

Leefmilieu Brussel



Verslag van het comité van deskundigen inzake niet-ioniserende straling 2024

Voorzitter: Prof. Isabelle Lagroye

Leden: Prof. Geoffrey Aerts, Ir. Véronique Beauvois, Prof. Michele Cincera,
Ir. David Erzeel, Prof. Daniel R. Kattnig, Prof. Jérôme Louveaux, Prof.
Sofie Pollin, Prof. Yves Rolain, Dr. Muriel Sacco, Dr. Brahim Selmaoui

Inhoudsopgave

1.	Evaluatie van de toepassing van de verordening.....	5
1.1.	Algemene toepassing van de technische aspecten van de bestelling	5
1.1.1.	Algemene situatie van het meetprotocol.....	5
1.1.2.	Simulator verbeteringen	8
1.2.	Inspanningen om informatie te verspreiden onder het publiek.....	9
1.3.	Inspanningen om naleving van afgegeven vergunningen te controleren.....	9
1.4.	Algemene mening over het meetprotocol.....	9
2.	Technologie publieke mobiele netwerken.....	11
2.1.	Overzicht banden/technologie/operator.....	11
2.1.1.	700 MHz-band	12
2.1.2.	800 MHz-band	12
2.1.3.	900 MHz-band	13
2.1.4.	1400 MHz-band	13
2.1.5.	1800 MHz-band	13
2.1.6.	2100 MHz-band	13
2.1.7.	2600 MHz-band	13
2.1.8.	3500 MHz-band	13
2.2.	Volgende generatie publieke mobiele netwerken.....	14
3.	Snelle uitrol van 5G draadloze communicatie en beoordeling van de risico's voor de menselijke gezondheid: waar staan we?.....	16
3.1.	Blootstelling aan 5G-signalen en beoordeling van gezondheidsrisico's	16
3.2.	Huidig onderzoek en nieuws	18
3.3.	Conclusie	19
	Bibliografie	19
4.	De huidige stand van 5G en zijn macro-economische implicaties: een globaal, Europees en Belgisch perspectief.....	22
4.1.	Inleiding	22
4.2.	Wereldwijd overzicht van de uitrol en implicaties van 5G.....	22
4.3.	Het Europese 5G-landschap, de Belgische 5G-voortgang en economische analyse.....	23
4.3.1.	Het Europese 5G-landschap	23
4.3.2.	Vooruitgang van 5G in België en economische analyse.....	23
4.3.2.1.	Economische gevolgen	23
4.4.	Economische implicaties en strategische aanbevelingen	24
4.4.1.	Economische gevolgen van 5G voor Europa en België	24
4.4.2.	Strategische aanbevelingen voor Europa en België	24

4.5.	Conclusie	26
	Bibliografie	26
5.	De uitrol van het 5G-netwerk en de detritische dimensie	27
5.1.	Gegevens verzenden en ontvangen (gebruik).....	27
5.2.	Gegevenscirculatie (netwerken)	28
5.3.	Gegevensopslag (Datacenters).....	29
5.4.	Conclusie	29
	Bibliografie	30
6.	Energieverbruik van het 5G-netwerk	32
6.1.	Studies over het energieverbruik van bestaande netwerken	32
6.2.	Literatuur over de evolutie van 4G- naar 5G-netwerken	35
6.3.	Bespreking	37
6.3.1.	Kernnetwerk en datacenters.....	37
6.3.2.	Gebruikersapparaten.....	38
6.3.3.	Keuzes in verband met dataverkeer en uitrol	38
6.3.4.	Reboundeffecten.....	38
6.3.5.	Energiebesparende functies.....	39
6.4.	Conclusies.....	39
	Bibliografie	40
7.	Milieueffecten van radiofrequente elektromagnetische straling afkomstig van technologie van de vijfde generatie.....	42
7.1.	ICNIRP-blootstellingsrichtlijnen en kritiek van vermeende niet-thermische effecten.....	42
7.2.	Specifieke risico's voor dieren, planten en ecosystemen	43
7.2.1.	Over gewijzigde blootstellingspatronen.....	43
7.2.2.	Over de mogelijkheid van interferentie met dierlijke zintuiglijke systemen	44
7.2.3.	Over niet-zintuiglijke effecten van radiofrequente elektromagnetische velden	44
7.3.	Effecten van 5G-straling op 3,5 GHz.....	45
7.4.	Een overzicht van de effecten van blootstelling aan radiofrequente elektromagnetische velden op flora en fauna	46
7.5.	Ecologische impact van CEM-RF.....	47
7.5.1.	Recente bevindingen over insecten	47
7.5.2.	Recente bevindingen bij planten.....	48
7.5.3.	Relevante bevindingen over vogels.....	48
7.6.	Samenvatting en conclusies	49
	Bibliografie	50

1. Evaluatie van de toepassing van de verordening

1.1. Algemene toepassing van de technische aspecten van de bestelling

Het besluit van 2007 betreffende de bescherming van het milieu tegen de mogelijke schadelijke effecten en hinder door niet-ioniserende straling werd in 2023 gewijzigd om rekening te houden met de 5e generatie mobiele telefonie (5G).

De belangrijkste wijzigingen hebben betrekking op het verhogen van de blootstellingsnormen en het rekening houden met de emissies van radio- en tv-antennes. Het resultaat is een strengere binnennorm van 9,19 V/m 900 MHz-equivalent en een buitennorm van 14,57 V/m.

De commissie vroeg zich af wat de frequentiebanden waren voor het onderdeel "uitzending", aangezien dit niet expliciet werd vermeld in het jaarverslag. Leefmilieu Brussel verklaarde dat het :

FM: 87 tot 108 MHz
DAB: van 174 tot 230 MHz
DVB-T: 470 tot 694 MHz.

Dit antwoord werd door de commissie geaccepteerd.

Na de wijziging van de verordening werd het indelingsbesluit uitgevaardigd om de nieuwe verordening om te zetten en een kader te bieden voor de komst van een 4e exploitant. Voor elke exploitant werden quota vastgesteld.

Aan de nieuwe orde is een handvest verbonden waaruit de onderstaande tekst is gehaald:

"Dit charter voorziet ook in een 5G mMIMO-meetcampagne, gefinancierd door de operatoren. Deze campagne, die eind 2023 van start gaat, heeft als doel om de methode en het protocol te definiëren voor het meten en controleren van de installatie van de Power Control, door metingen uit te voeren op 5G-sites in Brussel; en om ervoor te zorgen dat er correct rekening wordt gehouden met actieve antennes bij het afleveren van milieuvergunningen."

We hebben geen spoor van deze metingen gevonden in het nieuwe rapport. We gaan er daarom van uit dat geen van deze maatregelen is geïmplementeerd. We moedigen u echter aan om uw inspanningen in deze richting voort te zetten.

1.1.1. Algemene situatie van het meetprotocol

Het comité heeft de methode voor het meten van niet-ioniserende straling beoordeeld op basis van "Rap_2024_EN.docx" (geleverd door de dienst "Technologieën en straling" en de dienst "Elektromagnetische straling en luchtverkeer"). Zoals de uitsplitsing van zenders per technologie laat zien, zijn de belangrijkste technologieën momenteel 4G, 3G en 2G. 5G bevindt zich nog in de beginfase van de uitrol in de 700 MHz- en 3600 MHz-banden.

Het rapport geeft aan dat de suggestie van de commissie om de duur van de test te beperken, terwijl de meettijd intact blijft, lijkt te zijn uitgevoerd. Op pagina 7 wordt melding gemaakt van een meting die de hele bandbreedte in één keer bestrijkt, over een periode van 6 minuten. Deze methode biedt een betere tijdsdiversiteit en houdt rekening met alle frequentiebanden.

Op pagina 25 wordt echter een duur van 2 minuten genoemd. Gezien deze discrepantie vroeg de commissie om een nadere toelichting. Het antwoord luidde :

"De meetperiode van 6 minuten vermeld op pagina 7 verwijst naar een methodologie die vorig jaar specifiek werd ontwikkeld om het effect van de PowerLock-functie te meten en staat los van het type metingen dat Leefmilieu Brussel uitvoert om de naleving van de milieuregelgeving te verzekeren. De 2 minuten per operator zijn in overeenstemming met artikel 2.b van het relevante decreet, dat bepaalt dat EM-signalen gedurende 2 minuten worden gemeten per technologie en per operator (met uitzondering van 5G). Als we bijvoorbeeld uitgaan van 3 mobiele operatoren die uitzenden in 2G, 3G en 4G, dan is de totale duur $2\text{min} \times 3\text{tech} \times 3\text{op} = 18\text{min}$. Voor 5G (massive mimo) is het meetprotocol in zoverre anders dat de antenne eerst wordt geactiveerd door een oproep (downloaden van een groot bestand - zie art.2.b), waarna de inspecteur de bundel die door de antenne wordt gecreëerd, begint te meten. Een dergelijke oproep moet minstens 2 minuten per operator duren. Bijvoorbeeld, voor drie 5G-operators is de totale theoretische duur van de 5G-meting $2\text{min} \times 3\text{op} = 6\text{min}$. Dit 5G-protocol is gebaseerd op de testcampagnes die in 2019-2020 in Haasrode zijn uitgevoerd. Het besluit is in 2021 hierop aangepast. Samengevat is de totale tijd voor alle technologieën $18+6=24\text{min}$ (theoretisch), in de praktijk moeten we meer tijd verwachten (vooral voor 5G NR). Vermeldenswaard is dat de Inspectie op het punt staat om dit besluit - opnieuw - aan te passen om "2min per technologie en per operator" te vervangen door "6min per operator", ongeacht de technologie of band. A priori heeft deze wijziging geen betrekking op 5G."

Dit antwoord verduidelijkt de gebruikte procedure en de commissie aanvaardt deze procedure.

In §2.2.2.4 wordt vermeld dat Leefmilieu Brussel metingen uitvoert om de parameters van de simulatiesoftware te kalibreren. Het Comité vroeg om details over het gebruikte protocol en de frequentie van deze meetcampagnes.

Brussel Milieu reageerde:

"De rijtest, die bedoeld is om de intensiteit van het elektromagnetische veld op wegniveau te meten en de geldigheid van de simulaties te bevestigen, wordt eenmaal per jaar uitgevoerd, zoals gespecificeerd in de desbetreffende bijlage. Metingen ter plaatse (naast de antennes) worden uitgevoerd op basis van klachten van burgers, en nadere informatie over het aantal en de frequentie van deze klachten is beschikbaar in hoofdstuk 3, maar deze metingen worden niet systematisch gebruikt voor de kalibratie van de simulator. De simulatiemethode zelf is gevalideerd door het Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). De technische handleiding voor de simulatiesoftware is bijgevoegd. Leefmilieu Brussel onderhoudt een nauwe samenwerking met Geomod, de ontwikkelaars van Mithra-REM voor de voortdurende ontwikkeling van de simulatiemethode, en we sturen regelmatig experimentele gegevens om de simulaties te helpen kalibreren."

Leefmilieu Brussel verstrekke de commissie ook een verslag over de rijtest. Naar aanleiding hiervan stelde de commissie de volgende vragen:

- In de conclusie staat dat het signaal wordt versterkt door de aanwezigheid van een auto. Kan dit in meer detail worden uitgelegd?
Het antwoord op deze vraag luidt als volgt: "We zijn het ermee eens dat de term 'versterking' niet de beste woordkeuze was. We veronderstelden dat de hogere velden in de metingen van de auto te wijten waren aan extra reflecties van het dak en de metalen structuur van de auto. De formulering zal in toekomstige versies van het rapport worden aangepast. Het proces heeft duidelijk niets te maken met actieve versterking in laser/laserapparaten. De commissie is het eens met dit antwoord.
- In tabel 1 wordt de meetonzekerheid gegeven tot 3 GHz, hoewel de metingen zijn uitgevoerd op 3,6 GHz. Kunt u de onzekerheid voor de laatste meetband aangeven?
Het antwoord is ja: "Bedankt dat je dit onder mijn aandacht hebt gebracht. De volledige tabel staat hieronder."

MEASUREMENT UNCERTAINTY			
Expanded measurement uncertainty ^{b)} (in conjunction with SRM basic unit and 1.5 m RF cable)	Frequency range	Single-axis measurement with isotropic antenna	Isotropic measurement
	27 – 85 MHz	+2.4 / -3.3 dB	+ 3.2 / -4.7 dB
	> 85–900 MHz	+2.4 / -3.4 dB	+2.5 / -3.6 dB
	> 900-1400 MHz	+2.3 / -3.1 dB	+2.5 / -3.4 dB
	> 1400-1600 MHz	+2.3 / -3.1 dB	+2.6 / -3.8 dB
	> 1600-1800 MHz	+1.8 / -2.3 dB	+2.2 / -3.0 dB
	> 1800-2200 MHz	+1.8 / -2.3 dB	+2.4 / -3.3 dB
	> 2200-2700 MHz	+1.9 / -2.4 dB	+2.7 / -3.8 dB
	> 2700-3000 MHz	+1.9 / -2.4 dB	+3.3 / -5.3 dB

De commissie is het eens met dit antwoord.

- De grafieken moeten in het algemeen geïnterpreteerd en besproken worden. De belangrijkste vragen die beantwoord moeten worden zijn de volgende:
 - In Figuur 4: zijn de punten gewoon uitschieters? Zo niet, dan begrijpen we niet waar de gemiddelde waarde vandaan komt.
Antwoord: "De punten zijn inderdaad uitschieters".
 - Hoe is de standaarddeviatie berekend? Omvat het alleen de herhaalbaarheidsfout? Of wordt ook de nauwkeurigheid van de meting meegenomen?
Antwoord: "De standaardafwijking wordt alleen berekend op basis van de meetgegevens.
 - In Figuur 5: komen de hete zones overeen met die in de simulaties? Zo nee, waarom niet? Zo ja, benadruk dan dat dit een sterke validatie van de simulatie is.
Antwoord: "Veldmetingen in gebieden met hoge emissies komen overeen met de simulatieresultaten. In het rapport van 2024 zal hier meer nadruk op worden gelegd."
 - Tabel 3: De meeste metingen zijn kleiner met de fiets dan met de auto. Er is één uitzondering die de hele downlink domineert, in de B900 band. Wat is het? Waar komt het vandaan? Is het reproduceerbaar?
Antwoord: "De afwijkende waarde gemeten in 2021 werd onderzocht na de testrit en werd niet gereproduceerd."

- Wordt het gemiddelde in tabel 3 berekend op basis van tijd en/of afstand, aangezien er om de 2,5 meter wordt gemeten?

Antwoord: *"Het gemiddelde wordt berekend over alle gegevens".*

De commissie is het eens met de gegeven antwoorden.

1.1.2. Simulator verbeteringen

De Mithra-REM simulator is bijgewerkt. Exploitanten kunnen hun aanvragen nu rechtstreeks in de software invoeren, wat de vergunningsaanvragen versnelt. Vanuit technisch oogpunt maakt de software het nu mogelijk om rekening te houden met hellende daken en uitzenden (met behulp van de Fresnel ellipsoïde methode in plaats van de ray-tracing methode).

De commissie stelde de volgende vraag: "In de simulatie is de situatie van de daken niet duidelijk. Enerzijds staat op pagina 10 dat daar de kans op overschrijdingen groter is. De simulaties worden verondersteld het probleem stroomopwaarts op te lossen. Als simulaties in dit geval overschrijdingen kunnen aantonen, waarom worden ze dan niet gebruikt in het algemene geval? De meetcampagnes worden genoemd op pagina 11, maar hoe passen ze in deze tabel?

Het antwoord van Leefmilieu Brussel is :

"Dezelfde simulatiemethode wordt gebruikt om de overschrijdingen te controleren voor elk type oppervlak: buitengebieden zoals straten, wegen en balkons; buitengevels en daken; en binnengevels en daken, wat overeenkomt met het externe veld vermenigvuldigd met een dempingsfactor die afhangt van het materiaal van dit oppervlak (beton, gewapend beton, enz.). Aangezien dezelfde aannames worden gebruikt om elektrische veldsterktes op dakniveau en op bestratingsniveau te simuleren, is er ceteris paribus geen reden om te verwachten dat een validatiecampagne op basis van veldmetingen op bestratingsniveau onvoldoende zou zijn om ook de simulatieresultaten op dakniveau te valideren."

De commissie is het ermee eens dat de argumenten steekhoudend zijn en vindt daarom dat de formulering van het oorspronkelijke verslag moet worden gewijzigd.

Op pagina 11 van het rapport: welke nieuwe berekeningsmethode heeft de leverancier ontwikkeld? Is deze toepasbaar op alle frequenties om een volledige globale kaart van het Brusselse Gewest te geven?

Antwoord: "De leverancier van simulatiesoftware heeft een nieuwe methode ontwikkeld voor het berekenen van grote afstanden voor het Franse grondgebied, waardoor het uiteindelijk mogelijk wordt om sneller en tegen lagere kosten een globale kaart voor het Brusselse Gewest te leveren. De nieuwe methode is gebaseerd op een adaptieve mesh: hoe verder je van de antennes verwijderd bent, hoe minder berekeningspunten er zijn."

Het antwoord werd door de commissie geaccepteerd.

Op pagina 10 van het rapport wordt als methode voor diffusie de Fresnel ellipsoïde methode genoemd. De commissie gelooft niet dat deze methode algemeen bekend en/of eenduidig gedefinieerd is. Kunt u een verwijzing geven naar de documentatie die voor deze methode wordt gebruikt?

Antwoord: "Details over de simulatiemethode zijn te vinden in het technisch document van de simulator op pagina 56 en 76 (Mithra-REM CSTB 2024-10-18_nl). We zullen in het rapport van 2024 meer details geven over de simulatiemethode."

Het antwoord werd door de commissie geaccepteerd, omdat er bewijs is voor het gebruik van deze methode in open ruimten en stedelijke omgevingen.

1.2. Inspanningen om informatie te verspreiden onder het publiek

De commissie merkt op dat de overheid zich blijft inspannen om de verspreiding van informatie over niet-ioniserende straling onder een zo breed mogelijk publiek te verbeteren, zoals de commissie voorstelt, onder meer over de werking van het comité van deskundigen.

Zie: <https://environnement.brussels/citoyen/reglementation/textes-de-loi/quelles-sont-les-normes-legales-dexposition-aux-ondes-electromagnetiques>

Het Comité stelt vast dat de administratie deze informatie up-to-date houdt, in het bijzonder bij wijzigingen aan de ordonnantie. Ook de positie van de Brusselse ordonnantie ten opzichte van andere wetgeving (Belgische, Europese, internationale) is belangrijke informatie, die te vinden is op bovengenoemde website.

Internetinhoud over hoe blootstellingsnormen worden gecontroleerd is ook belangrijk voor burgers. Deze informatie omvat simulaties en veldcontroles, waaronder de Drive Test. De toegang tot simulatiegegevens is verbeterd door deze informatie te centraliseren op een nieuwe viewer.

Zie: <https://antennes3d.environnement.brussels/tw3d.php?id=001894860&lang=fr>

De pagina's voor professionals zijn ook herzien om de verplichtingen uit te leggen in termen van elektromagnetische golven.

1.3. Inspanningen om naleving van afgegeven vergunningen te controleren

Het Comité stelt vast dat de autoriteiten zich blijven inspannen om de overeenstemming tussen de afgegeven milieuvergunningen en de antenne-installaties te verbeteren. Daartoe hebben de autoriteiten zich tot doel gesteld om twee keer per maand de uittreksels van de exploitatie- en onderhoudscentra (OCM) van de exploitanten te vergelijken met de milieuvergunningen. Bovendien is nu een conformiteitscertificaat voor installaties vereist wanneer een installatie wordt gewijzigd.

1.4. Algemene mening over het meetprotocol

De commissie is van mening dat Leefmilieu Brussel de beheersmaatregelen en simulaties correct, accuraat en oordeelkundig uitvoert. De commissie constateert dat de procedures positief blijven evolueren. De commissie is verheugd over de inspanningen die worden geleverd om de metingen verder te verbeteren.

De commissie wil erop wijzen dat de nieuwe 5G-norm doorslaggevende veranderingen met zich mee zal brengen voor de methodes om stralingsniveaus te meten. De commissie moedigt daarom Leefmilieu Brussel aan om de nodige anticiperende inspanningen te blijven leveren om deze wijzigingen in de mate van het mogelijke op te nemen om een kloof tussen de 5G-norm en de metingen op het terrein te vermijden. Gezien de expertise die is opgebouwd rond de karakterisering van straling van 4G, en het voorbereidende werk dat door LB is uitgevoerd, heeft de commissie vertrouwen in de expertise van LB om deze uitdaging aan te gaan.

De commissie merkte echter op dat de aanpak met de nieuwe 5G-maatregelen onduidelijk is. Zij zou graag zien dat het gebruikte protocol duidelijk wordt gedefinieerd, en waarin verschilt het van 4G? De commissie vindt het belangrijk om de argumenten voor dit protocol te noemen. De vraag werd voorgelegd aan LB en het volgende antwoord werd gegeven:

"In aanvulling op het antwoord dat hierboven in punt 1.1.2 is gegeven, is het protocol voor 5G NR gemotiveerd door de aard van de werking van actieve antennes, waarvoor een conventioneel meetprotocol (zoals voor 4G) niet langer geschikt is. Dit komt omdat een actieve antenne alleen een "bundel" uitzendt als er een gebruiker aanwezig is. Als er geen gebruiker is, zendt de antenne een zwak signaal uit (+/-60mV) om een gebruiker in de buurt te detecteren. Om het slechtst mogelijke signaal te meten, moet je de antenne dus activeren door bijvoorbeeld te downloaden. Daarom heeft de inspectiedienst zijn protocol aangepast aan 5G NR."

De commissie is het ermee eens dat een "oproep van de balk" nodig is, maar het zou nuttig zijn om de voorgestelde procedure te onderbouwen met een rechtvaardiging, een wetenschappelijke referentie of meetgegevens.

2. Technologie publieke mobiele netwerken

Momenteel zijn er in Brussel verschillende operatoren aanwezig die publieke mobiele diensten (mobiele spraakoproepen en mobiele datadiensten) aanbieden aan het publiek.

Sinds de opkomst van de gsm in de jaren 1990 zijn de technologieën die gebruikt worden voor het aanbieden van deze diensten geëvolueerd. Grofweg elke 10 jaar zijn er nieuwe standaarden van kracht geworden:

- jaren 90: 2G - "GSM";
- jaren 2000: 3G - "UMTS";
- jaren 2010: 4G - "LTE";
- jaren 2020: 5G - "NR".

Over de jaren heen zijn er ook steeds meer frequentiebanden in gebruik genomen:

- 2G is begonnen met 900 MHz en 1800 MHz spectrum;
- 3G kon bijkomend gebruik maken van 2100 MHz spectrum;
- 4G en 5G kregen bijkomende banden in de 700 MHz, 800 MHz, 1400 MHz, 2600 MHz en 3500 MHz-banden (niet chronologisch).

Momenteel zijn de vergunning voor het spectrumgebruik, uitgereikt door het BIPT (Belgisch Instituut voor postdiensten en telecommunicatie) technologie-neutraal, de operatoren mogen kiezen welke technologie ze aanbieden in de respectievelijke banden.

Het aantal operatoren (partijen die de diensten aanbieden) is over de jaren heen ook geëvolueerd, en ze zijn ook al (soms verschillende keren) van naam gewijzigd. Momenteel bieden (alfabetisch) DIGI Communications Belgium¹, Orange Belgium², Proximus² en Telenet diensten aan in Brussel.

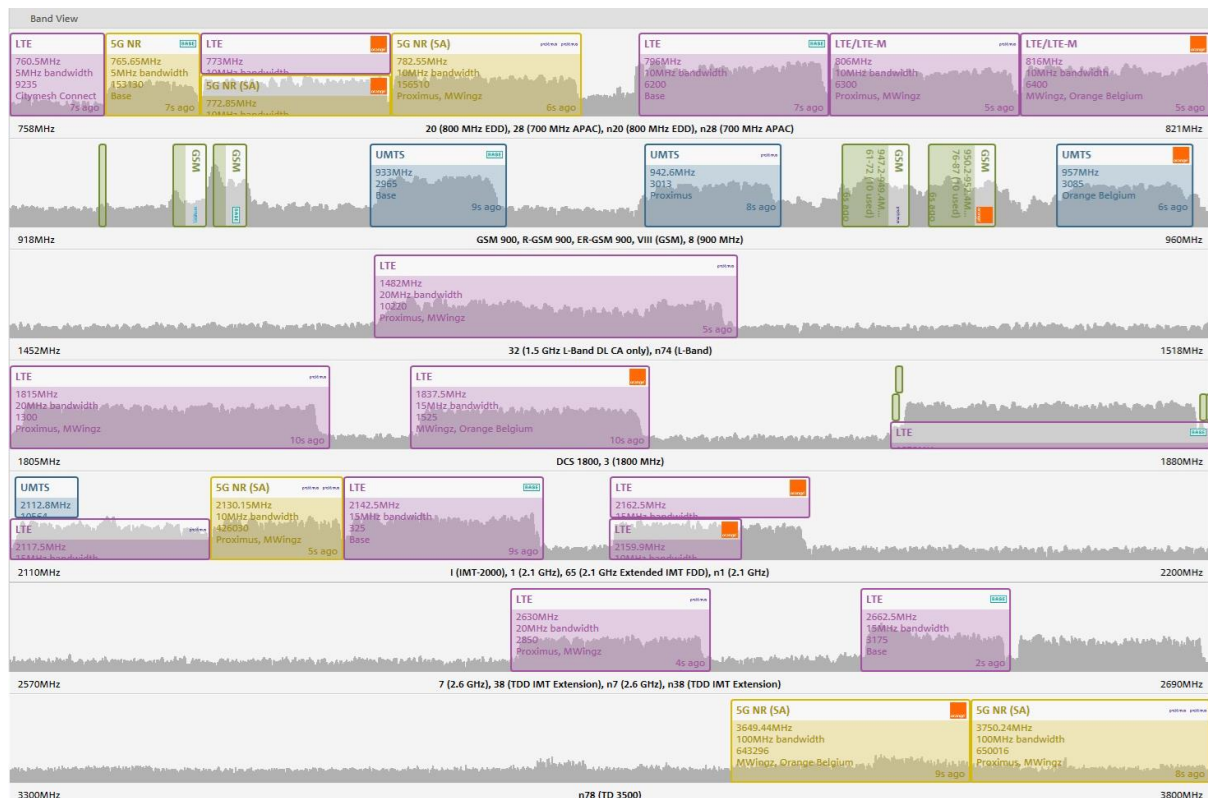
2.1. Overzicht banden/technologie/operator

Hieronder is een overzicht te zien van gebruikte banden, technologieën en operatoren. Het overzicht geeft geen volledig beeld van de situatie op het hele grondgebied, het is een voorbeeld van een momentopname op één plaats en één tijdstip. Het wordt gebruikt als kapstok-voorbeeld om de verschillende combinaties van band-technologie-operator te overlopen, zonder de intentie te hebben compleet te zijn.

De benamingen van de operatoren in de figuur zijn ook niet de officiële namen waaronder deze operatoren momenteel bekend zijn: Citymesh Connect verwijst naar DIGI Communications Belgium, Base naar Telenet, MwingZ, Orange Belgium naar Orange Belgium en Proximus, MWingz naar Proximus).

¹ DIGI Communications Belgium maakt gebruik van het netwerk van Insky.

² Orange Belgium en Proximus maken gedeeltelijk gebruik van het netwerk van MWingZ voor het RAN gedeelte (Radio Access Network).



Figuur 2.1: Overzicht van banden, technologieën en operatoren
2G-groen / 3G-blauw / 4G-paars / 5G-geel

2.1.1. 700 MHz-band

In de 700 MHz-band zien we de aanwezigheid van 4G LTE en 5G NR technologieën uitgebraat door DIGI Communications Belgium, Orange Belgium, Proximus en Telenet.

4G LTE en 5G NR kunnen mogelijk gebruikt worden binnen eenzelfde spectrum op eenzelfde mast. Wanneer dit toegepast wordt spreken we van DSS – Dynamic Spectrum Sharing: 4G en 5G kunnen naast mekaar gebruikt worden naargelang de noden van het moment. Slimme resource-management algoritmes laten toe om een opdeling te maken zoals nodig.

2.1.2. 800 MHz-band

In de 800 MHz-band zien we dat de aanwezige operatoren op deze plaats allen gebruik maken van 4G – LTE. Sommigen bieden LTE-M aan: dit betekent dat binnen het LTE-spectrum een klein deeltje voorbehouden wordt voor LTE Cat-M. Dit is een technologie die gebruikt kan worden voor Machine-to-Machine communicatie zoals gebruikt bij IoT-(Internet of Things)-communicatie. Smartmeters kunnen bijvoorbeeld gebruik maken hiervan.

2.1.3. 900 MHz-band

In de “klassieke” 900 MHz-band vinden we nog steeds 2G – GSM signalen terug. Maar we zien ook dat door de technologie-neutraliteit de operatoren hier ook 3G-UMTS signalen plaatsen.

Deze 3G-UMTS technologie wordt stilaan uitgefaseerd. Alle Belgische operatoren die deze technologie gebruiken hebben aangekondigd dat ze deze technologie gefaseerd uitschakelen in 2024 of 2025 of later.

Dit spectrum kan dan gebruikt worden voor een modernere technologie 4G of 5G. Deze nieuwe technologieën zijn energie- en spectrum-efficiënter.

Voor 2G is nog geen definitief uitschakelplan opgesteld. Vele machine-to-machine toestellen maken nog steeds gebruik van 2G zonder 4G of 5G (Cat-M of NB-IOT) aan te kunnen.

2.1.4. 1400 MHz-band

De 1400 MHz-band is wat speciaal: het is -wat we noemen- een SDL-band (Supplementary downlink). Deze band kan niet alleenstaand gebruikt worden om diensten aan te bieden. Dit wil zeggen dat een mobiel toestel verbinding moet maken met het netwerk via een andere band/technologie. Maar vanuit die andere band/technologie kan het toestel wel toestemming gegeven worden om van deze SDL-band gebruik te maken om extra capaciteit te krijgen om bv. hogere download-snelheden te bereiken.

2.1.5. 1800 MHz-band

De 1800 MHz-band is de andere (naast 900) “klassieke” band waarin 2G-GSM werd aangeboden. We zien dat Telenet nog steeds enkele 2G-GSM kanalen uitbaat maar er wordt tegenwoordig vooral ook van de 4G-LTE-technologie gebruik gemaakt. Dit komt omdat er steeds minder en minder verkeer over 2G verloopt.

2.1.6. 2100 MHz-band

Oorspronkelijk werd de 2100 MHz-band gebruikt als 3G-UMTS spectrum, maar we zien dat momenteel de 3 technologieën 3G-4G-5G uitgebaat worden in deze band. Op redelijk korte termijn zal de 3G echter verdwijnen zoals hiervoor uitgelegd (zie 900 MHz-band).

2.1.7. 2600 MHz-band

Het 2600 MHz-spectrum werd geveild in het kader van nieuwe 4G-vergunningen. Momenteel is er in deze band enkel 4G-LTE aanwezig op deze plaats waar de meting gebeurde.

2.1.8. 3500 MHz-band

Het laatste stuk spectrum dat in gebruik is voor deze publieke mobiele diensten, is het 3,5 GHz-spectrum. We hebben er enkel 5G gedetecteerd in deze opname. De 5G technologie die in deze band

gebruikt wordt verschilt wel wat van de andere technologieën in de voorgaande banden die we besproken.

Bij alle voorgaande banden gebruikten de aanwezige technologieën FDD – Frequency Division Duplex. Hierbij wordt de verbinding tussen het netwerk (“de mast”) en het mobiele toestel “de gsm of smartphone” op een andere frequentie gemaakt dan de omgekeerde verbinding tussen toestel en netwerk. De uitzendingen door het netwerk naar het toestel worden de ‘downlink’ genoemd, en de verbinding tussen het toestel en de mast wordt de ‘uplink’ genoemd.

Voor downlink en uplink gebruiken alle banden van 700 tot en met 2600 MHz dus verschillende frequenties. Wat in figuur 1 getoond wordt voor deze banden zijn de downlink frequenties, zoals gebruikt door het netwerk. De bijhorende uplink frequenties werden niet afgebeeld.

Voor de 5G in de 3500 MHz-band is de situatie echter verschillend. Hier wordt gebruik gemaakt van het TDD-(Time Division Duplex)-principe. Hierbij gebruiken de downlink en de uplink dezelfde frequenties. Om mekaar niet te storen delen de netwerken hun uitzendblokken echter op in het tijdsdomein: het netwerk gebruikt een deel van de tijd om met uitzendingen de downlink te verzekeren, en de toestellen krijgen een tijdsblok toegewezen gedurende hetwelke het netwerk niet uitzendt maar wel luistert naar de uplink van de toestellen.

2.2. Volgende generatie publieke mobiele netwerken

De International Telecommunication Union (ITU) is reeds begonnen met studies die de trends, visie en specificaties voor de volgende generatie mobiele netwerken vastleggen. In **Error! Reference source not found.** wordt een overzicht gegeven van de meest recente standaarden die volgens de aanbevelingen van de ITU werden ontwikkeld. Daaruit is duidelijk op te merken dat het werk richting wat men 6G noemt, of IMT-2030 ondertussen al gestart is en in verschillende rapporten is gedocumenteerd.

	IMT-2000 (3G)	IMT-Advanced (4G)	IMT-2020 (5G)	IMT-2030 (6G)
Report (FTT)	Future Tech Trends (FTT)	-	Rep. ITU-R M.2320	Rep. ITU-R M.2516
		-	Nov 2014	Nov 2022
Recommendation (Vision/Framework)	Vision	Rec. ITU-R M.687 & M.816	Rec. ITU-R M.2083	Rec. ITU-R M.2160
		Feb/Mar 1992 → 1997	September 2015	November 2023
Reports (Requirements, evaluation methodology and submission template)	Technical Performance Requirements	Rec. ITU-R M.1034	Rep. ITU-R M.2134	Rep. ITU-R M.2410
		Feb 1997	2008	2017
	Submission Template	8/LCCE/47 + Add	Rep. ITU-R M.2133	Rep. ITU-R M.2411
		1998	2008	2017
Recommendation (Radio Interface Tech.)	Evaluation Methodology	Rec. ITU-R M.1225	Rep. ITU-R M.2135-1	Rep. ITU-R M.2412
		Feb 1997	2009	2017
Recommendation (Radio Interface Tech.)	RIT Specifications (1 st release)	Rec. ITU-R M.1457	Rec. ITU-R M.2012	Rec. ITU-R M.2150
		May 2000	Jan 2012	Feb 2021

Future work

Figuur 2.2: IMT-families voor openbare mobiele netwerken - bron ["ITU-R Framework for IMT-2030" (bijgewerkt in oktober 2024)].

6G staat nog in de kinderschoenen, maar het is al duidelijk dat 6G ontwikkeld zal worden om een antwoord te bieden op duurzaamheid, alomtegenwoordige connectiviteit (ook in afgelegen gebieden) en inclusiviteit (om iedereen toegang te geven tot breedband connectiviteit). Veiligheid van de netwerkinfrastructuur is ook een belangrijk aandachtspunt, alsook betere interoperabiliteit tussen verschillende type netwerken.

Voor het spectrum wordt vooral gekeken in de richting van spectrum tussen ongeveer 7 en 20 GHz. Lage frequentiebanden blijven cruciaal om landelijke dekking mogelijk te maken, met name om de digitale kloof aan te pakken en deze uit te breiden. Harmonisatie van spectrum voor IMT zou leiden tot een grotere opportuniteit voor delen van apparatuur en is wenselijk om schaalvoordelen en betaalbaarheid van apparatuur te bereiken, waardoor digitale inclusie mogelijk wordt bevorderd. De volgende generatie (of 6G) staat in elk geval nog in de kinderschoenen.

3. Snelle uitrol van 5G draadloze communicatie en beoordeling van de risico's voor de menselijke gezondheid: waar staan we?

De grootschalige introductie van 5G draadloze communicatie speelt een cruciale rol in de ontwikkeling van geavanceerde digitale infrastructuren en stimuleert innovatie in verschillende sectoren. De wijdverspreide toepassing ervan heeft echter geleid tot bezorgdheid over mogelijke gevolgen voor de gezondheid, wat een voortdurend publiek en wetenschappelijk debat op gang heeft gebracht. Het huidige onderzoek naar millimetergolven heeft nog geen definitieve conclusies over het onderwerp opgeleverd. In reactie hierop heeft de Europese Unie vier lopende projecten gefinancierd via een oproep tot het indienen van voorstellen, gericht op het aanpakken van deze zorgen en het opvullen van de hiaten met betrekking tot de gezondheidseffecten van 5G-technologie.

3.1. Blootstelling aan 5G-signalen en beoordeling van gezondheidsrisico's

5G-netwerken worden snel uitgerold in stedelijke en plattelandsgebieden over de hele wereld, met aanzienlijke investeringen van telecombedrijven en overheden. Dit omvat de installatie van miljoenen nieuwe "small cell" antennes, vaak dicht bij de grond en in dicht bevolkte gebieden dan eerdere technologieën zoals 4G. Omdat 5G voornamelijk in het 24-100 GHz millimetergolfbereik werkt, is de datatransmissie sneller, maar is er een dicht antennennetwerk nodig (de golflengtes zijn korter). Dit netwerk is ontworpen om het grootschalige Internet of Things (IoT) te ondersteunen, waardoor slimme steden, autonome voertuigen en geavanceerde industriële automatisering mogelijk worden. De technologie ondersteunt video streaming met ultrahoge definitie, virtuele en augmented reality-toepassingen en andere gegevensintensieve activiteiten. Bedrijfskritische toepassingen zoals chirurgie op afstand, real-time gaming en geavanceerde robotica vertrouwen op de low-latency mogelijkheden van 5G.

De uitrol van een netwerk van kleine 5G mobiele antennes betekent dat mensen waarschijnlijk vaker zullen worden blootgesteld aan 5G EMV's. Deze EMV's zijn radiofrequente (RF) velden. Deze EMV's zijn radiofrequente (RF) velden, en 5G signalen zullen uiteindelijk gebruik maken van bestaande 4G frequenties, evenals drie specifieke draaggolffrequenties: 0,7, 3,5 en 26 GHz. Op 26 GHz worden EMV's "millimetergolven" genoemd omdat hun golflengte in de orde van een millimeter ligt. Hoewel deze millimetergolven die in 5G worden gebruikt niet diep in de huid doordringen, heeft de hogere dichtheid van de antennes geleid tot bezorgdheid over de mogelijkheid van cumulatieve blootstelling.

In 2012 voerde het Franse agentschap ANSES een beoordeling uit van de gezondheidsrisico's in verband met het gebruik van lichaamsscanners die gebruikmaken van millimetergolven rond de 24 GHz (ANSES 2012). Dit rapport benadrukt dat de meeste biologische effecten werden waargenomen bij blootstellingsniveaus die ver boven de Europese blootstellingslimieten lagen. Op deze vermogensniveaus veroorzaakt blootstelling lokale verhitting en is het moeilijk om zuivere elektromagnetische effecten te onderscheiden van thermische effecten.

Een in 2019 gepubliceerde review behandelde het beschikbare onderzoek naar de biologische en fysiologische effecten van EMV in het frequentiebereik tussen 6 en 100 GHz, inclusief de 26 GHz frequentie van 5G. Van de 94 geïdentificeerde publicaties toonde 80% van de in vivo onderzoeken reacties op blootstelling aan, terwijl 58% van het in vitro onderzoek effecten aantoonde, waaronder fysiologische, neurologische, histologische veranderingen of mutaties in gen- of eiwitexpressie, cytotoxische effecten, genotoxische veranderingen, meestal gerelateerd aan verwarming (Simkó en

Mattsson, 2019). Daarnaast identificeerden de auteurs slechts twee publicaties die te maken hadden met frequenties tussen 6 en 30 GHz. Eén in vitro studie werd uitgevoerd op fibroblasten, waarbij genotoxische effecten werden waargenomen bij een SAR-niveau van 20 W/kg (Franchini et al., 2018). De andere studie, uitgevoerd op bacteriën en schimmels, toonde een verhoogde celgroei na blootstelling aan frequenties van 18 GHz (Nguyen et al., 2016).

Vervolgens zijn er verdere reviews en meta-analyses (Karipidis et al., 2021; Wood et al., 2021) en een ANSES-rapport (2022) gepubliceerd over de beschikbare onderzoeken naar de biologische effecten van EMV in de specifieke frequenties van 5G. Het blijkt dat de meeste gerapporteerde biologische effecten niet onafhankelijk zijn gereproduceerd en dat veel studies gebruik hebben gemaakt van methoden van lage kwaliteit voor de beoordeling en monitoring van de blootstelling. In veel gevallen kan de mogelijkheid van effecten veroorzaakt door verhitting als gevolg van de hoge depositie van RF-energie, en dus verhitting van blootgestelde monsters, niet worden uitgesloten. In het algemeen ondersteunen deze onderzoeken geen bevestigd verband tussen millimetergolven met lage intensiteit en biologische effecten. Een aanvullend onderzoek naar het verband tussen blootstelling aan EMV van mobiele telefoons en de regulatie van het circadiane ritme bij dieren en mensen laat zien dat de resultaten van de onderzoeken tegenstrijdig zijn en dat sommige gegevens geen uitsluitel geven. Dit impliceert de noodzaak van verder onderzoek met gecontroleerde protocollen om beter te kunnen bepalen of het effect van chronische blootstelling aan RF op het biologisch functioneren en de gezondheid van gebruikers echt bestaat (Selmaoui & Touitou, 2020). Aangezien de penetratie van 5G-golven oppervlakkig is door het gebruik van de 26 GHz frequentie, zijn de verwachte effecten meer gericht op de huid. Er werden bijvoorbeeld drempels voor het gevoel van huidwarmte gemeten op de huid van de middenrug van 15 volwassen mannen, na blootstelling aan verschillende microgolffrequenties (2,45, 7,5, 10, 35 en 94 GHz) en infraroodfrequenties (IR). De gevoeligheid bleek toe te nemen over het gehele bereik van de geteste microgolffrequenties. De drempel bij 2,45 GHz ($63,1 \pm 6,7$ mW/cm²) was lager dan die bij 94 GHz ($4,5 \pm 0,6$ mW/cm²), zelf vergelijkbaar met de IR-drempel ($5,34 \pm 1,07$ mW/cm²) (Blick et al., 1997). Dit toont duidelijk aan dat millimetergolven door de huid worden geabsorbeerd. In een ander onderzoek (Alekseev et al., 2012) namen de opwarming van de huid en SAR toe met de frequenties die in dit onderzoek werden gebruikt. Deze gegevens vormen de basis van de blootstellingslimieten die zijn voorgesteld door de ICNIRP (ICRNIP, 2020) en het comité van het Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE Bushberg et al., 2020). Andere huideffecten werden waargenomen, zoals pigmentatie van blootgestelde huid, in een in vitro studie waarbij de gebruikte signalen 1,762 GHz en 28 GHz waren. Er is ook vastgesteld dat RF van mobiele telefoons geen invloed heeft op de melaninesynthese of huidpigmentatie onder normale omstandigheden van mobiel gebruik (Kim et al., 2021).

Meer recentelijk zijn er verschillende onderzoeken gepubliceerd over de effecten van 5G-signalen op 3,5 GHz. Jamal et al. (2023, 2024) toonden aan dat een 3,5 GHz 5G-signaal, gebruikt gedurende 1/2 uur binnen de voorgeschreven blootstellingslimieten, geen invloed had op hersenactiviteit, huidtemperatuur of elektrodermale activiteit bij 34 gezonde volwassen vrijwilligers (17 mannen en 17 vrouwen).

Canovi et al. (2023) toonden geen effect aan van een 15 minuten durende blootstelling aan een 3,5 GHz signaal (continu of gemoduleerd 5G) op neuronale activiteit in vitro bij SAR-niveaus van 1 en 3 W/Kg. Bij het hoogste geteste SAR-niveau (28 W/kg) was er echter een significante afname van neuronale elektrische activiteitsparameters.

Patrignoni et al. (2023) toonden een significante verlaging van de mitochondriale concentratie van ROS in huidfibroblasten blootgesteld aan een gemoduleerd 5G-signaal op 3,5 GHz bij één van de drie geteste SAR-niveaus (1 W/kg). Aan de andere kant verhoogde blootstelling licht maar statistisch de mitochondriale concentratie van ROS geïnduceerd door UV-B-straling in keratinocyten bij 0,25 en 1 W/kg maar niet bij 4 W/kg. Er werd echter geen effect waargenomen op de levensvatbaarheid van de cellen, ongeacht de blootstellingsomstandigheden.

Joushomme et al. (2023) testten ook de effecten van een gemoduleerd 5G-signaal op 3,5 GHz (continu of in AAN/UIT-modus) op huidfibroblasten en keratinocyten op de activiteit van verschillende eiwitten die betrokken zijn bij de cellulaire respons op stress (HSF, ERK, RAS, PML). De resultaten verkregen met behulp van de bioluminescentie resonantie energieoverdracht techniek (BRET) wijzen op effecten zoals een lichte maar significante afname in de maximale efficiëntie voor het triggeren van SUMOylering van PML in fibroblasten die continu zijn blootgesteld aan het 5G signaal (24 uur bij 4 W/kg), maar niet in keratinocyten.

Pecoraro et al. (2023) bestudeerden de embryonale ontwikkeling van zebravissen (*Danio rerio*) die werden blootgesteld aan 27 GHz millimetergolven. De resultaten wijzen op een voorbijgaande toename van de hartslag van blootgestelde embryo's gedurende 48 uur (vanaf 6 uur na de bevruchting), met desondanks een normale ontwikkeling van blootgestelde embryo's tot 96 uur.

Dasgupta et al. (2020, 2022) bestudeerden hetzelfde model met blootstelling aan een 3,5 GHz signaal (geen 5G modulatie) en een SAR van 8,27 W/Kg. Blootstelling gedurende 48 uur vanaf 6 uur na de bevruchting had geen significante invloed op de mortaliteit of morfologie, maar er werd een bescheiden remming van de schrikreactie waargenomen. Er werd een bescheiden transcriptomische verstoring waargenomen, waarbij 28 genen differentieel tot expressie kwamen en voornamelijk verband hielden met metabolisme. Tot slot suggereren gedragstesten op volwassen leeftijd een effect op sociaal gedrag en angstgerelateerd gedrag na blootstelling aan RF tijdens de embryonale periode.

We hebben nu enige informatie over de effecten van 5G RF op levende systemen. Er is een aanzienlijke heterogeniteit in de gebruikte modellen en de bestudeerde biologische parameters, met over het algemeen weinig effecten of effecten met een lage amplitude, zelfs voor blootstellingen tot 8 W/Kg. Bovendien suggereren sommige onderzoeken verschillen in gevoeligheid afhankelijk van het celtype (huidcellen).

Gezien het geringe aantal publicaties over de effecten van de frequenties die zijn geïmplementeerd voor 5G (3,5 - 26 GHz) op het grote publiek, kunnen er nog geen conclusies worden voorgesteld met betrekking tot het risico voor personen. Aanvullende studies van hoge kwaliteit zijn daarom nodig voor een relevante beoordeling van de risico's in verband met de nieuw geïmplementeerde 5G-generatie; goed gedefinieerde protocollen zijn essentieel en de blootstelling moet worden gekarakteriseerd in termen van blootstelling en dosimetrie en temperatuurcontroles, zoals aanbevolen door Mattsson et al (2021).

3.2. Huidig onderzoek en nieuws

Aangezien 5G een relatief nieuwe technologie is, worden er nog korte- en langetermijnstudies uitgevoerd om de gevolgen voor de gezondheid volledig in kaart te brengen. Daarom heeft de

Commissie van de Europese Unie via haar instellingen een oproep gedaan tot het indienen van voorstellen over het thema milieu en gezondheid (HORIZON-HL-TH-2021-ENVHLTH-02). Dit programma werd uitgevoerd naar aanleiding van de bezorgdheid van het publiek over de gezondheidseffecten van blootstelling aan 5G. De totale financiering bedroeg € 30 miljoen uit Horizon Europe 2021-2027. De resultaten zullen naar verwachting de huidige hiaten in de kennis over de effecten van draadloze technologieën op de gezondheid en het milieu opvullen. Vier door Horizon Europe gefinancierde projecten zijn samengebracht in het CLUE-H netwerk, waarbij meer dan 60 Europese onderzoeksorganisaties betrokken zijn in vier onderzoeksconsortia: ETAIN, GOLIAT, NextGEM en SEAWave. Wetenschappers van buiten Europa, waaronder de Verenigde Staten, Korea en Japan, werken ook samen aan deze projecten.

3.3. Conclusie

De snelle invoering van 5G biedt ongekennde mogelijkheden voor technologische innovatie, maar vereist ook een grondige en voortdurende risicobeoordeling van de mogelijke gevolgen voor de gezondheid. Hoewel de huidige wetenschappelijke consensus over het algemeen de veiligheid van 5G ondersteunt onder de bestaande richtlijnen, onderstreept de evoluerende aard van de technologie, gekoppeld aan onzekerheid op lange termijn, het belang van voortdurend onderzoek, transparante communicatie en adaptieve regelgevende kaders. Nu 5G steeds alomtegenwoordiger wordt, zal het van cruciaal belang zijn om de voordelen ervan in evenwicht te brengen met voorzorgsmaatregelen voor de gezondheid om het vertrouwen en de veiligheid van het publiek te waarborgen.

Bibliografie

- Alekseev, S. I., Ziskin, M. S., & Fesenko, E. E. (2012). [Frequentie-afhankelijkheid van verwarming van de menselijke huid blootgesteld aan millimetergolven]. *Biofizika*, 57(1), 110-114.
- ANSES, juli (2012). Avis de l'Anses. Collectief expertiseverslag. Assessment of the health risks associated with the use of the Ego "millimetric" wave body scanner.
- ANSES, februari (2022). Geactualiseerd ANSES-advies Collectief expertiseverslag: blootstelling aan elektromagnetische velden in verband met de uitrol van "5G"-technologie
- Blick, D. W., Adair, E. R., Hurt, W. D., Sherry, C. J., Walters, T. J., & Merritt, J. H. (1997). Thresholds of microwave-evoked warmth sensations in human skin. *Bio-elektromagnetics*, 18(6), 403-409.
- Bushberg, J. T., Chou, C. K., Foster, K. R., Kavet, R., Maxson, D. P., Tell, R. A., & Ziskin, M. C. (2020). IEEE Committee on Man and Radiation-COMAR Technical Information Statement: Health and Safety Issues Concerning Exposure of the General Public to Electromagnetic Energy from 5G Wireless Communications Networks. *Health Physics*, 119(2), 236-246. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001301>
- Canovi A, Orlacchio R, Poullietier de Gannes F, Lévêque P, Arnaud-Cormos D, Lagroye I, Garenne A, Percherancier Y, Lewis N (2023). [In vitro blootstelling van neuronale netwerken aan het 5G-3,5 GHz signaal](#). *Front Volksgezondheid* 11: 1231360
- Dasgupta S, Leong C, Simonich MT, Truong L, Liu H, Tanguay RL. (2022). [Transcriptomic and Long-Term Behavioral Deficits Associated with Developmental 3.5 GHz Radiofrequency Radiation Exposures in Zebrafish](#). *Environ Sci Technol Lett*, 9 (4): 327-332

- Dasgupta S, Wang G, Simonich MT, Zhang T, Truong L, Liu H, Tanguay RL. (2020). [Impacts of high dose 3.5 GHz cellphone radiofrequency on zebrafish embryonic development](#). PLoS One, 15 (7): e0235869
- Franchini, V., Regalbuto, E., De Amicis, A., De Sanctis, S., Di Cristofaro, S., Coluzzi, E., Marinaccio, J., Sgura, A., Ceccuzzi, S., Doria, A., Gallerano, G. P., Giovenale, E., Ravera, G. L., Bei, R., Benvenuto, M., Modesti, A., Masuelli, L., & Lista, F. (2018). Genotxische effecten in menselijke fibroblasten blootgesteld aan microgolffstraling. *Health Physics*, 115(1), 126-139. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000000871>
- ICNIRP. (2020). Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz tot 300 GHz). *Health Physics*, 118(5), 483-524. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001210>
- Jamal L, Yahia-Cherif L, Hugueville L, Mazet P, Lévêque P, Selmaoui B. (2023). [Beoordeling van elektrische hersenactiviteit van gezonde vrijwilligers blootgesteld aan 3.5 GHz van 5G-signalen binnen omgevingsniveaus: een gecontroleerde gerandomiseerde studie.](#) Int J Environ Res Public Health 20 (18): 6793
- Jamal L, Michelant L, Delanaud S, Hugueville L, Mazet P, Lévêque P, Baz T, Bach V, Selmaoui B (2024). [Autonome zenuwstelsel reacties op omgevingsniveau blootstelling aan 5G de eerste ingezette band \(3,5 GHz\) in gezonde menselijke vrijwilligers.](#) Exp Physiol [in druk].
- Joushomme A, Orlacchio R, Patrignoni L, Canovi A, Chappe YL, Poull  tier de Gannes F, Hurtier A, Garenne A, Lagroye I, Moisan F, Cario M, Lévêque P, Arnaud-Cormos D, Percherancier Y. (2023). [Effecten van 5G-gemoduleerde 3,5 GHz radiofrequente veldblootstellingen op HSF1, RAS, ERK, en PML activering in levende fibroblasten en keratinocyten cellen.](#) Sci Rep 13: 8305
- Karipidis, K., Mate, R., Urban, D. *et al.* (2021). 5G mobile networks and health-a state-of-the-science review of the research into low-level RF fields above 6 GHz. *J Expo Sci Environ Epidemiol* 31, 585-605. <https://doi.org/10.1038/s41370-021-00297-6>
- Kim, K., Lee, Y. S., Kim, N., Choi, H.-D., Kang, D.-J., Kim, H. R., & Lim, K.-M. (2021). Effecten van Elektromagnetische Golven met LTE en 5G Bandbreedte op de Huidpigmentatie In Vitro. *Internationaal Tijdschrift voor Moleculaire Wetenschappen*, 22(1), 170. <https://doi.org/10.3390/ijms22010170>
- Mattsson M-O Simk   M en Foster KR (2021) 5G New Radio vereist de best mogelijke risicobeoordelingsstudies: Perspectief en aanbevolen richtlijnen. *Front. Comms. Net* 2:724772. doi: 10.3389/frcmn.2021.724772.
- Nguyen, T. H. P., Pham, V. T. H., Nguyen, S. H., Baulin, V., Croft, R. J., Phillips, B., Crawford, R. J., & Ivanova, E. P. (2016). The Bioeffects Resulting from Prokaryotic Cells and Yeast Being Exposed to an 18 GHz Electromagnetic Field. *PLOS ONE*, 11(7), e0158135. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158135>
- Patrignoni L, Hurtier A, Orlacchio R, Joushomme A, Poull  tier de Gannes F, Lévêque P, Arnaud-Cormos D, Revzani HR, Mahfouf W, Garenne A, Percherancier Y, Lagroye I. (2024). [Evaluatie van](#)

[mitochondriale stress na blootstelling aan ultraviolette straling en 5G radiofrequente velden in menselijke huidcellen](#). *Bio-elektromagnetica* 45 (3): 110-129

- Pecoraro, R.; Pavone, S.C.; Scalisi, E.M.; Ignoto, S.; Sica, C.; Indelicato, S.; Capparucci, F.; Iaria, C.; Salvaggio, A.; Sorbello, G.; et al. **(2023)**. Multimarker Approach to Evaluate the Exposure to Electromagnetic Fields at 27 GHz on *Danio rerio* Larvae. *J. Mar. Sci. Eng.* 11, 693. <https://doi.org/10.3390/jmse11040693>
- Selmaoui, B., & Touitou, Y. **(2020)**. Association Between Mobile Phone Radiation Exposure and the Secretion of Melatonin and Cortisol, Two Markers of the Circadian System: A Review. *Bio-elektromagnetica*, bem.22310. <https://doi.org/10.1002/bem.22310>
- Simkó, & Mattsson **(2019)**. 5G Wireless Communication and Health Effects-A Pragmatic Review Based on Available Studies Regarding 6 to 100 GHz. *Internationaal Tijdschrift voor Milieuonderzoek en Volksgezondheid*, 16(18), 3406. <https://doi.org/10.3390/ijerph16183406>
- Wood, A., Mate, R. & Karipidis, K. Meta-analyse van in vitro en in vivo studies naar de biologische effecten van millimetergolven op laag niveau **(2021)**. *J Expo Sci Environ Epidemiol* **31**, 606-613 <https://doi.org/10.1038/s41370-021-00307-7>

4. De huidige stand van 5G en zijn macro-economische implicaties: een globaal, Europees en Belgisch perspectief

Het mobiele netwerk van de vijfde generatie (5G) betekent een transformatieve vooruitgang in de telecommunicatie en belooft hogere datasnelheden, bredere connectiviteit en aanzienlijke economische groei. Dit rapport onderzoekt de huidige stand van zaken van de uitrol van 5G en de macro-economische implicaties ervan wereldwijd, in Europa en specifiek in België. Wereldwijd wordt verwacht dat de invoering van 5G zal leiden tot aanzienlijke productiviteitswinsten, nieuwe banen en technologische innovatie. Europa staat voor zijn eigen uitdagingen, met complexe regelgeving en een ongelijke uitrol tussen de lidstaten. België heeft aanzienlijke vooruitgang geboekt op het gebied van strategische partnerschappen en de ontwikkeling van infrastructuur, maar wordt geconfronteerd met hindernissen op het gebied van regelgeving en uitrol. Het rapport onderzoekt ook hoe 5G de arbeidsmarkt beïnvloedt door de vraag naar vaardigheden vorm te geven en belangrijke industrieën te transformeren.

4.1. Inleiding

De overgang van 4G-netwerken (vierde generatie) naar 5G-netwerken (vijfde generatie) is een belangrijke mijlpaal in de evolutie van telecommunicatietechnologieën. In tegenstelling tot eerdere generaties maakt 5G hogere datasnelheden, ultralage latentie en massale apparaatconnectiviteit mogelijk, waarmee de basis wordt gelegd voor vooruitgang op het gebied van automatisering, kunstmatige intelligentie en het internet der dingen (IoT). De potentiële macro-economische impact van 5G is aanzienlijk. Landen die vooroplopen met de invoering van 5G zullen aanzienlijke concurrentievoordelen genieten door een hogere productiviteit en economische expansie. De weg naar een wijdverspreide implementatie van 5G is echter bezaaid met uitdagingen, waaronder hoge infrastructuurkosten, hindernissen in de regelgeving en een wisselende mate van publieke acceptatie (IHS Markit, 2020; 5G Observatory Report, 2024).

Dit rapport synthetiseert recente analyses en bevindingen uit verschillende primaire bronnen om een uitgebreid overzicht te geven van de huidige stand van zaken van 5G en de economische impact ervan wereldwijd, in Europa en specifiek in België.

4.2. Wereldwijd overzicht van de uitrol en implicaties van 5G

De wereldwijde uitrol van 5G begon eind 2010 in alle ernst, gedreven door een groeiende behoefte aan hogere mobiele datasnelheden, minder latentie en de mogelijkheid om grote netwerken van IoT-apparaten met elkaar te verbinden. Tegen 2024 zullen landen als Zuid-Korea, China en de VS het voortouw hebben genomen in de uitrol van 5G en de eerste economische voordelen plukken. Investerings in infrastructuur en technologie hebben al geleid tot een hogere industriële productiviteit, versnelde technologische vooruitgang en het ontstaan van nieuwe marktsegmenten (IHS-Markit, 2020).

Economische voorspellingen onderstrepen de omvang van de impact van 5G. De IHS-Technology 5G Economic Impact Study schat dat 5G tegen 2035 meer dan 13 biljoen dollar zal bijdragen aan de wereldeconomie. Deze economische groei wordt toegeschreven aan de nieuwe mogelijkheden die 5G

mogelijk maakt, zoals slimme productie, telegeneeskunde en autonome transportsystemen (IHS-Markit, 2020). Real-time gegevensverwerking ondersteund door 5G is cruciaal voor sectoren die afhankelijk zijn van nauwkeurigheid en snelheid, die voorheen beperkt werden door 4G-netwerken.

Toch gaat de wereldwijde uitrol van 5G gepaard met aanzienlijke uitdagingen. Hoge initiële uitrolkosten, geschillen over spectrumtoewijzing en verschillen in dekking tussen steden en het platteland blijven belangrijke obstakels. Daarnaast blijven geopolitieke spanningen, onder andere met betrekking tot technologisch leiderschap en intellectuele eigendomsrechten, van invloed op partnerschappen en het tempo waarin 5G wordt ingevoerd (5G Observatory Report, 2024; Market Guide for 5G New Radio, 2024).

4.3. Het Europese 5G-landschap, de Belgische 5G-voortgang en economische analyse

4.3.1. Het Europese 5G-landschap

Europa heeft aanzienlijke vooruitgang geboekt met de uitrol van 5G, met zeer uiteenlopende adoptiesnelheden en strategieën in de verschillende lidstaten. Tegen 2024 zullen landen als Duitsland, het Verenigd Koninkrijk en Frankrijk vooroplopen met de uitrol van infrastructuur en de integratie van technologie. De Digitale Agenda van de Europese Commissie heeft ambitieuze doelen gesteld om tegen 2025 volledige 5G-dekking te garanderen in stedelijke gebieden en op belangrijke transportroutes. Er blijven echter verschillen bestaan in de uitrol als gevolg van verschillen in economische capaciteit, regelgeving en investeringsniveaus tussen de lidstaten (Europese Commissie, 2024; Market Guide for 5G New Radio, 2024).

Een van de grootste uitdagingen voor de uitrol van 5G in Europa is het complexe regelgevingskader, dat van land tot land aanzienlijk verschilt. Het "5G Observatory Report" (2024) benadrukt dat de hoge kosten van spectrumlicenties en bureaucratische hindernissen in verband met grensoverschrijdende infrastructuurprojecten het uitrolproces in sommige regio's vertragen. Deze versnippering tast het concurrentievermogen van Europa aan in vergelijking met wereldleiders zoals de VS en China (5G Observatory Report, 2024; 5G Observatory Report BR-20, 2024).

De macro-economische impact van 5G op de Europese Unie (EU) omvat potentiële bbp-groei, verhoogde productiviteit en verbeterde technologische mogelijkheden. Het onderzoek van IHS-Markit (2020) voorspelt dat de economie van de EU tegen 2035 een impuls van \$ 2 biljoen kan krijgen dankzij 5G-technologieën zoals slimme logistiek, energienetwerken en nutsvoorzieningen (IHS-Markit, 2020). De focus van het continent op duurzame en groene groei sluit ook aan bij het vermogen van 5G om het gebruik van hulpbronnen te optimaliseren en de impact op het milieu te verminderen.

4.3.2. Vooruitgang van 5G in België en economische analyse

4.3.2.1. Economische gevolgen

De economische voordelen van 5G voor België zijn aanzienlijk, met het potentieel om een aanzienlijke bijdrage te leveren aan de groei van het BBP en het creëren van banen. De sectoren die er het meest van zullen profiteren zijn productie, logistiek en gezondheidszorg. Verbeterde connectiviteit maakt real-time monitoring en datagestuurde besluitvorming mogelijk, wat vooral waardevol is in sectoren

met hoge precisie. Het rapport Consumer Electronics and Technology in Belgium (2024) benadrukt het transformerende effect van 5G op de consumententechnologie, met inbegrip van de vooruitgang in augmented reality (AR) en smart home-apparaten die de consumentenbestedingen stimuleren (Consumer Electronics and Technology in Belgium, 2024).

De Belgische arbeidsmarkt wordt ook beïnvloed door de groeiende behoefte aan digitale vaardigheden. De vraag naar professionals in netwerkbeheer, cyberbeveiliging en gegevensanalyse neemt toe naarmate 5G-technologieën worden geïntegreerd in de bedrijfsvoering. Rapporten wijzen op een sterke correlatie tussen de uitrol van 5G en het verbeteren van de vaardigheden van werknemers, zoals beschreven in het rapport Telecommunication Industry in Belgium (2024).

4.4. Economische implicaties en strategische aanbevelingen

4.4.1. Economische gevolgen van 5G voor Europa en België

De macro-economische implicaties van 5G in Europa, waaronder België, zijn diepgaand en beïnvloeden de groei in alle sectoren via een verbeterde productiviteit, innovatie en jobcreatie. De uitrol van 5G vergemakkelijkt de ontwikkeling van slimme steden, verbonden industrieën en geavanceerde oplossingen voor de gezondheidszorg. Volgens het rapport van IHS-Markit (2020) kan 5G tegen 2035 naar schatting 2 biljoen dollar bijdragen aan de Europese economie en een golf van economische activiteit op gang brengen die zich richt op digitale transformatie, duurzaamheid en concurrentievermogen (IHS-Markit, 2020).

Als onderdeel van deze Europese golf zal België aanzienlijke voordelen halen uit het gebruik van 5G voor economische groei en modernisering. Het rapport Consumer Electronics and Technology in Belgium (2024) benadrukt dat sectoren zoals logistiek, retail en consumentenelektronica al verbeteringen beginnen te zien dankzij de integratie van 5G-technologie. Logistieke bedrijven profiteren bijvoorbeeld van een betere routeoptimalisatie en het traceren van activa, terwijl de consumentenelektronica-sector groeit dankzij de toegenomen toepassing van IoT-apparaten (Consumer Electronics and Technology in Belgium, 2024).

De Belgische arbeidsmarkt weerspiegelt deze technologische evolutie, met een opmerkelijke stijging van de vraag naar geschoolde werknemers in domeinen zoals netwerkbeheer, cyberbeveiliging en datawetenschappen. Het rapport "Telecommunication Industry in Belgium" (2024) wijst erop dat er weliswaar nieuwe functies worden gecreëerd, maar dat een sterke focus op bijscholing van de bestaande arbeidskrachten nodig is om duurzame groei te garanderen (Telecommunication Industry in Belgium, 2024).

4.4.2. Strategische aanbevelingen voor Europa en België

Om de macro-economische voordelen van 5G te maximaliseren, moeten Europa en België zich richten op verschillende strategische gebieden:

1. Infrastructuur sneller uitrollen :

- Het stroomlijnen van de regelgeving om de kosten en complexiteit van de uitrol van 5G-netwerken in de lidstaten te verminderen, zal helpen om de kloof tussen leidende en achterblijvende regio's te dichten.

2. **Publiek-private partnerschappen (PPP's):**
 - Het opzetten van PPP's kan de ontwikkeling bevorderen van innovatieve oplossingen die voordeel halen uit de mogelijkheden van 5G, zoals blijkt uit verschillende Europese smart city-projecten. De Belgische ervaring met het bevorderen van sectoroverschrijdende partnerschappen is veelbelovend gebleken, met name in logistieke en slimme energieprojecten (Innovation Insight for 5G, 2024).
3. **Investeren in de ontwikkeling van arbeidskrachten :**
 - Het is essentieel dat de beroepsbevolking over de digitale vaardigheden beschikt om 5G-technologie te ondersteunen.
 - België en Europa moeten prioriteit geven aan onderwijsprogramma's en beroepsopleidingen om de vaardigheidskloof te dichten die in het rapport "Telecommunication Industry in Belgium" (2024) wordt belicht.
 - Initiatieven om werknemers te herscholen en bèta/technisch onderwijs te bevorderen kunnen de arbeidsmarkt voorbereiden op de uitdagingen en kansen van een 5G-economie.
4. **Focus op duurzame groei:**
 - De economische voordelen van 5G moeten in overeenstemming zijn met de Europese doelstellingen voor duurzame ontwikkeling.
 - Het potentieel van 5G benutten om het energieverbruik in industrieën en slimme steden te optimaliseren, kan bijdragen aan de Green Deal-doelstellingen van de EU.
 - De integratie van 5G met technologieën zoals AI en IoT kan een efficiënter gebruik van hulpbronnen mogelijk maken, verspilling tegengaan en duurzame bedrijfspraktijken ondersteunen (BR-20 5G Observatory Report, 2024).
5. **Micro-economische gevolgen van 5G: gevolgen voor bedrijven en consumenten**
 - De uitrol van 5G-technologie heeft diepgaande micro-economische effecten en beïnvloedt de operationele efficiëntie, consumentenvraag en concurrentiedynamiek in alle sectoren.
 - Impact op bedrijfsniveau: Operationele efficiëntie en innovatie
5G verhoogt de operationele efficiëntie en stimuleert innovatie, met name in sectoren die afhankelijk zijn van hoge datatransmissie en lage latentie. Productiebedrijven kunnen bijvoorbeeld gebruikmaken van 5G-geactiveerde IoT voor realtime monitoring en voorspellend onderhoud, waardoor kosten en stilstandtijd worden verlaagd. De logistiek profiteert van geoptimaliseerde routeplanning en real-time tracking. Kleine bedrijven, waaronder start-ups en KMO's, kunnen toegang krijgen tot geavanceerde 5G-infrastructuur, waardoor ze augmented reality (AR), virtual reality (VR) en kunstmatige intelligentie (AI) toepassingen kunnen ontwikkelen, wat de concurrentie en industriespecifieke innovatie stimuleert.
 - Consumentengedrag en marktvraag
Aan de consumentenkant verandert 5G zowel de verwachtingen als de vraag. Met hogere snelheden en minder latentie worden data-intensieve toepassingen zoals streaming, gaming en interactieve diensten naadlozer, wat de interesse in 5G-apparaten en -diensten aanwakkert. In België, waar 95% van de huishoudens buiten 5G-dekking heeft en 76% binnenshuis vanaf juni 2024 (BIPT, 2024), integreren consumenten steeds meer IoT-apparaten, zoals slimme thermostaten en beveiligingssystemen, wat de groei in consumentenelektronica en IoT-ondersteunende diensten stimuleert.
 - Implicaties voor de sector: Gezondheidszorg, detailhandel en financiën
5G-mogelijkheden hebben een transformerend potentieel in belangrijke sectoren:
 - Gezondheidszorg: telegeneeskunde maakt nu realtime consultaties en diagnoses mogelijk, waardoor de toegang tot gezondheidszorg in afgelegen gebieden verbetert (BIPT, 2024).

- Detailhandel: Met 'Intelligent retailing'-oplossingen kunnen bedrijven de klantervaring personaliseren en de voorraad dynamisch beheren via real-time gegevensanalyse.
- Financiën: Snellere, veiligere digitale transacties ondersteunen realtimehandel en mobiel bankieren, waardoor het bereik van financiële diensten wordt vergroot en de klantervaring wordt verbeterd (The Brussels Times, 2023).
- Concurrentiedynamiek en marktstructuur
De uitrol van 5G heeft ook invloed op de structuur van de markt. Telecombedrijven die hun 5G-infrastructuur uitbreiden, krijgen concurrentievoordelen, wat kan leiden tot marktconsolidatie. In België ondersteunen overheidsinitiatieven, waaronder 20 miljoen euro federale financiering voor 5G-proefprojecten in 2023, sectoroverschrijdende innovatie en consolideren ze de positie van België als leider in de digitale economie van Europa (The Brussels Times, 2023).

4.5. Conclusie

De ontplooiing van 5G betekent een transformerende kracht voor de wereldeconomie, de Europese economie en de Belgische economie. Door de uitdagingen op het vlak van infrastructuur, regelgeving en de ontwikkeling van arbeidskrachten aan te pakken, kunnen Europa en België het volledige potentieel van 5G benutten en economische groei, innovatie en duurzaamheid garanderen. De weg voorwaarts houdt in dat overheden, industrieën en onderwijsinstellingen samenwerken om een toekomst op te bouwen die 5G gebruikt voor inclusieve en duurzame vooruitgang.

Bibliografie

Belgisch Instituut voor Postdiensten en Telecommunicatie (BIPT). (2023). *Jaarverslag over de uitrol van 5G en telecommunicatie in België*. Brussel: BIPT.

Belgisch Instituut voor Postdiensten en Telecommunicatie (BIPT) (2024). "Uitrol 5G bereikt 95% van Belgische huishoudens". Opgehaald van [bipt.be](https://www.bipt.be)

Europese Commissie. (2023). *Digital Economy and Society Index (DESI)*. Europese Unie.

Europese Commissie, Directoraat-generaal Communicatienetwerken, inhoud en technologie. (2024). *Halfjaarlijks verslag van het 5G Observatory: juni 2024 (situatie op 31 maart 2024)*. EY, PolicyTracker en LS telecom. Opgehaald van [/mnt/data/BR-20_5G-Observatory-Report-June-2024-2.pdf](https://mnt.data/BR-20_5G-Observatory-Report-June-2024-2.pdf)

IHS Markit (2020). *De 5G-economie: Hoe 5G-technologie zal bijdragen aan de wereldeconomie*. Londen: IHS Markit.

Statista (verschillende jaren). *Rapporten over digitale infrastructuur en technologie in België*. Statista Onderzoeksafdeling.

Brussels Times. (2023). "20 miljoen aan federale fondsen om 5G-ontwikkelingsprojecten te ondersteunen. Overgenomen van [brusselstimes.com](https://www.brusselstimes.com)

5. De uitrol van het 5G-netwerk en de detritische dimensie

Terwijl de uitrol van 5G wetenschappelijke interesse wekt in verband met de ecologische en gezondheidseffecten van elektromagnetische straling en de toename van het energieverbruik dat hierdoor zou toenemen of bespaard zou worden (Lopez, 2022), is er nog weinig aandacht voor de detritische dimensie die voortvloeit uit deze uitrol. De productie van afgedankte elektrische en elektronische apparatuur (AEEA) is het onderwerp van een omvangrijke multidisciplinaire wetenschappelijke literatuur. Het vormt een echte ecologische uitdaging, gekoppeld aan het verlies van de zeldzame en kritieke metalen die het bevat en de vervuilende, niet-conforme verwerking van een groot deel van de AEEA-stromen. Als gevolg daarvan ontsnapt een groot deel van de AEEA-stromen aan traceerbaarheid (Baldé et al., 2024) en wordt het gestort in landen waar de wetgeving en controles minder streng zijn. Ten tweede creëert het nieuwe verwerkingskanalen als onderdeel van de circulaire economie. En ten slotte is het onderwerp van belangrijke publieke actie. De productie van AEEA die specifiek verband houdt met de toepassing van AEEA is echter niet geanalyseerd in de wetenschappelijke literatuur. Hoewel de overheid steeds meer belangstelling toont voor het terugdringen van de groei van het volume AEEA (Green New Deal, circulaire economie, enz.), er openbare gegevens over 5G worden geproduceerd (aantal antennes, technische kenmerken van antennes, enz.) en er wetenschappelijk onderzoek naar AEEA wordt gedaan, zijn er nog steeds weinig onderzoeksprogramma's die specifiek gericht zijn op de specifieke afvalstromen die door 5G worden gegenereerd. De uitrol van 5G is echter afhankelijk van een reeks hardware-apparaten: smartphones en aangesloten objecten voor het verzenden en ontvangen van gegevens, antennes voor gegevensverkeer en datacenters voor gegevensopslag. Deze apparatuur vormt de infrastructuur die nodig is om 5G te implementeren.

Dit hoofdstuk is onderverdeeld in drie delen (gebruikers; netwerken; gegevensopslag) die een schematische benadering bieden van de verschillende dimensies van de materialiteit van de invoering van 5G.

5.1. Gegevens verzenden en ontvangen (gebruik)

In zijn detritische dimensie heeft de uitrol van 5G vooral de aandacht gevestigd op het rebound-effect (Dubey en Gras, 2021) dat het zal genereren in termen van consumptie door het stimuleren van de vernieuwing van elektrische en elektronische apparaten. Om te kunnen profiteren van de hogere downloadsnelheden en beeldkwaliteit die gepaard gaan met 5G, of van het verbruik van hulpbronnen dat beter wordt gereguleerd door het internet van de dingen, moeten we beschikken over apparaten die geschikt zijn voor het ontvangen en verzenden van gegevens. Daarom zal de uitrol van 5G waarschijnlijk gepaard gaan met een massale vernieuwing van smartphones en andere verbonden objecten, wat bijdraagt aan de versnelde veroudering van smartphones die om technologische redenen in gebruik zijn. Bovendien is 5G niet alleen gericht op mobiele telefonie en draagbare computerapparatuur (laptops, tablets, enz.), maar ook op de ontwikkeling van het Internet of Things (IoT), wat betekent dat er meer elektrische en elektronische apparaten zijn die gegevens kunnen versturen, met name om domotica-toepassingen te ontwikkelen. Deze apparaten zullen dus worden vernieuwd in afwachting van of naarmate 5G daadwerkelijk wordt ingevoerd. Hoewel openbare gegevens getuigen van een exponentiële groei van de hoeveelheid AEEA, is het moeilijk om de precieze impact van de uitrol van 5G vast te stellen, omdat er een gebrek is aan wetenschappelijke studies om dit verband te documenteren en te analyseren. Maar het lijkt erop dat, als het gaat om technologische innovatie, het aanbod voorafgaat aan en een stimulans is voor behoeften en nieuwe

toepassingen. Gezien het aantal apparaten waar het om gaat, zijn het de toepassingen waartoe de groei van overdraagbare gegevens zal leiden die steeds grotere en proportioneel grotere hoeveelheden elektronisch afval zullen genereren (Aiouch et al., 2022).

Wat het hergebruik en de recycling van computers en smartphones betreft, hebben studies al lang het gehalte aan zeldzame, edele en/of kritische metalen in AEEA gedocumenteerd, evenals de vormen en percentages van hergebruik en recycling. Van elektronisch afval zijn smartphones (Bastin, 2018) en computers (Gonda en Degrez, 2018) het onderwerp geweest van een aantal diepgaande studies, waaronder casestudies (specifieke modellen, bouwjaar), in termen van traceerbaarheid van stromen, levenscyclus en behandelingskanalen. Hoewel verbonden objecten nog steeds beperkte stromen vertegenwoordigen, hebben ze een aanzienlijk commercieel ontwikkelingspotentieel (Aiouch et al., 2022).

Geanalyseerd op basis van casestudies van welomschreven sectoren en stromen, lopen de hergebruik- en recyclingpercentages voor AEEA sterk uiteen. Ten eerste hangt het af van de stromen die worden onderzocht. Voor hergebruik is er de wederverkoopprijs. De wederverkoopprijs wordt grotendeels bepaald door de arbeidskosten. Maar de markt wordt ook bepaald door de vraag naar de aangeboden prijs. De keuze tussen nieuw en tweedehands hangt af van het type goed, maar lijkt vooral af te hangen van het prijsverschil tussen nieuw en tweedehands, maar ook van de prijscategorie waarin de nieuwe auto valt. Het verlengen van de levensduur van deze apparaten door reparatie en hergebruik is een zeer aan te bevelen manier om de milieuvoetafdruk van e-waste te verminderen (Bridgens et al., 2019), aangezien de voetafdruk zich concentreert in de productiefase (tussen 30% en 76%). Wat recycling betreft, hebben tal van onderzoeken aangetoond dat recycling slechts gedeeltelijk plaatsvindt. Enerzijds wordt slechts een klein percentage van AEEA naar behoren ingezameld voor recycling (Baldé et al., 2024). Ten tweede worden slechts enkele onderdelen gerecycled (Horta Arduin et al., 2020), en dat zijn vaak de meest winstgevende. Bovendien is recycling niet neutraal wat betreft de eigenschappen van grondstoffen en kan het de zuiverheid van materialen verminderen. Ten slotte wordt een aanzienlijk percentage van de materialen niet gerecycleerd, ofwel omdat er geen recyclageproces bestaat, ofwel omdat recyclage te duur is in vergelijking met storten, ofwel omdat de recyclagesector sterk afhankelijk is van inzameling, die de meeste op de markt gebrachte apparaten niet dekt.

Interdisciplinaire onderzoeksprojecten zoals Clever (Closed Loop Emotionally Valuable E-waste Recovery) en WEEESOC (ULB) hebben gekeken naar manieren om de inzameling, het hergebruik en de recycling van AEEA te verbeteren. Maar deze projecten bestrijken lang niet alle afvalstromen.

5.2. Gegevenscirculatie (netwerken)

"5G, dat naast vorige generaties mobiele telefonie zal bestaan, in het bijzonder 4G, zal in eerste instantie frequentiebanden gebruiken die al door hen worden gebruikt, evenals de frequentieband rond 3,5 GHz. In een tweede fase zal 5G ook worden uitgerold in de band rond 26 GHz, die wordt gekenmerkt door een kleiner bereik en een slechte penetratie van gebouwen en menselijk weefsel". (Aballéa et al, 2020, p. 5).

Zoals uit dit uittreksel blijkt, is het 5G-netwerk grotendeels gebaseerd op het optimaliseren van het gebruik van bestaande antennes voor mobiele telefoons. In die zin worden er geen antennes van de oudere generatie geëlimineerd, maar wordt het gebruik ervan verbeterd door een technologische

toevoeging. Op de schaal van een gebied als het CBR gaat dit 5G-systeem gepaard met de inzet van een nieuw type (actieve) antennes, die ook zeldzame en kritische metaallegeringen bevatten, een toename van het aantal datacenters en een toename van de productie van apparaten die compatibel zijn met 5G (smartphones en andere verbonden objecten). Op wereldschaal zal 5G de behoefte aan kabels doen toenemen om de gegevensstroom tussen continenten te versnellen en te vergroten. De uitrol van 5G is daarom afhankelijk van een hardware-infrastructuur met een beperkte levensduur. De productiefase van antennes is weliswaar geanalyseerd (Guérid et al., 2022), maar op de websites van telecomaانبieders staat dat antennes worden gerecycled. Er zijn echter geen precieze studies over het hergebruik of de recycling van deze antennes.

De uitrol van 5G is ook afhankelijk van satellieten (met name starlink: 1400 vandaag en uiteindelijk 42.000), die elektronisch afval in de ruimte zouden produceren (Dubey en Gras, 2021). Er is echter geen studie over dit specifieke onderwerp gevonden voor dit verslag, maar dat betekent niet dat ze het niet produceren. Er moet worden vermeld dat er een regel van 25 jaar is voor het verval van ruimteobjecten (ESA, 2024). Deze regel heeft geleid tot methodologieën om het einde van de levensduur van ruimteobjecten te voorspellen (Lemmens et al. 2016), waarop de Drama-software is gebaseerd. Drama wordt "gebruikt om statistieken voor het vermijden van botsingen te evalueren, de resterende baanlevensduur te schatten en het grondrisico voor gecontroleerde en ongecontroleerde terugkeer te beoordelen" (Braun et al. 2019).

5.3. Gegevensopslag (Datacenters)

Gegevens worden opgeslagen op servers in computercentra. Deze servers bevatten ook printplaten die kritieke en zeldzame metalen en kunststoffen bevatten. De computercentra zijn ook uitgerust met beveiligingscamera's, ventilatiesystemen om de door de servers geproduceerde warmte te verminderen en back-up stroomgeneratoren om problemen met de stroomvoorziening op te vangen (Lopez, 2022).

Het CeDaci project (Kerwin, 2022) analyseert de mogelijkheden voor het creëren van een circulaire economie keten die kijkt naar zowel eco-ontwerp en het hergebruik van componenten vóór recycling en storten. Het project is evenzeer gebaseerd op de sociale economie als op traditionele bedrijven. Het identificeert de belangrijkste gebieden voor de ontwikkeling van datacenters in het Verenigd Koninkrijk, Duitsland, Nederland en Frankrijk.

5.4. Conclusie

Er is een gebrek aan onderzoek naar specifieke stromen in bepaalde gebieden om de hoeveelheid AEEA die specifiek verband houdt met de invoering van 5G nauwkeurig te bepalen, evenals de mogelijkheden voor hergebruik van onderdelen en recycling van kritieke materialen in e-afval. De complexiteit van kwantitatieve beoordeling in verband met de moeilijke traceerbaarheid van elektronische afvalstromen blijft een groot obstakel voor de productie van gekwantificeerde gegevens over afvalproductie. Daarom vereist de productie van dergelijke gegevens noodzakelijkerwijs diepgaand, multidisciplinair en systemisch wetenschappelijk werk, vooral omdat de uitrol van 5G ook wordt geassocieerd met positieve ecologische effecten (lager energieverbruik, enz.). Er is echter niet geanticipeerd op de negatieve gevolgen van de inzet van deze nieuwe datatransmissietechnologie. In het specifieke geval van het CBR zal een groot deel van het detritische volume van 5G op zijn grondgebied buiten het CBR worden verwerkt. Gezien de structuur van haar industrieel weefsel, zal

de AEEA die verwerkt wordt volgens de conforme methode verwerkt worden in industriegebieden buiten de regio.

Bibliografie

Aiouch, Yasmine (Deloitte), Augustin Chanoine (Deloitte), Léo Corbet (Deloitte), Pierrick Drapeau (Deloitte), Louis Ollion (Deloitte), Valentine Vigneron (Deloitte), met bijdragen van Caroline Vateau (APL-datacenter), Etienne Lees Perasso (Bureau Veritas), Julie Orgelet (DDemain), Frédéric Bordage (GreenIT.fr) en Prune Esquerre (IDATE). 2022. Evaluation de l'impact environnemental du numérique en France et analyse prospective, Etat des lieux et pistes d'actions, studie Ademe-Arcep, 179 blz.

Aballéa, F-M. Robineau, L-C. Viossat (Igas), P. Follenfan, J-M. Nataf (CGEDD), P. Distler, B. Legait (CGE), H. Havard en V. Menuet (IGF), met medewerking van C-A. Calvet, 2020, Déploiement de la 5G en France et dans le monde : aspects techniques et sanitaires, gezamenlijke missie.

Baldé, Cornelis P., Ruediger Kuehr, Tales Yamamoto, Rosie McDonald, Elena D'Angelo, Shahana Althaf, Garam Bel, Otmar Deubzer, Elena Fernandez-Cubillo, Vanessa Forti, Vanessa Gray, Sunil Herat, Shunichi Honda, Giulia Iattoni, Deepali S. Khatriwal, Vittoria Luda di Cortemiglia, Yuliya Lobuntsova, Innocent Nnorom, Noémie Pralat, Michelle Wagner, 2024. Global E-waste Monitor, Genève/Bonn, Internationale Telecommunicatie-unie (ITU) en Instituut voor opleiding en onderzoek van de Verenigde Naties (UNITAR).

Bastin, F., Gonda, L., Delplancke, M.-P., & D'Ans, P. (2018). "In kaart brengen van strategische elementen in een smartphone en identificatie van kritieke onderdelen voor recycling". In Book of abstracts: Oral communication Fédération Française des Matériaux.

Braun, Vitali; Horstmann, André; Reihs, Benedikt; Lemmens, Stijn; Merz, Klaus; Krag, Holger, 2019, 'Exploiting Orbital Data and Observation Campaigns to Improve Space Debris Models', The Journal of the astronautical sciences, 66, no. 2, pp. 192-209.

Bridgens, B., Hobson, K., Lilley, D., Lee, J., Scott, J. en Wilson, G. 2019. "Closing the loop on e-waste: een multidisciplinair perspectief". Journal of Industrial Ecology 23(1), pp. 169-181.

Dubey, Gérard ; Gras, Alain, 2021, " Transition numérique : pour continuer comme avant ", La Servitude électrique Du rêve de liberté à la prison numérique. Parijs, Le Seuil, Anthropocène, p.215-228.

ESA Debris Office, 2024, ESA'S Annual Space Report, Darmstadt.

Gonda, Louise ; Degrez, Marc, 2018, " Beheer van computers aan het einde van hun levensduur in Brussel: milieuvergelijking van twee verwerkingsketens ", 25e CIRP Life Cycle Engineering (LCE) Conferentie, 30 april-2 mei 2018, Kopenhagen, Denemarken, pp. 968-973.

Guérid, Josua; Jean-Baptiste Doré, Jacques Reverdy, Bruno Reig, Antonio Clemente, et al. 2022, "Toward Eco-Design of a 5G mmWave Transmitarray Antenna Based on Life Cycle Assessment." 2022

Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit), Jun 2022, Grenoble, Frankrijk. pp. 440-445.

Horta Arduin, Rachel, et al., 2020, "Novel Indicators to Better Monitor the Collection and Recovery of (Critical) Raw Materials in WEEE: Focus on Screens.". *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 157, pp. 104772-104772,

Kerwin, Kristina ; Andrews, Deborah ; Adibi, Naeem ; Withehead, Beth ; Szableski, Carolina , Chenadec, Julie, 2022, "Developping a circular economy for the data centre industry - how the Cedaci project contributes to sustainable decision making", *E3S Web of conferences*.

Lemmens, Stijn; Bastida Virgili, Benjamin; Braun, Vitali; Flohrer, Tim; Funke, Quirin; Krag, Holger; Mclean, F., Merz. Klaus, 2016, "From End-of-Life to Impact on Ground: An Overview of ESA's Tools and Techniques to Predict Re-entries from the Operational Orbit to the Earth's Surface", 6th International Conference on Astrodynamics Tools and Techniques, *Proceedings of the conference*.

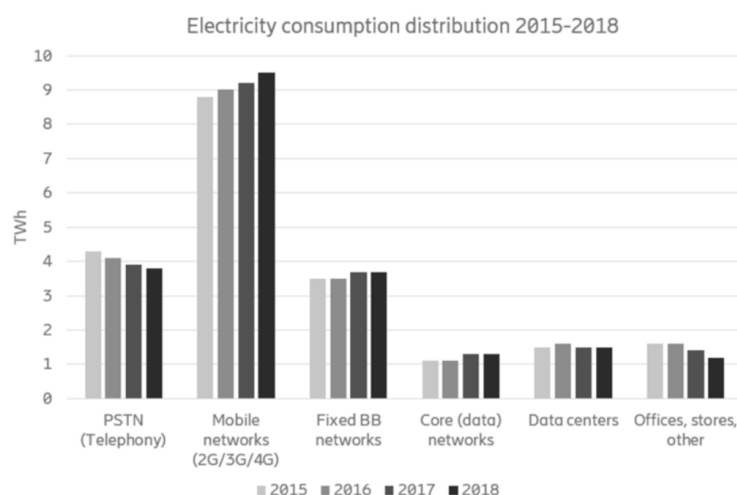
Lopez, Fanny, 2022, *Au bout de flux*, Uitgeverij Divergences.

6. Energieverbruik van het 5G-netwerk

De koolstofvoetafdruk van de ICT-sector (informatie- en communicatietechnologieën) heeft de laatste tijd meer aandacht gekregen vanwege het toenemende aandeel van die sector in de totale wereldwijde uitstoot. Afhankelijk van de gehanteerde perimeter wordt het elektriciteitsverbruik van ICT momenteel geschat op ongeveer 4-8% van het totale wereldwijde elektriciteitsverbruik (Freitag, 2021) (Malmodin, 2024). Het neemt gestaag toe met een groei van ongeveer 6% per jaar als we vergelijken met (Malmodin, 2018). De communicatienetwerken vertegenwoordigen een aanzienlijk deel van die impact, namelijk ongeveer 20-30% volgens (Malmodin, 2024). Binnen de communicatienetwerken levert het mobiele netwerk de grootste bijdrage. Het is ook het sterkst groeiende netwerk. Het ligt dus voor de hand om nader te onderzoeken welke veranderingen de uitrol van 5G naar verwachting met zich gaat meebrengen.

6.1. Studies over het energieverbruik van bestaande netwerken

Het elektriciteitsverbruik van communicatienetwerken is de afgelopen 10 jaar nauwlettend gevolgd en wordt bijvoorbeeld besproken in (Lundén, 2022). De onderstaande figuur toont het elektriciteitsverbruik van de operatoren voor de periode 2015-2018.

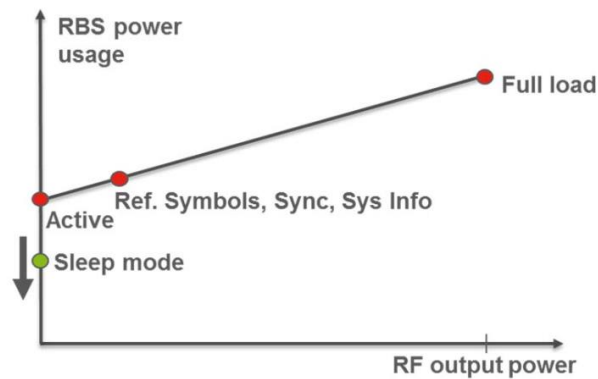


Figuur 6.1: Totaal elektriciteitsverbruik van de operatoren per netwerktype (Lundén, 2022), zonder apparatuur van eindgebruikers.

Het verbruik wordt opgesplitst in de verschillende delen van het communicatienetwerk, namelijk het operatorgedeelte van het kernnetwerk en de datacenters enerzijds en de toegangsinfrastructuur anderzijds, die zelf weer opgedeeld wordt in het mobiele radionetwerk, het vaste toegangsnetwerk (xDSL en FTTx) en het telefoonnetwerk. De gebruikersapparaten (bv. smartphones en home gateways) zijn niet meegenomen in deze evaluatie. Het merendeel van de datacenters en het kernnetwerk worden niet beheerd door operatoren en zijn hier evenmin meegerekend. De mobiele infrastructuur is duidelijk dominant in dit elektriciteitsverbruik van de telecommunicatie-operatoren. Daarom gaan we in dit hoofdstuk vooral daar op focussen.

Dezelfde auteurs presenteren een interessant resultaat waaruit blijkt dat het totale verbruik *per abonnee* over de geanalyseerde periode relatief constant blijft, namelijk ongeveer 20 kWh/abonnee voor het mobiele netwerk en 50 kWh/abonnee voor het vaste netwerk. Ongeveer hetzelfde leek te

gelden voor het mobiele netwerk (met een lichte stijging van ongeveer 10-15%) tijdens de uitrol van 4G vanaf het 3G-netwerk. Dit valt waarschijnlijk te verklaren door de geleidelijke aanleg van infrastructuur om de dekking voor de abonnees te garanderen naarmate hun aantal toeneemt. Om dit gedrag te begrijpen, is het belangrijk te weten dat, tot 4G, het stroomverbruiksprofiel van alle apparatuur (zie figuur 2) bestaat uit een hoog statisch verbruik zodra de infrastructuur draait, gevolgd door een veel lagere, dynamische lineaire toename afhankelijk van de belasting.



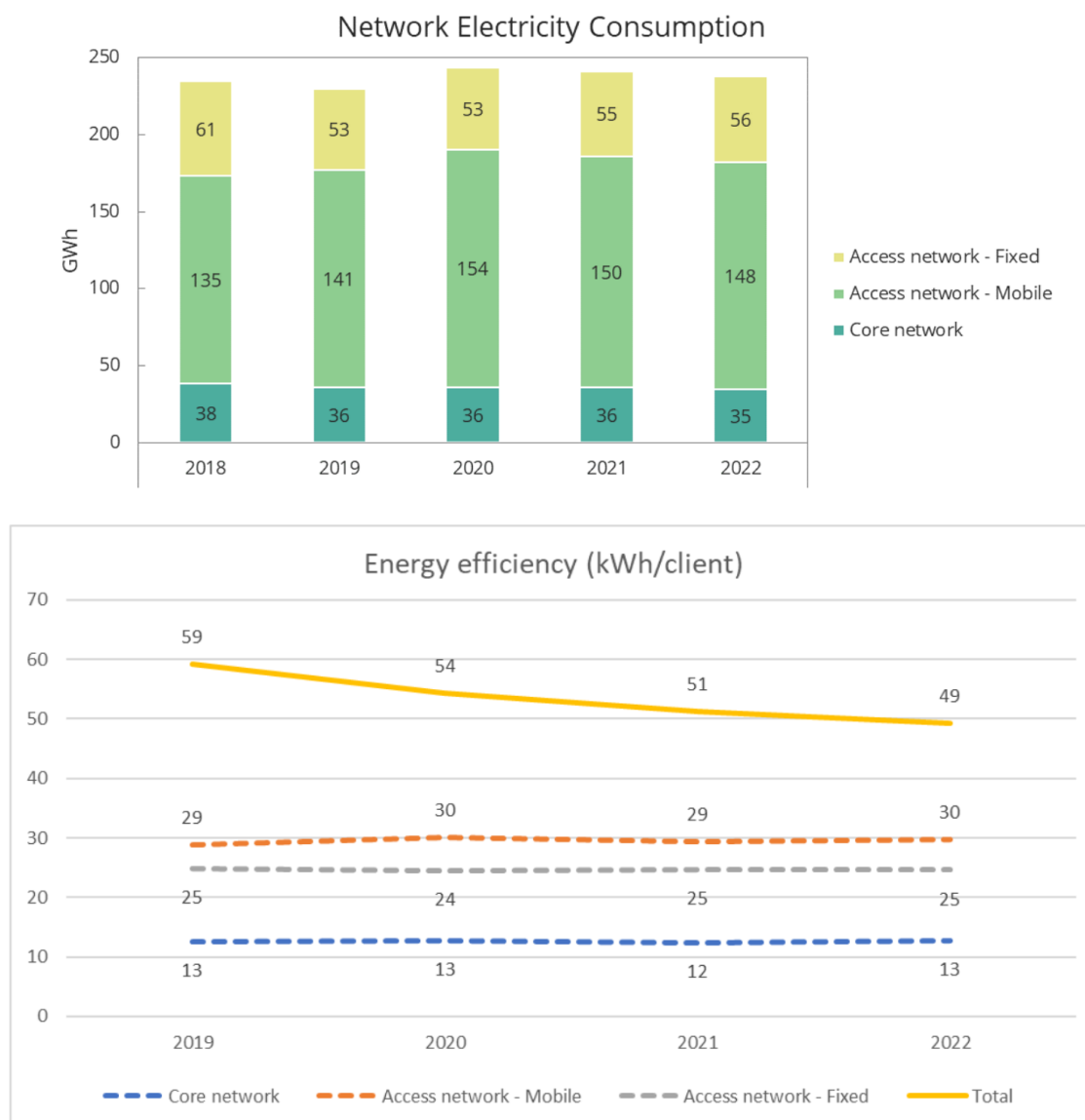
Afbeelding 6.2: Stroomverbruiksprofiel van een typisch basisstation als functie van de belasting. Uit (Frenger, 2019)

De uitrol van lopende infrastructuur is dus de belangrijkste factor in het totale elektriciteitsverbruik. Het is nog steeds opmerkelijk dat het relatief constant bleef, ondanks de aanzienlijke verschillen in de generaties apparatuur. Ondertussen is het dataverkeer aanzienlijk gegroeid (met een factor 5 tussen 2015 en 2020), waardoor het netwerk efficiënter is geworden. Ook dit hangt samen met het vermogensprofiel van de apparatuur. Een basisstation met een hoge capaciteit, dat aanvankelijk onderbenut is, begint met een lage efficiëntie. Zijn stroomverbruik neemt evenwel niet sterk toe wanneer het verkeer toeneemt. Zijn efficiëntie verbetert dus. De belangrijkste conclusie is dat, ook al lijkt het logischer om de evolutie van het energieverbruik te voorspellen aan de hand van dataintensiteit (energieverbruik per verzonden bit), die factor niet stabiel genoeg is in de tijd en mogelijk geen goed beeld geeft van de kenmerken van het netwerk. Het verbruik per abonnee geeft een betere voorspelling van het werkelijke verbruik van een netwerk. Aan de andere kant zegt dat niets over de efficiëntie van elk netwerk en kan het dus niet gebruikt worden om netwerken met elkaar te vergelijken. Het vaste toegangsnetwerk is bijvoorbeeld veel energie-efficiënter dan het mobiele toegangsnetwerk, ook al is het verbruik per abonnee omgekeerd (het vaste toegangsnetwerk verzendt veel meer dataverkeer per abonnee).

Op lange termijn is er nog steeds een kleine toename in het energieverbruik per abonnee van het mobiele netwerk naarmate het verkeer toeneemt. Door het grotere aantal abonnees, waardoor enkele schaafeffecten mogelijk zijn, en de verbeterde infrastructuur is de intensiteit per abonnee ongeveer constant gebleven. Het valt echter nog te bezien of dezelfde trend zal aanhouden met de uitrol van 5G, vooral omdat het statische deel van het stroomverbruik mogelijk niet langer dominant gaat zijn (zie verder) en het verkeer exponentieel blijft groeien. Het wordt dus moeilijk om de toenemende capaciteitsdoelstelling te halen met een vast stroombudget.

In het specifieke geval van België bestaan er verschillende rapporten van de belangrijkste operatoren. Het BIPT vat de resultaten samen in (BIPT, 2023). De verkregen waarden komen overeen met het rapport van (Lundén, 2022), met enkele verschillen die waarschijnlijk te maken hebben met de manier waarop het aantal abonnees geteld wordt. Toch lijkt ook hier het verbruik per abonnee constant te

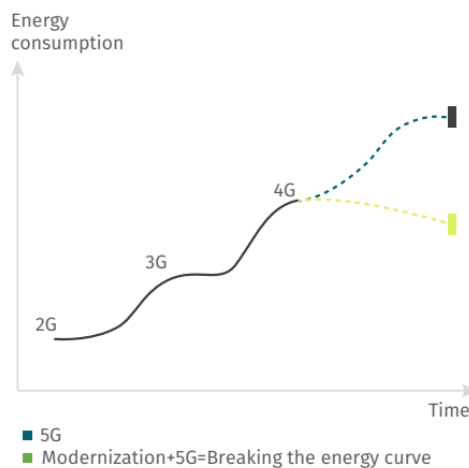
zijn. De trend van de energie-efficiëntie (dalende energie per bit in de loop der jaren) wordt eveneens bevestigd in het rapport.



Figuur 6.3: Elektriciteitsverbruik van de verschillende communicatienetwerken en hun genormaliseerd verbruik per abonnee, voor alle operatoren in België. Uit (BIPT, 2023).

Tot slot is er ook een rapport over de wereldwijde geaggregeerde waarden beschikbaar van de Wereldbank en ITU (ITU, 2024). Dit rapport geeft geen normalisatie per abonnee, maar toont de grote discrepantie in energie-efficiëntie van de netwerken op verschillende locaties. Het bespreekt ook de algemene evolutie van het energieverbruik sinds het begin van 2G, met de toename van zowel het aantal abonnees als de datasnelheid, die duidelijk een sterk stijgende trend volgt met elke nieuwe generatie.

Al deze resultaten zijn gebaseerd op metingen van echte systemen. De vraag is nu wat de evolutie in de toekomst zal zijn, en in het bijzonder of het mogelijk is om de voortdurende stijging van de energiecurve te doorbreken met de nieuwe 5G-generatie.



Figuur 6.4: Algemene trend van het wereldwijde verbruik van mobiele netwerkinfrastructuur in de loop der tijd. Uit (ITU, 2024).

6.2. Literatuur over de evolutie van 4G- naar 5G-netwerken

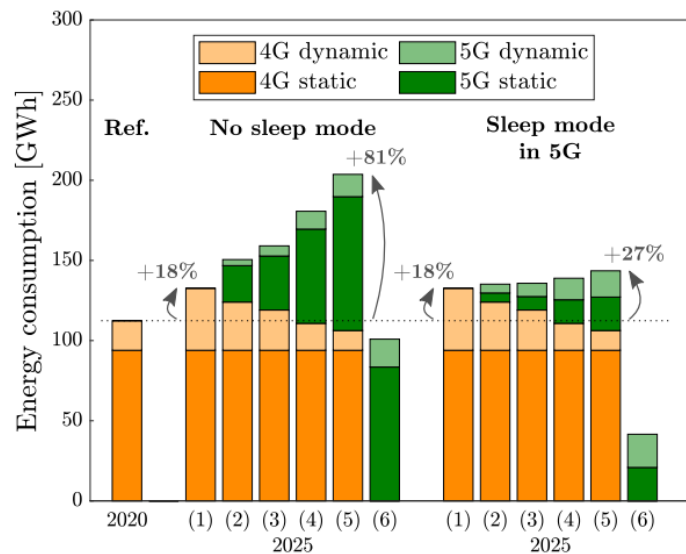
In de media zijn veel verschillende cijfers te vinden, met vaak tegenstrijdige conclusies. Zo geven enkele alarmerende rapporten (Koziol, 2019) aan dat "een 5G-basisstation naar verwachting ongeveer 3 keer zoveel zal verbruiken als een 4G-basisstation", en dat het aantal basisstations de komende 5 jaar ruwweg zal verdubbelen volgens het Small Cell Market Status Report (Small Cell Forum, 2018). Aan de andere kant beloven fabrikanten een verbetering van de energie-efficiëntie met bijna 90% (reductie met een factor 10 van het energieverbruik per verzonden bit).

Een overzicht van de wetenschappelijke literatuur is te vinden in (Williams et al, 2022). Zoals verwacht onderzoekt de meeste wetenschappelijke literatuur echter maar één techniek tegelijk en wordt meestal uitgegaan van de energie-efficiëntie. Er is dus een gebrek aan informatie over het voorspelde of gemeten totale energieverbruik van het hele netwerk. De enige beschikbare literatuur die het totale verbruik van het netwerk in beschouwing neemt, dateert van 2010-2015 (van de Europese projecten GreenTouch en EARTH) en is gebaseerd op verouderde evaluaties. Ze kijken ook niet in detail naar hardwareverbeteringen en geven dus geen erg betrouwbare informatie over de evolutie van het energieverbruik met de huidige 5G-apparatuur. De auteurs van (Williams, 2022) wijzen op twee andere duidelijke hiaten: het gebrek aan interesse in de literatuur voor de beoordeling van ingebedde energie (energieverbruik gerelateerd aan de productie van de apparatuur) en het gebrek aan numerieke analyses van indirecte, zowel positieve als negatieve effecten.

Er zijn enkele voorspellingen beschikbaar van adviesbureaus, die wellicht toegang hebben tot recentere gegevens. Die rapporten geven echter meestal niet genoeg details over hoe de berekeningen tot stand zijn gekomen en wat ze precies inhouden. We kunnen het rapport van (ABI Research, 2021) citeren. Het voorspelt dat de energie-efficiëntie van het 5G-netwerk tussen 2022 en 2030 enigszins langzaam zal afnemen, van ongeveer 600 J/Mbit tot 250 J/Mbit. Aangezien wordt aangenomen dat het dataverkeer met een factor 20 zal toenemen in dezelfde periode, zal het totale verbruik van het netwerk waarschijnlijk vrij snel toenemen. Het is echter moeilijk te achterhalen waar deze cijfers precies vandaan komen.

In de meer recente wetenschappelijke literatuur geeft het werk van (Golard, 2022) een prognose waarin verschillende scenario's voor de uitrol van 4G en 5G in België worden vergeleken. De hypothesen voor de 5G-apparatuur zijn gebaseerd op een opschaling van 4G-apparatuur, wat uiteraard een benadering is en in twijfel kan worden getrokken. Ze gaan ook uit van een afname tot

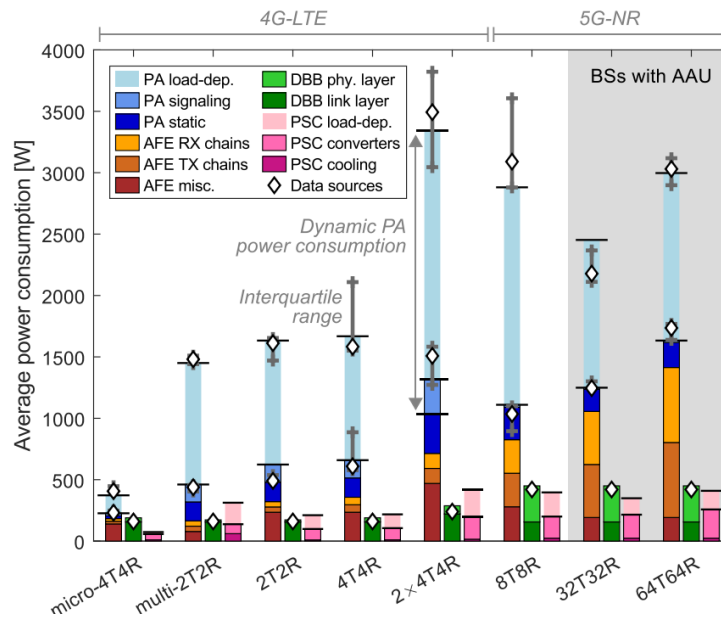
75% van het statische stroomverbruik door slaapstanden, wat op dit moment nog optimistisch is, maar in de toekomst mogelijk zou kunnen worden. De resultaten worden weergegeven in de onderstaande figuur.



Figuur 6.5: Totaal elektriciteitsverbruik met en zonder slaapstanden voor verschillende uitrolscenario's. Scenario (1) komt overeen met geen 5G, scenario (6) komt overeen met de buitengebruikstelling van 4G. De tussenliggende scenario's komen overeen met een geleidelijke uitrol van 5G. Uit (Golard, 2022).

Zoals verwacht neemt het verbruik aanzienlijk toe wanneer 5G boven op de 4G-infrastructuur komt, maar in die situatie is er ook meer capaciteit mogelijk. Het gebruik van slaapstanden is essentieel om te voorkomen dat deze impact te groot wordt. Opnieuw blijkt uit de resultaten dat het extra verbruik sterk afhangt van de keuzes bij de uitrol, zoals het type en de capaciteit van de basisstations. Die keuzes gaan op hun beurt het gebruikersgedrag beïnvloeden via het reboundeffect.

In (Golard, 2024) geven de auteurs een vergelijking die gebaseerd is op metingen van reële basisstationapparatuur van zowel 4G als 5G. Dit kan dus een veel beter idee geven van het verbruik dat in werkelijke netwerken zou kunnen optreden. De resultaten tonen de grote verscheidenheid aan apparatuur met zeer uiteenlopende prestaties. De paper bestudeert de invloed van verschillende parameters zoals het aantal banden, de bandbreedte, het aantal antennes ... Het enige nadeel van deze studie is dat ze geen waarden geeft voor het dataverkeer gekoppeld aan de bijbehorende apparatuur. De verklaring is dat het dataverkeer zelf sterk afhankelijk is van de dichtheid en positie van de gebruikers. Voor de gemeten apparatuur is het statische stroomverbruik van de 5G-basisstations in actieve modus (d.w.z. wanneer ze niet in slaapstand staan) hoger dan dat van 4G-apparatuur, maar van dezelfde orde als dat van de meest geavanceerde (2-band 4Tx-4Rx). Het belastingafhankelijke vermogen haalt voordeel uit de hogere efficiëntie van grote MIMO-configuraties en is daardoor lager dan de geavanceerde 4G-versies. De paper bespreekt ook de impact van energiebesparende functies (slaapstanden). Wanneer slaapstanden worden toegepast, blijkt het energieprofiel niet langer lineair te zijn bij lichtere belasting (zie figuur 7 en meer details hieronder).



Afbeelding 6.6: Uitsplitsing van het stroomverbruik van verschillende basisstationconfiguraties in actieve modus. Uit (Golard, 2024).

6.3. Bespreking

In dit laatste deel willen we graag een aantal belangrijke elementen bespreken en bekijken in hoeverre deze van invloed kunnen zijn op het energieverbruik van het 5G-netwerk in de toekomst.

6.3.1. Kernnetwerk en datacenters

Zoals eerder besproken, draagt het kernnetwerk in mindere mate bij aan het energieverbruik van het 5G-netwerk. Dit gaat in de nabije toekomst wellicht niet veranderen. Een van de belangrijkste veranderingen is de opkomst van virtualisatietechnologie. Theoretische studies voorspellen dat dit een energiebesparing tot 40% kan opleveren (Al-Quzeeni, 2019). Voorlopige metingen met echte apparatuur (Bellin, 2023) laten weinig invloed zien van de virtualisatietechniek, behalve bij hoge doorvoer. De apparatuur kan dan verzadigd geraken met zelfs enige overhead (tot 70%). Waarschijnlijk kan optimalisatie en een betere configuratie dit soort problemen echter verlichten. Samengevat zullen de veranderingen in het verbruik van het kernnetwerk wellicht minder dan 40% bedragen. Dit gaat dus waarschijnlijk een kleine impact hebben op het totale energieverbruik van het netwerk.

Het geval van de datacenters is veel lastiger. Hun energieverbruik (rekening houdend met alle datacenters en niet alleen die van telecommunicatiebedrijven zoals in figuur 1) was in voorgaande jaren al aanzienlijk, maar neemt tegenwoordig zeer snel toe met de komst van generatieve AI zoals ChatGPT. Dit zou in de toekomst wel eens een grote bijdrage kunnen leveren aan het elektriciteitsverbruik. Dit onderwerp valt echter buiten het bestek van dit hoofdstuk en verdient een afzonderlijke analyse.

6.3.2. Gebruikersapparaten

Aangezien de meeste gegevens gebaseerd zijn op rapporten van operatoren, is het energieverbruik van de gebruikersapparaten niet in deze analyse opgenomen. Over het algemeen zijn mobiele gebruikersapparaten (zoals smartphones of verbonden objecten) ontworpen om op batterijen te werken en dus meestal minder energieverwendend. Ze verbruiken vooral energie tijdens de productie. Uiteraard hebben vaste en op het stroomnet aangesloten gebruikersapparaten (zoals tv's, computers, enz.) een veel groter energieverbruik. Ook dit valt echter buiten het bestek van dit hoofdstuk.

6.3.3. Keuzes in verband met dataverkeer en uitrol

De evolutie in het energieverbruik met betrekking tot 5G zal vooral gekoppeld zijn aan het radiotoegangsnetwerk. Dit zal rechtstreeks verband houden met de toename van het dataverkeer. Maar zoals we hierboven al suggereren, kunnen we niet gewoon een evenredigheidsfactor toepassen tussen het dataverkeer en het energieverbruik. De invloed van dataverkeer kan in twee grote stappen worden gezien. Ten eerste is het de belangrijkste drijfveer voor de nieuwe uitrol. Met MIMO- en massive MIMO-configuraties hebben operatoren veel flexibiliteit bij de uitrol van apparatuur met een verschillend aantal antennes en verschillende bandbreedte, wat resulteert in grote verschillen in capaciteit en energieverbruik. Sommige studies in de literatuur (Bjornson, 2015 en Blandino, 2020) hebben de energie-efficiëntie geanalyseerd als functie van deze parameters. Uit beide onderzoeken blijkt dat waarden rond 100 antennes optimaal zijn in termen van energie-efficiëntie. Wat de dekking betreft, zijn er een aantal interessante efficiëntie-uitdagingen, zoals beschreven in (Lorincz, 2022). De algehele optimale uitrol zou enigszins vanzelfsprekend een combinatie moeten zijn van zeer dataefficiënte massive MIMO-basisstations in dichtbevolkte gebieden en verder weg gelegen basisstations met laag vermogen in gebieden met een lagere dichtheid.

In de tweede stap kan het dataverkeer na verloop van tijd nog steeds toenemen, zelfs nadat 5G lokaal is uitgerold. Hierdoor zal de gemiddelde belasting van de 5G-apparatuur waarschijnlijk toenemen. Het energieverbruik zal licht toenemen, wat overeenkomt met het dynamische deel van het stroomprofiel dat hierboven is beschreven (zie figuur 2 en figuur 7 hieronder). Dit resulteert na verloop van tijd meestal in een langzame verbetering van de energie-efficiëntie. Apparatuur met de hoogste capaciteit heeft meestal de beste efficiëntie bij maximale belasting, maar kan leiden tot een zeer lage efficiëntie en een hoog stroomverbruik als ze niet volledig wordt benut (dit gaf aanleiding tot de rapporten over het zeer hoge stroomverbruik van vroege implementaties zoals in China).

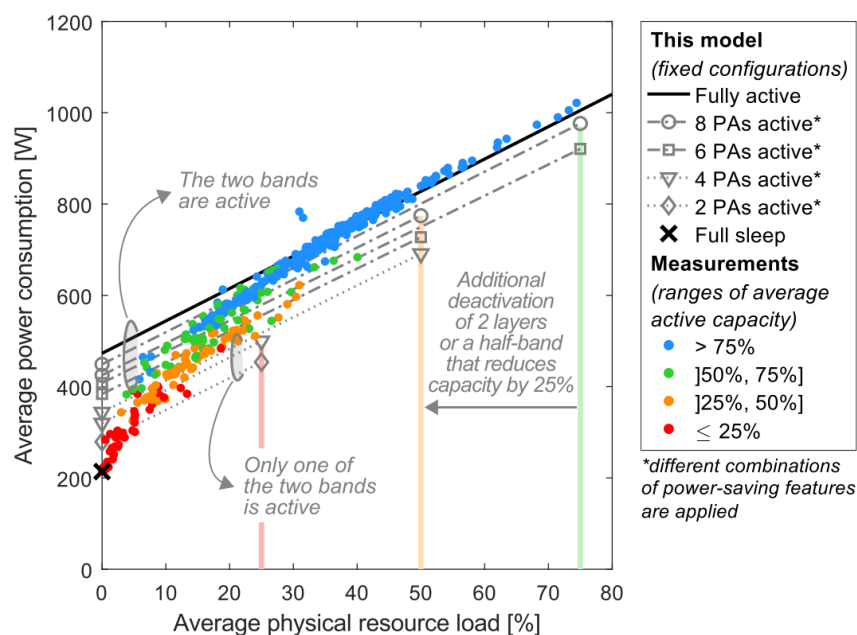
6.3.4. Reboundeffecten

De toename van het dataverkeer is een van de belangrijkste drijfveren voor de uitrol van nieuwe energieverwendende basisstations. Tot nu toe werd de natuurlijke evolutie van het dataverkeer vooral gestuurd door de toepassingen (met een grote invloed van de internetgiganten (GAFAM)). Communicatienetwerken hebben zich altijd aangepast om deze evoluties mogelijk te maken en zo indirect de enorme toename van het dataverkeer gevalideerd. Zoals Williams (2022) stelt, kan “de wijdverspreide invoering van onbeperkte data-abonnementen voor 5G-gebruikers en de facilitering van geavanceerde, data-intensieve mobiele diensten zoals VR en geavanceerdere mobiele games energie-intensieve gebruikerspraktijken aanmoedigen, bijdragen tot steeds toenemend dataverkeer en het energiebesparingspotentieel van 5G tenietdoen”. Aangezien alle sectoren hun koolstofvoetafdruk moeten verkleinen, valt er zeker iets te zeggen voor andere modellen om het

dataverkeer te reguleren, zoals het opleggen van op data gebaseerde prijzen of quota. Zoals vermeld in (Williams, 2022), zou verder onderzoek in deze richtingen zeer waardevol zijn.

6.3.5. Energiebesparende functies

Het concept van energiebesparende functies (of slaapstanden) is hierboven al genoemd. Het idee van energiebesparende functies is om het energieverbruik van basisstations te verminderen door een deel van de hardware uit te schakelen wanneer het niet aan het zenden is. Dit is gemakkelijker in 5G dankzij de zogenaamde lean signalering, die meer tijd laat tussen de verzending van de periodieke besturingssignalen. Daardoor zijn langere periodes in slaapstand mogelijk, vooral bij laag tot gemiddeld dataverkeer. Er bestaan vele soorten energiebesparende functies waarbij verschillende delen van de apparatuur worden uitgeschakeld, voor een wisselende duur (zie bijvoorbeeld (Islam, 2023) voor de beschrijving van verschillende soorten functies). Het gebruik van energiebesparende functies in 5G-hardware is uiteraard erg belangrijk om het energieverbruik van 5G te verminderen. In recente hardware is dit reeds geïmplementeerd. Er is op dit moment heel weinig bekend over hoe deze slaapstanden in werkelijkheid worden geoptimaliseerd. Dat maakt het nog moeilijker om het energieverbruik te voorspellen. Dit heeft bovendien een sterk effect op het stroomverbruiksprofiel. Het statische stroomverbruik neemt meestal af en het dynamische deel wordt minder lineair. Hierdoor wordt de energie-efficiëntie van de basisstations beter bij lage tot gemiddelde belasting (vergeleken met een situatie zonder slaapstand).



Figuur 6.7: Gemiddeld vermogen versus belasting bij gebruik van energiebesparende functies voor een voorbeeld-RRU (Remote Radio Unit). Uit (Golard, 2024).

6.4. Conclusies

Bij wijze van conclusie kunnen we stellen dat het elektriciteitsverbruik van het mobiele toegangsnetwerk met elke generatie aanzienlijk is geëvolueerd (figuur 4). De kans is groot dat dit opnieuw gebeurt met de komst van 5G. In het verleden was dit gekoppeld aan het groeiende aantal abonnees. Voor 5G zal de voortdurende exponentiële toename van het verkeer waarschijnlijk een

grotere impact hebben (door alle technische evoluties die nodig zijn om deze verkeerstoename mogelijk te maken, zoals massive MIMO). In die context zullen de keuzes voor de uitrol en de implementatie van energiebesparende functies doorslaggevend zijn en het uiteindelijke energieverbruik van het netwerk bepalen. Wat de uitrol betreft, kunnen we ons terecht afvragen of operatoren moeten worden aangemoedigd om door te gaan met de exponentiële capaciteitstoename die toepassingen met steeds meer dataoverdracht mogelijk maakt (en zo een reboundeffect creëert), dan wel of er regelgeving moet komen om het totale energieverbruik te verminderen.

Bibliografie

Charlotte Freitag, Mike Berners-Lee, Kelly Widdicks, Bran Knowles, Gordon S. Blair, Adrian Friday, "The real climate and transformative impact of ICT: A critique of estimates, trends, and regulations, Patterns," Volume 2, Issue 9, 2021, 100340.

Jens Malmmodin, Nina Lövehagen, Pernilla Bergmark, Dag Lundén, "Elektriciteitsverbruik en broeikasgasemissies in de ICT-sector - uitkomst voor 2020", Telecommunications Policy, Volume 48, Issue 3, 2024.

J. Malmmodin, en D. Lundén, "The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010-2015" Sustainability 10, no. 9: 3027, 2018.

D. Lundén, J. Malmmodin, P. Bergmark, N. Lövehagen, "Electricity Consumption and Operational Carbon Emissions of European Telecom Network Operators," Sustainability 2022, 14, 2637, 2022.

P. Frenger en R. Tano, "More Capacity and Less Power: How 5G NR Can Reduce Network Energy Consumption," 2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Spring), Kuala Lumpur, Maleisië, 2019.

BIPT, "Mededeling van de Raad van het BIPT van 19 december 2023 over de duurzaamheid van de telecommunicatienetwerken in België", december 2023.
<https://www.ibpt.be/operateurs/publication/communication-du-19-decembre-2023-concernant-la-durabilite-des-reseaux-de-telecommunications-en-belgique>

Gezamenlijke ITU & Wereldbank, "Measuring the Emissions & Energy Footprint of the ICT Sector", 2024.

Kozioł M. "5G's waveform is een batterijvampier", IEEE Spectrum, juli 2019.
<https://spectrum.ieee.org/5gs-waveform-is-a-battery-vampire>

Small cell forum, "Small cells market status report February 2018", februari 2018.
<https://www.scf.io/en/documents/050 - Small cells market status report February 2018.php>

Laurence Williams, Benjamin K. Sovacool, Timothy J. Foxon, "The energy use implications of 5G: Reviewing whole network operational energy, embodied energy, and indirect effects," Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 157, 2022.

ABI Research, "5G Sustainability", 2021. <https://go.abiresearch.com/lp-5g-sustainability>

Golard, L., Louveaux, J. & Bol, D. Evaluatie en projectie van 4G en 5G RAN energy footprints: het geval van België voor 2020-2025. *Ann. Telecommun.* 78, 313-327 (2023).

Louis Golard, Youssef Agram, François Rottenberg, François Quitin, David Bol, Jérôme Louveaux, "A Parametric Power Model of Multi-Band Sub-6 GHz Cellular Base Stations Using On-Site Measurements", *Proceedings of the 2024 IEEE 35th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Sep. 2024.

A. N. Al-Quzweeni, A. Q. Lawey, T. E. H. Elgorashi en J. M. H. Elmirghani, "Optimized Energy Aware 5G Network Function Virtualization," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 44939-44958, 2019.

A. Bellin, M. Centenaro en F. Granelli, "A Preliminary Study on the Power Consumption of Virtualized Edge 5G Core Networks," *2023 IEEE 9th International Conference on Network Softwarization (NetSoft)*, Madrid, Spanje, pp. 420-425.

E. Björnson, L. Sanguinetti, J. Hoydis en M. Debbah, "Optimal Design of Energy-Efficient Multi-User MIMO Systems: Is Massive MIMO the Answer?", in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, nr. 6, pp. 3059-3075, juni 2015,.

S. Blandino, C. Desset, A. Bourdoux en S. Pollin, "Energy Efficiency of Multiple-Input, Multiple-Output Architectures: Future 60-GHz Applications," in *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 15, nr. 2, pp. 65-71, juni 2020.

J. Lorincz, Z. Klarin en D. Begusic, "Modeling and Analysis of Data and Coverage Energy Efficiency for Different Demographic Areas in 5G Networks," in *IEEE Systems Journal*, vol. 16, nr. 1, pp. 1056-1067, maart 2022.

T. Islam, D. Lee en S. S. Lim, "Enabling Network Power Savings in 5G-Advanced and Beyond," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 41, nr. 6, pp. 1888-1899, juni 2023.

7. Milieueffecten van radiofrequente elektromagnetische straling afkomstig van technologie van de vijfde generatie

Om het publiek en werknemers te beschermen tegen wetenschappelijk onderbouwde schadelijke gezondheidseffecten van radiofrequente (RF) elektromagnetische velden (EMV's) in het bereik van 100 kHz tot 300 GHz, heeft de International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) blootstellingsrichtlijnen goedgekeurd, die onlangs opnieuw zijn bevestigd (ICNIRP, 2020). Er zijn geen vergelijkbare blootstellings-normen voor niet-menselijke soorten. Hoewel algemeen wordt aangenomen dat dieren, planten en ecosystemen beschermd zijn als mensen beschermd zijn (ICNIRP, 2020), kunnen unieke blootstellingsomstandigheden en interactiemechanismen leiden tot specifieke effecten op flora en fauna. In het algemeen is onze kennis over deze bijzondere factoren en de daaruit voortvloeiende blootstellingsrisico's nog beperkt en is er nog geen consensus bereikt op basis van de huidige gegevens.

Voordat we de effecten van RF EMV-straling op planten, insecten en bepaalde diergroepen bespreken, nemen we de ICNIRP-richtlijnen onder de loep, omdat ook in deze context specifieke interactiemechanismen recentelijk tot controverse hebben geleid.

7.1. ICNIRP-blootstellingsrichtlijnen en kritiek van vermeende niet-thermische effecten

De ICNIRP-richtlijnen, die de basis vormen voor het beleid in veel landen, gaan uit van twee belangrijke stellingen: eventuele biologische effecten zijn te wijten aan door elektromagnetische velden veroorzaakte weefselverwarming³ en er treden geen effecten op onder de vermeende drempelwaarde voor de specifieke energieabsorptiesnelheid (SAR). ICNIRP stelt met name dat er geen onderbouwd bewijs is van 'niet-thermische' interactiemechanismen die nadelige gezondheidseffecten voorspellen als gevolg van blootstelling aan RF EMV's onder de basisrestrictieniveaus.

Deze opvatting werd onlangs betwist (ICBE-EMF, 2022; Ishai et al. 2024, Levitt et al. 2021, 2022a, 2022b), deels op beschuldigende wijze door te suggereren dat "de voordelen voor de industrie voorrang krijgen, waardoor het publiek wordt blootgesteld aan vermijdbare risico's", en deels met een focus op flora en fauna en de voortdurende achteruitgang van de biodiversiteit. Zo stelt de International Commission on the Biological Effects of Electromagnetic Fields (ICBE-EMF) dat recent wetenschappelijk bewijs de gezondheidsstellingen ontkracht die ten grondslag liggen aan de richtlijnen voor blootstelling aan radiofrequente straling van ICNIRP (en FCC). De kritiek heeft voornamelijk betrekking op het feit dat ICNIRP schadelijke effecten uitsluit bij blootstellingen onder de vastgestelde SAR-drempelwaarde, ondanks (niet noodzakelijk onderbouwd) bewijs van het tegendeel. Het zou daarbij gaan om schadelijke effecten als niet-thermische inductie van reactieve zuurstofsoorten (ROS), DNA-schade, cardiomyopathie, carcinogeniteit, spermaschade en neurologische effecten, waaronder elektromagnetische overgevoeligheid, zoals beoordeeld door ICBE-EMF en anderen (ICBE-EMF, 2022; Ishai et al. 2024, Levitt et al. 2021, 2022a, 2022b). Een veelvoorkomend kenmerk van blootstelling aan RF EMV's van lage intensiteit lijkt de verhoogde

³ ICNIRP erkent de directe stimulatie van zenuwen onder 10 MHz en de diëlektrische afbraak van biologische membranen als interactiemechanismen. Deze zijn echter niet doorslaggevend in de frequentiebanden die relevant zijn voor telecommunicatie.

generatie van ROS te zijn. Dergelijke verhoogde ROS-productie in levende cellen is soms toegeschreven aan zwakke magnetische velden die de recombinatiesnelheden veranderen van kortlevende radicaalparen die gegenereerd worden door normale stofwisselingsprocessen. Dat zou leiden tot veranderingen in de concentraties vrije radicalen, veranderingen in spanningsgevoelige ionenkanalen in celmembranen met als gevolg veranderingen in de kationenstroom door membranen, of verhoogde NADH-oxidaseactiviteit.

Van de genoemde mechanismen is er inderdaad een sterke theoretische en experimentele basis voor het **radicaalpaarmechanisme (RPM)**, zowel voor eenvoudige chemische reacties als voor complexe biologische systemen. In feite wordt aangenomen dat RPM ten grondslag ligt aan een groot aantal magneto-receptieve eigenschappen in de biologie (Zadeh-Haghighi et al., 2022). Zo hebben 's nachts trekkende zangvogels bijvoorbeeld een lichtafhankelijk magnetisch kompaszintuig, waarvan het mechanisme vermoedelijk afhangt van de fotochemische vorming van radicaalparen in cryptochrome (Cry) eiwitten in het netvlies (Hore & Mouritsen, 2016). Een toenemend aantal reviews en artikelen suggereren dat RPM aan de grondslag kan liggen van RF EMV-effecten in de frequentiebanden die relevant zijn voor telecommunicatie. Dit is echter een misvatting (zie verder).

In deze context is het relevant om te benadrukken dat ICNIRP alleen rekening houdt met 'wetenschappelijk onderbouwd' bewijs van schadelijke gezondheidseffecten van radiofrequente EMV's. Dit houdt in dat effecten over het algemeen onafhankelijk geverifieerd moeten zijn, van hoge wetenschappelijke kwaliteit en consistent met de huidige wetenschappelijke inzichten, om als 'bewijs' te worden beschouwd en te worden gebruikt voor het vaststellen van blootstellingsbeperkingen. Hoewel veel onderzoeken de effecten van RF EMV's rapporteren, is de overgrote meerderheid van slechte kwaliteit, hebben ze geen dosimetrie of geblindeerde onderzoeksprotocollen, zijn ze niet gerepliceerd en hebben ze betrekking op een breed scala aan biologische eindpunten en systemen. Als zodanig bieden ze geen geschikte informatie voor zinvolle veiligheidsbeoordelingen of om vragen over niet-thermische effecten ondubbelzinnig te beantwoorden. Dit onderstreept de behoefte aan verder onderzoek van hoge kwaliteit naar de effecten van blootstelling aan RF EMV's, met inbegrip van planten en dieren, en de onafhankelijke replicatie van gerapporteerde effecten in het subthermische bereik, evenals onderzoek naar hun fysieke mechanismen. De politiek zou dit laatste moeten stimuleren.

7.2. Specifieke risico's voor dieren, planten en ecosystemen

7.2.1. Over gewijzigde blootstellingspatronen

Dieren worden waarschijnlijk op andere niveaus blootgesteld aan RF EMV-straling dan het grote publiek. Vliegende soorten zoals vogels en insecten kunnen bijvoorbeeld de uitsluitingszones rond RF zenders naderen, wat resulteert in blootstelling aan intensiteitsniveaus die de aanvaarde limieten overschrijden. Bovendien is de energieabsorptie-efficiëntie in het GHz-bereik hoger voor kleine dieren zoals insecten dan voor mensen, wegens resonantie-effecten, kleinere lichaamsafmetingen en andere diëlektrische eigenschappen. Dit is met name zorgwekkend in verband met de verwachte verschuiving naar hogere frequenties voor 5G (Thielens et al., 2018; Thielens et al., 2020; De Borre et al. 2021). Bij honingbijen kan een relatief kleine verschuiving van 10% in invallende vermogensdichtheid van frequenties onder 3 GHz naar hogere frequenties leiden tot een relatieve toename van het geabsorbeerde vermogen met een factor groter dan drie. Een dergelijke verschuiving in frequenties

wordt verwacht in toekomstige telecommunicatienetwerken, wat betekent dat de blootstelling aan RF EMV's voor insecten aanzienlijk zal toenemen (Thielens et al., 2020).

7.2.2. Over de mogelijkheid van interferentie met dierlijke zintuiglijke systemen

Een groot aantal dieren zijn gevoelig voor magnetische en elektrische velden, wat wijst op een intrinsiek verhoogde gevoeligheid voor blootstelling aan EMV's of mogelijke interferentie met vitale functies.

Veel diersoorten gebruiken het aardmagnetisch veld om zich te oriënteren en te navigeren bij activiteiten zoals seizoensmigratie, foerageren, paren en het bouwen van nesten en holen (Pophof et al., 2023b). Magnetosensitieve gedragskenmerken zijn goed gedocumenteerd voor trekvogels, honingbijen, fruitvliegen, vleermuizen, vissen en talloze andere soorten. Magnetoreceptie werkt met gespecialiseerde sensorische receptoren voor een zeer gevoelige veldwaarneming. De perceptiemechanismen die waarschijnlijk betrokken zijn bij magnetoreceptie omvatten magnetische inductie van elektrische signalen in gespecialiseerde sensorische receptoren, magneto-mechanische interacties met biogenetische magnetische mineralen zoals magnetiet, en/of radicaalpaardynamieken in cryptochrome fotoreceptoren (RPM; zie hierboven; Hore & Mouritsen, 2016).

Zwakke radiofrequente (RF) elektromagnetische velden kunnen interfereren met RPM-gebaseerde sensoren en zo bijvoorbeeld verhinderen dat vogels zich oriënteren in het magnetische veld van de aarde. Maar terwijl EMV's van de MF- tot VHF-band magnetoreceptie effectief verstoren (bv. radio- en televisie-uitzendingen of CB-radio), zelfs bij zeer lage vermogensdichtheden, hebben mobiele communicatienetwerken geen nadelige invloed op de magnetische waarneming van vogels. Uit een recente studie bleek dat de gevoeligheid van vogels voor RF desoriëntatie beperkt is tot frequenties onder 116 MHz, wat overeenkomt met theoretische modellen (Leberecht et al., 2023). Het op magnetiet gebaseerde mechanisme is alleen gevoelig voor statische en VLF magnetische velden, waardoor interferentie met ELF's die worden gebruikt in mobiele communicatie eveneens uitgesloten zijn (Pophof et al., 2023b). Het op inductie gebaseerde mechanisme is een specialiteit die alleen is gedocumenteerd voor de vissubklasse elasmobranchii en is dus niet van belang voor blootstelling in verband met telecommunicatie. Hoewel de effecten van extreem laagfrequente magnetische velden en de RF ontregeling van het RPM uitgebreid zijn bestudeerd en conceptueel goed gekend zijn, suggereren ze dus geen verhoogde gevoeligheid voor RF EMV's bij frequenties die relevant zijn voor telecommunicatie, zoals ten onrechte is beweerd (zie bijvoorbeeld de review ICBE-EMF, 2022).

7.2.3. Over niet-zintuiglijke effecten van radiofrequente elektromagnetische velden

Het rapport van Leefmilieu Brussel uit 2021 geeft een overzicht van de effecten van EMV's op het milieu, met speciale aandacht voor insecten. De systematische reviews van Thill et al. en Thielens proberen een representatief overzicht van dit veld te geven (Thill et al., 2023; Thielens 2021). Het algemene geschetste beeld was/is als volgt: hoewel Thill et al. suggereren dat biologische effecten van niet-thermische EMV's op insecten zijn aangetoond in het laboratorium en een ernstige impact kunnen hebben op de levensvatbaarheid van insectenpopulaties, zijn onderzoeken in het veld schaars en zijn de bredere ecologische implicaties dus nog onbekend. Het Bundesamt für Strahlenschutz

(Federaal Bureau voor Stralingsbescherming, Duitsland, BfS) heeft in een recente Spotlight (Spotlight, mei/2024 nr. 2) commentaar geleverd op de review van Thill et al. en een reeks methodologische kwesties aan de kaak gesteld (geen PRISMA-registratie; gemiddeldenratio gebruikt om de effectgrootte te schatten; geen beoordeling van het risico op bias en inclusie; geen beoordeling van de studiekwaliteit; combinatie van verschillende eindpunten en soorten; geen kritische beoordeling van duidelijke publicatiebias, enz.). Gezien deze tekortkomingen concludeerde BfS dat de review geen wezenlijke bijdrage levert aan de beoordeling van mogelijk schadelijke EMV-effecten op insecten. In tegenstelling tot Thill et al., stelt Thielens eveneens vast dat veel studies geen uitsluitsel geven of van slechte kwaliteit zijn, en dat betrouwbare studies niet wijzen op een schadelijk effect van zwakke hoogfrequente velden zoals die worden aangetroffen in de buurt van basisstations voor mobiele telefonie (Thielens, 2021). In het frequentiebereik boven 6 GHz rechtvaardigen *in vitro* demonstraties van neurostimulatie en *in vivo* demonstraties van ontwikkelings- en teratogene effecten op ongewervelden, waargenomen bij vergelijkbaar hoge vermogensdichtheden, verder onderzoek, met name bij lagere vermogensdichtheden. Een recent rapport van het Zwitserse Federal Office for the Environment geeft een samenvatting van de stand van kennis met betrekking tot de effecten van elektromagnetische velden op geleedpotigen. Hoewel het rapport veel, voornamelijk negatieve effecten vermeldt, wordt de kwaliteit van de onderzoeken opnieuw onvoldoende geacht, met technische tekortkomingen en vooringenomen onderzoeksplannen en -protocollen (Mulot et al., 2022).

7.3. Effecten van 5G-straling op 3,5 GHz

We vatten de effecten samen die zijn vastgesteld in recente onderzoeken naar de effecten van 5G-straling op 3,5 GHz, die centraal staan bij de huidige invoering van 5G, maar waarover tot nu toe slechts enkele publicaties zijn verschenen.

De blootstelling van zebravisembryo's aan SAR's van 8,27 W/kg leidde tot verminderde sensorimotoriek, abnormale gedragsreacties en variaties in de expressie van genen die verband houden met de stofwisselingsfunctie bij volwassen zebravissen (Dasgupta et al., 2020, 2022).

Bij *Drosophila melanogaster* verhoogde blootstelling aan 3,5 GHz de expressie van genen die verband houden met hiteschok, oxidatieve stress en humorale immuniteit, wat de ontwikkeling bij vliegen bevorderde (Wang et al., 2022; 0,1 W/m², 1 W/m², en 10 W/m² wat overeenkomt met SAR's van 0,0026 W/kg, 0,026 W/kg en 0,26 W/kg, d.w.z. gedeeltelijk 'niet-thermisch'; alle blootstellingen induceerden significante effecten; er werd geen monotone dosis-respons vastgesteld). Daarnaast namen de diversiteit en de abundantie van soorten van het microbioom significant af.

Langdurige blootstelling aan RF straling van 3,5 GHz induceerde een hittestressrespons, waarbij de expressie van circadiane klok- en neurotransmittergenen veranderde, waardoor de slaapduur en -kwaliteit verbeterden (Wang et al., 2021; 0,1 W/m², 1 W/m² en 10 W/m², zoals hierboven); kortdurende blootstelling aan RF EMV's verhoogde het activiteitsniveau en verminderde de slaapduur.

Langdurige blootstelling van diabetische en gezonde ratten leidde tot veranderingen in neuropeptideconcentraties en oxidatieve stress in de hersenen, en een toename in eetlust en energiemetabolisme (Bektas et al., 2022; 28,1 V/m of 1,6 W/m², wat overeenkomt met een SAR van gemiddeld 0,2 W/kg voor 10 g grijze materie). Meer recentelijk werden vergelijkbare veranderingen

in hormonen die het energiemetabolisme en de antioxidantstatus reguleren waargenomen in het bloed en de vetweefsels van vergelijkbaar blootgestelde ratten (Bektas et al., 2024; specifieke absorptiesnelheid voor het hele lichaam: 37 mW/kg). Hoewel er veranderingen waren in de hormoonspiegels in de blootgestelde groep, bleven de waarden altijd binnen het normale bereik.

Tot slot werd er geen effect op angstachtig gedrag waargenomen, maar wel een SAR-afhankelijke toename van malondialdehydeniveaus (MDA), verminderde antioxidant-enzymactiviteit, ultrastructurele schade en verhoogde celapoptose in de auditieve cortex van cavia's op een SAR-afhankelijke manier (Yang et al., 2022; 2 tot 10 W/kg gedurende 72 u).

Een paar oudere studies focusten op GSM-gemoduleerde mobiele telefoonstraling (900 MHz), waarbij een vermindering van de eileg door bijenkoninginnen werd vastgesteld en depletie van bijenkorfpollen en -honing (Sharma en Kumar, 2010; 85 mW/m², met 2 mobiele telefoons, 2 x 15 min. per dag), minder uitgekomen eieren en veranderde popontwikkeling van honingbijkoninginlarven (Odemer & Odemer, 2019; met mobiele telefoon met hoofd-SAR van 0,59 W/kg die tot 3,8 V/m leverde gedurende 2 weken). In een ander onderzoek zorgde GSM-gemoduleerde RF straling van 900 MHz ervoor dat mieren hun visuele en olfactorische geheugen voor het vinden van voedsel verloren (Cammaerts et al., 2012; ongeveer 0,77 V/m, $7,95 \times 10^{-4}$ W/m²).

Hoewel verschillende onderzoeken effecten hebben gerapporteerd van blootstelling aan RF EMV's bij frequenties die relevant zijn voor telecommunicatie, is het door de grote verscheidenheid aan bestudeerde systemen en biologische eindpunten en het gebrek aan replicatie momenteel niet mogelijk om tot een sluitende beoordeling te komen van risico's op niet-thermische blootstellingsniveaus. Het blijft bovendien onduidelijk of de waargenomen effecten daadwerkelijk een risico zouden vormen in het ecosysteem.

7.4. Een overzicht van de effecten van blootstelling aan radiofrequente elektromagnetische velden op flora en fauna

Er zijn verschillende reviews gepubliceerd over de blootstelling van verschillende planten en dieren aan antropogene RF EMV's. Die reviews zijn echter meestal niet systematisch en lijken deels onevenwichtig, terwijl ze een bepaald wereldbeeld aanhangen (namelijk dat antropogene EMV's een probleem zijn voor de biodiversiteit) zonder sterk ondersteunend bewijs. Meer recentelijk hebben Karipidis en collega's een systematische kaart samengesteld met alle antropogene bronnen van RF EMV's, inclusief frequenties binnen het hele RF bereik van 100 kHz tot 300 GHz (Brzozek et al., 2024). 334 studies die werden gepubliceerd voor 2023, kwamen in aanmerking (237 over fauna en 97 over flora) en werden geanalyseerd op effectgrootte en onderzoekskwaliteit. Met stralingsbescherming in gedachten is het resulterende beeld niet geruststellend. De overgrote meerderheid van de studies werd van slechte kwaliteit bevonden, en slechts 5,6% en 2,1% werd beschouwd als van goede kwaliteit voor respectievelijk fauna en flora. Bovendien was er een significante negatieve correlatie tussen kwaliteitsscore en effectgrootte voor studies over fauna, wat aangeeft dat studies die negatieve effecten van RF blootstelling op dieren rapporteren, doorgaans van lagere kwaliteit zijn. In feite bleek de kwaliteitsscore een betere indicatie te geven van de effectgrootte dan de parameters voor blootstellingsniveau of de blootstellingsduur. De effecten namen af met de parameters voor blootstellingsniveau of de blootstellingsduur, wat contra-intuïtief is. De auteurs concluderen dat dit twijfels oproept over de vraag of dieren en planten werkelijk worden beïnvloed op niveaus onder de

menselijke blootstellingslimieten, en benadrukken dat er nood is aan verder kwaliteitsvol onderzoek naar de effecten van blootstelling aan RF EMV's op planten en dieren, in het bijzonder buiten een paar beter bestudeerde bewijsclusters (gerelateerd aan voortplanting, ontwikkeling en gedrag van insecten en vogels voor dieren, en ontkieming en groei van graan en peulvruchten voor planten). Er is ook een grote behoefte aan verdere observationele studies om de ecologische impact van antropogene RF EMV's te onderzoeken.

7.5. Ecologische impact van CEM-RF

De meeste studies naar mogelijke langetermijneffecten van blootstelling aan RF EMV's werden uitgevoerd in laboratoria op gevestigde diermodellen, zonder rekening te houden met dieren in het wild en ecosystemen. Studies die zich richten op milieueffecten, d.w.z. effecten op hele populaties in hun natuurlijke ecosystemen, zijn schaars. Een systematische review door Cucurachi et al. bespreekt de effecten van RF blootstelling tussen 10 MHz en 3,6 GHz op ecologisch relevante eindpunten zoals groei, ontwikkeling en vruchtbaarheid (Cucurachi et al., 2013). In de meeste geïdentificeerde studies werden mogelijke ecologisch relevante effecten waargenomen. Door het gebrek aan een dosis-responsrelatie en standaardisatie, evenals het lage aantal veldstudies is het momenteel echter niet mogelijk om conclusies te trekken op ecosysteemniveau. Naast antropogene straling in verband met telecommunicatie-infrastructuur, richten twee recente onderzoeken zich op de schadelijke effecten van radiotelemetrie- en trackingapparatuur op in het wild levende dieren (Manville et al., 2024; Balmori, 2024). Hoewel de reviews alar-mistisch zijn, gelden dezelfde algemene opmerkingen over de slechte kwaliteit van het onderzoek en het gebrek aan onderbouwing.

7.5.1. Recente bevindingen over insecten

Studies naar de effecten van RF EMV's in natuurlijke omgevingen zijn schaars voor insecten. Eén studie suggereert dat elektromagnetische straling van telecommunicatieantennes de abundantie en samenstelling van verschillende soorten wilde bestuivende insecten in hun natuurlijke habitat op twee eilanden in de Egeïsche Zee beïnvloedde (de abundantie was afgenomen voor kevers, wespen en zweefvliegen en toegenomen voor ondergronds nestelende wilde bijen en wolzwevers; Lázaro et al., 2016). De soortenrijkdom van zweefvliegen had de neiging om af te nemen met de veldsterkte, maar alleen op één eiland; de soortenrijkdom van wilde bijen was niet significant gerelateerd aan RF EMV's. Door de correlatieve benadering van het onderzoek is het niet mogelijk om te controleren op andere variabelen die de abundantie zouden kunnen hebben beïnvloed. Indien de negatieve impact op de abundantie van sommige soorten en de veranderde soortensamenstelling van gemeenschappen wilde bestuivers in natuurlijke habitats causaal is, kan deze van ecologisch belang zijn.

In een veldstudie waarin het effect werd onderzocht van blootstelling aan de velden van basisstations voor mobiele telefonie (GSM 900 MHz, 48 uur; 0,1 tot 4,3 mW m⁻² op 16 m tot 151 m; schijnblootstelling afgeschermd door een kooi van Faraday) op het voortplantingsvermogen van vier verschillende ongewervelde soorten (de roofwants *Orius laevigatus*, de springstaart *Folsomia candida*, de sluipwesp *Asobara japonica* en de fruitvlieg *Drosophila melanogaster*), werden daarentegen geen significante effectgebieden gevonden (Vijver et al., 2014).

Wetenschappelijk bewijs dat antropogene RF EMV's van invloed kunnen zijn op de abundantie of diversiteit van bestuivers is beperkt tot de hierboven beschreven studie (Lázaro et al., 2016). Bijgevolg

moet nog worden vastgesteld of antropogene RF EMV's een significante bedreiging vormen voor bestuivende insecten en de voordelen die ze bieden aan ecosystemen en de mensheid (Vanbergen et al., 2019); gezien de algemene afname van insectendiversiteit en -abundantie is verder onderzoek dringend nodig. Nogmaals, door een gebrek aan wetenschappelijke studies van hoge kwaliteit is de kennis over het risico van antropogene EMV voor bestuivers onduidelijk, twijfelachtig of slechts gedeeltelijk vastgesteld.

7.5.2. Recente bevindingen bij planten

Bestaand onderzoek bij planten heeft aangetoond dat RF EMV-straling in principe invloed kan hebben op hun groei en ontwikkeling, genexpressie en verschillende metabolische activiteiten (Kaur et al., 2021; Pophof et al., 2023). Er is gesuggereerd dat het belangrijkste ingangspunt voor de biologische effecten van EMV's overeenkomt met een toename van het ROS-metabolisme en het cytosolisch calcium dat leidt tot verschillende cellulaire reacties (Kaur et al., 2021). Die bevindingen waren echter grotendeels afkomstig van de kortdurende blootstelling van gewassen onder laboratoriumomstandigheden.

In een recent onderzoek beoordeelden Czerwiński et al. de effecten van langdurige blootstelling aan RF EMV's in de frequentieband van 866-868 MHz op wilde planten onder gecontroleerde experimentele veldomstandigheden (Czerwiński et al., 2023). Dit lijkt het eerste onderzoek te zijn in een open natuurlijke omgeving. Over de onderzoeksperiode van vier maanden, van zaadontkieming tot rijping, vertoonden 9 van de 10 bestudeerde gewone kruidachtige planten geen significante reacties op RF EMV's. De opvallende uitzondering was de soort *Trifolium arvense*, die een toegenomen groei en veranderde bladoriëntatie vertoonde, maar ook een vroegere senescentie. De bevindingen suggereren dat *Trifolium arvense* kan dienen als indicator van RF EMV-blootstelling in het milieu en benadrukken de behoefte aan verdere studies naar andere verwante soorten in Europese graslanden.

De overheersende afwezigheid van effecten komt overeen met een oudere veldstudie die het effect van RF EMV's op jonge sparren en beuken onderzocht (Schmutz et al. 1996; 2.450 MHz, 0,007-300 Wm⁻²). Ondanks geïnduceerde temperatuurstijgingen tot 4°C bij de hoogste blootstelling, werden er geen waarneembare visuele symptomen van schade vastgesteld, zoals verminderde doorzichtigheid van de kruin. De concentraties van sommige voedingsstoffen in de bloemen daalden, maar bleven toereikend.

In een recenter onderzoek wordt beweerd dat de plantengroei van aardnoten vertraagt in de nabijheid van een GSM-basisstation (900 MHz en 1800 MHz, bij de ICNIRP-blootstellingslimiet) ten opzichte van een meer afgelegen controlegroep (Amuda et al., 2024). Er zijn echter duidelijke zwakke punten in de onderzoeksopzet die het belang van deze studie in twijfel doen trekken.

7.5.3. Relevante bevindingen over vogels

In de review van Cucurachi et al. worden 26 ecologisch relevante studies over vogels genoemd, waarbij 70% een effect van RF EMV's rapporteert (Cucurachi et al. 2013). De meeste studies waren laboratoriumstudies en gericht op ontwikkelings- en vruchtbaarheidseindpunten bij kippen. Hoewel de resultaten over het algemeen heterogeen waren, concludeerden de auteurs van de review dat

straling van mobiele telefoons, met name 900 MHz GSM, een factor zou kunnen zijn die van invloed is op de ecologie van vogels (Cucurachi et al. 2013).

Er zijn slechts enkele observationele studies gepubliceerd over de effecten van RF EMV's van mobiele communicatie op vogelpopulaties. In een veldstudie werd de abundantie van huismussen (*Passer domesticus*) geschat in de Spaanse stad Valladolid, van 2002 tot 2006 (Balmori en Hallberg, 2007). De abundantie van de mussen correleerde negatief met de veldsterkte (1 MHz-3 GHz, maximale veldsterkte 4 Vm^{-1}), d.w.z. er werden meer mussen waargenomen op locaties met een lagere veldsterkte. Een soortgelijke correlatie werd gevonden tussen mussendichtheid en elektrische veldsterkte op 900/1.800 MHz in zes woonwijken in België (Everaert en Bauwens 2007). De auteurs stelden vast dat de ruimtelijke variatie in het aantal huismusmannetjes negatief en zeer significant gerelateerd was aan de sterkte van elektrische velden in de downlink-frequentiebanden van zowel 900 als 1800 MHz. Een recente Algerijnse studie suggereert dat de vruchtbaarheid van witte ooievaars (*Ciconia ciconia ciconia*) toeneemt met de afstand tot een GSM-relaisantenne (900 en 1800 MHz; geen dosimetrie; Sakraoui et al., 2023). Al deze bevindingen rapporteren correlaties die niet noodzakelijkerwijs een oorzakelijk verband impliceren tussen mobiele-telefoonstraling en vogelabundantie, omdat covariërende factoren niet kunnen worden uitgesloten en zelfs waarschijnlijk zijn, zoals blijkt uit onderzoek dat de abundantie van mussen in verband brengt met de beschikbaarheid van struikvegetatie en oude bouwstructuren (Patel et al., 2024). Deze bevindingen kunnen evenmin worden verklaard op basis van de verstoring van de magnetoreceptie van vogels door zwakke breedbandige radiofrequente magnetische velden, aangezien dit effect prominent aanwezig is in het lage MHz-bereik (Engels et al., 2014) maar niet wordt verwacht bij frequenties die typisch zijn voor mobiele communicatie. Frequenties boven 100 MHz interfereren niet met het radicaalpaarmechanisme dat waarschijnlijk ten grondslag ligt aan de magnetische oriëntatie van nachtelijke trekvogels (Leberecht et al., 2023).

7.6. Samenvatting en conclusies

ICNIRP-richtlijnen en kritieken. De International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) heeft richtlijnen opgesteld voor blootstelling aan radiofrequente straling, die voornamelijk zijn gebaseerd op de bescherming van de menselijke gezondheid. Het blijft echter onduidelijk of deze richtlijnen voldoende bescherming bieden voor niet-menselijke soorten, vooral gezien hun verschillende blootstellingspatronen en biologische interacties met RF EMV's.

De richtlijnen zijn gebaseerd op de veronderstellingen dat RF EMV-effecten voornamelijk thermisch zijn en dat er geen nadelige effecten optreden onder specifieke energieabsorptiesnelheden (SAR's). Bepaalde studies suggereren niet-thermische effecten (bv. productie van reactieve zuurstofsoorten, DNA-schade) op subthermische niveaus, maar deze worden niet onderbouwd door een fysisch plausibel interactiemechanisme en zijn vaak van twijfelachtige wetenschappelijke kwaliteit, waardoor een afdoende beoordeling niet mogelijk is. Het meest plausibele mechanisme van niet-thermische effecten, het radicaalpaarmechanisme (RPM), ligt ten grondslag aan de magnetoreceptie van dieren bij soorten zoals trekvogels, maar staat niet de gevoeligheid voor radiofrequente elektromagnetische velden van technologieën van de vijfde generatie.

Specifieke risico's voor dieren en ecosystemen. Dieren, en dan vooral vliegende soorten zoals vogels en insecten, kunnen een verhoogde blootstelling aan RF EMV's ervaren door de nabijheid van zenders en een verhoogde absorptie-efficiëntie bij hogere frequenties. Studies leveren geen duidelijk bewijs

voor de verstoring van dierlijke sensorische systemen door 5G-technologieën. Er zijn interferenties vastgesteld in magnetoreceptie voor frequenties onder 116 MHz, d.w.z. in frequentiebanden ver onder de 5G-frequenties.

Achteruitgang van insecten en bestuivers. Insectenstudies tonen aan dat blootstelling aan hoge frequenties het geabsorbeerde vermogen kan verhogen, wat mogelijk gevolgen heeft voor insectenpopulaties. Het meeste onderzoek is echter gebaseerd op laboratoriumstudies, waarbij veldstudies of ecologische perspectieven ontbreken, en is van lage methodologische kwaliteit. Er is dan ook verder onderzoek nodig om de langetermijneffecten te beoordelen.

Effecten op de flora. Onderzoek naar de impact van RF EMV's op plantengroei en celmetabolisme suggereert mogelijke invloeden via ROS-metabolisme en calciumroutes. In een recente studie naar kruidachtige planten onder natuurlijke omstandigheden werden beperkte effecten vastgesteld, waarbij *Trifolium arvense* kleine groeiveranderingen vertoonde. Het bewijs is nog steeds onduidelijk en vraagt om uitgebreidere studies in verschillende ecologische settings.

5G-specifieke onderzoekshiaten. Er bestaan maar weinig studies naar de specifieke effecten van 5G op 3,5 GHz. Vroege bevindingen bij dieren, waaronder zebrafissen en *Drosophila*, wijzen op een aantal biologische reacties op niet-thermische niveaus, zoals veranderingen in genexpressie en veranderd gedrag. De variabiliteit in biologische eindpunten tussen soorten en het gebrek aan replicatie beperken echter de ecologische relevantie van deze bevindingen.

Vogelpopulaties en ecologische waarnemingen. Observatiestudies rapporteren correlaties tussen blootstelling aan RF EMV's en vogelpopulaties, met name huismussen en witte ooievaars. Deze onderzoeken kunnen echter geen oorzakelijk verband vaststellen vanwege versturende factoren. 5G-frequenties hebben waarschijnlijk geen invloed op de gevoeligheid van het RPM, aangezien de interferentie voornamelijk beperkt blijft tot lagere MHz-banden.

Conclusie. Hoewel RF EMV's van 5G-technologie bepaalde biologische processen bij niet-menselijke soorten kunnen beïnvloeden, blijft het bewijs inconsistent en vaak van lage kwaliteit. Hoogwaardig veldonderzoek is essentieel om te bepalen of RF EMV-blootstellingsniveaus onder de ICNIRP-drempelwaarden een significant effect kunnen hebben op de biodiversiteit, vooral bij kwetsbare insecten- en vogelpopulaties. Verder onderzoek naar niet-thermische mechanismen en hun relevantie voor de ecologische gezondheid is nodig om eventuele noodzakelijke aanpassingen in richtlijnen voor blootstelling aan RF EMV's te onderbouwen.

Bibliografie

Amuda, D. B., James, V., Oni, F. G. O., Oni, O. M., & Olawoore, I. T. Effects Of Radio Frequency Radiation On Growth Of Groundnut Around Mobile Base Transmitter Stations.

Balmori, A., & Hallberg, Ö. (2007). De stedelijke achteruitgang van de huismus (*Passer domesticus*): een mogelijk verband met elektromagnetische straling. *Elektromagnetische biologie en geneeskunde*, 26(2), 141-151.

Balmori, A. (2024). Radiotrackingssystemen zenden gepulseerde golven uit die de gezondheid van dieren kunnen aantasten en hun oriëntatie kunnen veranderen. *Tijdschrift voor Natuurbehoud*, 77, 126520.

Bektas, H., Algul, S., Altindag, F., Yegin, K., Akdag, M.Z., Dasdag, S.: Effects of 3.5 GHz radiofrequency radiation on Ghrelin, Nesfatin-1, and Irisin level in diabetic and healthy brains. *J. Chem. Neuroanat.* **126**, 102168 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jchemneu.2022.1021>

Bektas, H., Dasdag, S., Altindag, F., Akdag, M.Z., Yegin, K., Algul, S.: Effects of 3.5-GHz radiofrequency radiation on energy-regulatory hormone levels in the blood and adipose tissue. *Bio-elektromagnetics* **45**, 209-217 (2024). <https://doi.org/10.1002/bem.22498>

Brzozek, C., Mate, R., Bhatt, C. R., Loughran, S., Wood, A. W., & Karipidis, K. (2024). Investigating the impact of anthropogenic radiofrequency electromagnetic fields on animals and plants in the environment: analysis from a systematic map. *International Journal of Environmental Studies*, 1-16.

Cammaerts MC, De Doncker P, Patris X, Bellens F, Rachidi Z, Cammaerts D. GSM 900 MHz-straling remt de associatie van mieren tussen voedsellocaties en aangetroffen signalen. *Electromagn Biol Med.* 2012;31:151-65.

Cucurachi, S., Tamis, W. L., Vijver, M. G., Peijnenburg, W. J., Bolte, J. F., & de Snoo, G. R. (2013). Een overzicht van de ecologische effecten van radiofrequente elektromagnetische velden (RF-EMF). *Environment international*, 51, 116-140.

Czerwiński, M., Vian, A., Woodcock, B. A., Goliński, P., Virto, L. R., & Januszkiewicz, Ł. (2023). Hebben elektromagnetische velden die worden gebruikt in telecommunicatie invloed op wilde plantensoorten? Een in het veld uitgevoerde effectstudie. *Ecologische indicatoren*, 150, 110267.

Dasgupta, S., Wang, G., Simonich, M.T., Zhang, T., Truong, L., Liu, H., Tanguay, R.L.: Impacts of high dose 3.5 GHz cellphone radiofrequency on Zebrafish embryonic development. *PLoS. ONE.* **15**, e0235869 (2020). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235869>

Dasgupta, S., Leong, C., Simonich, M.T., Truong, L., Liu, H., Tanguay, R.L.: Transcriptomic and long-term behavioral deficits associated with developmental 3.5 GHz radiofrequency radiation exposures in Zebrafish. *Environ. Sci. Technol. Lett.* **9**, 327-332 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00037>

De Borre E, Joseph W, Aminzadeh R, Müller P, Boone MN, Josipovic I, Hashemizadeh S, Kuster N, Kühn S, Thielens A. Radiofrequente blootstelling van de gele koorts mug (*A. aegypti*) van 2 tot 240 GHz. *PLoS Comput Biol* 17:e1009460; 2021.

Engels, S., Schneider, N. L., Lefeldt, N., Hein, C. M., Zapka, M., Michalik, A., ... & Mouritsen, H. (2014). Antropogene elektromagnetische ruis verstoort magnetische kompasoriëntatie in een trekvogel. *Nature*, 509(7500), 353-356.

Everaert, J., & Bauwens, D. (2007). Een mogelijk effect van elektromagnetische straling van basisstations voor mobiele telefonie op het aantal broedende huismussen (*Passer domesticus*). *Elektromagnetische biologie en geneeskunde*, 26(1), 63-72.

Hore, P. J., & Mouritsen, H. (2016). Het radicaal-paar mechanisme van magnetoreceptie. *Annual review of biophysics*, 45(1), 299-344.

ICNIRP. Richtlijnen voor het beperken van de blootstelling aan elektromagnetische velden (100 kHz tot 300 GHz). *Health Phys* 118(5):483-524; 2020.

Ishai, P. B., Davis, D., Taylor, H., & Birnbaum, L. (2024). Problems in evaluating the health impacts of radio frequency radiation. *Environmental research*, 243, 115038.

Internationale Commissie voor de Biologische Effecten van Elektromagnetische Velden (ICBE-EMF). Scientific evidence invalidates health assumptions underlying the FCC and ICNIRP exposure limit determinations for radiofrequency radiation: implications for 5G. *Environ Health* 21, 92 (2022). <https://doi.org/10.1186/s12940-022-00900-9>

Kaur, S., Vian, A., Chandel, S., Singh, H. P., Batish, D. R., & Kohli, R. K. (2021). Gevoeligheid van planten voor hoogfrequente elektromagnetische straling: Cellulaire mechanismen en morfologische veranderingen. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 20(1), 55-74.

A. Lázaro, A. Chroni, T. Tscheulin, J. Devaldez, C. Matsoukas, T. Petanidou. Electromagnetic radiation of mobile telecommunication antennas affects the abundance and composition of wild pollinators. *J. Insect Conserv.* 20 (2016), pp. 315-324

Leberecht, B., Wong, S. Y., Satish, B., Döge, S., Hindman, J., Venkatraman, L., ... & Hore, P. J. (2023). Upper bound for broadband radiofrequency field disruption of magnetic compass orientation in night-migratory songbirds. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(28), e2301153120.

Levitt, BB , Lai, HC , en Manville, AM . Effecten van niet-ioniserende elektromagnetische velden op flora en fauna, deel 3. Blootstellingsnormen, overheidsbeleid, wetten en toekomstige richtingen. *Rev Environ Health* (2021) 37:531-58. doi: 10.1515/reveh-2021-0083.

Levitt, B. B., Lai, H. C., & Manville, A. M. (2022). Effecten van niet-ioniserende elektromagnetische velden op flora en fauna, deel 1. Stijgende EMV-niveaus in de omgeving. *Reviews on Environmental Health*, 37(1), 81-122.

Levitt, BB , Lai, HC , en Manville, AM . Effects of non-ionizing electromagnetic fields on flora and fauna, part 2 impacts: how species interact with natural and man-made EMF. *Rev Environ Health* (2022) 37:327-406. doi: 10.1515/reveh-2021-0050

Manville, A. M., Levitt, B. B., & Lai, H. C. (2024). Health and environmental effects to wildlife from radio telemetry and tracking devices-state of the science and best management practices. *Frontiers in Veterinary Science*, 11, 1283709.

Mulot M., Kroeber T., Gossner M., Fröhlich J. Wirkung von nichtionisierender Strahlung (NIS) auf Arthropoden, Bericht im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU), Neuenburg, Juli 2022.

Odemer R, Odemer F. Effecten van radiofrequente elektromagnetische straling (RF-EMF) op de ontwikkeling van honingbijenkoninginnen en paringssucces. *Sci Total Environ.* 2019;661:553-62.

Patel, F. P., Dodia, P. P., & Mehta, D. M. (2024). Factors influencing the occurrence of the House Sparrow *Passer domesticus* (Linnaeus, 1758)(Aves: Passeriformes: Passeridae) in Bhavnagar, Gujarat, India. *Journal of Threatened Taxa*, 16(6), 25360-25372.

Pophof, B., Henschenmacher, B., Kattnig, D. R., Kuhne, J., Vian, A., & Ziegelberger, G. (2023). Biological effects of radiofrequency electromagnetic fields above 100 MHz on fauna and flora: workshop report. *Health Physics*, 124(1), 31-38.

Pophof, B., Henschenmacher, B., Kattnig, D. R., Kuhne, J., Vian, A., & Ziegelberger, G. (2023). Biological Effects of Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields from 0 to 100 MHz on Fauna and Flora: Workshop Report. *Health Physics*, 124(1), 39-52.

Sakraoui, D., Ziane, N., Ghalem, R., Boukheroufa, M., & Habbachi, W. (2023). Is er een effect van elektromagnetische golven van basisstations op het broedsucces van *Ciconia ciconia ciconia* in Algerije? *Biosystems Diversity*, 31(4), 493-499.

Schmutz, P., Siegenthaler, J., Stäger, C., Tarjan, D., & Bucher, J. B. (1996). Langdurige blootstelling van jonge sparren en beuken aan 2450-MHz microgolfstraling. *Science of the total environment*, 180(1), 43-48.

Sharma VP, Kumar NR. Changes in honeybee behaviour and biology under the influence of cellphone radiations. *Curr Sci.* 2010;98:1376-8.

Spotlight (2024). Spotlight op "Biological effects of electromagnetic fields on insects: a systematic review and meta-analysis" door Thill et al. in *Reviews on Environmental Health* (2023).
https://doris.bfs.de/jspui/bitstream/urn:nbn:de:0221-2024051343843/4/SL_Thill_2023_BiologicalEffectsOf_Deu.pdf

Thielens, A., Bell, D., Mortimore, D. B., Greco, M. K., Martens, L., & Joseph, W. (2018). Blootstelling van insecten aan radiofrequente elektromagnetische velden van 2 tot 120 GHz. *Wetenschappelijke rapporten*, 8(1), 3924.

Thielens, A., Greco, M. K., Verloock, L., Martens, L., & Joseph, W. (2020). Blootstelling van westerse honingbijen aan radiofrequente elektromagnetische velden. *Wetenschappelijke rapporten*, 10(1), 461.

Thielens A. De milieueffecten van 5G. Een literatuuroverzicht van de effecten van blootstelling aan radiofrequente elektromagnetische velden van niet-menselijke gewervelde dieren, ongewervelde dieren en planten. STOA, Europees Parlement 2021.

Thill, A., Cammaerts, M. C., & Balmori, A. (2023). Biologische effecten van elektromagnetische velden op insecten: een systematische review en meta-analyse. *Reviews on environmental health*.

Vanbergen AJ, Potts SG, Vian A, Malkemper EP, Young J, Tscheulin T. Risk to pollinators from anthropogenic electro-magnetic radiation (EMR): evidence and knowledge gaps. *Sci Total Environ* 695:133833; 2019.

Vijver, M. G., Bolte, J. F., Evans, T. R., Tamis, W. L., Peijnenburg, W. J., Musters, C. J. M., & de Snoo, G. R. (2014). Onderzoek naar kortdurende blootstelling aan elektromagnetische velden op het voortplantingsvermogen van ongewervelden in de veldsituatie. *Elektromagnetische biologie en geneeskunde*, 33(1), 21-28.

Wang, Y., Zhang, H., Zhang, Z., Sun, B., Tang, C., Zhang, L., Jiang, Z., Ding, B., Liao, Y., Cai, P.: Gesimuleerde mobiele communicatiefrequenties (3,5 GHz) uitgezonden door een signaalgenerator beïnvloeden de slaap van *Drosophila melanogaster*. *Environ. Pollut.* **283**, 117087 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117087>

Wang, Y., Jiang, Z., Zhang, L., Zhang, Z., Liao, Y., Cai, P.: 3,5-GHz radiofrequente elektromagnetische straling bevordert de ontwikkeling van *Drosophila melanogaster*. *Environ. Pollut.* **294**, 118646 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118646>

Yang, H., Zhang, Y., Wu, X., Gan, P., Luo, X., Zhong, S., Zuo, W.: Effects of acute exposure to 3500 MHz (5G) radiofrequency electromagnetic radiation on anxiety-like behavior and the auditory cortex in guinea pigs. *Bio-elektromagnetica* **43**, 106-118 (2022). <https://doi.org/10.1002/bem.22388>

Zadeh-Haghighi, H., & Simon, C. (2022). Magnetische veldeffecten in de biologie vanuit het perspectief van het radicaalpaarmechanisme. *Journal of the Royal Society Interface*, 19(193), 20220325.