

Leefmilieu Brussel



Verslag van het comité van deskundigen inzake niet-ioniserende straling 2025

Voorzitter: Prof. Isabelle Lagroye

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

Inhoudsopgave

1.	Evaluatie van de toepassing van de ordonnantie	4
1.1.	Algemene toepassing van de technische aspecten	4
1.2	Drive-test.....	5
1.3	Simulaties tgov. metingen	6
1.4	Inspanningen om informatie onder het publiek te verspreiden	6
2.	Stand van zaken en timing in verband met 6G	Error! Bookmark not defined.
3.	ANSES-rapport 'Radiofrequenties en kanker'.....	9
3.1.	Door de WHO in opdracht gegeven systematische reviews.....	11
3.1.1.	Cognitie en niet-specifieke symptomen	12
3.1.2	Systematische review met betrekking tot vruchtbaarheid	13
3.1.3	Systematische reviews met betrekking tot kanker	15
3.1.4	Systematische reviews met betrekking tot oxidatieve stress	16
3.2.	Conclusie	16
	Bibliografie	17
4.	De stand van zaken met betrekking tot 5G in België in 2025	20
4.1	Marktomvang in België (2024 - 2025).....	20
4.2	Operatoren en netwerktraject	21
4.3	Macro-economische kanalen en achtergrondsynthese	21
4.4	Beleid omzetten in prestaties: macro-economische kanalen en effecten op bedrijfsniveau.....	22
4.5	Veiligheidsoptmerking: drones en radionetwerken	23
4.6.	Beleids- en investeringsrichtlijnen voor 2025	24
	Referenties	24
5.	Afval van 6G.....	26
	Conclusie	29
	Referenties	29
6.	Energieverbruik van het 5G-netwerk	31
6.1	Studies over het energieverbruik van bestaande netwerken	31
6.2.	Literatuur over de evolutie van 4G- naar 5G-netwerken	34
6.3.	Bespreking.....	36
6.3.1.	Kernnetwerk en datacenters	36
6.3.2.	Gebruikersapparaten.....	37
6.3.3.	Ingebedde energie.....	37
6.3.4.	Keuzes in verband met dataverkeer en uitrol	37
6.3.5.	Rebound-effecten.....	38
6.3.6	Energiebesparende functies.....	38

6.3.7 Impact van beleid	39
6.4. Conclusies	39
Bibliografie	40
7. Opmerkingen over de effecten van radiofrequente elektromagnetische velden in verband met vijfde generatie technologie op flora en fauna	43
7.1. Over gewijzigde blootstellingsomstandigheden van dieren.....	44
7.2. Over specifieke sensorische interactiemechanismen die de gevoeligheid voor RF-EMV beïnvloeden.....	45
7.3 Over niet-zintuiglijke effecten van radiofrequente elektromagnetische velden	46
7.4. Over recente bevindingen bij insecten	48
7.5. Algemene aanbeveling.....	49
7.6. Opmerkingen en aanbevelingen over de samengevatte richtsnoeren voor de installatie van EM-antennes in Natura 2000-gebieden	51
Bibliografie	53

1. Evaluatie van de toepassing van de ordonnantie

1.1. Algemene toepassing van de technische aspecten

De Brusselse milieuadministratie leeft de ordonnantie betreffende de bescherming van het leefmilieu tegen de eventuele schadelijke effecten en hinder van niet-ioniserende stralingen na en voert alle nodige technische en administratieve maatregelen uit om de effectieve toepassing ervan te garanderen. Ons verslag benadrukt de sterke punten van deze implementatie en geeft enkele opmerkingen om verdere verbetering te ondersteunen.

Deze ordonnantie, die oorspronkelijk in 2007 werd aangenomen, werd in 2023 gewijzigd om rekening te houden met de invoering van de vijfde 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.

Het comité heeft de methode voor het meten van niet-ioniserende straling beoordeeld op basis van verschillende documenten die door de administratie werden verstrekt, waaronder het jaarverslag van de dienst 'Technologieën en straling' en de dienst 'Elektromagnetische straling en luchtverkeer' van Leefmilieu Brussel. In dit verslag blijkt uit de uitsplitsing van zenders per technologie dat de belangrijkste technologieën die momenteel worden gebruikt, 4G+, 4G, 3G en 2G zijn. De activering van 5G vordert geleidelijk en het aantal vergunningen zal naar verwachting in 2025 toenemen.

Leefmilieu Brussel is het 'Diagrams Project' gestart om de elektromagnetische simulaties te verbeteren, zodat deze alle mogelijke operationele omstandigheden beter weergeven. Onze opmerkingen zullen in het volgende jaarverslag worden opgenomen, aangezien dit project nog in ontwikkeling is binnen Leefmilieu Brussel. Het comité verwacht aanvullende informatie in het volgende jaarverslag van de administratie.

Sommige definities en terminologie in het verslag van de dienst lijken onduidelijk (zoals de definitie van 'actieve antenne' of 'actieve zender'). Na ontvangst van nadere informatie van de dienst zijn deze verduidelijkt. Het comité raadt aan om de termen in toekomstige verslagen van de dienst duidelijk te definiëren.

Het comité heeft de dienst om enkele verduidelijkingen gevraagd met betrekking tot het verzadigingseffect dat wordt waargenomen als gevolg van de invoering van 5G, vergelijkbaar met de situatie vóór de vaststelling van de nieuwe limieten (overgang van 6 V/m naar 9,19 V/m). Het antwoord van de dienst stemde het comité tevreden.

Het comité stelde ook een vraag over de kalibratie die voor de metingen wordt gebruikt. De dienst heeft informatie verstrekt over de kalibratie van de spectrumanalysator, die eenmaal per jaar wordt uitgevoerd overeenkomstig het meetbesluit (artikel 6, lid 2). Het comité acht het antwoord bevredigend en beveelt aan om volgend jaar de kalibratiecertificaten rechtstreeks samen met het jaarverslag te verstrekken.

Het comité heeft de dienst een vraag gesteld over de meetduur, aangezien zowel 6 minuten als 2 minuten per operator werden gerapporteerd. Het comité heeft meer informatie ontvangen van de dienst en acht het antwoord bevredigend. Het huidige meetbesluit bepaalt dat elke technologie gedurende ten minste 2 minuten wordt gemeten, wat de meettijd is die momenteel voor elke operator en voor elke technologie (2G, 3G, 4G en 5G) wordt toegepast. Er loopt momenteel een project om het meetbesluit aan te passen naar een duur van 6 minuten. Het comité staat volledig achter deze aanpassing.

Het comité stelde ook enkele vragen over de implementatie van de 'Power Control Functions' (PCF) die worden gebruikt om de straling van 5G-actieve antennetechnologieën ('massive MIMO') te evalueren. De dienst heeft deze vragen naar tevredenheid beantwoord. Bovendien worden er ook onaangekondigde tests uitgevoerd in de buurt van 5G-locaties. Deze tests controleren op '1) eventuele overschrijdingen van de norm, 2) overeenstemming met simulatieresultaten en 3) correcte activering van de PCF door de antenntellers van de operatoren op te vragen'. Het verslag van deze tests zal in het volgende jaarverslag met het comité worden gedeeld.

1.2 Drive-test

Het comité heeft ook het tweede rapport van de Drive-test '*Rapport Drive Test 2024 - EN.pdf*' geëvalueerd. Het comité waardeert dit rapport, dat nuttige gegevens bevat om de naleving van de ordonnantie te controleren. We merken hier een aantal aandachtspunten op die verder kunnen worden verbeterd.

Het comité had een inconsistentie opgemerkt tussen het meetbereik en de genoemde antenne. Leefmilieu Brussel heeft hierover duidelijkheid verschaft door de antenne te corrigeren en het comité gerust te stellen over een functie van het meetapparaat die dergelijke inconsistenties kan detecteren. Het comité herinnert de administratie er niettemin aan waakzaam te blijven.

Het rapport zou kunnen verduidelijken hoe het aantal realisaties verband houdt met een fysieke locatie.

De definitie van uitschieters zou kunnen worden gegeven om de interpretatie ervan in de cijfers te verbeteren.

Het comité waardeert de toevoeging van de simulaties naast de metingen, zodat beide kunnen worden vergeleken. Hoewel dit een positieve ontwikkeling is, kunnen een aantal aspecten nog worden overwogen voor verdere verbetering:

- Het exacte instrument dat voor deze simulatie is gebruikt, zou kunnen worden verduidelijkt.
- Het rapport maakt een opmerking over het 'worst-case' karakter van de simulaties, die meestal op niveaus liggen die hoger zijn dan de overeenkomstige gemeten veldsterktes. Dit vereist meer nuance en moet verder (kwantitatief) worden geconsolideerd op basis van een statistische studie. Met name de vier hoogste gemeten veldsterktes werden allemaal

onderschat door de simulaties. Bovendien wordt in het volgende punt een andere steekproef van de fysieke locatie gegeven om ervoor te zorgen dat de simulatie een 'worst-case' prestatie oplevert.

- In het rapport staat: 'De eerste stap bij de voorbewerking van de drive-testgegevens is het verplaatsen van de punten naar het midden van de weg. Deze stap compenseert de mogelijke onnauwkeurigheid van GPS-metingen, die aanzienlijk kan zijn.' Een alternatieve benadering van de voorbewerking zou zijn om een 'wolk' van punten dicht bij het midden van de weg in aanmerking te nemen en de worst-case blootstelling te nemen. Dit zou een meer 'conservatieve' benadering zijn, aangezien het veiliger is om de blootstelling te overschatten dan te onderschatten. Deze verbeterde bemonstering zou kunnen helpen om artefacten en speciale effecten als gevolg van multipadcomponenten, obstructies of andere factoren die een afwijking tussen metingen en voorspellingen kunnen veroorzaken, op te lossen en vooral gevallen te vermijden waarin de blootstelling wordt onderschat.

Tot slot waardeert het comité dat de tabel met meetonzekerheden nu wordt verstrekt tot 6 GHz, waarmee wordt gereageerd op eerdere opmerkingen van het comité.

1.3 Simulaties tgov. metingen

Het comité is van mening dat de verbeteringen in de berekeningen van de simulatiesoftware gedetailleerder kunnen worden beschreven.

1.4 Inspanningen om informatie onder het publiek te verspreiden

Het comité merkt op dat de overheid haar inspanningen voortzet om de website te actualiseren en te verbeteren, zodat informatie over niet-ioniserende straling onder een zo breed mogelijk publiek kan worden verspreid. Het comité signaleert ook enkele punten die voor verbetering vatbaar zijn.

De samenstelling van het COMEX moet worden bijgewerkt (op het moment van schrijven van dit verslag dateert de laatste update van 03/09/2025).

We herhalen de opmerking van vorig jaar over de noodzaak om het publiek te informeren over de 'broadcast'-frequentiebanden.

De meeste informatie in het verslag van de dienst met betrekking tot deze aspecten lijkt te dateren uit 2023 en werd al in een vorig verslag gepresenteerd. Het comité zou het op prijs stellen als het verslag alleen de updates en wijzigingen ten opzichte van het vorige verslag zou bevatten.

2. 6G status en timing

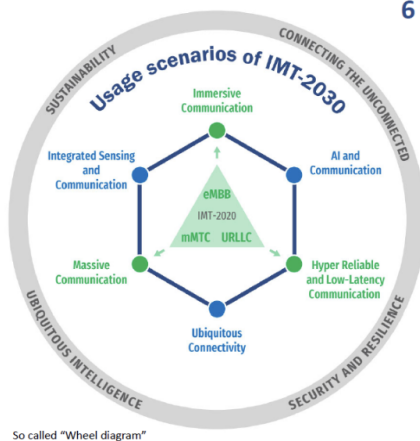
De ontwikkeling van IMT-2030, vaak aangeduid als 6G, werd formeel ingezet met de goedkeuring van ITU-R Aanbeveling M.2160, waarin het kader en de algemene doelstellingen voor 6G worden vastgelegd ¹. Dit document definieert de visie, prestatie-indicatoren en gebruiksscenario's die de volgende generatie mobiele technologie moeten vormgeven. Het kader voorziet volgende stappen in het proces naar IMT-2030:

- Vastleggen van de specificaties en vereisten (fase tot 2027).
- Ontwikkelen standaard en technische specificaties (fase tot 2030)
- Uitrol en verbetering standaard (vanaf 2030)

The ITU voorziet zes gebruiksscenario's voor 6G, weergegeven in Figuur 2.1. Drie zijn een uitbreiding van de bestaande 5G scenarios, en focusen op hoge datasnelheden voor immersieve communicatie (eMBB), communicatie met een groot aantal kleine sensoren (mMTC) en hyper betrouwbare communicatie met lage vertraging voor robot toepassingen.

Daarnaast voorziet 6G ook in drie nieuwe gebruiksscenario's en trends: het gebruik van communicatienetwerken voor localisatie en bewustzijn van de omgeving, integratie van Artificial Intelligence en tenslotte bereik op alle mogelijke plaatsen door gebruik te maken van bijvoorbeeld satellietcommunicatienetwerken.

Usage scenarios



6 Usage scenarios

Extension from IMT-2020 (5G)

- eMBB → Immersive Communication
- mMTC → Massive Communication
- URLLC → HURLLC (Hyper Reliable & Low-Latency Communication)

New

- Ubiquitous Connectivity
- AI and Communication
- Integrated Sensing and Communication

4 Overarching aspects:

act as design principles commonly applicable to all usage scenarios

Sustainability, Connecting the unconnected,
Ubiquitous intelligence, Security/resilience

Figuur 2.1: IMT-2030 voorziet zes gebruiksscenario's voor 6G. [2]

Op dit moment ligt de focus op het verfijnen van specificaties en vereisten en technische criteria voor kandidaat technologieën. Volgens het IMT-2030-kader worden aanzienlijk hogere capaciteiten nagestreefd: pieksnelheden tot 50–200 Gb/s, latenties onder 1 ms, extreem hoge

¹ ITU-R M.2160 – Framework and overall objectives of the future development of IMT-2030.

² <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-2030/pages/default.aspx> [geraadpleegd op 16 november 2025]

verbindingsdichtheid en geïntegreerde functies zoals omgevings-voelen (sensing) en AI-gebaseerd netwerkbeheer ³. Deze doelstellingen tonen de ambitie om 6G niet enkel te zien als een snellere mobiele technologie, maar als een platform dat communicatie, sensing en intelligentie samenbrengt.

6G-systemen bevinden zich nog in een vroeg ontwikkelingsstadium. Toch vraagt deze prille fase om proactief optreden van overheden en beleidsmakers om de voordelen, uitdagingen en brede implicaties van 6G te begrijpen. In deze snel veranderende omgeving is het zinvol om zich te richten op het anticiperen op toekomstige ontwikkelingen, zodat zij de voordelen van 6G maximaal kunnen benutten en de risico's tot een minimum kunnen beperken.

Op mondiaal niveau kan het bereiken van consensus tussen landen over frequentietoewijzingen een uitdaging zijn. Dit benadrukt het belang van de lopende discussies in verband met agendapunt 1.7 van WRC-27 (ITU-R 2024b) ⁴.

³ Report ITU-R M.2516 (ITU-R 2022).

⁴ WRC-27 agenda item 1.7: *“to consider studies on sharing and compatibility and develop technical conditions for the use of International Mobile Telecommunications (IMT) in the frequency bands 4 400-4 800 MHz, 7 125-8 400 MHz (or parts thereof), and 14.8-15.35 GHz taking into account existing primary services operating in these, and adjacent, frequency bands, in accordance with Resolution 256 (WRC-23)”*.

3. ANSES-rapport 'Radiofrequenties en kanker'

Op 30 september 2024 heeft ANSES, het Franse nationale agentschap voor voedsel-, milieu- en arbeidsveiligheid, zijn rapport 'Radiofrequenties en kanker' ter openbare raadpleging voorgelegd. Dit 364 pagina's tellende rapport is een antwoord op verwijzing nr. 2016-SA-0176 'Radiofrequenties en kanker' en is het resultaat van een systematisch onderzoek van artikelen die tussen januari 2013 en september 2021 werden gepubliceerd en aanvullend onderzoek van epidemiologische gegevens die tot 2024 werden gepubliceerd. Hierdoor konden artikelen uit de studies MobiKids (Castano-Vinyals et al., 2022), UK Biobanks (Zhang et al., 2023) en COSMOS (Feychting et al., 2024) worden opgenomen. De belangrijkste geraadpleegde databases zijn Pubmed, Scopus en EMF-Portal. Van de 4.877 geïdentificeerde artikelen werden 232 studies van goede kwaliteit of met kleine methodologische beperkingen geëvalueerd.

De analyse van de carcinogene effecten van radiofrequenties wordt uitvoerig uitgevoerd op basis van de bewijsniveaus voor elk orgaan, rekening houdend met epidemiologische en experimentele studies, waarbij de laatste dierstudies en celstudies of studies naar mechanismen samenbrengen.

Het bewijsniveau is afgeleid van de algemene analyse van de bewijslijnen (voldoende, beperkt, onduidelijk, geen gegevens of gebrek aan kwaliteitsgegevens) voor epidemiologische en experimentele benaderingen en voor elk orgaan of fysiologisch systeem. De analyse kan dus concluderen dat:

- er een bewezen carcinogeen effect is van radiofrequenties bij mensen;
- er een waarschijnlijk carcinogeen effect is van radiofrequenties bij mensen;
- er een mogelijk carcinogeen effect is van radiofrequenties bij mensen.
- Het niet mogelijk is om te concluderen dat er een carcinogeen effect is of dat er geen carcinogeen effect is van radiofrequenties bij mensen.

De kankers die in dit ANSES-rapport worden behandeld, zijn kankers van het hoofd (inclusief cerebrovasculaire kankers) en de nek, bloed en plasma, het immuunsysteem, het endocriene systeem, het cardiovasculaire systeem, het pulmonale systeem, het spijsverteringsstelsel, de lever, de borst/borstklieren, de nieren, het urinestelsel en de blaas, het voortplantingssysteem (bij beide geslachten), de huid, de botten, de spieren en de zenuwen (met uitzondering van het centrale zenuwstelsel). Ook kankers tijdens de ontwikkeling werden geanalyseerd.

Over het geheel genomen⁵ concludeert de deskundigengroep dat 'ongeacht de tumorlocatie of de in dit rapport geanalyseerde biologische systemen, de beschikbare gegevens **de conclusie dat er al dan niet carcinogene effecten bestaan, niet ondersteunen. Dit antwoord geldt ook voor de algemene vraag of er een carcinogeen effect bij de mens bestaat.**'

⁵ In het rapport wordt gewezen op het tegenstrijdige advies van een van de 13 leden van de deskundigengroep.

Met betrekking tot hersentumoren was de deskundigengroep van mening dat de geanalyseerde gegevens **de conclusie niet ondersteunt dat er al dan niet een carcinogeen effect van radiofrequenties bestaat**

- in de menselijke hersenen voor alle hersentumoren.
- in de hersenen van dieren.
- op de inductie van een reeks mechanismen die betrokken zijn bij de carcinogenese van hersentumoren in menselijke modellen.

Concluderend stellen de auteurs van het rapport: '**Op basis van de beschikbare gegevens kunnen we niet concluderen dat radiofrequenties al dan niet een effect hebben op het ontstaan van hersentumoren**'.

Hieronder volgen de belangrijkste elementen die hebben geleid tot de conclusies van de ANSES-deskundigengroep.

- Gezien de epidemiologische Interphone-studie, die een significante toename van het risico op glioom bij volwassenen die meer dan 1.640 uur bellen suggereerde, stelt de groep van deskundigen dat deze resultaten 'onverenigbaar zijn met het uitblijven van enige verandering in de temporele trends van de incidentie van glioom in Denemarken, Finland, Noorwegen, Zweden en de Verenigde Staten'. Er wordt ook op gewezen dat de auteurs van het rapport aangeven dat een odds ratio van 2,7, zoals beschreven door de groep Zweedse epidemiologen Hardell in talrijke artikelen, '**voor 100% kan worden uitgesloten**'.

Sinds de IARC-classificatie in 2011, waarbij RF werd ingedeeld in groep 2B (mogelijk kankerverwekkend), zijn er 21 epidemiologische studies over hersentumoren gepubliceerd.

Cohortstudies tonen geen verhoogd risico op hersentumoren aan. Gezien de zeer trage ontwikkeling van tumoren zoals gliomen, kan de follow-upduur in deze cohortstudies, tot 7 jaar, echter als relatief kort worden beschouwd. De onderzochte case-controlstudies waren gericht op gliomen, meningeomen en akoestische neuromen (of schwannomen). De hierboven genoemde groep van Hardell heeft vier artikelen gepubliceerd waarin steeds wordt geconcludeerd dat er een significante toename is van het risico op hersentumoren. Tot slot wijst een onderzoek naar beroepsmatige blootstelling aan radiofrequenties niet op een toename van het risico op glioom en meningioom.

Meta-analyses hebben over het algemeen een niet-significant relatief 'meta'-risico aangetoond.

Er zijn maar weinig studies over kinderen en adolescenten die aan RF worden blootgesteld. Het gaat onder meer om een studie over blootstelling aan RF van antennes van mobiele telefoons (Hauri et al., 2014) en de Mobikids-case-controlstudie (Castaño-Vinyals et al., 2022) over blootstelling aan RF van mobiele telefoons. Deze twee studies hebben geen verband aangetoond tussen blootstelling aan radiofrequenties op afstand of van dichtbij en met name hersentumoren.

- Wat betreft carcinogeneseonderzoek naar de hersenen bij knaagdieren zijn met name twee recente studies geanalyseerd.

De studie van Falcioni et al (2018) bij mannelijke en vrouwelijke ratten (200/groep) concludeerde, ondanks het gebrek aan statistisch significante gegevens, dat blootstelling van het hele lichaam aan radiofrequentie-expositie bij 1800 MHz (SAR van 0,1 W/kg) een effect had op glioom bij blootgestelde vrouwtjes.

De zogenaamde 'NTP'⁶-studie betrof 90 dieren/groep ratten en muizen, mannetjes en vrouwtjes die met hun hele lichaam werden blootgesteld aan GSM- of CDMA-radiofrequentiesignalen (SAR van 1,5; 3 en 6 W/kg bij ratten en SAR van 2,5; 5 en 10 W/kg bij muizen).

De werkgroep is van mening dat, hoewel deze gegevens niet zijn gepubliceerd en niet zijn beoordeeld in een peer-reviewed tijdschrift, de externe audit die door het NTP werd opgezet, gelijkwaardig is aan deze peer review. De deskundigengroep is van mening dat 'er geen significante inductie van tumoren in de hersenen werd waargenomen bij GSM en CDMA' bij vrouwelijke ratten, evenals bij mannelijke en vrouwelijke muizen. Bij mannelijke ratten concludeerde het NTP dat er 'enig bewijs' was voor de inductie van glioom.

- Tot slot hebben de talrijke studies naar de effecten van radiofrequenties op genotoxiciteit, celdood, proliferatie, apoptose, autofagie, reactie op DNA-schade, oxidatieve stress, ontsteking of immunosuppressie, niet kunnen aantonen dat een van deze belangrijke mechanismen betrokken is bij carcinogenese in vivo en in vitro.

3.1. Door de WHO in opdracht gegeven systematische reviews

Hieronder volgt een samenvatting van systematische reviews in opdracht van de Wereldgezondheidsorganisatie (WHO) die tussen eind 2024 en medio 2025 gepubliceerd werden. Deze reviews richten zich op de biologische effecten van radiofrequente (RF) elektromagnetische velden. Dit werk maakt deel uit van het lopende programma van de WHO om de mogelijke gevolgen van blootstelling aan RF voor de menselijke gezondheid te beoordelen.

Deze publicaties bieden nieuwe inzichten in een mogelijk verband tussen blootstelling aan radiofrequentie en verschillende gezondheidseffecten. Elk van deze reviews is gebaseerd op een strikte en transparante methodologie, waarbij bijzondere aandacht is besteed aan het identificeren en beheersen van vertekeningen die de resultaten kunnen beïnvloeden, om de betrouwbaarheid van de conclusies te waarborgen.

De gepubliceerde analyses richten zich meer specifiek op de volgende thema's:

- Cognitie bij mannen en niet-specifieke symptomen
- Mannelijke vruchtbaarheid (menselijk en experimenteel),
- Vrouwelijke vruchtbaarheid (menselijk en experimenteel),
- Kankerrisico, bij de algemene bevolking en bij blootgestelde werknemers, en

⁶ NTP: Amerikaans 'National Toxicological Program'

- Oxidatieve stress, zowel in vivo als in vitro bestudeerd.

3.1.1. Cognitie en niet-specifieke symptomen

Effecten van RF-golven op de cognitieve prestaties van mensen

Pophof B, Kuhne J, Schmid G, Weiser E, Dorn H, Henschenmacher B, Burns J, Danker-Hopfe H, Sauter C. The effect of exposure to radiofrequency electromagnetic fields on cognitive performance in human experimental studies: Systematic review and meta-analyses. Approx. Int. 2024 Sep;191:108899. DOI: 10.1016/J.Envint.2024.108899. Epub 2024 Jul 22. PMID: 39265322.

Deze systematische review en meta-analyse onderzocht of kortdurende blootstelling aan RF de cognitieve prestaties van mensen (geheugen, aandacht, reactiesnelheid, redeneringsvermogen, enz.) zou kunnen beïnvloeden. Uit meer dan 76 studies met ongeveer 3.800 deelnemers blijkt dat de golven geen significant effect hebben op de snelheid of nauwkeurigheid van cognitieve taken. Tests van aandacht, geheugen en redeneringsvermogen lieten geen verschil zien tussen de blootgestelde en niet-blootgestelde groepen. Enkele geïsoleerde studies suggereren een lichte afname van de motriciteit (snelheid), maar deze resultaten zijn te onzeker om als significant te worden beschouwd. Samenvattend: blootstelling aan golven, zelfs dicht bij het hoofd, lijkt de menselijke cognitie niet te schaden. Niettemin is verder onderzoek nodig, met name bij ouderen en om mogelijke verschillen tussen mannen en vrouwen te onderzoeken.

Effecten van RF-golven op niet-specifieke symptomen

Bosch-Capblanch X, Esu E, Oringanje CM, Dongus S, Jalilian H, Eyers J, Auer C, Meremikwu M, Rösli M. The effects of radiofrequency electromagnetic fields exposure on human self-reported symptoms: A systematic review of human experimental studies. Approx. Int. 2024 May;187:108612. DOI: 10.1016/J.Envint.2024.108612. Epub 2024 Apr 2. Erratum in: Environ Int. 2024 Aug;190:108892. DOI: 10.1016/J.Envint.2024.108892. PMID: 38640611.

Deze systematische review richt zich op studies die zijn uitgevoerd naar niet-specifieke symptomen bij de algemene bevolking of bij personen die melden dat zij lijden aan idiopathische milieu-intolerantie die wordt toegeschreven aan elektromagnetische velden (IEI-EMV of EHS). Informatiebronnen zijn onder meer Medline, Web of Science, PsycInfo, Cochrane Library, Epistemonikos, Embase en het EMF-Portal, tot april 2022. Het doel is om de effecten van blootstelling aan RF op zelfgerapporteerde niet-specifieke symptomen, met name hoofdpijn en slaapstoornissen, systematisch te beoordelen en de nauwkeurigheid van percepties met betrekking tot de aanwezigheid of afwezigheid van blootstelling aan RF te verifiëren. Er werden 41 studies opgenomen, waaronder 13 studies met IEI-EMV-proefpersonen, waarbij 2.874 deelnemers betrokken waren. Het merendeel daarvan werd dus uitgevoerd met jonge, gezonde vrijwilligers. De resultaten suggereren dat de deelnemers hun blootstelling aan RF niet beter konden waarnemen dan door toeval en dat IEI-EMV-personen in dit opzicht niet beter presteerden dan de algemene bevolking. Bovendien werd er geen bewijs gevonden voor bijzonder kwetsbare personen in de IEI-EMV-groep.

Samenvattend wijst het beschikbare bewijs erop dat acute blootstelling aan RF, lokaal of van het hele lichaam, bij niveaus onder de wettelijke limieten, geen symptomen veroorzaakt bij de algemene

bevolking en bij zelfgerapporteerde IEI-EMV-personen. Symptomen in het dagelijks leven lijken eerder verband te houden met de waarneming van RF-blootstelling dan met RF-blootstelling zelf.

3.1.2 Systematische review met betrekking tot vruchtbaarheid

Effecten van RF-golven op de reproductieve gezondheid van vrouwen

Johnson EE, Kenny RPW, Adesanya AM, Richmond C, Beyer F, Calderon C, Rankin J, Pearce MS, Toledano M, Craig D, Pearson F. The effects of radiofrequency exposure on adverse female reproductive outcomes: A systematic review of human observational studies with dose-response meta-analysis. Approx. Int. 2024 Aug; 190:108816. doi: 10.1016/j.envint.2024.108816. Epub 2024 Jun 12. PMID: 38880062.

Dit deel gaat over de invloed van radiofrequente elektromagnetische velden, zoals die van mobiele telefoons of medische apparaten, op de reproductieve gezondheid van vrouwen. De geanalyseerde studies onderzochten verschillende mogelijke risico's: miskramen, geboortefwijkingen, vroeggeboorten, doodgeboren kinderen of een laag geboortegewicht. Over het algemeen zijn de resultaten erg onzeker. De meeste studies tonen geen sterk verband aan tussen blootstelling aan golven en negatieve effecten op de zwangerschap of de ontwikkeling van de foetus. De betrouwbaarheid van deze studies is echter beperkt: versturende factoren (levensstijl, arbeidsomstandigheden, voeding) worden vaak slecht gecontroleerd, de blootstellingsmetingen lopen sterk uiteen en de kwaliteit van het bewijs is laag vanwege de kleine steekproefomvang of heterogene methoden. De onderzoekers bevelen daarom aan om nauwkeuriger studies uit te voeren, met gestandaardiseerde meetinstrumenten en rekening houdend met de blootstelling van beide ouders. Samenvattend: tot op heden is er geen sterk bewijs dat RF een significante invloed heeft op de vrouwelijke voortplanting, maar er zijn nog onvoldoende gegevens om definitieve conclusies te trekken.

Effecten van RF-golven op de vruchtbaarheid van mannen

Pw Kenny R, Evelynne Johnson E, Adesanya AM, Richmond C, Beyer F, Calderon C, Rankin J, Pearce MS, Toledano M, Craig D, Pearson F. The effects of radiofrequency exposure on male fertility: A systematic review of human observational studies with dose-response meta-analysis. Approx. Int. 2024. Aug;190:108817. DOI: 10.1016/J.Envint.2024.108817. Epub 2024 Jun 11. PMID: 38880061.

In deze systematische review werd onderzocht of RF de vruchtbaarheid van mannen kan beïnvloeden, met name aan de hand van indicatoren zoals beweeglijkheid, morfologie, concentratie of totaal aantal zaadcellen. De geanalyseerde studies hadden betrekking op mannen in de leeftijd van 20 tot 39 jaar, die werden blootgesteld in een beroepsmatige omgeving (radars, militair materieel) of in het dagelijks leven (mobiele telefoons). De resultaten wijzen op mogelijke verbanden, maar zonder duidelijk bewijs. Meta-analyses toonden geen consistent effect of significante dosis-responsrelatie aan. Er zijn veel beperkingen: vertekeningen in de meting van de blootstelling, onvoldoende aandacht voor versturende factoren (leeftijd, tabak, alcohol, BMI) en de algehele lage kwaliteit van het bewijs. Conclusie: de beschikbare gegevens bevestigen geen duidelijke verandering in de vruchtbaarheid van mannen als gevolg van golven, maar voorzichtigheid blijft geboden totdat er meer rigoureuze studies zijn uitgevoerd.

Effecten van RF-golven op de vruchtbaarheid van mannen

Cordelli E, Ardoino L, Benassi B, Consales C, Eleuteri P, Marino C, Sciortino M, Villani P, H, Brinkworth M, Chen G, McNamee P, Wood AW, Belackova L, Verbeek J, Pacchierotti F. Effects of radiofrequency electromagnetic field (RF-EMV) exposure on male fertility: A systematic review of experimental studies on non-human mammals and human sperm in vitro. Approx. Int. 2024 Mar;185:108509. DOI: 10.1016/J.Envint.2024.108509. Epub 2024 Feb 19. Erratum in: Environ Int. 2025 May;199:109449. DOI: 10.1016/J.Envint.2025.109449. PMID: 38492496.

Deze systematische review omvatte 117 dierstudies en 10 in vitro studies met menselijk sperma. De auteurs analyseerden de vele parameters die verband houden met de vruchtbaarheid van mannen in vivo en in vitro, met behulp van meta-analyses. De geëvalueerde parameters zijn de afname van de vruchtbaarheid (mannelijke onvruchtbaarheid, enz.), de kwaliteit van het sperma (aantal zaadcellen en vitaliteit/motiliteit, enz.), de toxiciteit voor de voortplantingsorganen (testiculair gewicht en histologie, enz.) en hormonale effecten (testosteronniveaus).

Samenvattend concluderen de onderzoekers dat blootstelling aan RF een nadelig effect kan hebben op het zwangerschapspercentage en het aantal zaadcellen bij ratten en muizen. De SAR-waarden variëren sterk, tussen 0,001 en 43,6 W/kg, wat een gemiddelde SAR voor het hele lichaam oplevert tussen 12 en 23 W/kg. De daling van het zwangerschapspercentage is dus voornamelijk het gevolg van één enkele studie die is uitgevoerd bij de hoogste geteste SAR, die 50.000 keer hoger is dan de limiet voor blootstelling van het publiek aan RF (limiet voor het hele lichaam).

Effecten van RF-golven op de dracht en bevalling bij vrouwtjes

Cordelli E, Ardoino L, Benassi B, Consales C, Eleuteri P, Marino C, Sciortino M, Villani P, Brinkworth MH, Chen G, McNamee JP, Wood AW, Belackova L, Verbeek J, Pacchierotti F. Effects of Radiofrequency Electromagnetic Field (RF-EMV) exposure on pregnancy and birth outcomes: A systematic review of experimental studies on non-human mammals. approx. int. 2023 Oct;180:108178. DOI: 10.1016/J.Envint.2023.108178. Epub 2023 Aug 30. Erratum in: Environ Int. 2025 Feb;196:109273. DOI: 10.1016/J.Envint.2025.109273. PMID: 37729852.

Deze systematische review richt zich op experimentele studies waarin de effecten van RF op de vruchtbaarheid van vrouwtjes en hun nesten worden onderzocht. Er werden 88 studies geselecteerd uit de databases Pubmed, Scopus en EMF-Portal. De onderzochte parameters hebben betrekking op de vermindering van de vruchtbaarheid (verliezen vóór de implantatie, foetale sterfte, grootte van het nest), op de schadelijke effecten bij de jongen bij de geboorte (gewicht en grootte van de foetussen, foetale misvormingen en geslachtsverhouding), en op de late effecten wanneer de *in utero* blootgestelde knaagdieren volwassen zijn (gedrag, vruchtbaarheid, hersen- en kankerpathologieën).

Meta-analyses geven aan dat blootstelling aan RF geen invloed heeft op de vruchtbaarheid van knaagdieren of hun nakomelingen (grootte van het nest), maar wel van invloed kan zijn op de gezondheid van pasgeborenen in termen van foetaal gewicht en, op langere termijn, hun gedrag.

Samenvattend lijkt blootstelling aan RF *in utero* geen nadelig effect te hebben op de vruchtbaarheid van vrouwen, maar kan het wel gevolgen hebben voor de gezondheid van de nakomelingen. De

onderzoekers wijzen er echter op dat de methodologische beperkingen die in deze experimentele studies zijn vastgesteld, deze conclusies zeer onzeker maken.

3.1.3 Systematische reviews met betrekking tot kanker

Blootstelling aan RF-golven en het risico op kanker bij mensen

Karipidis K, Baaken D, Loney T, Blettner M, Mate R, Brzozek C, Elwood M, Narh C, Orsini N, Rösli M, Paulo MS, Lagorio S. The effect of exposure to radiofrequency fields on cancer risk in the general and working population: A systematic review of human observational studies - Part II: Less researched outcomes. Approx. 2025 Feb;196:109274. DOI: 10.1016/J.Envint.2025.109274. Epub 2025 Jan 11. PMID: 39904670.

In deze systematische review werd het risico op kanker, met name hersentumoren (glioom, meningeoom, akoestisch neuroom), in verband met het gebruik van mobiele telefoons beoordeeld. De resultaten van recente grootschalige studies, zoals COSMOS, UK Biobank en MOBI-Kids, wijzen niet op een significante toename van het risico op kanker, zelfs niet na meerdere jaren gebruik. De auteurs hebben het risico op vertekening (selectie, herinnering, ontbrekende gegevens) zorgvuldig beoordeeld en de GRADE-criteria⁷ gevolgd om de robuustheid van het bewijs te beoordelen. Desondanks blijft de algehele kwaliteit laag tot matig, voornamelijk vanwege de beperkingen van observationele studies. Conclusie: de huidige gegevens tonen geen duidelijk verband aan tussen het gebruik van mobiele telefoons en het ontstaan van hersentumoren. De onderzoekers bevelen echter aan om de monitoring voort te zetten, vooral met de komst van 5G en nieuwe vormen van blootstelling.

Effecten van RF-golven op kanker bij dieren

Mevissen M, Ducray A, Ward JM, Kopp-Schneider A, McNamee JP, Wood AW, Rivero TM, Straif K. Effects of radiofrequency electromagnetic field exposure on cancer in laboratory animal studies, a systematic review. Approx. Int. 2025 May;199:109482.

Op basis van 52 studies die tot 2022 zijn gepubliceerd, concludeert deze systematische review dat er 'bewijs is dat blootstelling aan RF de incidentie van kanker bij proefdieren verhoogt' voor cardiale schwannomen en gliomen.

Ook hier lijkt de conclusie van deze systematische review gebaseerd te zijn op één enkele studie, de NTP-studie, waarin deze effecten alleen bij mannelijke ratten werden waargenomen die werden blootgesteld aan 6 W/kg voor het hele lichaam. In deze studie had de groep ratten die aan schijn-RF was blootgesteld, een vroege mortaliteit ondervonden in vergelijking met de blootgestelde groepen. Hier hebben de onderzoekers de resultaten van de NTP-studie opnieuw geanalyseerd met behulp van een groep andere controlegroepen (historische controles), wat een aanzienlijke vertekening oplevert. Het is dan ook begrijpelijk dat deze conclusie in tegenspraak is met de conclusies van het hierboven gepresenteerde ANSES-rapport.

⁷ GRADE = 'Grading of Recommendations, Assessment, Development and Evaluations' <https://www.gradeworkinggroup.org>

3.1.4 Systematische reviews met betrekking tot oxidatieve stress

Meyer F, Bitsch A, Forman HJ, Fragoulis A, Ghezzi P, Henschenmacher B, Kellner R, Kuhne J, Ludwig T, Sachno D, Schmid G, Tsaïoun K, Verbeek J, Wright R. The effects of radiofrequency electromagnetic field exposure on biomarkers of oxidative stress in vivo and in vitro: A systematic review of experimental studies. Approx. Int. 2024 Dec;194:108940. DOI: 10.1016/J.Envint.2024.108940. Epub 2024 Aug 14. PMID: 39566441.

In deze review werd gekeken naar oxidatieve stress, een biologisch fenomeen dat bij veel ziekten een rol speelt, om te bepalen of blootstelling aan golven dit zou kunnen veroorzaken. De onderzoekers verzamelden 56 experimentele studies, waarvan het merendeel op dieren (ratten, muizen, konijnen) en enkele op menselijke cellen. De resultaten zijn heterogeen en tegenstrijdig: in sommige weefsels (testikels, thymus) werd een toename van markers van oxidatieve stress waargenomen, terwijl in andere (hersenen, lever, bloed) de effecten inconsistent of niet aanwezig waren. Deze variaties kunnen worden verklaard door veelvuldige methodologische fouten, niet-gestandaardiseerde protocollen en een slechte karakterisering van de blootstellingen. Het bewijs voor een verband tussen golven en oxidatieve stress is zwak en onzeker. De onderzoekers pleiten voor beter gecontroleerde studies, met betrouwbare biomarkers en rigoureuze protocollen.

3.2. Conclusie

Alle gepresenteerde systematische reviews bieden een overzicht van de huidige kennis over de effecten van elektromagnetische - radiofrequente velden, met name die van mobiele telefoons, antennes en bepaalde medische apparaten, op de menselijke gezondheid.

Ondanks de diversiteit van de behandelde onderwerpen (voortplanting, vruchtbaarheid, oxidatieve stress, kanker, cognitie) komt een gemeenschappelijke observatie naar voren: het beschikbare bewijs is zwak, inconsistent of onvoldoende om een causaal verband te leggen tussen blootstelling aan RF en bewezen schadelijke gezondheidseffecten.

Wat de cognitieve prestaties betreft, lijkt kortstondige blootstelling aan RF-golven het geheugen, de aandacht of de reactiesnelheid van individuen niet te veranderen, noch hoofdpijn of slaapstoornissen te verergeren. Onder laboratoriumomstandigheden veroorzaakt het ook geen niet-specifieke symptomen bij de algemene bevolking en bij mensen die zelf aangeven gevoelig te zijn voor IEL-EMV.

Wat voortplanting betreft, hebben studies geen duidelijk effect aangetoond bij vrouwen (miskramen, misvormingen, geboortegewicht) of bij mannen (kwaliteit van het sperma). Experimenteel zijn bij dieren enkele effecten vastgesteld (mannelijke vruchtbaarheid en foetaal gewicht) die niet bij mensen worden aangetroffen. Experimentele blootstellingen worden soms uitgevoerd bij hoge SAR-waarden, wat een zekere opwarming van de weefsels veroorzaakt. De resultaten blijven onzeker vanwege te variabele methoden en slecht gekwantificeerde blootstellingen.

Wat het risico op kanker betreft, bevestigen recente grote epidemiologische studies geen verband tussen het gebruik van mobiele telefoons en hersentumoren. Langdurig toezicht moet echter voortgezet worden, met name met betrekking tot het COSMOS-cohort.

Wat oxidatieve stress tot slot betreft, hebben sommige laboratoriumexperimenten tekenen van biologische verstoring aangetoond, maar zonder consistentie tussen de studies of sterk bewijs van blijvende schade.

Over het algemeen zijn er tot op heden geen grote gezondheidsrisico's aangetoond, maar er blijven onzekerheden bestaan, met name vanwege de lage methodologische kwaliteit van veel studies en de snelle evolutie van communicatietechnologieën.

De onderzoekers roepen daarom op tot verder onderzoek met strengere protocollen, nauwkeurige blootstellingsmetingen en aandacht voor nieuwe vormen van blootstelling (5G, verbonden objecten, nabijheidsantennes). Samen met hen herinneren we eraan dat er aanwijzingen zijn voor kwalitatief hoogstaand onderzoek op het gebied van bio-elektromagnetisme (Repacholi 1998, Kuster en Schonborn 2000, Simko et al. 2016, Vijayalaxmi 2016). Deze aanpak zal op lange termijn een beter inzicht verschaffen in de vraag of RF-EMV's een reëel risico vormen voor de menselijke gezondheid, of dat de tot nu toe waargenomen effecten voornamelijk te wijten zijn aan wetenschappelijke variabiliteit en de beperkingen van de huidige studies.

Bibliografie

Bosch-Capblanch X, Esu E, Oringanje CM, Dongus S, Jalilian H, Eyers J, Auer C, Meremikwu M, Rössli M. The effects of radiofrequency electromagnetic fields exposure on human self-reported symptoms: A systematic review of human experimental studies. *Approx. Int.* 2024 May;187:108612. DOI: 10.1016/J.Envint.2024.108612. Epub 2024 Apr 2. Erratum in: *Environ Int.* 2024 Aug;190:108892. DOI: 10.1016/J.Envint.2024.108892. PMID: 38640611.

Cordelli E, Ardoino L, Benassi B, Consales C, Eleuteri P, Marino C, Sciortino M, Villani P, H, Brinkworth M, Chen G, McNamee P, Wood AW, Belackova L, Verbeek J, Pacchierotti F. Effects of radiofrequency electromagnetic field (RF-EMF) exposure on male fertility: A systematic review of experimental studies on non-human mammals and human sperm in vitro. *Approx. Int.* 2024 Mar;185:108509. DOI: 10.1016/J.Envint.2024.108509. Epub 2024 Feb 19. Erratum in: *Environ Int.* 2025 May;199:109449. DOI: 10.1016/J.Envint.2025.109449. PMID: 38492496.

Cordelli E, Ardoino L, Benassi B, Consales C, Eleuteri P, Marino C, Sciortino M, Villani P, Brinkworth MH, Chen G, McNamee JP, Wood AW, Belackova L, Verbeek J, Pacchierotti F. Effects of Radiofrequency Electromagnetic Field (RF-EMF) exposure on pregnancy and birth outcomes: A systematic review of experimental studies on non-human mammals. *approx. int.* 2023 Oct;180:108178. DOI: 10.1016/J.Envint.2023.108178. Epub 2023 Aug 30. Erratum in: *Environ Int.* 2025 Feb;196:109273. DOI: 10.1016/J.Envint.2025.109273. PMID: 37729852.

Johnson EE, Kenny RPW, Adesanya AM, Richmond C, Beyer F, Calderon C, Rankin J, Pearce MS, Toledano M, Craig D, Pearson F. The effects of radiofrequency exposure on adverse female reproductive outcomes: A systematic review of human observational studies with dose-response meta-analysis. *Approx. Int.* 2024 Aug;190:108816. DOI: 10.1016/J.Envint.2024.108816. Epub 2024 Jun 12. PMID: 38880062.

Karipidis K, Baaken D, Loney T, Blettner M, Mate R, Brzozek C, Elwood M, Narh C, Orsini N, Rösli M, Paulo MS, Lagorio S. The effect of exposure to radiofrequency fields on cancer risk in the general and working population: A systematic review of human observational studies - Part II: Less researched outcomes. *Approx. 2025 Feb*;196:109274. DOI: 10.1016/J.Envint.2025.109274. Epub 2025 Jan 11. PMID: 39904670.

Kuster N, Schönborn F. Recommended minimal requirements and development guidelines for exposure setups of bio-experiments addressing the health risk concern of wireless communications. *Bioelectromagnetics. 2000 Oct*; 21(7):508-14. doi: 10.1002/1521-186x(200010)21:7<508::aid-bem4>3.0.co; 2-f. PMID: 11015115.

Mevisen M, Ducray A, Ward JM, Kopp-Schneider A, McNamee JP, Wood AW, Rivero TM, Straif K. Effects of radiofrequency electromagnetic field exposure on cancer in laboratory animal studies, a systematic review. *Approx. Int. 2025 May*;199:109482. DOI: 10.1016/J.Envint.2025.109482. Epub 2025 Apr 25. PMID: 40339346.

Meyer F, Bitsch A, Forman HJ, Fragoulis A, Ghezzi P, Henschenmacher B, Kellner R, Kuhne J, Ludwig T, Sachno D, Schmid G, Tsaoun K, Verbeek J, Wright R. The effects of radiofrequency electromagnetic field exposure on biomarkers of oxidative stress in vivo and in vitro: A systematic review of experimental studies. *Approx. Int. 2024 Dec*;194:108940. DOI: 10.1016/J.Envint.2024.108940. Epub 2024 Aug 14. PMID: 39566441.

Pophof B, Kuhne J, Schmid G, Weiser E, Dorn H, Henschenmacher B, Burns J, Danker-Hopfe H, Sauter C. The effect of exposure to radiofrequency electromagnetic fields on cognitive performance in human experimental studies: Systematic review and meta-analyses. *Approx. Int. 2024 Sep*;191:108899. DOI: 10.1016/J.Envint.2024.108899. Epub 2024 Jul 22. PMID: 39265322.

Repacholi MH. Low-level exposure to radiofrequency electromagnetic fields: health effects and research needs. *Bioelectromagnetics. 1998*; 19(1):1-19. PMID: 9453702.

Pw Kenny R, Evelynne Johnson E, Adesanya AM, Richmond C, Beyer F, Calderon C, Rankin J, Pearce MS, Toledano M, Craig D, Pearson F. The effects of radiofrequency exposure on male fertility: A systematic review of human observational studies with dose-response meta-analysis. *Approx. Int. 2024. Aug*;190:108817. DOI: 10.1016/J.Envint.2024.108817. Epub 2024 Jun 11. PMID: 38880061.

Simkó M, Remondini D, Zeni O, Scarfi MR. Quality Matters: Systematic Analysis of Endpoints Related to "Cellular Life" in Vitro Data of Radiofrequency Electromagnetic Field Exposure. *Int J Environ Res Public Health. 2016 Jul 12*; 13(7):701. DOI: 10.3390/iTherph13070701. PMID: 27420084; PMCID: PMC4962242.

Vijayalaxmi. Biological and health effects of radiofrequency fields: Good study design and quality publications. *Mutat Res Genet Toxicol Environ Mutagen. 2016 Nov 1*;810:6-12. DOI: 10.1016/J.Mrgentox.2016.09.007. Epub 2016 Sep 9. PMID: 27776692.

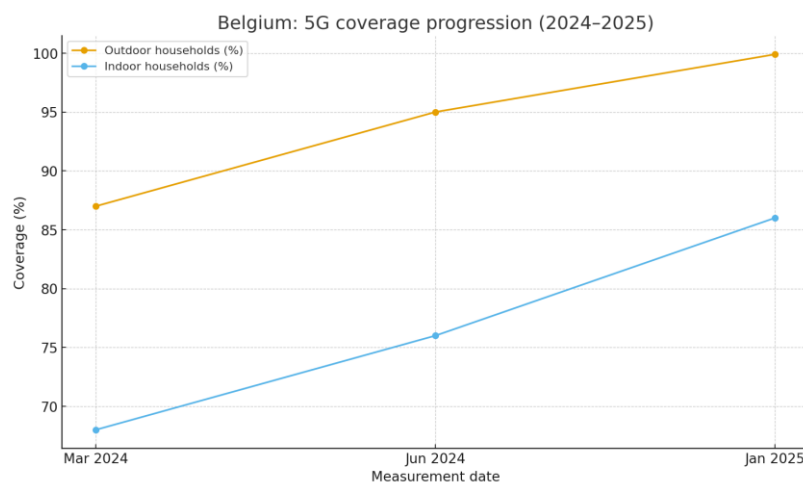
4. De stand van zaken met betrekking tot 5G in België in 2025

De uitrol van 5G in België versnelde in 2024 en begin 2025. De dekking voor huishoudens buitenshuis heeft in feite de nationale verzadigingsgraad bereikt, terwijl de beschikbaarheid binnenshuis is verbeterd doordat operatoren hun netwerken verdichten en spectrum herverdelen. De macro-economische interpretatie blijft in overeenstemming met de conclusies van vorig jaar: 5G is een faciliterend platform waarvan de waarde tot uiting komt door kapitaalverdieping in telecommunicatie en aanvullende activa, door productiviteitsverbeteringen als gevolg van de digitale adoptie in bedrijven, en door veerkrachtigere en responsievere openbare diensten. Deze editie behoudt de analytische focus van het vorige rapport, integreert de meest recente Belgische gegevens over dekking en strategieën van operatoren, en introduceert een veiligheidsnota over drone-incidenten boven kritieke infrastructuur en hun interactie met radionetwerken.

4.1 Marktomvang in België (2024 - 2025)

Regelgevende metingen die in 2024 werden gepubliceerd, wijzen op een duidelijke verandering in de beschikbaarheid. In maart 2024 registreerde het Belgisch Instituut voor Postdiensten en Telecommunicatie (BIPT) dat ongeveer 87 % van de huishoudens buiten toegang had tot 5G en ongeveer 68 % binnen. Een daaropvolgende campagne in juni 2024 bracht deze cijfers op ongeveer 95 % buiten en 76 % binnen. Uit berichten in de vakpers in januari 2025 blijkt dat de dekking buitenshuis nu vrijwel universeel is, terwijl de dekking binnenshuis stijgt naar ongeveer 85 %. Het beeld dat naar voren komt, is dat van een volwassen wordende beschikbaarheid in een groot gebied, gevolgd door een tweede golf die zich richt op de kwaliteit binnenshuis, met name in dichtbevolkte stedelijke omgevingen en in openbare gebouwen.

De strategieën van de operatoren blijven grotendeels in lijn met deze volgorde. Proximus blijft streven naar landelijke dekking rond 2026 en blijft niet-standalone 5G uitbreiden met geselecteerde standalone use cases voor bedrijfsoplossingen. Orange Belgium en Telenet/BASE richten zich eveneens op verdichting, prestaties binnenshuis en gerichte verticale toepassingen. De gemeenschappelijke nadruk ligt op de combinatie van radioverdichting, glasvezelbackhaul en cloud-edge-mogelijkheden die bepalend zijn voor de kwaliteit die gebruikers daadwerkelijk ervaren.



Figuur 4.1. Dekking van huishoudens buitenshuis en binnenshuis van maart 2024 tot januari 2025, op basis van metingen van het BIPT en onafhankelijke rapportage

4.2 Operatoren en netwerktraject

De drie mobiele netwerkkoperatoren volgen een grotendeels vergelijkbaar traject. Proximus meldt wijdverspreide niet-standalone 5G en positioneert standalone-mogelijkheden voor bedrijfsoplossingen onder de paraplu van Proximus NXT. Orange Belgium geeft aan de verdichting voort te zetten, met de nadruk op prestaties binnenshuis en campusconfiguraties. Telenet/BASE zet de uitrol voort en verbetert tegelijkertijd de beschikbaarheid binnenshuis. Het bedrijf gebruikt de metingen van 2024 als benchmark voor latere upgrades. In alle gevallen is de richting die wordt ingeslagen die van een hogere sitendichtheid en een betere indoorervaring, waarbij spectrumgebruik en backhaul-upgrades als belangrijkste hefboomen fungeren.

4.3 Macro-economische kanalen en achtergrondsynthese

Vanuit macro-economisch oogpunt vormt de overgang van vierde generatie (4G) naar vijfde generatie (5G) netwerken een belangrijke mijlpaal in de evolutie van de telecommunicatietechnologie. De impact vloeit in de eerste plaats voort uit investeringen in radiolocaties, spectrum en glasvezelbackhaul; in de tweede plaats uit totale factorproductiviteitswinsten als gevolg van digitale adoptie in bedrijven, verbeterde datasnelheden, ultralage latentie en massale apparaatconnectiviteit, waaronder de koppeling van 5G met cloud, kunstmatige intelligentie (AI), internet of things (IoT) en edge computing; ten derde uit het concurrentievermogen van de export en specialisatie in data-intensieve diensten zoals logistiek, mediaproductie en lucht- en ruimtevaart; en ten slotte uit de voordelen op het gebied van veerkracht in openbare diensten, waar connectiviteit de continuïteit van de bedrijfsvoering en realtime besluitvorming ondersteunt. De empirische kracht van deze kanalen in elk land hangt af van het gebruik, niet alleen van de nominale dekking. Daarom zijn de kwaliteit binnenshuis, de latentie en proefprojecten met netwerkslicing van belang voor de vooruitzichten op middellange termijn.

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. Wereldwijd zal de invoering van 5G naar verwachting leiden tot aanzienlijke productiviteitswinst, nieuwe banen en technologische innovatie. Europa staat voor een reeks eigen uitdagingen met complexe regelgeving en ongelijke invoering tussen de lidstaten. België boekt opmerkelijke vooruitgang op het gebied van strategische partnerschappen en infrastructuurontwikkeling, maar kampt met obstakels op het gebied van regelgeving en invoering.

De potentiële macro-economische impact van 5G is aanzienlijk, waarbij landen die vooroplopen bij de uitrol aanzienlijke concurrentievoordelen zullen ondervinden door een hogere productiviteit en economische groei. De weg naar een wijdverbreide implementatie van 5G is echter bezaaid met uitdagingen, waaronder hoge infrastructuurkosten, regelgevingsbarrières en uiteenlopende niveaus van publieke acceptatie (IHS Markit, 2020; 5G Observatory Report, 2024).

Op mondiaal niveau is de uitrol van 5G eind jaren 2010 van start gegaan, gedreven door een toenemende behoefte aan snellere mobiele datasnelheden, verminderde latentie en de mogelijkheid om uitgebreide netwerken van IoT-apparaten aan te sluiten. Tegen 2024 hebben landen als Zuid-

Korea, China en de Verenigde Staten het voortouw genomen bij de implementatie van 5G en plukken zij de vruchten van vroege economische voordelen. Investerings in infrastructuur en technologie hebben al geleid tot een hogere industriële productiviteit, versnelde technologische vooruitgang en de creatie van nieuwe marktsegmenten (IHS-Markit, 2020).

Economische prognoses onderstrepen het belang 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 nieuwe mogelijkheden die 5G biedt, waaronder slimme productie, telegeneeskunde en autonome transportsystemen (IHS-Markit, 2020). Realtime gegevensverwerking met ondersteuning van 5G is cruciaal voor sectoren die afhankelijk zijn van precisie en snelheid, die voorheen beperkt waren door 4G-netwerken.

De wereldwijde uitrol van 5G gaat echter gepaard met aanzienlijke uitdagingen. Hoge initiële implementatiekosten, geschillen over frequentietoewijzing en verschillen in dekking tussen stedelijke en landelijke gebieden blijven belangrijke belemmeringen. Bovendien blijven geopolitieke spanningen, met name met betrekking tot technologisch leiderschap en intellectuele eigendomsrechten, van invloed op partnerschappen en het tempo van de invoering van 5G (5G Observatory Report, 2024; Market Guide for 5G New Radio, 2024).

4.4 Beleid omzetten in prestaties: macro-economische kanalen en effecten op bedrijfsniveau

Samen zorgen de beleidsinstrumenten in tabel 1 voor minder onzekerheid en een soepele uitvoering. Duidelijke blootstellingsnormen – uitgebreid naar broadcastingcontexten – verminderen het regelgevingsrisico en verankeren de verwachtingen van investeerders over toekomstige beperkingen, wat langetermijninvesteringen ondersteunt. Systematische energiemonitoring verbetert de zichtbaarheid van de exploitatiekosten, waardoor operatoren duurzame CAPEX/OPEX-trajecten kunnen plannen wanneer de elektriciteitsprijzen fluctueren. Doelstellingen voor afvalbeheer creëren voorspelbare trajecten voor naleving en stimuleren secundaire markten voor renovatie en recycling, waardoor de prikkels voor een circulaire economie worden versterkt. Tot slot verkorten gedigitaliseerde vergunningverlening en pariteit in OMC-processen de goedkeuringscycli en verbeteren ze de voorspelbaarheid, wat op zijn beurt de kapitaalkosten verlaagt.

Beleidshefboom	Macro-economisch kanaal
Blootstellingsnormen, incl. broadcasting	Vermindert regelgevingsrisico's; stabiliseert investeringsverwachtingen
Energiemonitoring	Ondersteunt duurzame CAPEX/OPEX-planning
Afvalbeheerdoelstellingen	Creëert zekerheid over naleving; stimuleert markten voor circulaire economie

Gedigitaliseerde vergunningverlening & OMC-pariteit	Kortere tijd tot vergunningverlening; verlaagt kapitaalkosten door voorspelbaarheid
---	---

Tabel 4.1. Beleidsinstrumenten en macro-economische kanalen [Bronnen: ICNIRP (2020), IEC 62232:2022, Richtlijn (EU) 2023/1791, Richtlijn 2012/19/EU, Richtlijn 2008/98/EG, Verordening (EU) 2024/1309, Uitvoeringsverordening (EU) 2020/1070 van de Commissie]

Deze voordelen op systeemniveau vertalen zich rechtstreeks in resultaten op bedrijfsniveau in tabel 2. Minder wrijving bij het verkrijgen van vergunningen zorgt voor meer inkomsten doordat producten eerder op de markt kunnen worden gebracht. Een betere simulatiegetrouwheid (de 'diagrammen'-benadering) vermindert de onzekerheid bij het ontwerp, waardoor er minder wijzigingsopdrachten en herbezoeken aan de locatie nodig zijn. Energiebeheersingsfuncties op massive MIMO (bijv. PowerLock) leveren meetbare energiebesparingen op en vergroten de ruimte voor naleving van blootstellingslimieten. Door energie- en afval-KPI's op te nemen in de vereisten voor inkoopcascades in de toeleveringsketen, ontstaan er niches in renovatie-/reparatie-/recyclingdiensten en worden de operationele praktijk en de beleidsdoelstellingen op elkaar afgestemd. Kortom, voorspelbare regels en gedigitaliseerde processen verminderen het risico van investeringen op macroniveau en leiden tot een snellere uitrol, lagere kosten en groenere activiteiten op bedrijfsniveau.

Implicaties op bedrijfsniveau	Operationeel/zakelijk effect
Minder wrijving bij het verkrijgen van vergunningen	Eerdere lancering van diensten → eerdere realisatie van inkomsten
Betere simulatiegetrouwheid ('Diagrammen')	Minder wijzigingsopdrachten; minder herbezoeken aan locaties
Vermogensregeling op mMIMO (PowerLock)	Energiebesparingen; stabielere nalevingsmarges
KPI's voor energie/afval	Nieuwe leveranciersvereisten; niches voor renovatie/reparatie/recycling

Tabel 2. Implicaties op bedrijfsniveau en operationele effecten [Bronnen: Ericsson, Nokia]

4.5 Veiligheidsopmerking: drones en radionetwerken

Eind 2025 werd België geconfronteerd met gecoördineerde drone-incidenten die de activiteiten op de luchthavens van Brussel en Luik verstoorden en aanleiding gaven tot een vergadering van de Nationale Veiligheidsraad. Het beleidsantwoord was gericht op een strengere bewaking van het luchtruim en een betere integratie van tegenmaatregelen tegen-UAS. Moderne anti-UAS-toolkits combineren radiofrequentiedetectie, radar en optische tracking. Neutralisatietechnieken zoals

radioverstoring of GNSS-interferentie zijn bij wet voorbehouden aan bevoegde autoriteiten en zijn onderworpen aan strenge controles. De Belgische toezichthouder BIPT verbiedt het privébezit of -gebruik van stoorzenders. In de praktijk moet elke wettige neutralisatie zo worden uitgevoerd dat schadelijke interferentie met openbare mobiele netwerken, waaronder 5G, en met noodcommunicatie wordt voorkomen.

Voor netwerkoperatoren en infrastructuureigenaren zijn de operationele implicaties concreet. Kritieke locaties moeten vooraf met mobiele operatoren overeengekomen incidentprotocollen hanteren, die spectrummonitoring en verkeerssturing omvatten. Resilienceplannen moeten voorzien in lokale fallback-dekking in geval van tijdelijke interferentie of overbelasting van cellen tijdens een incident. Wanneer neutralisatie wettelijk is toegestaan, moeten de emissies strikt worden beperkt wat betreft vermogen, frequentie en duur, en moet de samenwerking met operatoren worden voortgezet door middel van audits van de kwaliteit van de dienstverlening na het incident, om ervoor te zorgen dat de wettelijke voorschriften worden nageleefd en de integriteit van de dienstverlening gewaarborgd blijft.

4.6. Beleids- en investeringsrichtlijnen voor 2025

Het beleid moet prioriteit blijven geven aan de beschikbaarheid binnenshuis in dichtbevolkte stedelijke gebieden en in openbare gebouwen, waar de werkelijke gebruikerservaring achterblijft bij de nominale dekking. Steun voor zelfstandige 5G-proeven gericht op lage latentie en netwerkslicing kan de acceptatie versnellen in complexe verticale markten zoals havens, logistiek, mediaproductie en openbare veiligheid. Tegelijkertijd kunnen geformaliseerde procedures tussen operatoren en autoriteiten op luchthavens en militaire bases de responstijden tijdens incidenten verkorten en tegelijkertijd de netwerkintegriteit behouden. Tot slot helpen transparante dashboards voor dekking en kwaliteit, met expliciete meetgegevens voor binnenruimtes, om particuliere investeringen af te stemmen op publieke doelstellingen.

Referenties

BIPT — 5G roll-out reaches 95% of Belgian households (June 2024).

<https://www.bipt.be/consumers/publication/5g-roll-out-reaches-95-of-belgian-households>

BIPT — 5G network mapping & quality (March 2024).

<https://www.bipt.be/consumers/publication/5g-roll-out-in-belgium-network-mapping-and-quality>

BIPT — Jammers are illegal for private use: <https://www.bipt.be/consumers/jammers>

Commission Implementing Regulation (EU) 2020/1070 of 20 July 2020 on small-area wireless access points (small cells) under the EEC. CELEX: 32020R1070 — https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2020/1070/oj

Directive (EU) 2023/1791 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on energy efficiency (recast). CELEX: 32023L1791 — <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/1791/oj>

Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE). CELEX: 32012L0019 — <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2012/19/oj>

Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste (Waste Framework Directive). CELEX: 32008L0098 — <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/98/oj>

Ericsson. RAN Energy Efficiency / Massive MIMO energy-saving features (deep sleep, micro-sleep, etc.). <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/breaking-the-energy-curve>)

ICNIRP (2020). Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz–300 GHz). <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPrfgdl2020.pdf>

IEC 62232:2022. Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of base stations for the purpose of evaluating human exposure. (IEC Webstore – paywalled) <https://webstore.iec.ch/search?search=62232>

Regulation (EU) 2024/1309 of the European Parliament and of the Council of 29 April 2024 on measures to reduce the cost of deploying gigabit electronic communications networks (Gigabit Infrastructure Act). CELEX: 32024R1309 — <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1309/oj>

Nokia — Mobile Networks — Energy efficiency (including μ DTX, muting, dynamic power management) / 5G-Advanced features. <https://www.nokia.com/networks/mobile-networks/energy-efficiency/>

SkeyDrone — detection projects in Belgium: <https://www.skeydrone.aero/>

Trade press — Nearly all households have outdoor 5G; 86% indoor (January 2025) <https://www.telecompaper.com/news/nearly-all-belgian-households-have-5g-coverage-outdoors--1541981>

5. Afval van 6G

6G bevindt zich sinds 2018 officieel in de plannings- en onderzoeksfase (Salameh & Tarhuni, 2022). Deze anticipatie kan worden verklaard door het feit dat de ontwikkeling van dit nieuwe telecommunicatiesysteem samenwerking vereist tussen vele staten, hun overheden, grote telecommunicatie- en clouddienstverleners of industrieën om overeenstemming te bereiken over de vele normen en standaarden van het te bouwen netwerk op het gebied van connectiviteit en interoperabiliteit tussen sectoren en grenzen.

In 2019 werd een symposium over 6G gehouden en verschenen de eerste wetenschappelijke publicaties hierover. De lidstaten en de Europese Unie hebben via hun innovatiebeleid onderzoeksprogramma's en projectoproepen gefinancierd om technologische innovaties te stimuleren die nuttig zijn voor de ontwikkeling ervan. 6G wordt gezien als een noodzakelijke stap voorwaarts voor de economische ontwikkeling en als een symbool van de moderniteit van onze samenlevingen.

In het Witboek van de Europese Commissie van 2024 (COM, 2024, blz. 17) wordt de modernisering van digitale netwerken voorgesteld als een hefboom voor duurzaamheid. Het argument ondersteunt dus een techno-solutionistisch verhaal, in die zin dat technologische vooruitgang het mogelijk zal maken om ecologische problemen op te lossen.

De commercialisering is gepland voor 2030. Het doel is om de verzadiging van 5G tegen te gaan, die met name wordt veroorzaakt door de toename van videostreams en AI. De uitdagingen van geolocatie kunnen niet worden aangepakt door het GNSS-satellietsysteem. De ontwikkeling van virtual en augmented reality vereist grotere videostreams. De snelheid van 6G zal 1 TB/sec bedragen met 1 gebruiker per m². En de latentie, d.w.z. 'de tijd die verstrijkt tussen een commando dat naar de zender wordt gestuurd en het moment waarop de actie kan worden uitgevoerd naar de ontvanger' (Gesbert, 2024), is veel lager dan bij 5G, namelijk in de grootorde van één minuut/sec.

De technologieën die nodig zijn om 6G-netwerken te ontwikkelen, omvatten daarom een nieuwe generatie radiotechnologieën. Sommige van deze technologieën zijn al nodig voor 5G-ontwikkelingen (Ronteix et al., 2024). De nieuwe generatie radio-interfaces, alternatieve microgolven, worden echter nog volop besproken (Ronteix et al., 2024, p. 155). Er zullen dus nieuwe satellieten op een lagere hoogte nodig zijn om de latentie te verminderen door de verbindingafstand te verkleinen, evenals nieuwe herconfigureerbare gefaseerde antennes en metavlakken.

Het afval dat wordt geproduceerd door de ontwikkeling van de 5G- en 6G-netwerken komt zelden aan bod in beleidsdocumenten. Zo vermeldt het rapport van 2025 van het 5G Observatory (p. 7) in een voetnoot over duurzaamheid dat '6G zal worden ontworpen met strikte doelstellingen op het gebied van energie-efficiëntie, koolstofneutraliteit en circulaire economie'. De kwestie van afval wordt dus niet expliciet aan de orde gesteld. De Europese Commissie heeft middelen toegewezen aan onderzoek naar de duurzaamheid van 6G (COM, 2024), maar de beschrijvingen van deze projecten blijven nogal vaag en laten niet toe om te zeggen of er middelen zullen worden toegewezen aan de aard en kwantificering van het afval dat geproduceerd zal worden door technologische ontwikkelingen in telecommunicatienetwerken en de methoden voor de verwerking ervan.

De productie van afval bij de ontwikkeling van 6G maakt niet het voorwerp uit van specifieke wetenschappelijke literatuur. Er lopen onderzoeksprogramma's. Volgens Gesbert (2024) is het nog moeilijk om te bepalen welke ontwerpbouwstenen zullen worden gekozen, omdat de technologie zich nog in de R&D-fase bevindt. In de reeds bestaande literatuur over 6G wordt echter melding gemaakt van de noodzaak van duurzaamheid van 6G, van het ontwerp tot het beheer aan het einde van de levensduur (Uusitalo et al., 2021). Het doel is om ontwerpen te stimuleren die de levensduur, inzameling en recycling van componenten aan het einde van hun levensduur verbeteren (Chataut et al., 2024).

Verder is de literatuur over de milieueffecten van de invoering van deze nieuwe mobiele communicatietechnologie, net als bij 5G, meer gericht op de energie-efficiëntie en het ontwerp die deze doelstelling met zich meebrengt. Het afval dat door de invoering van 6G wordt geproduceerd, wordt in de geraadpleegde teksten dus niet zonder meer vermeld, ook details ontbreken en er wordt evenmin een specifieke analyse van gemaakt. In de artikelen over 6G gaan alleen Salameh en Tarhuni (2022, blz. 8) expliciet in op de toename van het volume aan AEEA tussen 2005 en 2014, evenals op het volume aan AEEA in 2017, waarbij zij erop wijzen dat dit een alarmerende indicator is.

In het algemeen presenteren de geraadpleegde teksten de nieuwe technische en economische mogelijkheden die 6G biedt. Noch de materialiteit van de infrastructuur die nodig is voor 6G, noch de productie van AEEA in verband met de ontwikkeling van 6G zijn het onderwerp van kwantitatieve benaderingen of analyses in termen van geproduceerde AEEA met nauwkeurige levenscyclusanalyses. De artikelen gaan over de benodigde radiofrequentie, de toename van de snelheid en de verbeterde connectiviteit dankzij satellieten in een baan op 500 kilometer van de aarde. De geproduceerde AEEA bevindt zich zowel op het land als in de ruimte.

Om een idee te krijgen van de afvalproductie van dit nieuwe netwerk, moet worden gekeken naar de mogelijke toepassingen en innovaties die 6G mogelijk maakt om de benodigde apparatuur te identificeren. Er zijn echter geen diepgaande kwantitatieve analyses of prognoses beschikbaar.

Toepassing;

- Virtual en augmented reality
- Internet of Things
- Digitale tweelingen
- Verbonden robots
- AI-ontwikkeling
- Precisielandbouw
- Telechirurgie
- Robotisering van de industrie dankzij AI
- ...

Deze toepassingen zullen leiden tot:

- Behoefte aan nieuwe routers voor een betere bedrijfsconnectiviteit
- Opkomst van verbonden objecten
- Toename van de automatisering van industriële processen met AI
- Toename van datacenters en hun capaciteit om een grotere hoeveelheid gegevens op te slaan

- Toename van sensoren, naast machineklanten zoals onbemande drones en autonome auto's (die hogere eisen stellen aan de radiokwaliteit) (Gesbert, 2024)
- Dichtere satellieten
- Toename van datacenters, inclusief servers en koelsystemen, om de geproduceerde gegevens op te slaan

Al deze apparatuur is gebaseerd op en werkt met micro-elektronica (kabels, batterijen, enz.), waarvoor meer zeldzame en strategische metalen nodig zijn. Servers in datacenters worden gemiddeld om de twee à drie jaar vervangen om efficiënt te blijven (Izoard, 2024). De metalen waaruit deze elektronische en micro-elektronische apparatuur bestaat, worden echter gewonnen door middel van metallurgische processen die aanzienlijke hoeveelheden water, gas en olie verbruiken, om nog maar te zwijgen van de tonnen gesteente en steen die daarbij worden vernietigd. De residuen die bij deze metallurgische processen ontstaan, kunnen het water en het grondwater vervuilen.

Uit het geraadpleegde onderzoek blijkt dat het einde van de levensduur van het eerste gebruik van elektronische apparaten zou moeten worden uitgesteld door het feit dat 6G een vermindering van het energieverbruik voor de werking van deze apparaten mogelijk zou maken, wat zou leiden tot een verlenging van de levensduur van batterijen, of zelfs van apparaten zonder batterijen (Salameh & Tarhuni, 2022). Deze optimalisatie van het batterijgebruik zal echter waarschijnlijk worden gedwarsboomd door het intensievere gebruik van deze apparaten als gevolg van de nieuwe toepassingen die mogelijk worden gemaakt door datatransmissie, een fenomeen dat bekend staat als het rebound-effect (Bihouix, 2025).

Bovendien is metaalrecycling moeilijk voor zeldzame en strategische metalen, die moeilijk terug te winnen zijn omdat ze in kleine hoeveelheden (in de orde van milligrammen en nanometers) in verschillende componenten en vaak in legeringen voorkomen (Bihouix, 2025). Recycling wordt bijgevolg alleen uitgevoerd voor een paar metalen (staal, aluminium, koper, nikkel, lood, chroom, kobalt, goud, mangaan, platina, zilver, enz.) Voor metalen die nuttig zijn voor de ontwikkeling van digitale technologie – zoals zeldzame aardmetalen, tantaal, gallium, indium, germanium, indium of antimoon – bedraagt de recycling wereldwijd minder dan 1 % (Bihouix, 2025). Bovendien levert deze recycling ook vervuilend en giftig industrieel afval op (Bihouix, 2025), omdat het arseen (Izoard, 2024), kwik en chroom (Salameh & Tarhuni, 2022) bevat.

In 2025 zijn er al 1 miljard slimme apparaten en geautomatiseerde systemen die verbonden zijn en gegevens verzamelen en analyseren (Enables, n.d). Het aantal afgedankte batterijen zal de komende jaren dan ook waarschijnlijk exponentieel toenemen. Er is dus dringend behoefte aan het ontwerpen van duurzamere batterijen. Al deze voorwerpen bevatten zeldzame metalen die moeilijk te recycleren zijn (Izoard, 2024).

Daarbovenop komt dat de toename van de frequentie die nodig is voor 6G ervoor zal zorgen dat siliciumcomponenten niet meer werken (Knénas en Dutoit, 2024). De uitrol van de 6G-infrastructuur moet dus gepaard gaan met de introductie van nieuwe materialen die hogere frequenties en een grotere bandbreedte mogelijk maken. Volgens Izoard (2024) wordt silicium vervangen door galliumarsenide of silicium-germanium.

Om de exponentiële toename van AEEA tegen te gaan, bespreken Salameh en Tarhuni (2022) de noodzaak om de recyclingnormen te verbeteren, maar ook de verwachte innovaties op het gebied van

groene biologische materialen zoals microben, die minder giftige en energie-intensieve recyclingprocessen mogelijk maken. Opgemerkt moet worden dat de uitrol van 6G niet alleen AEEA op het land met zich meebrengt, maar ook in de ruimte als gevolg van de inzet van satellieten.

In tegenstelling tot de literatuur over de kwantificering van de productie en consumptie van elektrische en elektronische apparaten door de uitgebreide verantwoordelijkheid van producenten, blijkt uit het ontbreken van literatuur over de AEEA die wordt gegenereerd door de ontwikkeling van mobiele telecommunicatienetwerken en over de behandeling daarvan dat er een groter gebrek aan aandacht is voor de ontwikkeling van de digitale infrastructuren die nodig zijn voor 5G en 6G.

Als gevolg daarvan is de analyse van de milieu-impact ervan momenteel onvolledig, terwijl de componenten van deze nieuwe technologieën, zoals we hierboven hebben aangetoond, vervuiling kunnen veroorzaken die op haar beurt gezondheids- en ecologische risico's met zich meebrengt voor mensen die met deze AEEA omgaan of in de buurt ervan wonen, voor de biodiversiteit en de natuur, en aanzienlijke verwerkingskosten met zich meebrengt voor de gebieden waar ze worden gerecycled, gelekt of verbrand. In dit rapport moet een mogelijke verklaring worden vermeld voor het ontbreken van wetenschappelijke literatuur over afval van 5G- en 6G-infrastructuren, namelijk het gebrek aan toepassing van het systeem van uitgebreide producentenverantwoordelijkheid (UPV) zoals gedefinieerd in de richtlijn. Volgens de lijst van uitzonderingen op UPV die door Leefmilieu Brussel op de website van het instituut werd gepubliceerd, vallen telecommunicatieantennes niet onder de regeling voor uitgebreide producentenverantwoordelijkheid (Brussel-Milieu, 2024) omdat ze vallen onder de categorie 'apparatuur die speciaal is ontworpen voor onderzoeks- en ontwikkelingsdoeleinden en die alleen door een ander bedrijf aan een bedrijf ter beschikking wordt gesteld'.

Conclusie

De planning van 6G was volop aan de gang, terwijl tegelijkertijd de effectieve uitrol van 5G begon. Ondanks het gebrek aan nauwkeurige gegevens over de detritische effecten van 5G, wordt de conceptualisering van de architectuur en apparatuur van 6G overwogen, maar nog steeds zonder een serieuze analyse van de mogelijke impact ervan op het gebied van productie en afvalbeheer. In het BHG zou er onderzoek kunnen worden gedaan om meer inzicht te krijgen in de levensduur van antennes en hoe ze aan het einde van hun levensduur worden behandeld. Idealiter zou dit onderzoek plaatsvinden vóór de lancering van 6G, omdat de beoordeling van de milieueffecten van een technologie, zodra deze is geïntroduceerd, zeer tijdrovend en complex kan zijn. Onderzoekresultaten komen vaak op een moment dat technologieën al goed ingeburgerd zijn (UNEP, 2024).

Referenties

BIHOUIX, Philippe, With illustrations by PERRIOT, Vincent, 2025. Tracts (N° 68) - L'Insoutenable Abondance. In: BIHOUIX, Philippe, Tracts (N°68) - L'Insoutenable Abondance Should we believe the prophets of progress? Paris: Gallimard. Tracts, p.3-63. URL: <https://stm.cairn.info/tracts-n-68-l-insoutenable-abondance--9782073126979-page-3?lang=fr>.

Brussels-Environment, 2024, "What to do with your electrical and electronic waste", published on 1 November 2024, consulted on 30 October 2025, on the website:

<https://environnement.brussels/pro/gestion-environnementale/gerer-les-dechets/que-faire-de-vos-dechets-electriques-et-electroniques>

Chataut, Robin, Mary Nankya, and Robert Akl. "6G Networks and the AI Revolution—Exploring Technologies, Applications, and Emerging Challenges." *Sensors* (Basel, Switzerland) 24, no. 6 (2024): 1888. <https://doi.org/10.3390/s24061888>.

European Commission (COM), 2024, How to master Europe's digital infrastructure needs?, Brussels, 21.2.2024 COM(2024) 81 final

Enables, n.d., European infrastructure powering the internet of things, Research Paper Infrastructure Position Paper.

GESBERT, David, 2024. 6G: promises and challenges for 2030. *Annales des Mines - Enjeux numériques*, 2024/3 n° 27, p.59-64. DOI: 10.3917/ennu.027.0059. URL: <https://stm.cairn.info/revue-enjeux-numeriques-2024-3-page-59?lang=fr>.

IZOARD, Celia, 2024. The mind that devoured matter AI, an insatiable technology. *Ecology & Politics*, 2024/2 N° 69, p.73-84. DOI: 10.3917/ecopo1.069.0073. URL: <https://shs.cairn.info/revue-ecologie-et-politique-2024-2-page-73?lang=fr>.

KTÉNAS, Dimitri and DUTOIT, Denis, 2024. Components for digital infrastructure. *Annales des Mines - Enjeux numériques*, 2024/3 n° 27, p.128-134. DOI: 10.3917/ennu.027.0128. URL: <https://stm.cairn.info/revue-enjeux-numeriques-2024-3-page-128?lang=fr>.

RONTEIX, Flavien, EL JAAFARI, Mohamed, PANAITOPOL, Dorin And CHUBERRE, Nicolas, 2024. Convergence of the Telecommunication systems with 5G and 6G. *Annales des Mines - Enjeux numériques*, 2024/1 N° 25, p.147-156. URL: <https://stm.cairn.info/revue-enjeux-numeriques-2024-1-page-147?lang=en>.

Salameh, Ahmed I, and Mohamed El Tarhuni. "From 5G to 6G—Challenges, Technologies, and Applications". *Future internet* 14, no. 4 (2022): 117. <https://doi.org/10.3390/fi14040117>.

United Nations Environment Programme (UNEP). 2024. *Digital Public Infrastructure for Environmental Sustainability*. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/45181>

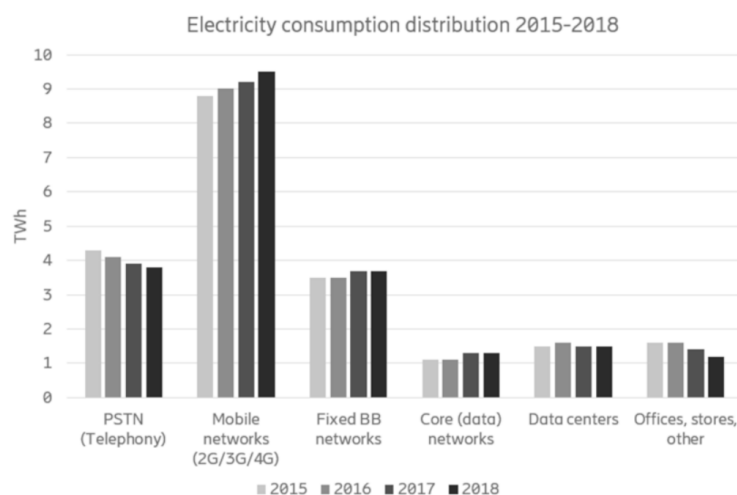
Uusitalo, Mikko A, Patrik Rugeland, Mauro Renato Boldi, Emilio Calvanese Strinati, Panagiotis Demestichas, Marten Ericson, Gerhard P Fettweis, et al. "6G Vision, Value, Use Cases and Technologies From European 6G Flagship Project Hexa-X". *IEEE access* 9 (2021): 160004-20. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3130030>.

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 6.2) bestaat uit een hoog statisch verbruik zodra de infrastructuur draait, gevolgd door een veel lagere, dynamische lineaire toename afhankelijk van de belasting.

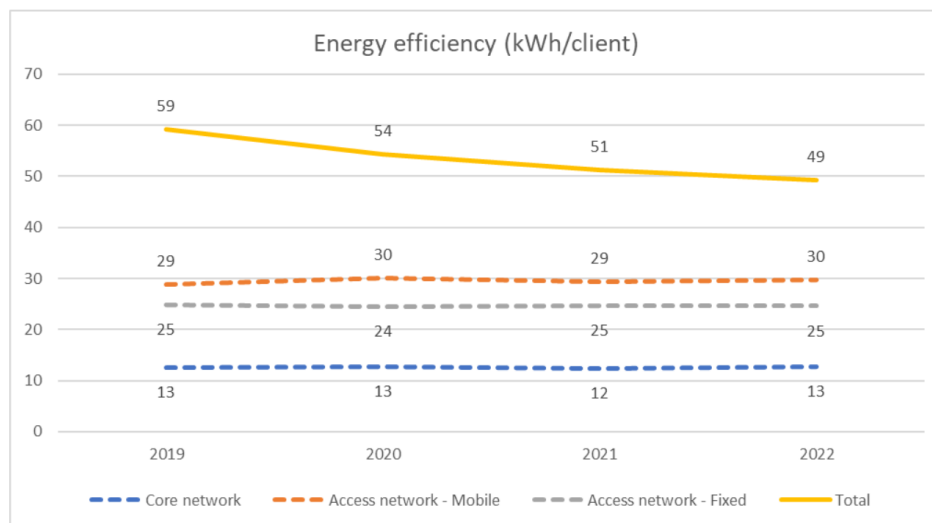
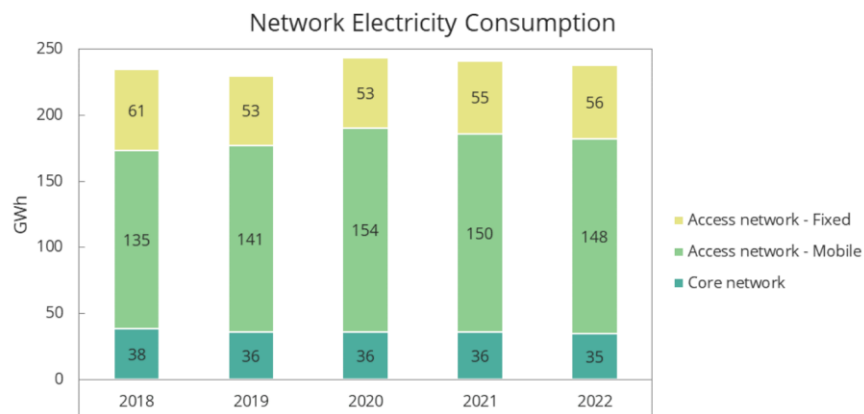
De uitrol van lopende infrastructuur is dus de belangrijkste factor in het totale elektriciteitsverbruik. Het is nog steeds opmerkelijk dat het relatief constant bleef, ondanks de aanzienlijke verschillen in de generaties apparatuur. Ondertussen is het dataverkeer aanzienlijk gegroeid (met een factor 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 data-intensiteit (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.

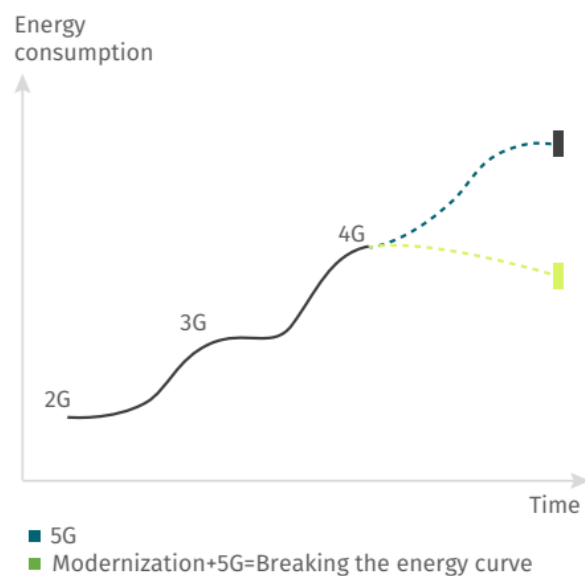
In het specifieke geval van België bestaan er verschillende rapporten van de belangrijkste operatoren. Het BIPT vat de resultaten samen in (BIPT, 2023). De verkregen waarden komen overeen met het rapport van (Lundén, 2022), met enkele verschillen die waarschijnlijk te maken hebben met de manier waarop 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.

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



Figuur 6.3: 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% (een vermindering met een factor 10 van het energieverbruik per verzonden bit), die wordt bereikt door verschillende technologieën, zoals energiebesparende strategieën, cell zooming, dichte HetNets, Massive MIMO, offloading, lokale caching, mobile edge computing, enz. (Williams, 2022).

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.

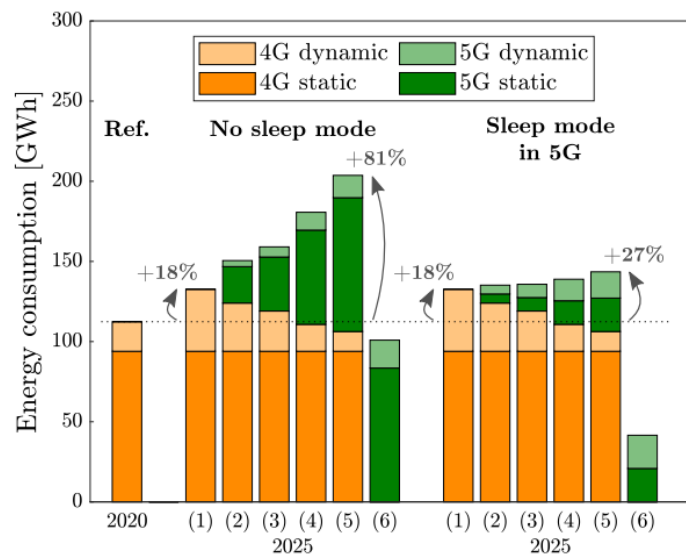
Er zijn enkele voorspellingen beschikbaar van adviesbureaus, die wellicht toegang hebben tot recentere gegevens. Die rapporten geven echter meestal niet genoeg details over hoe de berekeningen tot stand zijn gekomen en wat ze precies inhouden. We kunnen het rapport van (ABI Research, 2021) citeren. Het 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 figuur 6.4.

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.

Enigszins vergelijkbare resultaten worden verkregen in (Bieser, 2023) voor het Zwitserse mobiele netwerk. Op basis van hun verwachte scenario voorspellen zij een verbetering van de energie-efficiëntie met 85 %, maar een totale toename van het energieverbruik met 20 % als gevolg van de toename van het dataverkeer. Zij tonen ook aan dat de broeikasgasemissies (BKG) in verband met de

productie in de toekomst dominant kunnen worden (zie het gedeelte over ingebedde energie hieronder).

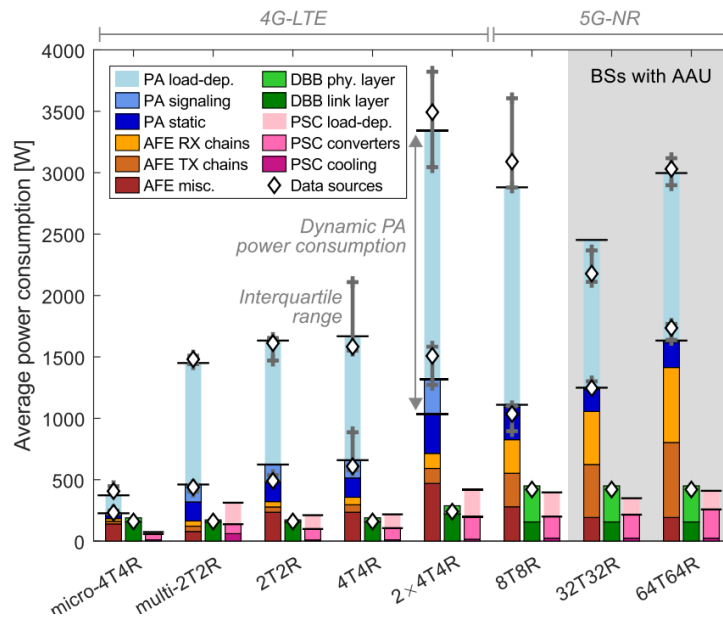


Figuur 6.4: Totaal elektriciteitsverbruik met en zonder slaapstanden voor verschillende uitrolscenario's. Scenario (1) komt overeen met geen 5G, scenario (6) komt overeen met de buitengebruikstelling van 4G. De tussenliggende scenario's komen overeen met een geleidelijke uitrol van 5G. Uit (Golard, 2022).

In (Singh, 2025) worden echter andere resultaten verkregen, waarin experimentele metingen van 4G- en verschillende soorten 5G-netwerken worden vergeleken. In dat onderzoek vertonen sommige configuraties van het 5G-netwerk een lagere energie-efficiëntie dan 4G (van 0,1 J/MB voor 4G tot 0,25 of 0,3 J/MB in de 5G-SA- en 5G-NSA-configuraties). Deze resultaten kunnen echter afhankelijk zijn van de precieze configuratie die wordt gebruikt en de hoeveelheid dataverkeer.

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 energieverbruik niet langer lineair te zijn bij lichtere belasting (zie figuur 6.6 en meer details hieronder).

Soms zijn er tegenstrijdige resultaten te vinden in de literatuur.



Figuur 6.5: 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 6.1) 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. Ingebedde energie

De ingebedde energie komt overeen met de milieukosten die gepaard gaan met de productie en het afvalbeheer van de verschillende apparatuur die in het netwerk wordt gebruikt. Voor mobiele communicatienetwerken is deze energie historisch gezien aanzienlijk lager geweest dan de milieukosten van de gebruiksfase. Zo werd aangenomen dat de ingebedde energie in 2G/3G 20 tot 33 % van de totale levenscyclus van een basisstation vertegenwoordigde (Williams, 2022), terwijl het resterende deel voornamelijk verband houdt met het energieverbruik in de gebruiksfase. Door de verdichting van het netwerk, de verbeterde energie-efficiëntie van de 5G-basisstations en het mogelijke gebruik van hernieuwbare energie om basisstations van stroom te voorzien, zal de ingebedde energie naar verwachting echter een grotere rol gaan spelen in toekomstige generaties mobiele netwerken (Bieser, 2023). Dit vraagt om maatregelen om de levensduur van basisstations te verbeteren en de opeenvolgende uitrol van nieuwe generaties te vertragen.

Anderzijds vertegenwoordigt de ingebedde energie, zoals hierboven vermeld, het grootste deel van de broeikasgasemissies in de levenscyclus van gebruikersapparaten (ongeveer 80 % volgens (Bieser, 2022)). Bovendien is deze van dezelfde orde van grootte als het energieverbruik van het mobiele toegangsnetwerk. In die zin is het nog belangrijker om de levensduur van smartphones en andere communicatieapparaten te verbeteren. In (Bieser, 2022) worden verschillende consumentgerichte maatregelen voorgesteld en geanalyseerd om consumenten ertoe aan te zetten beslissingen te nemen die een positieve invloed hebben op de levensduur van smartphones. Deze maatregelen variëren van voorlichting, overreding (marketing en ontwerp voor gehechtheid), vereenvoudigingen (inzamelingscampagne voor gemakkelijker hergebruik), stimulansen (kortingen op mobiele abonnementen voor oudere telefoons, financiële beloningen voor teruggave) tot handhaving (uitgebreide producentenverantwoordelijkheid).

6.3.4. 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 6.2 en figuur 6.6 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).

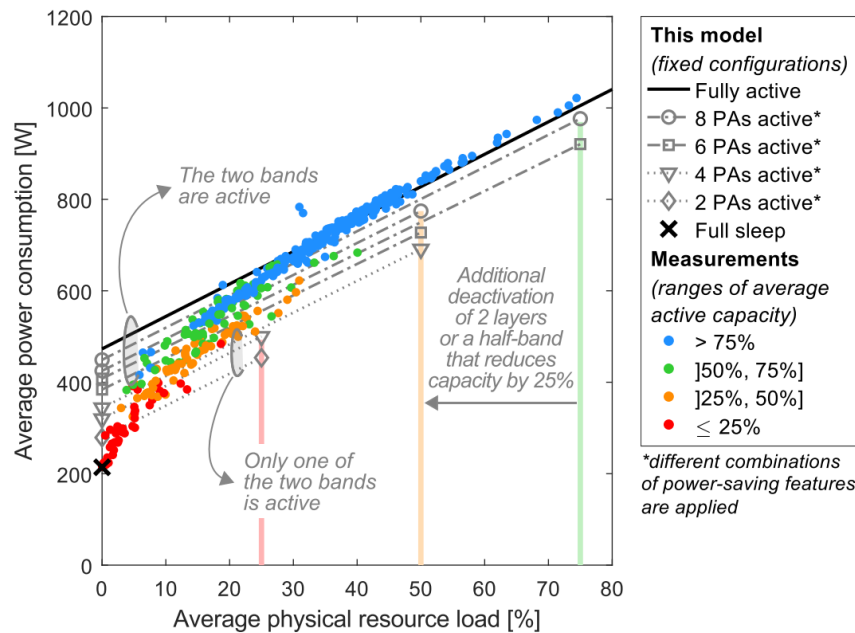
6.3.5. Rebound-effecten

De toename van het dataverkeer is een van de belangrijkste drijfveren voor de uitrol van nieuwe energieverblindende 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.

6.3.6 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. Het gebruik van energiebesparende functies in 5G-hardware is uiteraard erg belangrijk om het energieverbruik van 5G te verminderen. 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). Door verschillende niveaus van slaapstanden beschikbaar te hebben, kan er meer worden geoptimaliseerd, wat leidt tot een grotere vermindering van het stroomverbruik (Huertes, 2025). Voor dergelijke optimalisaties is meestal een nauwkeurig stroomverbruiksmodel van de basisstationapparatuur nodig, dat voor een bepaalde apparatuur kan worden verkregen door een analytisch model op meetgegevens toe te passen of door middel van 'machine learning'-methoden (Piovesan, 2022). De optimale methoden voor het beheer van slaapmodi, volgens verschillende criteria en situaties, worden gepresenteerd en vergeleken in (Peschiera, 2025). Er worden enkele resultaten

gepresenteerd voor de huidige apparatuur, waaruit blijkt dat energiebesparend beheer kan leiden tot een vermindering van het stroomverbruik met ongeveer 25 tot 40 % bij een gemiddelde tot lage belasting. 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 6.6: Gemiddeld vermogen versus belasting bij gebruik van energiebesparende functies voor een voorbeeld-RRU (Remote Radio Unit). Uit (Golard, 2024).

6.3.7 Impact van beleid

In (Zagdanski, 2023) wordt een interessante analyse gegeven van de impact die spectrumbeleid kan hebben op het stroomverbruik en, meer in het algemeen, op de CO₂-uitstoot van mobiele communicatienetwerken. De belangrijkste bevindingen zijn dat 1) het toestaan van een groter spectrum kan bijdragen tot een hogere doorvoercapaciteit per basisstation, waardoor minder basisstations nodig zijn en dus de totale ingebedde energie van het netwerk daalt; 2) spectrumfragmentatie schadelijk is voor de energie-efficiëntie van het netwerk; 3) in de huidige stand van de techniek apparatuur die op hogere draaggolffrequenties werkt meer stroom verbruikt en dat het verschuiven van het beschikbare spectrum naar hogere frequenties dus zal leiden tot hogere energiekosten. Numerieke evaluaties worden gegeven in (Zagdanski, 2023). Deze zijn echter grotendeels gebaseerd op voorspellingen op basis van vaste intensiteitsmaatstaven, waarvan bekend is dat ze onnauwkeurig zijn.

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 inzet betreft, is het een legitieme vraag of de operatoren moeten worden aangemoedigd om de exponentiële capaciteitsverhoging voort te zetten.

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 Malmudin, Nina Lövehagen, Pernilla Bergmark, Dag Lundén, "ICT sector electricity consumption and greenhouse gas emissions – 2020 outcome", Telecommunications Policy, Volume 48, Issue 3, 2024.

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

P. Frenger and 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, Malaysia, 2019.

BIPT, « Communication du Conseil de l'IBPT du 19 décembre 2023 concernant la durabilité des réseaux de télécommunications en Belgique », December 2023.
<https://www.ibpt.be/opérateurs/publication/communication-du-19-decembre-2023-concernant-la-durabilite-des-reseaux-de-telecommunications-en-belgique>

Joint ITU&World Bank, « Measuring the Emissions & Energy Footprint of the ICT Sector”, 2024

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

Small cell forum, "Small cells market status report February 2018", February 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. Evaluation and projection of 4G and 5G RAN energy footprints: the case of Belgium for 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 and J. M. H. Elmirghani, "Optimized Energy Aware 5G Network Function Virtualization," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 44939-44958, 2019.

A. Bellin, M. Centenaro and 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, Spain, 2023, pp. 420-425.

E. Björnson, L. Sanguinetti, J. Hoydis and M. Debbah, "Optimal Design of Energy-Efficient Multi-User MIMO Systems: Is Massive MIMO the Answer?," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 6, pp. 3059-3075, June 2015,.

S. Blandino, C. Desset, A. Bourdoux and S. Pollin, "Energy Efficiency of Multiple-Input, Multiple-Output Architectures: Future 60-GHz Applications," in *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 15, no. 2, pp. 65-71, June 2020.

J. Lorincz, Z. Klarin and D. Begusic, "Modeling and Analysis of Data and Coverage Energy Efficiency for Different Demographic Areas in 5G Networks," in *IEEE Systems Journal*, vol. 16, no. 1, pp. 1056-1067, March 2022.

T. Islam, D. Lee and S. S. Lim, "Enabling Network Power Savings in 5G-Advanced and Beyond," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 41, no. 6, pp. 1888-1899, June 2023.

Jann Camilo Sánchez Huertas, Greta Vallero, Loutfi Nuaymi, Anne-Cécile Orgerie, "Review and classification of the use of SMs for energy saving in next-generation radio access networks," in *Computer Networks*, Volume 273, 2025.

Jan C.T. Bieser, Yann Blumer, Linda Burkhalter, René Itten, Marilou Jobin, Lorenz M. Hilty, "Consumer-oriented interventions to extend smartphones' service lifetime," *Cleaner and Responsible Consumption*, Volume 7, 2022.

J. Bieser, B. Salieri, R. Hischier, L.M. Hilty, (2023), "Opportunities of 5G Mobile Technology for Climate Protection in Switzerland," In: Wohlgemuth, V., Naumann, S., Behrens, G., Arndt, H.K., Hüb, M. (eds) *Advances and New Trends in Environmental Informatics. ENVIROINFO 2022. Progress in IS*. Springer, Cham.

N. Piovesan, D. López-Pérez, A. De Domenico, X. Geng, H. Bao and M. Debbah, "Machine Learning and Analytical Power Consumption Models for 5G Base Stations," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 60, no. 10, pp. 56-62, October 2022.

E. Peschiera, Y. Agram, F. Quitin, L. V. d. Perre and F. Rottenberg, "On Optimizing Time-, Space- and Power-Domain Energy-Saving Techniques for Sub-6 GHz Massive MIMO Base Stations," *2025 IEEE 26th International Workshop on Signal Processing and Artificial Intelligence for Wireless Communications (SPAWC)*, Surrey, United Kingdom, 2025, pp. 1-5.

G. Guennebaud, A. Bugeau and A. Dudouit, "Assessing VoD Pressure on Network Power Consumption," *2023 International Conference on ICT for Sustainability (ICT4S)*, Rennes, France, 2023, pp. 76-86.

R. Singh, D. Jadaan, D. Ghimire, M. Berger, A. Skavhaug and L. Dittmann, "Comparative Analysis of Power Consumption in LTE, 5G-NSA, 5G-SA, and Private 5G Networks," *2025 IEEE 22nd Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, Las Vegas, NV, USA, 2025, pp. 1-2.

G. Kamiya, and P. Bertoldi, "Energy consumption in data centres and broadband communication networks in the EU," (pp. 1831-9424). Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2024

J. Zagdanski, P. Castells, "The impact of spectrum policy on carbon emissions," 32nd European Conference of the International Telecommunications Society (ITS), Madrid, Spain, 19th-20th June 2023, Calgary.

7. Opmerkingen over de effecten van radiofrequente elektromagnetische velden in verband met vijfde generatie technologie op flora en fauna

De steeds toenemende acceptatie van mobiele communicatietechnologieën heeft geleid tot bezorgdheid over de milieurisico's die gepaard gaan met langdurige blootstelling van ecosystemen aan elektromagnetische velden in de microgolfband. Deze bezorgdheid werd nog versterkt door de uitrol van mobiele netwerken van de vijfde generatie (5G) (Di Ciaula, 2018), die een stijging van de basisfrequentie met zich meebrengt, waarbij doorgaans gebruik wordt gemaakt van 3,4 - 3,8 GHz in de middenband en mogelijk millimetergolven voor communicatie met veel verkeer en korte afstanden (24,25 GHz tot 71,0 GHz). Dit gebeurt in een context van heersende wetenschappelijke onzekerheid en controverse over de effecten van elektromagnetische velden van telecommunicatie op flora en fauna (Karipidis et al., 2023; Thielens, 2021; Simko & Mattsson, 2019; Cucurachi et al., 2013; Froidevaux et al., 2023), zelfs met betrekking tot de gevestigde en relatief goed onderzochte frequentiebanden rond 900, 1.800 en 2.450 MHz, die pre-5G mobiele telefoons en basistations en wifi bestrijken.

Er werden geen blootstellingsnormen ontwikkeld om de blootstelling van niet-menselijke soorten aan radiofrequente elektromagnetische velden te beoordelen en te beperken (Pophof et al. 2023). Hoewel algemeen wordt aangenomen dat dieren, planten en ecosystemen tegen schadelijke gezondheidseffecten worden beschermd als mensen dat worden, kunnen unieke blootstellingsomstandigheden en interactiemechanismen aanleiding geven tot specifieke effecten op flora en fauna, en kunnen biologische effecten op soorten en ecosystemen zich manifesteren bij niveaus die geen onmiddellijk gezondheidsrisico vormen (Cucurachi et al., 2013; Froidevaux et al., 2023). In het algemeen is onze kennis over deze bijzondere factoren en de daaruit voortvloeiende blootstellingsrisico's beperkt en is er nog geen consensus bereikt op basis van de huidige gegevens.

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 werden bevestigd (ICNIRP, 2020) en in veel landen de basis vormen voor het beleid. In het frequentiespectrum dat relevant is voor telecommunicatie, schrijft de ICNIRP schadelijke gezondheidseffecten toe aan door radiofrequente elektromagnetische velden veroorzaakte weefselverwarming. De ICNIRP stelt dat er momenteel geen onderbouwd bewijs is voor 'niet-thermische' interactiemechanismen die schadelijke gezondheidseffecten zouden voorspellen als gevolg van blootstelling aan RF-EMV onder de basisdrempelwaarden voor specifieke energieabsorptiesnelheden (SAR). De relevantie van deze richtlijnen voor blootstelling van niet-menselijke organismen is echter niet bewezen en deels niet praktisch (bijvoorbeeld voor insecten, vanwege hun kleine massa; onlangs werd een gemiddelde SAR van 1 mg voorgesteld als nieuwe maatstaf voor fijnschalige biodosimetrie om de discussie uit te breiden; Jeladze et al., 2025), en biologische effecten en schadelijke gezondheidseffecten zijn niet noodzakelijkerwijs samenvallende begrippen.

Dieren, planten en dus ook ecosystemen zijn onderhevig aan specifieke risico's, deels als gevolg van gewijzigde blootstellingspatronen en deels als gevolg van gewijzigde interactiemechanismen en de mogelijkheid van interferentie met de zintuigen van dieren, waarover we nog zullen spreken.

7.1. Over gewijzigde blootstellingsomstandigheden van dieren

Dieren worden blootgesteld aan radiofrequente elektromagnetische velden die vaak aanzienlijk verschillen van die van mensen, zowel wat betreft intensiteit als ruimtelijke verdeling. Vliegende soorten zoals vogels en insecten kunnen in de nabije omgeving of uitsluitingszones rond zenders terechtkomen, waar de veldsterkte hoger is dan de normale niveaus in het milieu. Door hun kleinere lichaamsgrootte, specifieke morfologie en diëlektrische eigenschappen van hun weefsels absorberen kleine dieren, met name insecten, RF-energie efficiënter in het GHz- tot millimetergolfbereik (Thielens et al., 2018; Thielens et al., 2020; De Borre et al., 2021; Herssens et al., 2022). Dit is vooral relevant voor 5G en toekomstige draadloze netwerken, die gebruikmaken van hogere draaggolffrequenties en directionele beamforming, waardoor de ruimtelijke en temporele blootstellingsomstandigheden in natuurlijke habitats veranderen (Colombi et al., 2015; Simko & Mattsson, 2019).

Modelleringsstudies tonen aan dat zelfs een bescheiden opwaartse verschuiving van de transmissiefrequentie de absorptie in kleine organismen sterk kan versterken. Bij honingbijen kan een verschuiving van 10 % in invallende vermogensdichtheid van minder dan 3 GHz naar meer dan 6 GHz bijvoorbeeld leiden tot een verdrievoudiging van het geabsorbeerde vermogen (Thielens et al., 2020). Een dergelijke herverdeling van frequenties, die kenmerkend is voor netwerken van de volgende generatie, suggereert dat de blootstelling van vliegende insecten aan RF-EMV waarschijnlijk zowel in omvang als in ruimtelijke heterogeniteit zal toenemen. Recente numerieke dosimetrie heeft deze voorspellingen verfijnd door middel van anatomisch realistische, heterogene insectenmodellen. Jjeladze et al. (2025) hebben weefselspecifieke SAR's gekwantificeerd bij de honingbij (*Apis mellifera*), de wesp (*Vespula vulgaris*), het lieveheersbeestje (*Coccinella septempunctata*) en de bidsprinkhaan (*Mantis religiosa*) tussen 2,5 en 100 GHz. Afzonderlijke diëlektrische lagen (cuticula, inwendig weefsel en hersenen) werden gesimuleerd met behulp van de FDTD-methode om de frequentieafhankelijke absorptie te beoordelen. Maximale neurale SAR's traden op bij soortspecifieke resonanties: 25 GHz voor honingbijen ($3,6 \text{ W kg}^{-1}$), 12 GHz voor wespen ($5,4 \text{ W kg}^{-1}$), 25 GHz voor bidsprinkhanen ($5,2 \text{ W kg}^{-1}$) en 60 GHz voor lieveheersbeestjes (10 W kg^{-1}) voor een invallende vermogensdichtheid van 1 mW cm^{-2} . De EMV-absorptie in cuticulaire weefsels nam bijna lineair toe met de frequentie, wat suggereert dat oppervlakteverwarming relevant kan worden bij millimetergolflengten.

Samen versterken deze bevindingen eerdere voorspellingen dat 5G-gerelateerde frequentiebereiken gedeeltelijke of volledige lichaamsresonantie bij insecten kunnen veroorzaken, wat leidt tot een hogere lokale energieabsorptie (Thielens et al., 2018; Thielens et al., 2020; De Borre et al., 2021; Herssens et al., 2022). Hiermee moet rekening worden gehouden bij ecologische effectbeoordelingen van 5G-implementatiescenario's, met name gezien de centrale functie van insecten voor de voortplanting van planten, voedselketens en de algehele biodiversiteit (Balmori, 2015; Balmori, 2021; Cucurachi et al., 2013).

Planten zijn als vastzittende organismen voortdurend blootgesteld aan RF-EMV's in de omgeving, en hun blootstellingspatronen zullen evolueren met de uitbreiding van 5G en toekomstige draadloze netwerken. In tegenstelling tot dieren kunnen planten zich niet verplaatsen uit zones met een hoog veld, waarbij hun blootstelling varieert naargelang de hoogte van het bladerdak, het vochtgehalte en de diëlektrische eigenschappen van het weefsel, die bepalend zijn voor de veldpenetratie en -absorptie (Vian et al., 2016; Halgamuge, 2017). Het toenemende gebruik van hogere frequenties (>6

GHz) en dichte small-cell-netwerken kan de elektromagnetische veldgradiënten dicht bij het oppervlak veranderen. Aangezien de penetratiediepte in plantenweefsels afneemt met de frequentie, kan de oppervlaktegelokaliseerde absorptie in bladeren en meristemen intensiveren bij millimetergolflengten, wat mogelijk van invloed is op de membraanpermeabiliteit, het ionentransport en de reacties op oxidatieve stress (Waldmann-Selsam et al., 2016; Zhong et al. 2021).

7.2. Over specifieke sensorische interactiemechanismen die de gevoeligheid voor RF-EMV beïnvloeden

Veel dieren beschikken over zintuiglijke systemen die zwakke magnetische of elektrische velden kunnen detecteren, waardoor ze in principe gevoeliger zouden kunnen zijn voor elektromagnetische interferentie. Magneto- en elektrosensatie komen veel voor in verschillende taxa en ondersteunen essentiële gedragingen zoals migratie, foerageren en voortplanting (Pophof et al., 2023b). Magnetoreceptie is gebaseerd op gespecialiseerde biofysische mechanismen die organismen in staat stellen het magnetisch veld van de aarde waar te nemen en te gebruiken. Er zijn drie belangrijke mechanismen voorgesteld: (i) elektromagnetische inductie in elektroreceptoren, (ii) magnetomechanische interacties waarbij biogene magnetietdeeltjes betrokken zijn, en (iii) magnetisch gevoelige radicaalpaarreacties die plaatsvinden in lichtafhankelijke cryptochroomfotoreceptoren.

Het radicaalpaarmechanisme (RPM) zou een verklaring kunnen zijn voor de lichtafhankelijke magnetische kompasoriëntatie bij trekvogels (Hore & Mouritsen, 2016) en andere taxa, en wordt besproken in de context van verschillende biologische effecten van zwakke magnetische velden (Zadeh-Haghighi & Simon, 2022). In dit model converteren foto-geïnduceerde radicaalparen tussen singlet- en triplettoestanden, afhankelijk van het omringende magnetische veld. Zwakke oscillerende magnetische velden binnen een specifiek frequentie- en amplitudebereik kunnen deze kwantumspindynamica verstoren, waardoor de oriëntatie mogelijk wordt verstoord. Interessant is dat het RPM ook van toepassing is op planten, die reageren op magnetische velden als gevolg van de spindynamica in hun fotoreceptor cryptochroom (Thoradit et al., 2023).

Experimenteel onderzoek toont aan dat zeer zwakke radiofrequente (RF) magnetische velden in het middenfrequentie- (MF) tot zeer hoge frequentiebereik (VHF) de op RPM gebaseerde magnetoreceptie kunnen verstoren bij nachtvliegende zangvogels, wat leidt tot tijdelijke desoriëntatie (Leberecht et al., 2023), en bij planten (Albaqami et al., 2020). Dit effect verdwijnt echter boven ongeveer 116 MHz, ver onder de gigahertzfrequenties die worden gebruikt in mobiele communicatie (Leberecht et al., 2023). Evenzo reageren op magnetiet gebaseerde mechanismen alleen op statische of extreem laagfrequente magnetische velden en worden ze niet beïnvloed door RF-signalen (Shaw et al., 2015). Elektromagnetische inductie is alleen bekend bij bepaalde elasmobranch-vissen die zijn uitgerust met ampullaria en werkt bij lage frequenties in het hertz- tot kilohertz-bereik, ver buiten de telecommunicatiebanden (Anderson et al., 2017).

Samenvattend kan worden gesteld dat biologische magneto- en elektrogevoelige systemen weliswaar een opmerkelijke gevoeligheid voor zwakke velden vertonen, maar dat hun werkfrequentiebereiken

niet overlappen met die welke worden gebruikt in de moderne draadloze communicatie. Het huidige bewijs wijst dus niet op een verhoogde gevoeligheid van dieren of planten voor RF-EMV bij telecommunicatiefrequenties. Niettemin is voortgezet interdisciplinair onderzoek, waarbij biofysische modellering wordt gecombineerd met gedrags- en ecologische studies, essentieel om mogelijke indirecte of cumulatieve effecten te verduidelijken.

7.3 Over niet-zintuiglijke effecten van radiofrequente elektromagnetische velden

Er zijn veel studies uitgevoerd om de schadelijke effecten van RF-EMV bij dieren en planten vast te stellen (Karipidis et al., 2023; Thielens, 2021; Simko & Mattsson, 2019; Cucurachi et al., 2013). Ondanks aanzienlijke inspanningen komen studies die een breed scala aan biologische eindpunten en systemen in aanmerking nemen echter tot zeer uiteenlopende conclusies die over het algemeen nog steeds onvoldoende zijn om een zinvolle veiligheidsbeoordeling te kunnen maken en vragen oproepen over de betrouwbaarheid van de bevindingen. Veel studies zijn namelijk van slechte kwaliteit, ontbreken dosimetrie of geblindeerde experimentele protocollen en essentiële experimentele details, en maken gebruik van kleine experimentele groepen en blootstellingsomstandigheden die verschillen van de werkelijke blootstellingen. Het fysische interactiemechanisme voor de gesuggereerde niet-thermische effecten blijft onduidelijk, waardoor een bottom-up, rationele risicobeoordeling die vergelijkbaar is met die van thermische effecten, onmogelijk is. 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.

Er bestaat wetenschappelijke onenigheid over de vraag of niet-thermische, lage straling biologische effecten heeft en of veiligheidslimieten op basis van thermische effecten voldoende zijn. Er is ook geen consensus over de langetermijneffecten van lage straling op ecosystemen. Sommige studies wijzen op mogelijke risico's voor kwetsbare soorten, met name wat betreft navigatie, voortplanting, kankerrisico's en de gezondheid van ecosystemen. Gezaghebbende instanties die het totale bewijsmateriaal hebben beoordeeld, hebben geconcludeerd dat er momenteel geen consistent, zeer zeker bewijs is voor schade aan flora en fauna bij blootstelling aan milieuniveaus of niet-thermische effecten, maar roepen toch op tot meer gericht, langdurig en gestandaardiseerd ecologisch onderzoek (EPRS PE 690.021, 2021; BfS 2023). In ieder geval is het relevant om te accepteren dat dit een actief onderzoeksgebied is en dat de interpretatie van de resultaten kan variëren. In deze context zijn systematische metastudies waardevol om overkoepelende trends, opkomende patronen, kennislacunes en mogelijke aandachtsgebieden te identificeren. We vatten hier de inzichten van recente studies, gepubliceerd in 2024 en 2025, samen.

Onlangs hebben Karipidis en collega's een systematische kaart samengesteld van alle antropogene bronnen van RF-EMV, inclusief frequenties binnen het gehele RF-bereik van 100 kHz tot 300 GHz (Brzozek et al., 2024). 334 studies, gepubliceerd vóór 2023, kwamen in aanmerking (237 over fauna en 97 over flora) en werden geanalyseerd met betrekking tot 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.

Weller et al. (2025) hebben zeer recent hun scoping review en evidence map gepubliceerd waarin ze *in vivo*-, *in vitro*- en epidemiologische gegevens over blootstelling aan radiofrequente velden (3 kHz-300 GHz) beoordelen met betrekking tot een mogelijk verband met genotoxiciteit. In overeenstemming met de Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses for Scoping Reviews (PRISMA-ScR) hebben de auteurs 517 studies (waarvan 130 van goede kwaliteit) onderzocht en in 59 % van de studies (48 % van de studies van goede kwaliteit) DNA-schade door blootstelling aan RF-EMV vastgesteld, met name schade aan DNA-basen en DNA-strengbreuken. De gevoeligheid voor schade varieerde per celtype, waarbij voortplantingscellen (testiculaire, spermacellen en eicellen) en hersencellen bijzonder kwetsbaar bleken te zijn. Er werd een complexe U-vormige dosis-responsrelatie waargenomen voor zowel de duur als de intensiteit van de blootstelling, wat wijst op een mogelijk probleem bij blootstelling aan RF-EMV met een lage intensiteit (1 dag-3 maanden) en langdurige blootstelling (>3 maanden of 1.000 uur). De auteurs identificeerden ook statistisch significante DNA-schade bij extreem lage intensiteiten ($SAR < 0,001 \text{ W/kg}$), die aanzienlijk (>600.000 keer in individuele gevallen) lager bleken dan de ICNIRP-blootstellingslimieten voor het publiek (2 W/kg voor het hoofd en de romp voor het grote publiek, gemiddeld over 10 gram weefsel). Opvallende studies in deze categorie zijn de studies van Burlaka et al. (2013) en Tsybulin et al. (2013) naar embryo's van Japanse kwartels die *in ovo* werden blootgesteld aan discontinue GSM 900 MHz-velden ($0,25 \mu\text{W/cm}^2$) gedurende 158-360 uur, wat resulteerde in overproductie van reactieve zuurstofspecies, tekenen van oxidatieve stress en veranderde vroege embryogenese. Over het algemeen werd DNA-schade vaker aangetroffen bij *in vivo* studies, bij zeer zwakke of zeer sterke signaalintensiteiten, bij zeer lange of zeer korte blootstellingsduur, bij frequenties van 900, 1800 en 2450 MHz, bij GSM-gespreksmodus en bij gepulseerde modulaties, met name bij gebruik van apparaten uit de praktijk. Hoewel het aantal kleiner was (waardoor de conclusies minder zeker zijn), vertoonden niet-zoogdierstudies, met name studies met planten, insecten, wormen, amfibieën en vogels, een hoog percentage (80-100%) van resultaten die RF-geïnduceerde DNA-schade en oxidatieve stress aantoonde. Evenzo identificeerde 71 % van de insectenstudies statistisch significante effecten op DNA-schade. Het bewijs suggereert ook plausibele mechanistische routes voor DNA-schade, met name door verhoogde productie van vrije radicalen en oxidatieve stress. De evidence map bracht ook een aantal belangrijke hiaten in het onderzoek aan het licht, zoals het beperkte aantal studies naar de genotoxische effecten van RF op niet-zoogdierachtige soorten, waaronder insecten, vogels en bomen. Er zijn ook helemaal geen studies over reptielen en binnen de zoogdieren is er weinig onderzoek gedaan buiten studies met mensen en knaagdieren. Er waren ook veel minder studies die gebruik maakten van hogere frequenties, zoals moderne 5G-technologieën (middenband 3,5 GHz of mmWave

26-40+ GHz), ondanks hun toenemende prevalentie. Het onderzoek loopt dus achter op de technologische vooruitgang, waardoor potentiële risico's grotendeels ononderzocht blijven.

De systematische review van Mevissen et al. (2025), die voldoet aan de PECOS-criteria, concludeert dat er bewijs is voor een verhoogde incidentie van bepaalde vormen van kanker bij proefdieren die zijn blootgesteld aan RF-EMV, met de sterkste bewijskracht ('Certainty of Evidence', CoE) voor kwaadaardige hartschwannomen en gliomen bij mannelijke ratten. Op basis van 52 studies, waaronder 20 chronische bioassays, vonden de auteurs een hoge CoE voor een verhoogd risico op gliomen en hartschwannomen, een matige CoE voor lymfomen, feochromocytomen (bijnier), hepatoblastomen (lever) en longneoplasmata, en minimaal of geen bewijs voor de meeste andere orgaansystemen. De auteurs benadrukken dat het extrapoleren van deze resultaten complex blijft vanwege onzekerheden rond blootstellingsmetriek, dosis-responsrelaties en de onderliggende mechanismen van RF EMV-carcinogeniteit. Ze brengen deze effecten verder in verband met DNA-schade en oxidatieve stress veroorzaakt door de vorming van vrije radicalen, waarmee ze wijzen op een mogelijk biologisch mechanisme.

De systematische review van Danho et al. (2025), eveneens gebaseerd op de PRISMA-richtlijnen, richt zich op de schadelijke effecten van EMV's op levende organismen, zoals gepubliceerd in studies van 2017 tot 2024. De auteurs concluderen dat blootstelling aan EMV's meetbare biologische effecten kan hebben op een reeks levende organismen, waaronder zowel flora als fauna. Bij dieren werden EMV's in verband gebracht met oxidatieve stress, ontstekingen, verminderde vruchtbaarheid, veranderde neuronale activiteit en verstoorde fysiologische processen, terwijl bij planten studies melding maakten van verminderde fotosynthese, groeiveranderingen en cellulaire stressreacties. Hoewel deze bevindingen wijzen op mogelijke ecologische en gezondheidsrisico's in verband met toenemende blootstelling aan EMV's, blijft de algehele zekerheid van het bewijs laag vanwege methodologische variabiliteit en vertekening tussen studies. De auteurs benadrukken de dringende noodzaak van gestandaardiseerd, langdurig en transparant onderzoek om een beter inzicht te krijgen in de effecten van EMV op ecosystemen en om evidence-based beleid op het gebied van milieu en volksgezondheid te kunnen ontwikkelen.

Het komt erop neer dat de primaire literatuur biologisch aannemelijke effecten van RF-EMV (inclusief 5G-frequenties, maar minder onderzocht) bij planten en dieren onder bepaalde laboratoriumomstandigheden aantoont en kwetsbare eindpunten (bestuivers, kleine insecten, zaailinggroei, fotosynthese) en enkele mechanistische overeenkomsten identificeert, maar dat er nog geen robuust, representatief bewijs is dat de huidige 5G-implementaties schade op populatieniveau veroorzaken; Om dit op te lossen zijn gecoördineerde, ecologisch realistische, langetermijnstudies nodig met gestandaardiseerde dosimetrie en aandacht voor bijzonder kwetsbare soorten en levensfasen.

7.4. Over recente bevindingen bij insecten

Er zijn maar weinig studies naar de effecten van RF-EMV op insecten in natuurlijke omgevingen. Eén studie suggereert dat elektromagnetische straling van telecommunicatieantennes de abundantie en samenstelling van verschillende groepen wilde bestuivende insecten in hun natuurlijke habitat op twee Egeïsche eilanden heeft beïnvloed (de abundantie nam af voor kevers, wespen en zweefvliegen en nam toe voor ondergronds nestelende wilde bijen en bijenvliegen; de soortenrijkdom van zweefvliegen nam op één eiland af naarmate de veldsterkte toenam; Lázaro et al., 2016). 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. Vanwege het belang van bestuivers voor de homeostase van ecosystemen, en aangezien er geen systematisch onderzoek is gedaan naar insecten in het bijzonder, terwijl een niet-systematisch onderzoek (Thill et al. 2023) heeft geleid tot controverses over de interpretatie van bewijsmateriaal (Spotlight, mei/2024 nr. 2), vatten we hieronder een aantal recente studies samen die RF/5G-relevante frequenties testen.

Treder et al. (2023) stelden honingbijenkolonies bloot aan gesimuleerde RF-EMV (2,45 & 5,805 GHz). In een geblindeerd veldonderzoek met een speciaal gebouwde stralingssimulator (Wi-Fi-pakketten op 2,45 GHz en 5,805 GHz; EIRP $\approx$ 177,8 mW bij 2,45 GHz en 10 mW bij 5,805 GHz, continue blootstelling gedurende weken voorafgaand aan de tests) verminderde langdurige blootstelling het succes van honingbijen bij het terugvinden van hun nest (controle terugkeer $\sim$ 95,2% vs. blootgesteld $\sim$ 78,6%) en nam de tijd die nodig was om het nest terug te vinden toe ($\sim$ 20% langer), terwijl de ontwikkeling van het broedsel en de levensduur van volwassen werksters niet werden beïnvloed; kortdurende (40 min.) bestraling leidde niet tot een verminderd vermogen om het nest terug te vinden. De auteurs stellen dat langdurige, veldrealistische blootstelling de oriëntatie/gedragsresultaten kan veranderen, zelfs wanneer de grove koloniecijfers ongewijzigd blijven, en zij benadrukken de noodzaak van zorgvuldige dosimetrie en replicatie.

Meer recentelijk rapporteerden Treder et al. (2025) de resultaten van hun tweejarige, geblindeerde veldstudie waarin de effecten van realistische blootstelling aan 2,4 en 5,8 GHz met een gestandaardiseerde stralingsbron op het bezoek van bijen aan bloemen werden getest. Ze *vonden* geen effect op het bezoek van honingbijen aan *Salvia* en *Lavandula*, maar wel een significante vermindering van het aantal bloembezoeken door hommels (*Bombus* sp.) per observatie wanneer planten werden bestraald, waarbij in totaal 2.882 bestuivers werden gedocumenteerd, wat een taxonspecifieke kwetsbaarheid aan het licht bracht. De auteurs riepen op tot mechanistische vervolgstudies en merken op dat subletale veranderingen in het foerageergedrag kunnen uitgroeien tot ecologische effecten als ze worden gerepliceerd en aanhouden.

Vilić et al. (2024) rapporteerden dat langdurige blootstelling aan 900 MHz in het veld oxidatieve stress veroorzaakt bij honingbijen. In een veldonderzoek van een jaar naar 15 kolonies op locaties met verschillende blootstelling aan het niveau van basisstations, vonden onderzoekers biomarkers van oxidatieve stress (bijv. veranderde antioxidant-enzymniveaus), vooral bij larven, wat erop wijst dat ontwikkelingsstadia mogelijk gevoeliger zijn; de effecten waren niet strikt dosis-lineair en de auteurs waarschuwen voor versturende factoren in veldonderzoeken, maar benadrukken mogelijke subletale fysiologische effecten bij chronische blootstelling.

7.5. Algemene aanbeveling

In reactie op bezorgdheid over de mogelijke effecten van 5G-netwerken op flora en fauna wordt een veelzijdige aanpak aanbevolen, met voorzorgsmaatregelen, uitgebreide observatie en gericht beleid. Aangezien de huidige veiligheidsrichtlijnen, die grotendeels zijn gebaseerd op de aanbevelingen van de ICNIRP, voornamelijk gericht zijn op thermische effecten bij mensen, is er een erkende behoefte aan specifieke richtlijnen voor milieubescherming (Vornoli et al., 2022). De huidige kennis is echter te beperkt en er is verder onafhankelijk, multidisciplinair onderzoek nodig, met name in de context van chronische blootstelling en mogelijke niet-thermische effecten op flora en fauna. Dergelijk onderzoek

moet de kennislacunes aanpakken die aan het licht zijn gekomen in recente systematische reviews, waaronder die over insecten, vogels, niet-knaagdierachtige zoogdieren en mechanistische routes (Weller et al., 2025), zoals hierboven besproken. Nationale en internationale beleidsmakers moeten daarom de nodige basis leggen door duurzame financiering te verstrekken voor hoogwaardig, grootschalig onderzoek.

Op lokaal niveau moeten gebieden met ecologisch kwetsbare ecosystemen (zoals wetlands, bossen, hotspots voor bestuivers en habitats van bedreigde diersoorten) worden geïdentificeerd en specifiek in aanmerking worden genomen in de strategie voor de uitrol van 5G. Totdat er meer sluitende gegevens beschikbaar zijn over de mogelijke effecten op de lokale flora en fauna, moeten de stralingsniveaus in deze kritieke habitats zoveel mogelijk worden beperkt, waarbij hoogfrequente (5G) technologieën idealiter worden beperkt in bestuivingshotspots. Bij de plaatsing van infrastructuur moet rekening worden gehouden met zowel de flora als de fauna, door torens en kleine cellen strategisch te plaatsen, weg van kwetsbare habitats zoals vogelroutes, nestplaatsen van insecten, zones met unieke plantensoorten en natuurreservaten. Voor kritieke habitats moet verplichte gedeelde gebruik van telecommunicatie-infrastructuur door providers worden overwogen als een middel om de cumulatieve blootstelling aan EMV te verminderen, zelfs als de huidige blootstellingslimieten niet worden overschreden door overlappende apparatuur. Opkomende technologieën, zoals beamforming, slim resourcebeheer en energiezuinige (nachtmodus) werking, moeten worden benut om de totale RF-EMV-vermogensniveaus te verminderen (Singh et al., 2025), met name in ecologisch kwetsbare zones. In dit opzicht zou 5G een voordeel kunnen bieden door transmissies met een lager vermogen en een grotere doelgerichtheid mogelijk te maken, maar de risico's die gepaard gaan met hogere frequenties (waaronder millimetergolven) moeten ook worden beoordeeld (Froidevaux et al., 2023).

De stralingsniveaus moeten systematisch worden gemonitord, niet alleen boven de drempelwaarde voor thermische effecten, maar met de nadruk op de micro-omgevingen waarin kwetsbare organismen leven. Dit omvat het meten van RF-EMV-niveaus in verschillende omgevingen: uitsluitingszones rond zendmasten, natuurlijke habitats in stedelijke en landelijke gebieden, broedgebieden voor vogels en bestuivingszones. Er zijn gerichte in-situ meetcampagnes nodig om RF-EMV en de daarmee samenhangende statische elektrische en magnetische velden van meerdere antropogene bronnen te kwantificeren. Eerdere onderzoeken hebben namelijk aangetoond dat de blootstelling aan EMV bij ooievaarsnesten aanzienlijk varieert naargelang de afstand tot en de oriëntatie ten opzichte van antennes, wat de complexiteit van de blootstelling in de praktijk onderstreept (Balmori, 2021; Durusoy et al., 2016). Hoewel blootstellingsmetingen op zich geen biologische schade verminderen, bieden ze essentiële contextuele informatie over de blootstelling en de gegevens die nodig zijn om een vergelijking te maken met laboratoriumstudies. Deze gegevens moeten openbaar worden gemaakt. Wat netwerkuitbreidingen betreft, moet prioriteit worden gegeven aan het gebruik van bestaande telecommunicatie-infrastructuur om nieuwe aanleg tot een minimum te beperken. Wanneer nieuwe locaties nodig zijn, moeten deze worden geplaatst in minder gevoelige gebieden, uit de buurt van bekende broedplaatsen, nestplaatsen en ecologisch belangrijke flora. Maatregelen voor het monitoren en beperken van RF-EMV moeten worden geïntegreerd in nationale biodiversiteitsstrategieën, instandhoudingsdoelstellingen en beheersplannen voor beschermde gebieden om ervoor te zorgen dat de potentiële ecologische effecten van 5G naast andere milieustressfactoren in aanmerking worden genomen.

Er moeten programma's voor de monitoring van de biodiversiteit worden opgezet en gecombineerd met systematische blootstellingsmetingen. Er moeten langetermijnmonitoringprogramma's worden uitgevoerd om veranderingen in de biodiversiteit, de gezondheid van soorten en de populatieaantallen na de invoering van 5G te volgen, met name voor lokale insecten en vogels. Dergelijke inspanningen kunnen worden ondersteund door burgerwetenschappelijke initiatieven om uitgebreide observatiegegevens te verzamelen (bijvoorbeeld het volgen van de activiteit van bestuivers of vogelwaarnemingen en migratiepatronen) in verband met de nabijgelegen 5G-infrastructuur. Een mogelijk model is het 'EU Horizon Europe'-project ETAIN in Griekenland (<https://www.etaiproject.eu/>), dat het vangen van insecten in gebieden met constante blootstelling aan RF-EMV monitort en gecontroleerde experimenten met bijenkasten in zowel blootgestelde als niet-blootgestelde omgevingen omvat. Een soortgelijk initiatief zou lokaal kunnen worden gerealiseerd met bescheiden financiële middelen.

Gezien de aanzienlijke kennislacunes met betrekking tot de effecten van RF-EMV op flora en fauna, zouden beleidsmakers in het algemeen het voorzorgsbeginsel moeten hanteren, wat betekent dat zij bij onzekerheid preventieve maatregelen moeten nemen en blootstelling waar mogelijk tot een minimum moeten beperken. Dit zou kunnen worden uitgebreid tot een tijdelijk moratorium op de uitrol van 5G in gebieden met kwetsbare ecosystemen, totdat de mogelijke effecten grondig zijn onderzocht en gemitigeerd. Verder wordt aanbevolen om transparante milieuraapportage af te dwingen (met inbegrip van energieverbruik, RF-EMV-emissieniveaus en operationele netwerkaspecten). Uiteindelijk kunnen de huidige lacunes in kennis alleen worden opgelost door de ontwikkeling en implementatie van specifieke blootstellingslimieten voor RF-EMV voor flora en fauna, die verschillen van de op de mens gerichte richtlijnen voor thermische effecten. Gezien de huidige stand van kennis is het echter onwaarschijnlijk dat dergelijke specifieke limieten in de nabije toekomst zullen worden vastgesteld (Panagopoulos et al., 2021).

7.6. Opmerkingen en aanbevelingen over de samengevatte richtsnoeren voor de installatie van EM-antennes in Natura 2000-gebieden

Hier hebben we het over 'Mobile Phone Installations in the Natura 2000 Context – Phases II and III: Mitigation Measures and Biodiversity Characterisation Form', zoals verstrekt in de versie van 9 april 2025 (referentienummer: C1306). Deze samengevatte richtsnoeren hebben betrekking op de plaatsing/upgrade van EM-antennes in speciale beschermingszones (SBZ) van Natura 2000, omliggende bufferzones (met een breedte van 60 m) en natuureservaten of bosreservaten.

Het initiatief vormt een belangrijke en constructieve stap in de richting van het verzoenen van technologische ontwikkeling met de bescherming van de biodiversiteit binnen Natura 2000-gebieden. De voorgestelde mitigatiemaatregelen, die gericht zijn op het beperken van geluid, licht, vervuiling en verstoring van habitats, zijn goed ontworpen en weerspiegelen een sterk engagement om de ecologische impact te verminderen en tegelijkertijd de continuïteit van essentiële communicatie-infrastructuur te behouden.

Het gestructureerde kader dat operatoren wordt geboden om milieugevoeligheden te identificeren en gerichte mitigatiemaatregelen te implementeren, is duidelijk uiteengezet. De verstrekte checklists en gedetailleerde factsheets zijn gebruiksvriendelijk en kunnen het bewustzijn onder belanghebbenden bevorderen.

In het algemeen zal het initiatief er dus voor kunnen zorgen dat bij werkzaamheden aan mobiele telefooninstallaties in Natura 2000- en aanverwante gebieden voldoende rekening wordt gehouden met preventieve benaderingen van milieubeheer en het zal blijken geven van een aanzienlijke inspanning om duurzaamheidsbeginselen in de digitale infrastructuursector in praktijk te brengen.

De mitigatiemaatregelen zijn algemeen en vereisen geen ecologische basisgegevens of soorteninventarisaties voorafgaand aan de toepassing. Dit kan een ontwerpkeuze zijn geweest, maar een focus op de feitelijke ecologische kwetsbaarheid van de specifieke locatie zou de voorkeur verdienen. Bovendien lijkt het aan de aanvrager te zijn om te bepalen welke soorten specifieke voorzorgsmaatregelen vereisen. Het wordt daarom aanbevolen om eerst de ecologische basisgegevens vast te stellen en hiernaar te verwijzen in de aanvraag, al was het maar om de aandacht te vestigen op de soorten die bijzondere aandacht verdienen. Dit zou kunnen worden gerealiseerd door middel van een inventarisatie van kwetsbare taxa en habitats binnen de Natura 2000-SBZ (en bufferzones en mede in aanmerking genomen bos- en natuurreservaten), idealiter gekoppeld aan BruGIS, of door middel van een verplichte ecologische screening (bijvoorbeeld een snelle habitatbeoordeling) van de betreffende locaties die regelmatig moet worden bijgewerkt.

We hebben ook de indruk dat in de richtsnoeren te weinig aandacht wordt besteed aan cumulatieve en indirecte effecten, ondanks de wettelijke verplichting om significante effecten te beperken die niet alleen voortvloeien uit individuele projecten, maar ook in combinatie met andere plannen of projecten. De richtsnoeren moeten dus de noodzaak onderkennen om cumulatieve effecten van meerdere telecommunicatie-infrastructuren en toegangswegen binnen of nabij Natura 2000-gebieden te beoordelen, bijvoorbeeld op basis van de nabijheid van andere bestaande of geplande EM-installaties (bijvoorbeeld binnen 500 m). Bovendien moeten de richtsnoeren trachten visuele verstoringen of microklimatologische fragmentatie, zoals die kunnen ontstaan door toegangswegen en meerdere installaties, tot een minimum te beperken.

De richtsnoeren moeten verder worden uitgebreid om ook rekening te houden met de ontmanteling van oude installaties, waarbij moet worden gekeken naar de verwijdering van ontmantelingsafval, bodemsanering en herstel van habitats.

Hoewel de richtsnoeren voldoende aandacht besteden aan bouwgerelateerde effecten (geluid, licht, verstoring van habitats), gaan ze helemaal niet in op mogelijke EMV-effecten op wilde dieren, ondanks dat ze antennespecifiek zijn. Hoewel het waar is dat het bewijs gemengd is en het onderzoek nog gaande is, wijst het gecombineerde bewijs erop dat antropogene RF-EMV-effecten waarschijnlijk zijn en dat de richtlijnen voor blootstelling van mensen (ICNIRP/WHO) niet noodzakelijkerwijs milieubeschermingsdrempels voor wilde dieren bieden. Dit pleit voor een voorzorgsbenadering op basis van risico's, met name in beschermde natuurgebieden, met als doel de blootstelling zoveel mogelijk te beperken. Het risico kan worden vastgesteld door RF-propagatiekaarten uit blootstellingsmodellen te beoordelen in combinatie met informatie over ecologische hotspots (zie soorteninventarisatie hierboven), met als doel de overlap te minimaliseren door alternatieve plaatsing en oriëntatie (bijvoorbeeld door te voorkomen dat krachtige antennes in de directe omgeving van bekende nest- en rustplaatsen worden geplaatst). Er wordt ook opgemerkt dat door het niet opnemen van EMV-overwegingen in de richtsnoeren een kans wordt gemist om mogelijke interferentie te beperken door middel van technische maatregelen, zoals het gebruik van sterk gerichte antennes en straalvorming om de straling op de grond en in het luchtruim dat door wilde dieren wordt gebruikt tot een minimum te beperken; vermogensbeheer om het zendvermogen te verminderen tot het

minimum dat nodig is om dekking te bereiken; vermogensvermindering buiten de piekuren; enz. Er moet worden gewerkt aan de integratie van dergelijke concepten in de richtlijnen, niet alleen in de milieueffectbeoordeling bij de bouw van nieuwe masten, maar bij alle antennegerelateerde upgrades.

Tot slot merken we op dat sommige formuleringen vaag zijn, waardoor de afdwingbaarheid en vergelijkbaarheid tussen projecten wordt beperkt. Zo is bijvoorbeeld 'geluidsoverlast beperken' dubbelzinnig, aangezien naleving niet verifieerbaar is en de vraag open blijft of de verklaring verwijst naar technische haalbaarheid of naar de interpretatie daarvan door de aannemer. Bovendien lijkt het formulier te veel te vertrouwen op zelfverklaringen en is het niet duidelijk of er een rapportageverplichting is en of de adequate uitvoering van maatregelen wordt gecontroleerd.

Bibliografie

Albaqami, M., Hammad, M., Pooam, M. *et al.* (2020). *Arabidopsis* cryptochrome is responsive to Radiofrequency (RF) electromagnetic fields. *Sci Rep* **10**, 11260. Doi: 10.1038/s41598-020-67165-5.

Anderson, J.M., Clegg, T.M., Véras, L.V.M.V.Q. *et al.* (2017). Insight into shark magnetic field perception from empirical observations. *Sci Rep* **7**, 11042. Doi: 10.1038/s41598-017-11459-8.

Balmori, A. (2015). Anthropogenic radiofrequency electromagnetic fields as an emerging threat to wildlife orientation. *Science of the Total Environment*, 518–519, 58–60. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.02.077.

Balmori, A. (2021). Electromagnetic radiation as an emerging driver factor for the decline of insects. *Science of the Total Environment*, 767, 144913.

BfS, Federal Office for Radiation Protection, Germany, (2023). Possible effects of electromagnetic fields on plants and animals. <https://www.bfs.de/EN/bfs/science-research/emf/statements/emf-animals-and-plants.html>.

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.

Burlaka A, Tsybulin O, Sidorik E, Lukin S, Polishuk V, Tsehmistrenko S, et al. Overproduction of free radical species in embryonal cells exposed to low intensity radiofrequency radiation. *Exp. Oncol.* (2013) 35:219–25.

Colombi, D., Thors, B., & Törnevik, C. (2015). Implications of EMF exposure limits on output power levels for 5G devices above 6 GHz. *IEEE Antennas and Wire-less Propagation Letters*, 14, 1247–1249. Doi: 10.1109/LAWP.2015.2400331.

Cucurachi S, Tamis WL, Vijver MG, Peijnenburg WJ, Bolte JF, de Snoo GR. 2013. A review of the ecological effects of radiofrequency electromagnetic fields (RF-EMF). *Environ Int.* 51, 116-40. Doi: 10.1016/j.envint.2012.10.009.

Danho, S., Huertas, J. F. E., Schoellhorn, W. I., & Schoellhorn, W. (2025). A Systematic Review of the Impact of Electromagnetic Waves on Living Beings. *Cureus*, 17(8).

De Borre E, Joseph W, Aminzadeh R, Müller P, Boone MN, Josipovic I, Hashemizadeh S, Kuster N, Kühn S, Thielens (2021). A. Radio-frequency exposure of the yellow fever mosquito (*A. aegypti*) from 2 to 240 GHz. *PLoS Comput. Biol.* 17:e1009460.

Di Ciaula, A. (2018). Towards 5G communication systems: Are there health implications? *Int. J. Hyg. Environ. Health* **221**, 367-375. Doi: 10.1016/j.ijheh.2018.01.011.

Durusoy, R., Onmus, O., Hassoy, H., & Sürücü, B. (2016). Electromagnetic field exposure of White stork nests and possible impacts on their breeding success and development. In *ISEE Conference Abstracts* 28 , P1-327.

EPRS, European Parliamentary Research Service, Scientific Foresight Unit (2021). Environmental impacts of 5G: A literature review of effects of radio-frequency electromagnetic field exposure of non-human vertebrates, invertebrates and plants. PE 690.021.

Froidevaux, J. S., Recuero Virto, L., Czerwiński, M., Thielens, A., & Park, K. J. (2023). Addressing wildlife exposure to radiofrequency electromagnetic fields: time for action. *Environmental Science & Technology Letters*, 11(1), 3-4.

Halgamuge, M. N. (2017). Review: Weak radiofrequency radiation exposure from mobile phone radiation on plants. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 36(2), 213–235. Doi: 10.1080/15368378.2016.1220389

Herssens, N., Thielens, A., Tanghe, E., Martens, L., & Joseph, W. (2022). Modelling of the absorption of radiofrequency electromagnetic fields in insects up to 300 GHz. *Scientific Reports*, 12(1), 327. Doi: 10.1038/s41598-021-04202-5

Hore, P. J., & Mouritsen, H. (2016). The radical-pair mechanism of magnetoreception. *Annual review of biophysics*, 45(1), 299-344.

ICNIRP (2020). Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz). *Health Phys.* 118(5):483-524.

Jeladze, V., Nozadze, T., Partsvania, B., Thielens, A., Shoshiashvili, L., & Gogoladze, T. (2025). Numerical dosimetry of specific absorption rate of insects exposed to far-field radiofrequency electromagnetic fields. *International Journal of Radiation Biology*, **101**, 327–340, doi: 10.1080/09553002.2024.2442693.

Karipidis, K., Brzozek, C., Mate, R. *et al.* (2023). What evidence exists on the impact of anthropogenic radiofrequency electromagnetic fields on animals and plants in the environment: a systematic map. *Environ Evid* **12**, 9, doi:10.1186/s13750-023-00304-3.

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

Mevissen, M., Ducray, A., Ward, J. M., Kopp-Schneider, A., McNamee, J. P., Wood, A. W., ... & Straif, K. (2025). Effects of radiofrequency electromagnetic field exposure on cancer in laboratory animal studies, a systematic review. *Environment International*, 109482.

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, 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, 39-52.

Simko, M., & Mattsson, M.-O. (2019). 5G wireless communication and health effects—A pragmatic review based on available studies regarding 6 to 100 GHz. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(18), 3406. Doi: 10.3390/ijerph16183406.

Shaw, J., Boyd, A., House, M., Woodward, R., Mathes, F., Cowin, G., Saunders, M. Baer B. (2015). Magnetic particle-mediated magnetoreception. *J. R. Soc. Interface*.1220150499.

Singh, H., Singh, R., Assaf, M., & Kumar, S. (2025). Signal analysis techniques to minimize electromagnetic radiation in 5G mobile networks. *Cureus Journal of Engineering*, 2, es44388-025-06744-6.

Spotlight (2024). Spotlight on “Biological effects of electromagnetic fields on insects: a systematic review and meta-analysis” by Thill et al. in Reviews on Environmental Health (2023).

Thielens, A., Bell, D., Mortimore, D. B., Greco, M. K., Martens, L., & Joseph, W. (2018). Exposure of insects to radio-frequency electromagnetic fields from 2 to 120 GHz. *Scientific reports*, 8(1), 3924.

Thielens, A., Greco, M. K., Verloock, L., Martens, L., & Joseph, W. (2020). Radio-frequency electromagnetic field exposure of western honey bees. *Scientific reports*, 10(1), 461.

Thielens A. (2021). Environmental impacts of 5G. A literature review of effects of radio-frequency electromagnetic field exposure of non-human vertebrates, invertebrates and plants. STOA, European Parliament.

Thill, A., Cammaerts, M. C., & Balmori, A. (2024). Biological effects of electromagnetic fields on insects: a systematic review and meta-analysis. *Reviews on Environmental Health*, 39(4), 853-869.

Thoradit T, Thongyoo K, Kamoltheptawin K, Tunprasert L, El-Esawi MA, Aguida B, Jourdan N, Buddhachat K and Pooam M (2023) Cryptochrome and quantum biology: unraveling the mysteries of plant magnetoreception. *Front. Plant Sci.* 14:1266357. Doi: 10.3389/fpls.2023.1266357.

Treder, M., Müller, M., Fellner, L., Traynor, K., & Rosenkranz, P. (2023). Defined exposure of honey bee colonies to simulated radiofrequency electromagnetic fields (RF-EMF): Negative effects on the homing ability, but not on brood development or longevity. *Science of The Total Environment*, 896, 165211.

Treder, M., Glück, M., England, S. J., & Traynor, K. S. (2025). Radiofrequency electromagnetic fields reduce bumble bee visitation to flowers. *Environmental Pollution*, 126836.

Tsybulin O, Sidorik E, Brieieva O, Buchynska L, Kyrylenko S, Henshel D, et al. (2013). GSM 900 MHz cellular phone radiation can either stimulate or depress early embryogenesis in Japanese quails depending on the duration of exposure. *Int. J. Radiat. Biol.* 89:756–63. Doi: 10.3109/09553002.2013.791408.

Vian, A., Davies, E., Gendraud, M., & Bonnet, P. (2016). Plant responses to high frequency electromagnetic fields. *BioMed Research International*, 1830262. Doi: 10.1155/2016/1830262.

Vilić, M., Žura Žaja, I., Tkalec, M., Tucak, P., Malarić, K., Popara, N., ... & Gajger, I. T. (2024). Oxidative Stress Response of Honey Bee Colonies (*Apis mellifera* L.) during Long-Term Exposure at a Frequency of 900 MHz under Field Conditions. *Insects*, 15(5), 372.

Waldmann-Selsam, C., Balmori-de la Puente, A., Breunig, H., & Balmori, A. (2016). Radiofrequency radiation injures trees around mobile phone base stations. *Science of the Total Environment*, 572, 554–569. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.08.045.

Weller SG, McCredden JE, Leach V, Chu C and Lam AK (2025) A scoping review and evidence map of radiofrequency field exposure and genotoxicity: assessing *in vivo*, *in vitro*, and epidemiological data. *Front. Public Health* 13:1613353. Doi: 10.3389/fpubh.2025.1613353.

Zadeh-Haghighi, H., & Simon, C. (2022). Magnetic field effects in biology from the perspective of the radical pair mechanism. *Journal of the Royal Society Interface*, 19(193), 20220325.

Zhong, Z., Wang, X., Yin, X., Tian, J., & Komatsu, S. (2021). Morphophysiological and proteomic responses on plants of irradiation with electromagnetic waves. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(22), 12239.