (geschikt voor video) bedraagt in 2018 zo'n 0,57 EB (ACM, 2019).

In alle toekomstverkenningen op het gebied van dataverbruik wordt een toename van dataverbruik door video verwacht. Zowel de kijktijd als toenemende videokwaliteit zijn hiervoor verantwoordelijk (McKinsey Global Institute, 2020). Ericsson verwacht in 2025 een verviervoudiging van het wereldwijde gemiddelde mobiele dataverbruik door video ten opzichte van 2019. Waar in 2019 het maandelijkse mobiele dataverbruik voor 60% bestond uit videoconsumptie (4,5 GB voornamelijk SD-kwaliteit), groeit dit naar 75% in 2025 (18,5 GB voornamelijk HD-kwaliteit). Dit zijn wereldwijde gemiddeldes waarin ook een toename is te zien in gebruikers en kijktijd van landen die tot nu toe achter zijn gebleven. De situatie hoeft niet representatief te zijn voor Nederland, waar een goede bekabelde breedbandinfrastructuur beschikbaar is.

Voor Nederland specifiek zijn weinig cijfers bekend over het aandeel videokijken op mobiele data. Volgens Media:Tijd 2018 besteden we gemiddeld 3% van onze kijktijd van video's op onze smartphone. Bij een totale kijktijd van 183 minuten per dag, kijken we gemiddeld dus 5,5 minuten video per dag op onze smartphone. Ook uit opeenvolgende Media:Tijd-rapportages blijkt dat Nederlanders steeds meer video op mobiele apparaten bekijken.

Een deel van de kijktijd op de smartphone zal via wifi of offline verlopen, anderzijds is deze 5,5 minuten een gemiddelde over de kijktijd van alle Nederlanders van 13 jaar en ouder. Voor de smartphonegebruikers kan de daadwerkelijke tijd hoger liggen. We veronderstellen dat de 5,5 minuten een goede indicatie is voor de tijd dat smartphone gebruikers met een

databundel op mobiele data video kijken. Houden we de gelijke verdeling over videotypes aan als in het wereldgemiddelde in de Ericsson Mobility Calculator 2019, dan komen we per persoon¹⁹ op ongeveer 1 GB/maand aan mobiele data voor video. Dit komt neer op zo'n 31% van het gemiddelde maandelijkse (3G en 4G) dataverbruik (inclusief dataverbruik door zakelijke gebruikers).

Uit Media:Tijd leiden we af dat de kijktijd naar video op de smartphone sinds 2015 jaarlijks met circa 36% groeide. Het is moeilijk te zeggen of deze groei zich voortzet tot 2030. We hanteren een vrijwel gelijke kijktijd als in de huidige situatie in het lage scenario voor 2030 en gaan in het hoge scenario uit van een verdubbeling van de kijktijd op smartphones in 2030, zie Tabel 5. Dit is in lijn met de verwachte wereldwijde toename van de online video kijktijd (McKinsey Global Institute, 2020), dat net iets hoger op 2,3 ligt, maar sterk bepaald wordt door de toename in landen met opkomende economieën.

Tabel 5 - De ontwikkeling van video kijken in de verschillende scenario's

	Nu	2030 laag	2030 hoog	
Kijktijd	5,5	6 (nagenoeg gelijk)	11 (verdubbeling)	Minuten/dag per gebruiker
Gebruikers	14,82	15,99	15,99	Miljoen Nederlanders 13+
Dominante video kwaliteit	SD/HD	Full HD 1080p/UHD (4K)	UHD (4K)	
Bit rate dominante video kwaliteit	6 ²⁰	70	120	MB/ minuut
Totaal jaarlijks datagebruik	0,2	2,4	7,7	EB

Het aantal gebruikers groeit alleen met de bevolking. De bit rate neemt aanzienlijk toe met hogere videokwaliteit. Waar nu de meeste videocontent van SD/HD-kwaliteit is, verwachten we dat dit in het lage scenario een gelijke combinatie van Full HD en UHD 4K-kwaliteit en in het hoge scenario gaan we uit van 100% UHD 4K videokwaliteit. Dit is redelijk in lijn met de verwachting van het McKinsey Global Institute dat in haar wereldwijde analyse veronderstelt dat 90% van alle online video van 4K-kwaliteit is (McKinsey Global Institute, 2020) en Ericsson die voor 2025 verwacht dat Full HD nog dominant is (Ericsson, 2019b).

Energieverbruik

Het energiegebruik van video streaming op smartphones over het mobiele netwerk kent verschillende componenten. Allereerst is er het energiegebruik van de smartphone dat onder volle belasting vooral gerelateerd is aan de kijktijd, dit onderdeel rekenen we niet tot het energiegebruik van 5G-ICT (de smartphone wordt immers ook gebruikt in de situatie zonder 5G). Daarnaast het energiegebruik van het mobiele netwerk dat gerelateerd is aan het dataverbruik en tot slot het energiegebruik van het datacenter van de videostreaming-dienst wat ook gerelateerd is aan de dataflow. Met name voor de laatste is het energiegebruik moeilijk in te schatten. In de literatuur worden verschillende cijfers genoemd voor het energie-efficiëntie in kWh/GB voor het streamen van video (of data-overdracht over het internet). De cijfers zijn vaak gebaseerd op verschillende referentie jaren en systeem-afbakeningen waarin het energiegebruik van de verschillende elementen niet duidelijk is. Hierdoor is het niet goed mogelijk om de invloeden van een ander mobiel netwerk terug te laten zien. We hebben daarom gekozen gebruik te maken van de recente (wereldwijde)

¹⁹ In Media:Tijd wordt uitgegaan van personen van 13 jaar en ouder, dit houden we aan.

²⁰ Op basis van 480p video, wereldwijd in 2019 de dominante videokwaliteit volgens de Ericsson Mobility Calculator. Alle bit rates zijn overgenomen uit de Ericsson Mobility Calculator.

cijfers uit de scenario's van de denktank The Shift Project (The Shift Project, 2019), die gebaseerd zijn op een model en analyse die in 2015 is gepubliceerd door Andrea en Edler (Andrae & Edler, 2015). De cijfers van The Shift Project hebben we exponentieel geëxtrapoleerd naar 2030.

Tabel 6 - Energie-efficiëntie ketenelementen voor online data en video streaming

	2017 laag	2017 hoog	2030 laag	2030 hoog	
Energie-efficiëntie netwerk met 4G	0,25	0,45			kWh/GB (of TWh/EB)
Energie-efficiëntie netwerk met 5G			0,025	0,07	kWh/GB (of TWh/EB)
Energie-efficiëntie datacenter	0,069	0,069	0,005	0,019	kWh/GB (of TWh/EB)
Totaal	0,32	0,52	0,03	0,09	kWh/GB (of TWh/EB)

Op basis van deze kentallen komt het energiegebruik van Ultra HD video streamen in 2030 uit op 0,07 tot 0,7 TWh per jaar ten opzichte van 0,06 tot 0,09 TWh/jaar nu voor video op smartphones. Dus afhankelijk van de ontwikkeling van het dataverbruik en de energie-efficiëntie van het 5G-netwerk en datacenters kan het energiegebruik voor video ongeveer gelijk blijven (0,02 TWh/jaar toename) of bijna verachtvoudigen (0,6 TWh/jaar toename).

Het energiegebruik van de smartphones, tablets, etc. waarop de video's worden bekeken hebben we niet meegenomen. Het additionele energiegebruik is moeilijk vast te stellen ten opzichte van het kijken van video's op minder hoge kwaliteit. Daarnaast is niet de verwachting dat 5G-modems in deze apparaten op de lange termijn meer energie gebruiken dan de 4G voorgangers (Android Authority, 2020; Qualcomm, 2019).

Alternatief

UHD 4K-video's zouden bij goede dekking buitenshuis nog via 4G kunnen verlopen, maar dit levert meer energiegebruik op dan via 5G en levert op grote schaal capaciteitsproblemen op. In deze situatie levert 5G dus een energiebesparing op ten opzichte van 4G. Wifi is binnenshuis een alternatief, maar biedt geen alternatief voor video buitenshuis.

4.4.2 Overige eMBB-toepassingen

Naast Ultra HD video's zijn andere mogelijke ontwikkelingen binnen deze *use case* Virtual Reality (VR)-toepassingen, Augmented Reality (AR)-toepassingen en mobiele cloud gaming. Omdat de gebruiker bij Virtual Reality onttrokken wordt aan de buitenwereld en helemaal opgaat in de virtuele wereld is dit voornamelijk een indoor toepassing. Het gebruik van 5G ligt daarmee minder voor de hand dan bij AR, waarbij virtuele aspecten worden toegevoegd aan de echte wereld.

Volgens Media:Tijd besteden Nederlanders ouder dan 13 jaar gemiddeld 18 minuten per dag aan video gaming, waarvan 6% onderweg en een aantal procent tijdens andere activiteiten buitenshuis. Op basis hiervan veronderstellen we dat dit neer komt op gemiddeld 2 minuten per dag, waarbij we buitenshuis gamen. Als cloud gaming eventueel gecombineerd met Augmented Reality de belangrijkste gaming toepassingen in 2030 worden, met bit rates tussen de 10 (720p) en 35 (4K) Mbps levert dit een mobiel dataverbruik op van 0,9 tot 3,1 EB. Het bijbehorende energieverbruik over 5G is 0,03 tot 0,27 TWh per jaar. Ook hier nemen we geen extra energiegebruik van de apparaten (smartphones/tablets) mee omdat gaming nu ook al plaatsvindt alleen niet via de cloud.

Bij bovenstaande kan het ook om AR-toepassingen gaan, hoewel 5G AR meer mogelijkheden biedt, kan het ook al worden toegepast bij 4G. Verwacht wordt dat 5G de toepassing van AR zal vergroten. Voorspellingen voor het energie- en datagebruik van AR in relatie met 5G zijn echter moeilijk te maken.

4.5 Conclusie

De analyse van de drie 5G *use cases* geven samen antwoord op de tweede onderzoeksvraag: hoe neemt in 2030 het energiegebruik van de ICT-sector toe als gevolg van *nieuwe ICT-toepassingen* die door 5G mogelijk worden gemaakt? Hierbij hebben we ons beperkt tot de voornaamste toepassingen van de drie *use cases*.

De voornaamste impact op het energiegebruik door deze *use cases* is de toename in het dataverbruik en het gebruik van clouddiensten (datacenters). Het energiegebruik van de apparaten zelf is alleen voor IoT (use case mMTC) meegenomen, omdat in de andere gevallen het additionele energiegebruik moeilijk is vast te stellen. Enerzijds omdat het energiegebruik van de apparaten niet goed is in te schatten of goed toerekenbaar is aan de ICT-sector (de ICT-apparatuur van zelfrijdende voertuigen) en anderzijds omdat de apparaten anders ook gebruikt zouden worden voor niet-5G-toepassingen (bijvoorbeeld video kijken met smartphones op 4G in plaats van 5G).

Alle beschreven toepassingen van de 5G *use cases* samen zorgen voor een toename in het dataverkeer in 2030. Duidelijk is dat er op deze tijdshorizon tal van onzekerheden zijn. In de literatuur en onder experts zijn er toekomstvisies van wat er mogelijk staat te gebeuren, maar de kwantitatieve onderbouwing hiervan ontbreekt vaak. Er zijn een aantal wereldwijde verkenningen, maar die laten zich niet altijd eenvoudig vertalen naar de situatie in Nederland.

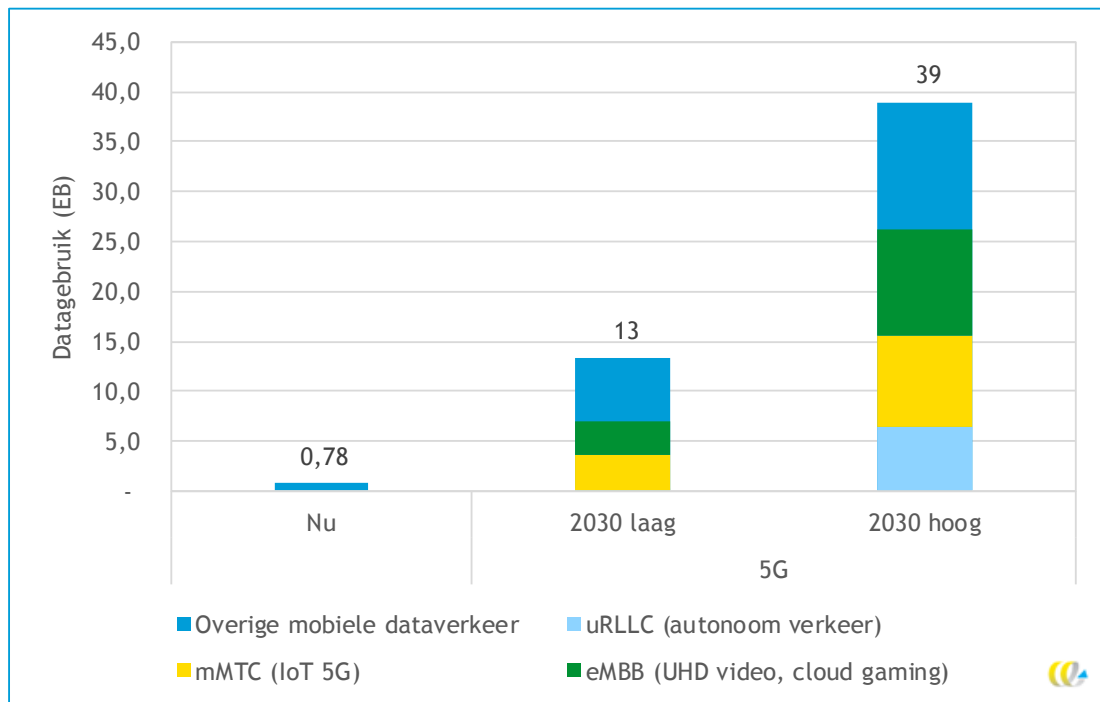
Binnen al deze onzekerheden hebben we inschattingen gemaakt van de bandbreedte van het dataverbruik in het 5G-tijdperk. In een *laag* en *hoog* scenario voor 2030 hebben we op basis hiervan het energiegebruik door 5G ICT-toepassingen ingeschat. De toename van energiegebruik van de ICT-sector wordt bepaald door de nieuwe mogelijke toepassingen (*use cases*) die door 5G gerealiseerd kunnen worden. We hebben ons hierbij beperkt tot de belangrijkste onderscheidende 5G-toepassingen. Deze nieuwe toepassingen leiden tot een hoger dataverbruik en meer gebruik van clouddiensten wat zich vertaalt naar relatief meer energieverbruik.

De ontwikkeling van het dataverkeer van deze *use cases* zoals wij die geprognoseerd hebben voor 2030, is voor de volledigheid samen met het overige mobiel dataverkeer²¹ weergegeven in Figuur 12. Zowel de huidige situatie (2019) als het hoge en lage scenario voor 2030 zijn weergegeven.

²¹ Dit is het restant tussen het verwachte totale dataverbruik in 2030 uit de vorige paragraaf en de som van het dataverbruik van de *use cases*.



Figuur 12 - Datagebruik 5G-toepassingen in 2030 en mobiel dataverkeer nu in EB



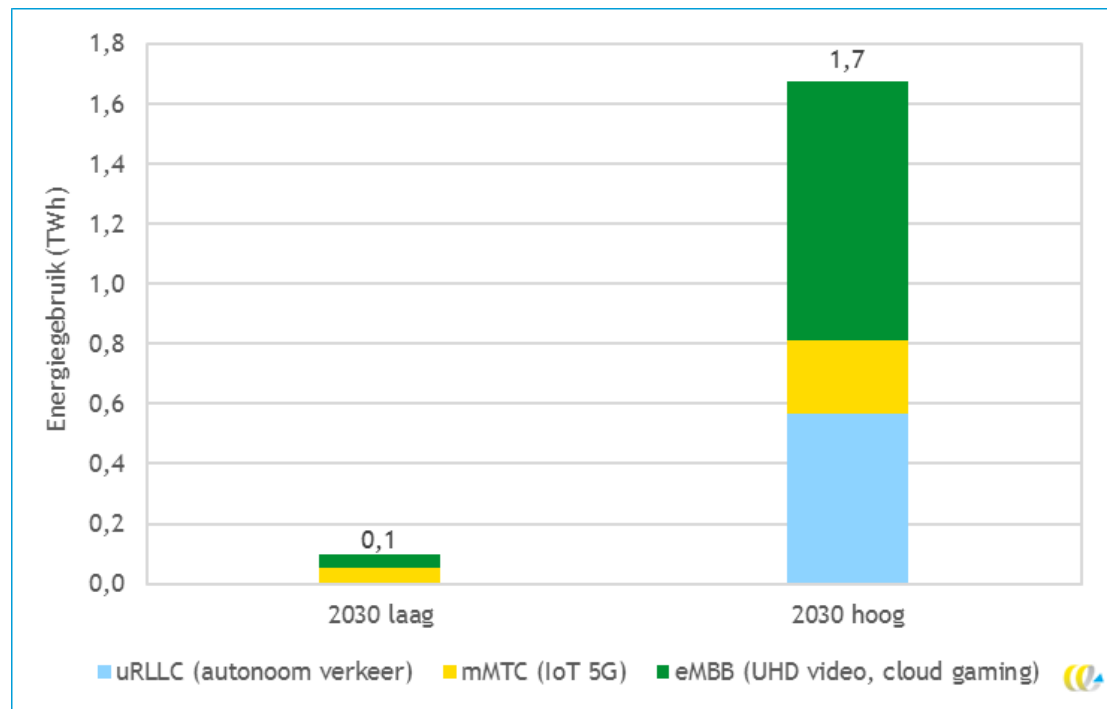
Tussen het hoge en het lage scenario zit een aanzienlijk verschil tussen het verwachte dataverbruik, dit laat zien dat er veel onzekerheden in de ontwikkelingen. Zo hangt de toekomst van zelfsturend verkeer onder andere af van de maatschappelijke acceptatie.

Alle drie 5G use cases samen zorgen dus voor een forse toename in het dataverkeer en het gebruik van datacenters in 2030. De mogelijke gevolgen voor het energiegebruik van de ICT-sector in 2030 zijn weergegeven in Figuur 13²². Hierin is naast het energiegebruik van het dataverkeer dat over het netwerk en via datacenter loopt, ook rekening gehouden met het energiegebruik van IoT-apparaten²³. Het energiegebruik van de ICT-sector neemt naar onze inschatting toe met 0,1 tot 1,7 TWh/jaar door de ontwikkelingen van de onderzochte toepassingen binnen de nieuwe 5G use cases. Het gaat om additioneel energiegebruik als gevolg van nieuwe mogelijkheden die door het 5G-netwerk gerealiseerd worden. De relatief grote range wordt voornamelijk veroorzaakt door onzekerheid in de mate waarin zelfsturend verkeer zich ontwikkeld en het gebruik van hoge kwaliteit video's.

²² In deze figuur is het energiegebruik van het overige mobiele dataverbruik niet weergegeven, omdat dit onder het energieverbruik van het netwerk is gerekend en geen specifieke 5G-toepassing is.

²³ Het energiegebruik van smartphones voor UHD video en cloud gaming is buiten beschouwing gelaten. De effecten op het energiegebruik ten opzichte van de 4G situatie is niet goed in beeld te brengen. Dit geldt eveneens voor de ICT-systemen van autonome voertuigen.

Figuur 13 - Additioneel energiegebruik door 5G ICT-toepassingen (use cases) in 2030



Opmerking: Dit energiegebruik is inclusief het energiegebruik van netwerk en datacenter behorend bij de dataoverdracht, deze cijfers zijn dus niet simpelweg op te tellen bij het energiegebruik van het netwerk.

Ook kunnen nieuwe ICT-toepassingen bijdragen aan energiebesparingen in andere sectoren, bijvoorbeeld doordat verkeer efficiënter verloopt. Dat is een belangrijke kanttekening die voor een breder perspectief op het energiegebruik door 5G verder onderzocht zou moeten worden.

5 Overzicht energiegebruik door 5G

5.1 Inleiding: verkenning met tal van onzekerheden

In de voorgaande hoofdstukken hebben we een globale scenarioverkenning gedaan van het energiegebruik van het 5G-netwerk en de voornaamste 5G ICT-toepassingen in 2030. Duidelijk is dat er op deze tijdshorizon tal van onzekerheden zijn. In de literatuur en onder experts zijn er toekomstvisies van wat er mogelijk staat te gebeuren, maar de kwantitatieve onderbouwing hiervan ontbreekt vaak. Er zijn een aantal wereldwijde verkenningen, maar die laten zich niet altijd eenvoudig vertalen naar de situatie in Nederland. Dit komt onder andere door opkomende economieën (zoals India) die in deze cijfers zijn meegenomen en het feit dat we, in tegenstelling tot veel andere landen, in Nederland beschikken over een goede bekabelde breedbandinfrastructuur, waardoor het niet voor de hand ligt dat 5G als breedbandverbinding thuis wordt ingezet.

Binnen al deze onzekerheden hebben we inschattingen gemaakt van de bandbreedte van het dataverbruik en de energie-efficiëntie in het 5G-tijdperk. In een *laag* en *hoog* scenario voor 2030 hebben we op basis hiervan het energiegebruik van het 5G-netwerk en de toename door 5G ICT-toepassingen ingeschat. Het energiegebruik van het netwerk is feitelijk het energiegebruik veroorzaakt door alle mobiele dataverkeer over het 5G-netwerk en de daaraan gelinkte vaste netwerken. De toename van energiegebruik van de ICT-sector wordt bepaald door de nieuwe mogelijke toepassingen (*use cases*) die door 5G gerealiseerd kunnen worden. We hebben ons hierbij beperkt tot de belangrijkste onderscheidende 5G-toepassingen. Deze nieuwe toepassingen leiden tot een hoger dataverbruik en meer gebruik van clouddiensten wat zich vertaalt naar relatief meer energieverbruik.

In de volgende twee paragrafen tonen we de resultaten van onze scenarioverkenningen en geven daarmee per paragraaf antwoord op de twee onderzoeksvragen:

1. Wat is het energiegebruik van het *5G mobiele netwerk* ten opzichte van de huidige mobiele netwerken in 2030?
2. Hoe neemt in 2030 het energiegebruik van de ICT-sector toe als gevolg van *nieuwe ICT-toepassingen* die door 5G mogelijk worden gemaakt?

Merk op dat de twee onderzoeksvragen los van elkaar staan, hoewel ze samen een beeld geven van de energie-impact van 5G. Voor de tweede vraag beschrijven we de hele keten van de toepassing, inclusief het gebruik van het 5G-netwerk door die toepassing. De resultaten van beide vragen kunnen daarom niet bij elkaar worden opgeteld.

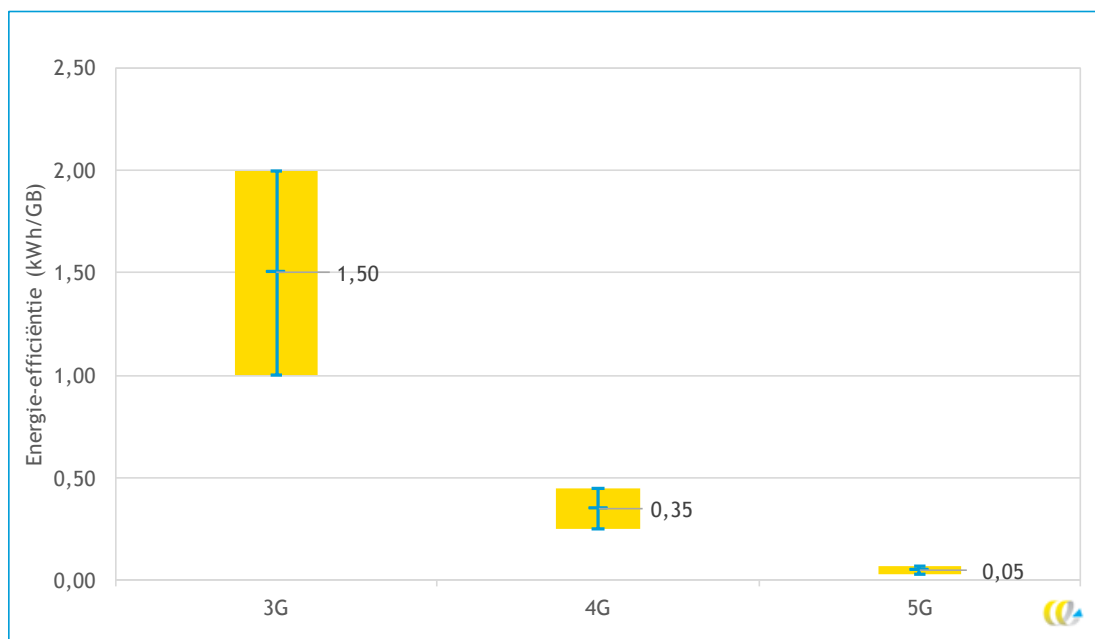
5.2 Onderzoeksvraag 1: Energiegebruik van het 5G-netwerk

De verwachting is dat het mobiele netwerk in 2030 helemaal is overgestapt op 5G. De energie-efficiëntie van het 5G-netwerk, uitgedrukt in energiegebruik per GB data, is in 2030 ongeveer een factor zeven lager dan van het 4G-netwerk en zijn voorgangers, zie Figuur 14. Dat betekent dat bij gelijkblijvend dataverbruik het energiegebruik van mobiele netwerken sterk zal dalen ten opzichte van nu.



De energie-efficiëntie van het huidige 5G-netwerk is echter nog niet op het niveau van 2030. Op dit moment is het 5G-netwerk nog minder energiezuinig dan 4G- en 3G-netwerk (ING Economics Department, 2019). Op korte termijn kan het 5G-netwerk dus wel voor een (relatief) hoger energiegebruik zorgen, al is het 5G-dataverbruik dan nog beperkt in vergelijking met 2030.

Figuur 14 - Energie-efficiëntie verschillende generaties mobiele netwerken in kWh/GB

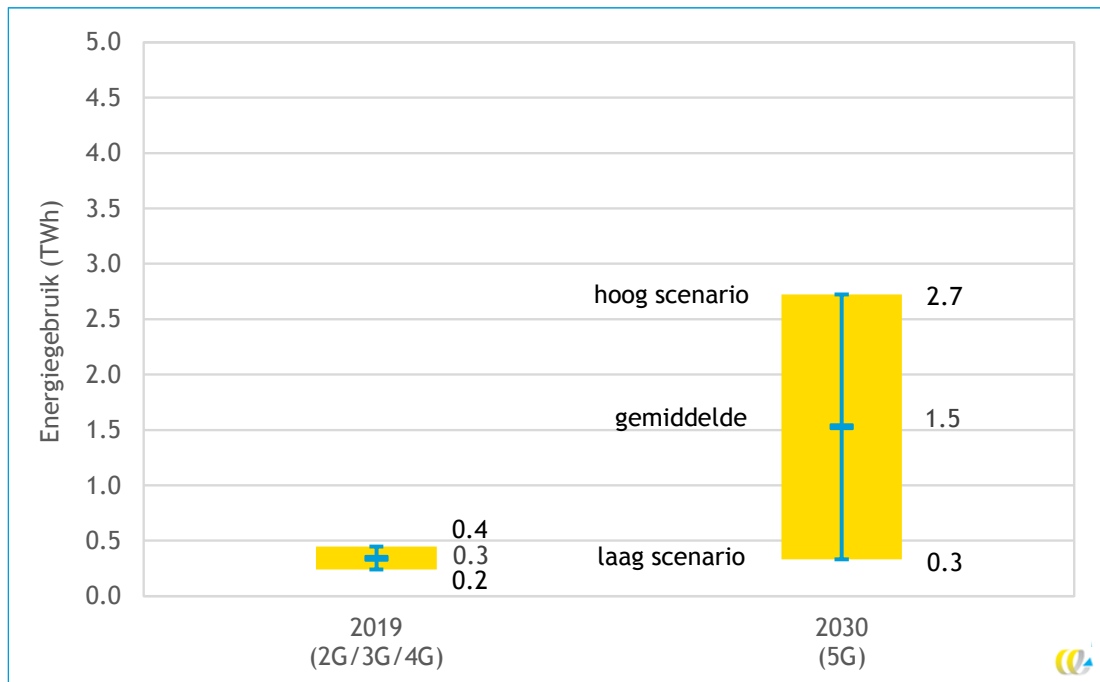


Bron: (ING Economics Department, 2019; IEA, 2017; STL Partners, 2019).

Opmerking: De gele balkjes en blauwe staafjes geven de banbreedte aan, de genoemde cijfers zijn de middenwaarden.

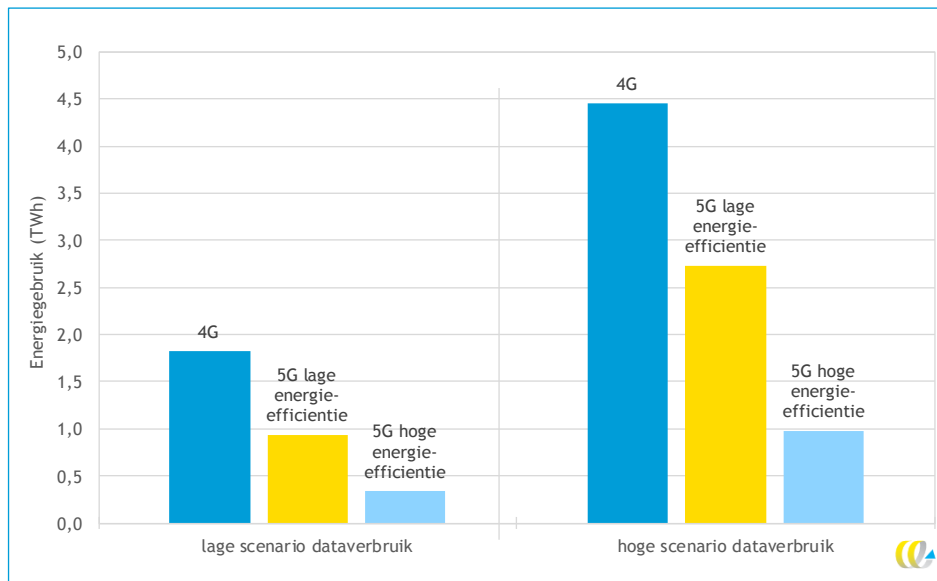
Het staat echter vast dat het dataverbruik tot 2030 zal toenemen. Deze toename is een voortzetting van een trend die al jaren zichtbaar is en die ook zonder 5G ten dele gerealiseerd zal worden. De mogelijkheden die 5G biedt zorgen er echter voor dat het dataverkeer verder zal toenemen, dit laten we zien in de volgende paragraaf. De mate waarin het dataverbruik zal toenemen en de uiteindelijke energie-efficiëntie van het 5G-netwerk bepaalt in welke mate het energiegebruik van mobiele netwerken in 2030 zal toenemen. Voor 2019 is de inschatting dat het energiegebruik van het mobiele netwerk tussen 0,2 en 0,4 TWh/jaar ligt, in 2030 verwachten we dat bij een volledig 5G-netwerk het tussen 0,3 en 2,7 TWh/jaar ligt. Dit is te zien in Figuur 15. Om de genoemde cijfers in perspectief te plaatsen: het verwachte (finale) elektriciteitsverbruik van Nederland in 2030 is 109 TWh/jaar (4% hoger dan nu) (PBL, 2019). In 2016 is het energiegebruik van de ICT-sector in 2030 geraamd op 7,3 tot 10,7 TWh/jaar (CE Delft, 2016), deze cijfers zijn inmiddels wel wat achterhaald en bevatten slechts deels de 5G-ontwikkelingen.

Figuur 15 - Prognose energieverbruik mobiel netwerk 2019-2030 in TWh/jaar



Uit Figuur 15 blijkt dus dat het energieverbruik van mobiele netwerken naar alle waarschijnlijkheid zal toenemen, mogelijk zelfs fors. Om dit in perspectief te plaatsen is het belangrijk om te realiseren dat ook zonder 5G-netwerk het energieverbruik zou toenemen als het 4G-dataverbruik zich blijft ontwikkelen volgens de huidige trend. Doordat het 4G-netwerk minder energie-efficiënt is dan het 5G-netwerk, zal dit energieverbruik naar verwachting zelfs hoger zijn in 2030 bij een volledig 4G-netwerk dan bij een 5G-netwerk. Dit is in Figuur 16 weergegeven voor vergelijkbare scenario's van het dataverbruik: lage groeiverwachting en de hoge groeiverwachting van het dataverkeer van 4G en 5G. In beide scenario's groeit het dataverbruik bij 5G overigens aanzienlijk sterker dan bij 4G, onder andere door nieuwe 5G-toepassingen.

Figuur 16 - Vergelijking energieverbruik 4G en 5G infrastructuur 2030 in TWh/jaar



5.3 Onderzoeksvraag 2: Energiegebruik van 5G-toepassingen

Het 5G-netwerk biedt een aantal technische vernieuwingen ten opzichte van 4G, zoals grotere bandbreedte, hele lage latentie en een hoge betrouwbaarheid. Hierdoor worden nieuwe toepassingen mogelijk die data-intensief zijn en voor een forse stijging van het dataverbruik kunnen zorgen, bovenop de autonome groei. Deze toepassingen kunnen onderscheiden worden in drie *use cases*, waarvan wij op basis van de belangrijkste toepassingen een inschatting hebben gemaakt van het energiegebruik in 2030 in een *hoog* en *laag* scenario. Het gaat om deze drie *use cases* en hun voornaamste toepassingen:

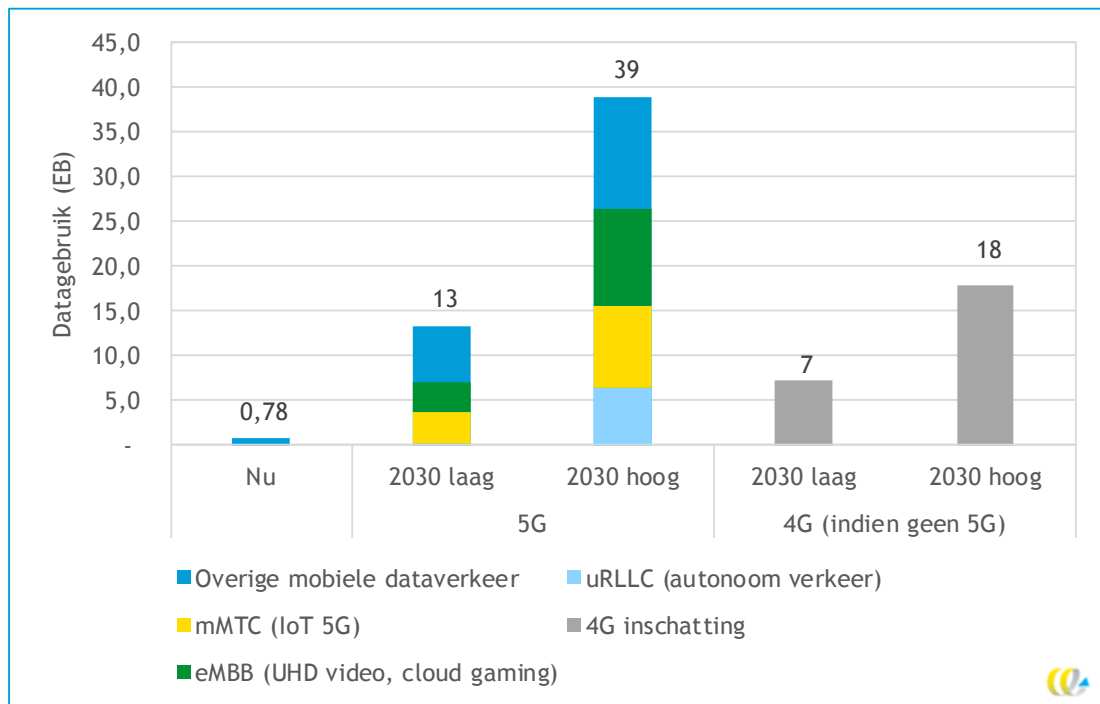
- Ultra Reliable Low Latency Communication (uRLLC): zelfsturend verkeer;
- Massive Machine Type Communication (mMTC): Internet-of-Things;
- Enhanced Mobile Broadband (eMBB): Ultra-HD video en cloud gaming.

De voornaamste impact op het energiegebruik door deze *use cases* is de toename in het dataverbruik en het gebruik van clouddiensten (datacenters). Het energiegebruik van de apparaten zelf is alleen voor IoT (*use case* mMTC) meegenomen, omdat in de andere gevallen het additionele energiegebruik moeilijk is vast te stellen. Enerzijds omdat het energiegebruik van de apparaten niet goed is in te schatten of goed toerekenbaar is aan de ICT-sector (bij de ICT-apparatuur van zelfrijdende voertuigen) en anderzijds omdat de apparaten anders ook gebruikt zouden worden voor niet-5G-toepassingen (bijvoorbeeld videokijken met smartphones op 4G in plaats van 5G).

De ontwikkeling van het dataverkeer van deze *use cases* zoals wij die geprognostiseerd hebben voor 2030, is voor de volledigheid samen met het overige mobiel dataverkeer²⁴ weergegeven in Figuur 17. Zowel de huidige situatie (2019) als het hoge en lage scenario voor 2030 zijn weergegeven. Ook is ter vergelijking een inschatting weergegeven van de data-ontwikkeling van 4G als er geen 5G-netwerk zou komen en het 4G-dataverbruik zich blijft ontwikkelen volgens de huidige trend.

²⁴ Dit is het restant tussen het verwachte totale dataverbruik in 2030 uit de vorige paragraaf en de som van het dataverbruik van de *use cases*.

Figuur 17 - Datagebruik 5G toepassingen in 2030 en mobiel dataverkeer nu in EB. Tevens vergeleken met de inschatting voor datagebruik van 4G in 2030, indien er geen 5G-netwerk zou komen



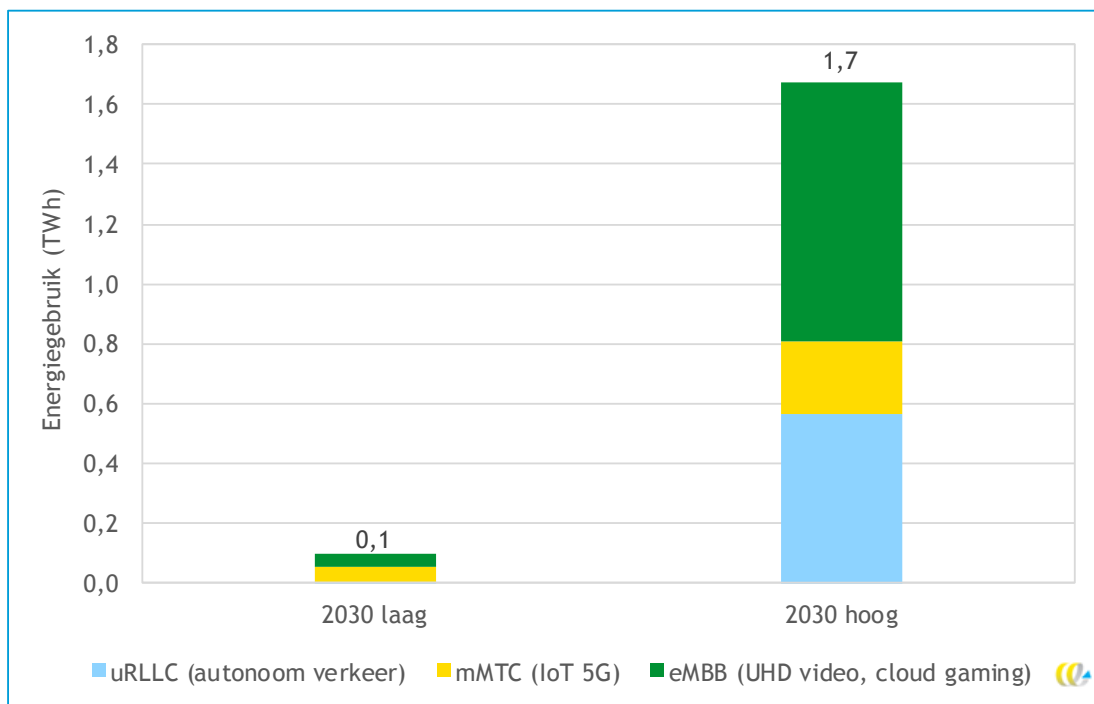
Ook hier zijn weer veel onzekerheden in de ontwikkelingen. Zo hangt de toekomst van zelfsturend verkeer onder andere af van de maatschappelijke acceptatie. Dit zorgt voor grote bandbreedtes.

Alle drie 5G *use cases* samen zorgen dus voor een forse toename in het dataverkeer en het gebruik van datacenters in 2030. De mogelijke gevolgen voor het energiegebruik van de ICT-sector in 2030 zijn weergegeven in Figuur 18²⁵. Hierin is naast het energiegebruik van het dataverkeer dat over het netwerk en via datacenter loopt, ook rekening gehouden met het energiegebruik van IoT-apparaten²⁶. Het energiegebruik van de ICT-sector neemt naar onze inschatting toe met 0,1 tot 1,7 TWh/jaar door de ontwikkelingen binnen de nieuwe 5G *use cases*. Het gaat om additioneel energiegebruik als gevolg van nieuwe mogelijkheden die door het 5G-netwerk gerealiseerd worden. De relatief grote range wordt voornamelijk veroorzaakt door onzekerheid in de mate waarin zelfsturend verkeer zich ontwikkelt en het gebruik van hoge kwaliteit video's.

²⁵ In deze figuur is het energiegebruik van het overige mobiele dataverbruik niet weergegeven, omdat dit onder het energieverbruik van het netwerk is gerekend en geen specifieke 5G-toepassing is.

²⁶ Het energiegebruik van smartphones voor UHD video en cloud gaming is buiten beschouwing gelaten. De effecten op het energiegebruik ten opzichte van de 4G-situatie is niet goed in beeld te brengen. Dit geldt eveneens voor de ICT-systemen van autonome voertuigen.

Figuur 18 - Additioneel energiegebruik door 5G ICT-toepassingen (use cases) in 2030



Opmerking: Dit energiegebruik is inclusief het energiegebruik van netwerk en datacenter behorend bij de dataoverdracht, deze cijfers zijn dus niet simpelweg op te tellen bij het energiegebruik van het netwerk.

5.4 Energiegebruik 5G in een breder perspectief

Dit onderzoek richt zich op het energiegebruik van het 5G-netwerk en de 5G ICT-toepassingen in 2030. Hoewel de ontwikkeling van het dataverbruik niet los kan worden gezien van 5G is het belangrijk te realiseren dat elke GB data over het 5G-netwerk minder energie kost dan over het 4G-netwerk nu. Op korte termijn kan 5G mogelijk wel voor een hoger energiegebruik zorgen wanneer verschillende netwerken naast elkaar bestaan en het 5G-netwerk nog niet de energie-efficiëntie van 2030 heeft bereikt. Ook kunnen nieuwe ICT-toepassingen bijdragen aan energiebesparingen in andere sectoren, bijvoorbeeld doordat verkeer efficiënter verloopt. Dat is een belangrijke kanttekening die voor een breder perspectief op het energiegebruik door 5G verder onderzocht zou moeten worden.

Bibliografie

- ACM, 2019. *ACM Telecommonitor: grotere stijging dataverbruik in eerste helft 2019*. [Online]
Available at: <https://www.acm.nl/nl/publicaties/acm-telecommonitor-grotere-stijging-dataverbruik-eerste-helft-2019>
[Geopend 1 april 2020].
- AECC, 2020. *General Principle and Vision - White Paper Version 3.0*, Wakefield, USA: Automotive Edge Computing Consortium.
- Andrae, A. S. & Edler, T., 2015. On Global Electricity Usage of Communication Technology : Trends to 2030. *Challenges*, Issue 6, pp. 117-157.
- Android Authority, 2020. *Snapdragon SoC guide: All of Qualcomm's smartphone processors explained!*. [Online]
Available at: <https://www.androidauthority.com/qualcomm-snapdragon-soc-guide-908280/>
[Geopend 2020].
- Automobiel Management, 2019. *Europese AV-markt groeit naar 4 miljoen auto's in 2030*. [Online]
Available at: <https://www.automobielmanagement.nl/zelfrijdend-vervoer/2019/05/29/europese-av-markt-groeit-naar-4-miljoen-autos-in-2030/?gdpr=accept>
[Geopend April 2020].
- CBS, 2019. *Personenauto's rijden recordaantal kilometers in 2018*. [Online]
Available at: <https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2019/38/personenauto-s-rijden-recordaantal-kilometers-in-2018>
[Geopend April 2020].
- CE Delft, 2016. *Trends ICT en Energie 2013-2030 - Energiegebruik ICT in Nederland 2013, trendontwikkeling 2020 en 2030*, Delft: CE Delft.
- Cisco, 2016. *Cisco Global Cloud Index : Forecast and Methodology, 2015-2020*. [Online]
Available at: <https://www.iotjournaal.nl/wp-content/uploads/2017/02/white-paper-c11-738085.pdf>
[Geopend 2020].
- Cisco, 2019. *White paper trends 2017-2022*, sl: Cisco.
- Cisco, 2020. *Annual internet report (2018-2023)*, sl: Cisco.
- Design World, 2019. What high speed means for connected vehicles. *Design World*, Issue August, pp. 32-33.
- Emerce, 2019. *Gemiddelde mobiele dataverbruik stijgt snel*. [Online]
Available at: <https://www.emerce.nl/nieuws/gemiddelde-mobiele-dataverbruik-stijgt-snel>
[Geopend 1 april 2020].
- Ericsson, 2019b. *Breaking the energy curve: why service providers should care about 5G energy efficiency*, Stockholm: Ericsson.



Ericsson, 2019b. *Mobility Report*, Stockholm: Ericsson.

Ericsson, 2020. *Cellular IoT in the 5G era : Realizing cellular IoT for industrial transformation*. [Online]
Available at: https://www.ericsson.com/48ff1f/assets/local/reports-papers/white-papers/Cellular_IoT_in_5G_whitepaper_AW.pdf?_ga=2.114501447.1941550076.1596533774-864346258.1596533774
[Geopend 2020].

ERTRAC, 2019. *Connected Automated Driving Roadmap*, Brussels: ERTRAC.

FierceWireless, 2018. *Analysts: Autonomous vehicles could drive 40x increase in wireless traffic*. [Online]
Available at: <https://www.fiercewireless.com/iot/analysts-autonomous-vehicles-could-drive-40x-increase-wireless-traffic>
[Geopend April 2020].

Gray, C., Ayre, R., Hinton, K. & Tucker, R., 2015. *Power consumption of IoT Access Network Technologies, paper at the IEEE ICC 2015 - Workshop on Next Generation Green ICT*. sl, University of Melbourne.

Holma, H. & Toskala, A., 2020. *5G Technology: 3GPP New Radio*. 1 red. Finland: John Wiley & Sons Ltd..

IEA, 2017. *Digitalization & Energy : Technology report*. [Online]
Available at: <https://www.iea.org/reports/digitalisation-and-energy>
[Geopend 2020].

IEEE ComSoc, 2019. *IHS Markit: Video streaming is killer app for 5G (mobile and FWA) in U.S.* [Online]
Available at: <https://techblog.comsoc.org/2019/08/22/ihs-markit-video-streaming-is-killer-app-for-5g-mobile-and-fwa-in-u-s/>
[Geopend 18 maart 2020].

IHS Market, 2019. *Use Case Overviews - eMBB & Fixed Wireless Access*. [Online]
Available at: <https://ihs-markit.foleon.com/technology/5g-is-coming-topical-report/use-case-embb-fwa/>
[Geopend 18 maart 2020].

ING Economics Department, 2019. *Further efficiency gains vital to limit electricity use of data*, sl: ING.

KPMG, 2019. *Mobility 2030: are you ready to rise to the challenge? : A perspective for organizations across the Dutch ecosystem*, Amsterdam: KPMG.

Lauridsen, M., Mogensen, P. & Sorensen, T. B., 2015. Estimation of a 10 Gb/s 5G Receiver's Performance and Power Evolution Towards 2030. *2015 IEEE 82nd Vehicular Technology Conference (VTC2015-Fall)*, Volume 2015, pp. 1-5.

McKinsey Global Institute, 2020. *Connected World : An evolution in connectivity beyond the 5G revolution*, sl: McKinsey Global Institute.



McKinsey, 2020. *The 5G era- New horizons for advanced electronics and industrial companies*, sl: sn

Milakis, D. et al., 2017. Delevopment and transport implications of automated vehicles in the Netherlands: Scenarios for 2030 and 2050. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 17(1), pp. 63-85.

Netflix, 2020. *How can I control how much data Netflix uses?*. [Online]
Available at: <https://help.netflix.com/en/node/87>
[Geopend 1 april 2020].

PBL ; CPB, 2020. *Ontwikkeling mobiliteit : PBL/CPB-notitie ten behoeve van de werkgroep Toekomstbestendige mobiliteit van de Brede maatschappelijke heroverwegingen 2020*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) ; Centraal Planbureau (CPB).

PBL, 2019. *Klimaat- en Energieverkenning (KEV) 2019*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving (PBL).

Qualcomm, 2019. *Benchmark global study proves 5G performance, coverage and power-efficiency*. [Online]
Available at: <https://www.qualcomm.com/news/onq/2019/10/23/benchmark-global-study-proves-5g-performance-coverage-and-power-efficiency>
[Geopend 7 mei 2020].

STL Partners, 2019. *Curtailing Carbon Emissions : Can 5 G Help?*. [Online]
Available at: <https://carrier.huawei.com/~ /media/CNMGV2/download/program/Industries-5G/Curtailing-Carbon-Emissions-Can-5G-Help.pdf>
[Geopend 2020].

Telecompaper, 2019. *Gemiddelde databundelbehoefte in twee jaar tijd gestegen van 2 tot 5 GB per maand*. [Online]
Available at: <https://www.telecompaper.com/nieuws/gemiddelde-databundelbehoefte-in-twee-jaar-tijd-gestegen-van-2-tot-5-gb-per-maand--1305729>
[Geopend 13 april 2020].

The Shift Project, 2019. *Lean ICT, towards digital sobriety*. [Online]
Available at: https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2019/03/Lean-ICT-Report_The-Shift-Project_2019.pdf
[Geopend 2020].

The Verge, 2020. *Shooting 8K videos on the Galaxy S20 requires 600MB per minute*. [Online]
Available at: <https://www.theverge.com/2020/2/12/21134451/samsung-galaxy-s20-8k-footage-recording-600mb-minute-storage-capacity>
[Geopend 1 april 2020].

T-mobile, 2018. *Sustainability Report*, sl: T-mobile.

Tuxera, sd *The biggest challenge car makers face in delivering data-driven UX*. [Online]
Available at: <https://www.tuxera.com/blog/the-biggest-challenge-car-makers-face-in-delivering-data-driven-ux/>
[Geopend April 2020].



VerkeersNet, 2019. *EU verwacht 'volledig geautomatiseerde' auto's in 2030*. [Online] Available at: <https://www.verkeersnet.nl/smart-mobility/29212/eu-verwacht-volledig-geautomatiseerde-autos-in-2030/?gdpr=accept> [Geopend April 2020].



A Energie en ICT-studie 2016

In 2016 publiceerde CE Delft een studie over trends in de ICT met verwachtingen voor de ontwikkelingen van het energiegebruik richting 2030 (CE Delft, 2016). In deze studie zijn twee realistische scenario's uitgewerkt op basis van vijf megatrends:

1. *Pervasive computing*: overal en altijd via meerdere apparaten toegang tot internet.
2. *Internet-of-Things*: zelfsturende communicatie van apparaten onderling o.a. via internet.
3. *Big data*: meer en omvangrijkere data lokaal of in de cloud en data gedreven processen.
4. *Cloud*: 'online' opslag, rekenkracht, applicaties, connectiviteit en ontwikkel platforms.
5. *Energie-efficiëntie*: toenemende energie-efficiëntie in apparatuur en datacenters.

Omdat er over zo'n lange tijdsperiode veel onzekerheden zijn, zeker in een snel ontwikkelende sector als de ICT-sector, zijn er twee scenario's onderscheiden. Het eerste scenario kent een 'laag' ontwikkelingspad, waarbij de aantallen apparaten beperkt groeien en de energie-efficiëntie sterk toeneemt, het tweede scenario kent een 'hoog' ontwikkelingspad, waarbij de aantallen sterk groeien en de energie-efficiëntie slechts beperkt verbeterd. Dit schetst de bandbreedte voor het verwachtte energiegebruik in 2030, dat volgens deze scenario's uitkomt op 7,3 tot 10,7 TWh/jaar in 2030. Ten opzichte van 2013 betekent dit een bandbreedte van een daling van circa 22% tot een toename van 14% in het energiegebruik.

In die studie zijn de ontwikkelingen in de telecomsector wel meegenomen, zowel vast als mobiel, maar het effect van het 5G-netwerk is niet expliciet meegenomen. Wel is een toename voorzien van Internet-of-Things en cloudservices, toepassingen waarop met 5G-apparatuur naar verwachting meer een beroep zal worden gedaan dan nu het geval is. Zelfsturend verkeer was echter geen onderdeel van deze studie en zou als het zich ontwikkelt richting het hoge scenario voor extra energiegebruik in de ICT-sector kunnen zorgen ten opzichte van werd verwacht in 2016.

In de telecomsector werd een sterke groei van het (mobiele) datagebruik voorzien, wat zich samen met efficiëntieverbeteringen uit in 90 tot 130% groei van het energiegebruik in 2013, afhankelijk van het scenario. Dit huidige rapport kijkt naar de verwachte ontwikkelingen van het 5G mobiele netwerk en de onderscheidende 5G-toepassingen, toepassingen die er dankzij 5G komen. Een gedetailleerd vergelijk van de resultaten van de studie uit 2016 is echter lastig, omdat de studie uit 2016 op hoofdlijnen is en een andere sectorindeling hanteert en inmiddels wat gedateerd is. Wel is duidelijk dat de daling van het energiegebruik van de telecomsector in het lage scenario van de studie uit 2016 wel mogelijk is, maar dat dit naar alle waarschijnlijkheid niet komt door de mobiele netwerken.

B Lijst met geïnterviewde personen

De volgende experts zijn in het kader van deze studie geïnterviewd:

Tabel 7 - Overzicht van geïnterviewde personen

Naam	Functie	Organisatie
Toon Norp	5G-expert	TNO
Patrick Blankers	Program Manager Sustainability & Corporate Responsibility (Europe)	Ericsson
Jeroen Buijs	CTO Ericsson Nederland	Ericsson

C Lijst met eenheden & afkortingen

Afktoring/Eenheid	Betekenis
EB, GB	EB: Exabyte; GB: Gigabyte; eenheden voor hoeveelheid data. 1 EB = 1 miljard GB. Voor de beeldvorming: dat staat gelijk aan ongeveer 333 miljoen uur Netflix kijken op HD-kwaliteit.
Mbps	Eenheid voor bitrate, megabit per seconde.
TWh, GWh, MWh	TWh: Terawattuur; GWh: Gigawattuur; MWh: Megawattuur; eenheden voor hoeveelheid energie. 1 TWh = 1 miljard kWh 1 GWh = 1 miljoen kWh 1 MWh = 1.000 kWh
uRLLC	Ultra Reliable Low Latency Communication, een belangrijke 5G use case
mMTC	Massive Machine Type Communication, een belangrijke 5G use case
eMBB	Enhanced Mobile Broadband, een belangrijke 5G use case
V2V, V2I, V2X, V2N, V2P	Vehicle-to-: X: een van onderstaande varianten V: vehicle: communicatie tussen voertuigen I: infrastructure: communicatie tussen voertuigen en infrastructuur N: network: communicatie tussen voertuigen en het mobiele netwerk P: pedestrian: communicatie tussen voertuigen en overige weggebruikers
IoT, M2M	IoT: Internet-of-Things M2M: machine-to-machine communication
ZA	Zelfsturende auto('s)
SD, UHD, HD, 4K, 8K	Afkortingen voor beeldkwaliteit van video: SD: Standard Definition, relatief lage beeldkwaliteit/resolutie HD: High Definition, hogere beeldkwaliteit/resolutie dan SD (o.a. 720p kwaliteit) UHD: Ultra High Definition videokwaliteit/resolutie zoals 4K en 8K, waarbij de laatste de hoogste resolutie/videokwaliteit heeft.
VR, AR	VR: Virtual Reality AR: Augmented Reality
GHz, MHz	GHz: Gigahertz; MHz: Megahertz; eenheden voor frequentie, bijvoorbeeld van radiogolven. 1 MHz = 1.000 GHz