



Marktverkenning onbemande luchtvaartuigen

Toepassingen en impact op frequentiespectrum

**Ir. Tommy van der Vorst, Ir. Jan van Rees, Jasper Ott MSc,
Tom Verboon MSc, Bernard Snaauw BSc**

Opdrachtgever:
Rijksinspectie
Digitale Infrastructuur

Publicatienummer:
2022.138.2302 v1.0.1543

Datum:
Utrecht, 29 maart 2023

Inhoudsopgave

Managementsamenvatting	3
Management summary	5
1 Inleiding	7
1.1 Onderzoeksvragen	7
1.2 Definities en afbakening	7
1.3 Achtergrond	8
1.4 Leeswijzer.....	9
2 Methodologie	10
3 Toepassingen en trends	12
3.1 Voorziene toepassingen	12
3.2 Operationele concepten	17
3.3 Vertaling naar de Nederlandse context .	18
4 Communicatiebehoefte	25
4.1 C2-communicatie	25
4.2 Payloadcommunicatie	28
4.3 Positierapportage en andere diensten ...	31
5 Spectrumimpact.....	36
5.1 Communicatiemodi	36
5.2 Internationaal.....	48
5.3 Conclusie	49
6 Conclusie	52
6.1 Beantwoording onderzoeksvragen	52
6.2 Aanbevelingen.....	54
7 Verwijzingen.....	57
Bijlage 1. Overzicht gesprekspartners..	60

Citeren als: Dialogic, van der Vorst, Tommy, van Rees, Jan, Ott, Jasper, Verboon, Tom & Snaauw, Bernard (2023). *Marktverkenning onbemande luchtvaartuigen: toepassingen en impact op frequentiespectrum*. Groningen: Rijksinspectie Digitale Infrastructuur.

Managementsamenvatting

De Rijksinspectie Digitale Infrastructuur (RDI) heeft Dialogic gevraagd onderzoek uit te voeren naar de ontwikkelingen op het gebied van toepassingen voor onbemande luchtvaartuigen (UAS, drones), en tot welke toekomstige frequentiespectrumbehoefte dit zou kunnen leiden. Dialogic heeft dit samen met To70 onderzocht op basis van literatuurstudie en interviews met experts in de luchtvaartsector.

Toepassingen van drones

Ontwikkelingen op het gebied van dronetoepassingen laten zich onderverdelen in een aantal

(hoofd)categorieën. De verwachtingen van de omvang van de markt en daarmee het aantal drones verschilt sterk per categorie (zie onderstaande tabel). De aantallen hangen daarnaast sterk af van de *business case* voor toepassingen en de mate waarin wordt geïnvesteerd in snelle uitrol van dienstverlening (zoals bijvoorbeeld bij flitsbezorgers gebeurde). Inzet door overheden vanuit wettelijke taken is met name te verwachten in de categorieën infrastructuurinspectie (waaronder bijvoorbeeld ook de kustlijn en douanetoepassingen) en tijdens calamiteiten.

Toepassing	Mogelijke implementatoren	Vanaf	Waar	Aantal (2035)
Personenvervoer	Private aanbieders: Volocopter, XPeng	2040 – 2050	Shuttlediensten, bijvoorbeeld tussen vliegveld en stad	0-10
Pakketbezorging	Pakketbezorgers: PostNL, UPS, DHL, e.a.	2035 – 2050	<i>Last mile transport</i> : Vanaf city-hubs naar woningen/bedrijven	2.000-3.000
Medisch transport	ANWB	2023	Tussen ziekenhuizen en andere zorginstellingen	50-100
Landbouw	Boeren en 'as a service' dienstverleners	2025	Boven landbouwgrond	1.000-2.000
Infrastructuurinspectie	Rijkswaterstaat, TenneT, ProRail	Nu	Snelwegen, spoor, dijken, kustlijn	200-400
Calamiteiten	Politie, brandweer, ambulance	Nu	Havengebieden, vliegvelden, kustgebieden, verkeersknooppunten, tijdens grotere evenementen	2.000-2.500

Draadloze communicatiebehoefte

De communicatiebehoefte van drones bestaat uit een aantal componenten:

- **Besturingscommunicatie (CNPC, Command & Control, hierna C2).** Hierbij gaat het om het doorgeven van stuurbewegingen en sensorgegevens. De benodigde bandbreedte is beperkt, maar de communicatie is wel kritiek.
- **C2-videocommunicatie.** Wanneer een drone buiten zicht vliegt (BVLOS) en handmatig wordt bestuurd, is de videoverbinding eveneens cruciaal. Deze vorm van communicatie vraagt (afhankelijk van de kwaliteit) enkele Mbit/s aan bandbreedte.
- **Payloadcommunicatie.** Dit betreft de applicatiespecifieke gegevensuitwisseling, zoals bijvoorbeeld livebeelden van een warmtecamera. Deze communicatie is bij de meeste toepassingen minder kritiek en is naar verwachting

aanbodedreven (wanneer hoge capaciteit beschikbaar is zal deze worden gebruikt).

- **Positierapportage.** Drones en andere luchtvaart geven via specifiek hiervoor ontwikkelde systemen hun positie door aan het luchtverkeersleidingssysteem binnen U-space en anderen in de directe omgeving.

Communicatiemodi

Om de communicatiebehoefte in te vullen bestaat een aantal mogelijkheden:

- **Rechtstreekse communicatie.** Dit ligt voor de hand bij operatie in het zicht (VLOS), op basis van propriëtaire protocollen of Wi-Fi, in de 2,4 GHz-band, voor zowel C2- als payloadcommunicatie. Hierbij speelt dat de vermogenslimiet in de EU substantieel lager is dan in de VS voor deze band. In de toekomst zou de 5.030 - 5.091 MHz-band

eveneens een rol kunnen spelen bij deze communicatievorm.

- **Communicatie via mobiele netwerken.** Dit ligt voor de hand bij operatie voorbij zicht (BVLOS), en kan plaatsvinden op basis van LTE/5G. Voor C2-communicatie is gegarandeerde netwerkcapaciteit en -kwaliteit (QoS) nodig. Om hoge capaciteit te realiseren voor C2-video- en payloadcommunicatie is aanpassing van de (radio)netwerken noodzakelijk. Binnen 3GPP worden diverse functies specifiek voor drones ontwikkeld voor onder andere positierapportage. Een proprietair netwerk in de 5.030 – 5.091 MHz-band zou een alternatieve invulling kunnen zijn.
- **Satellietcommunicatie.** Hiervoor bestaan verschillende mogelijkheden, zowel op basis van LEO- als GEO-satellieten. Satellietcommunicatie kan naar verwachting als back-up voor mobiele verbindingen die bij BVLOS worden ingezet.
- **Uitzenden van positie-informatie.** Dit zal gebeuren op basis van technologieën in de 2,4 GHz-band (Remote ID op basis van Bluetooth LR en Wi-Fi), ADS-B Out (1.090 MHz) en de SRD-860-band (ADS-L). Mogelijk speelt ook ADS-B UAT (978 MHz) een rol.
- **Laser links.** Deze kunnen in de toekomst worden ingezet om betrouwbare verbindingen met drones te realiseren (resistent tegen jamming en andere verstoringen).

Mogelijke bedreigingen en knelpunten

Wanneer we kijken naar het spectrumgebruik voor communicatie met drones in U-space zien we een aantal mogelijke bedreigingen en knelpunten:

1. Het gelijktijdig gebruik van propriëtaire protocollen en Wi-Fi in dezelfde ISM-band kan leiden tot inefficiënt gebruik van het spectrum.
2. Het gebruik van de ISM-banden voor directe punt-puntcommunicatie met drones zou in specifieke situaties negatieve gevolgen kunnen hebben voor de capaciteit van het gebruik hiervan op de grond (met name door Wi-Fi-netwerken). Daarnaast kan de capaciteit van het spectrum een beperking vormen wanneer er een groot aantal drones tegelijkertijd hoge bandbreedtes nodig heeft.
3. Het gebruik van miniradar op drones in de 60 GHz-band kan beperkte gevolgen hebben voor ander gebruik van de band.
4. De mobiele netwerken zijn op dit moment nog niet geoptimaliseerd voor het gebruik voor communicatie met drones. Het gebruik door drones kan negatieve gevolgen hebben voor de capaciteit op de grond. Het gebruik van de 3,5 GHz-band kan hierbij impact hebben op radiohoogtemeters; dit probleem is echter oplosbaar en waarschijnlijk van voorbijgaande aard.
5. De beschikbaarheid van de 978 MHz -band voor ADS-B UAT is onduidelijk.
6. Het gebruik van de SRD-860-band voor positiedoorgifte kent mogelijk capaciteitsbeperkingen. Hetzelfde zou gelden voor ADS-B op 1.090 MHz en in bredere zin voor vermenging van het gebruik van frequentieruimte door bemande en onbemandede luchtvaart. Het lijkt er voorsnog niet op dat drones binnen het U-spaceconcept in banden voor bemandede luchtvaart gaan zenden.

Aanbevelingen

Uit het onderzoek komt een aantal aanbevelingen naar voren voor RDI:

1. Stimuleer de inzet van moderne standaarden die (op basis van *resource blocks/elements*, richtantennes en *beamforming*) efficiënter gebruik van spectrum door/met drones mogelijk maken en bedreigingen verminderen. Specifiek zou de inzet van Wi-Fi 6 in de 2,4 GHz-band een positief effect kunnen hebben.
2. Monitor in hoeverre er bij dronestoepassingen met een rechtstreekse verbinding behoefte bestaat naar groter bereik/hogere capaciteit.
3. Monitor in hoeverre de mobiele netwerkopera-tors capaciteits- en kwaliteitsgaranties aanbieden die nodig zijn voor C2-verkeer en andere communicatiebehoefte van bijvoorbeeld drones van hulpdiensten.
4. Informeer de markt over de (Europese) status van de ADS-B UAT-band (978 MHz). Blijf de Europese ontwikkelingen op dit vlak monitoren zodat tijdig kan worden geacteerd wanneer de band in andere landen voor UAS-positierapportage wordt ingezet.
5. Informeer de markt over hoe de 5.030 – 5.091 MHz-band in Nederland kan worden ingezet voor drones, zodra op dit vlak ontwikkelingen zijn in internationaal verband.
6. Onderzoek, afhankelijk van ontwikkelingen in U-Space, eventuele capaciteitsbeperkingen in de SRD-860-band.

Management summary

The Dutch Authority for Digital Infrastructure (RDI) has asked Dialogic to study the developments in the field of applications for unmanned aerial vehicles (drones, UAS), and the future frequency spectrum needs this could lead to. Dialogic investigated this together with To70 through literature study and interviews with experts in the aviation sector.

Applications of drones

Developments in the field of drone applications can be divided into several categories. The expectations of the size of the market and therefore the number

of drones differ greatly per category (see table below). The numbers also depend strongly on the *business case* for applications and the extent to which investments are made in the rapid roll-out of services (as seen earlier with flash delivery companies, for example).

Use by governments in the context of legal tasks is to be expected in the categories of infrastructure inspection (including, for example, the coastline and customs) as well as during calamities.

Application	Potential implementors	Expected by	Location(s)	Number of drones (2035)
Passenger transport	Private service providers such as Volocopter, XPeng	2040 – 2050	Shuttle services, for example between airport and city centre	0-10
Parcel delivery	Parcel delivery companies such as PostNL, UPS, DHL	2035 – 2050	<i>Last mile transport</i> : between city hubs and residential areas/companies	2.000-3.000
Medical transport	ANWB	2023	Between hospitals and other care locations	50-100
Agriculture	Farmers as well as agricultural service providers	2025	Above agricultural zones	1.000-2.000
Infrastructure inspection	Rijkswaterstaat, TenneT, ProRail	Nu	Highways, railways, dikes, coastline	200-400
Calamities	Police, fire department, ambulance service	Nu	Harbours, airports, coastlines, traffic hotspots, during larger events	2.000-2.500

Wireless communication needs

The communication needs of drones consist of a number of components:

- **Control communication (CNPC, Command & Control, C2).** This involves the exchange of steering movements and sensor data. The required bandwidth is limited, but the communication is critical.
- **C2 video communication.** When a drone flies out of sight (BVLOS) and is manually controlled, the video connection is crucial as well. This form of communication requires (depending on the quality) a few Mbit/s of bandwidth.
- **Payload communication.** This concerns the application-specific data exchange, such as live images from a thermal camera. This

communication is less critical for most of the applications and is expected to be supply-driven (when high capacity is available it will be used).

- **Position reporting.** Drones and other aircraft transmit their position to the air traffic control system in U-space and other aircraft in the immediate vicinity via special-purpose systems.

Communication modes

There are several options for meeting the communication needs:

- **Direct communication.** This form is typically used during Visual Line of Sight Operations (VLOS) and may use proprietary protocols or Wi-Fi in the 2.4 GHz band, for both C2 and payload communication. The power limit in the EU is

substantially lower than in the US for this band. In the future, the 5,030 - 5,091 MHz band could also play a role for this form of communication.

- **Communication via mobile networks.** This is useful for operations *beyond* VLOS (BVLOS), and can take place on the basis of LTE/5G. C2 communication requires guaranteed network capacity and quality (QoS). In order to achieve high capacity for C2 video and payload communication, adjustment of the (radio) networks is necessary. Within 3GPP, various functions specifically for drones are being developed for, among other things, position reporting. A proprietary network in the 5,030 – 5,091 MHz band could be an alternative solution.
- **Satellite communications.** There are various satellite-based options that could be useful for drones, all based on LEO and GEO satellites. Satellite communication is expected to be used as a backup for mobile connections deployed at BVLOS.
- **Broadcasting position information.** This will be done based on technologies in the 2.4 GHz band (Remote ID based on Bluetooth LR and Wi-Fi), ADS-B Out (1,090 MHz) and the SRD-860 band (ADS-L). ADS-B UAT (978 MHz) may also play a role.
- **Laser links.** These can be used in the future to establish reliable connections with drones (resistant to jamming and other disturbances).

Possible threats and bottlenecks

When we look at the spectrum use for communication with drones in U-space, we see several possible threats and bottlenecks:

1. The simultaneous use of proprietary protocols and Wi-Fi in the same ISM band can lead to inefficient use of spectrum.
2. The use of the ISM bands for direct point-to-point communication with drones could negatively affect the capacity of their use on the ground (in particular by Wi-Fi networks) in specific situations. In addition, the capacity of the spectrum can be a limitation when there is a large number of drones that simultaneously require high bandwidths.
3. The use of small radars on drones using the 60 GHz band may have limited consequences for other uses of the band.
4. The mobile networks are not yet optimized for use for communication with drones. The use by drones can have negative consequences for the capacity on the ground. The use of the 3.5 GHz band can have an impact on radio altimeters; However, this problem is solvable and likely transient.
5. The availability of the 978 MHz band for ADS-B UAT is unclear.
6. The use of the SRD-860 band for position transmission may encounter capacity limits. The same could apply to ADS-B at 1,090 MHz and more broadly to mixed use of frequency space by both crewed and uncrewed aviation. For the time being, it does not appear that drones within the U-space concept will transmit in frequency bands for manned aviation.

Recommendations

The research concludes with several recommendations for RDI:

1. Encourage the deployment of modern standards that (based on *resource blocks/elements*, directional antennas and *beamforming*) enable more efficient use of spectrum by/with UAS and reduce threats. Specifically, the deployment of Wi-Fi 6 in the 2.4 GHz band could have a positive effect.
2. Monitor the need for longer range/higher capacity for UAS applications with a direct connection.
3. Monitor the extent to which the mobile network operators offer capacity and quality guarantees that are necessary for C2 traffic and other communication needs of, for example, drones of emergency services.
4. Inform the market about the (European) status of the ADS-B UAT band (978 MHz). Continue to monitor European developments in this area so that timely action can be taken in case the band will be employed for UAS position reporting in other countries.
5. Inform the market about how the 5,030 – 5,091 MHz band in the Netherlands can be used for UAS (pending developments in this area in the international context).
6. Investigate possible capacity limitations in the SRD-860 band if U-Space (further) develops in the direction of usage of the band.

1 Inleiding

Er zijn wereldwijd meerdere bedrijven in een gevorderd stadium met het ontwikkelen van vliegende taxi's, transportdrones en soortgelijke toepassingen. Ook in Nederland wordt hier hard aan gewerkt en zijn er zelfs al verschillende testvluchten uitgevoerd. Ook heeft er in opdracht van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat een verkennend onderzoek plaatsgevonden over de ontwikkeling van zogenaamde Urban Air Mobility (UAM) [1]. Bekend is dat op dit moment, tijdens de ontwikkeling en het testen van de vliegende systemen, er gebruik wordt gemaakt van frequentiespectrum dat niet specifiek is toegewezen voor dit gebruik. Denk hierbij onder andere aan het gebruik van vergunningsvrij frequentiespectrum, de SRD (short range devices) banden en experimenteervergunningen.

Voor de Rijksinspectie Digitale Infrastructuur (hierna: RDI) is het van belang om te weten wat de verwachte verdere ontwikkeling en toekomstige frequentiespectrumbehoefte is van deze specifieke markt en of de verwachting is dat daar (exclusief) frequentiespectrum ten behoeve van onder andere besturing en navigatie van deze toepassingen voor noodzakelijk is. Als deze markt een vlucht gaat nemen met een mogelijk evenredige groei van de vraag naar (exclusieve) frequentieruimte, dan is die frequentieruimte op dit moment mogelijk niet of beperkt beschikbaar.

Naast het mogelijke frequentiegebruik van drones geldt dezelfde vraag voor U-space, de luchtverkeersleiding voor (autonome) drones. Eén van de belangrijke voorwaarden voor een U-space systeem is de netwerkidentificatie. U-space moet weten waar elke drone in het luchtruim zich bevindt. Voor de draadloze verbindingen voor deze identificatie zal mogelijk ook additionele frequentieruimte nodig zijn, net als voor de overige communicatie tussen de drones en U-space. Daarnaast vraagt het gebruik van dronevluchten boven (dicht)bevolkte gebieden mogelijk om extra veiligheidsmaatregelen en daarmee ook om extra bescherming van het gebruikte spectrum door de drone.

Naast de behoefte voor frequentiespectrum voor besturing en navigatie en U-spaceverbindingen is het voor de RDI relevant om te onderzoeken hoe de dataoverdracht van bijvoorbeeld een observatiedrone zich in de toekomst gaat ontwikkelen. Denk bijvoorbeeld aan een drone uitgerust met camera's en/of sensoren.

1.1 Onderzoeksvragen

De vragen die in dit onderzoek centraal staan, zijn de volgende:

1. Welke toepassingen voor onbemande drones worden voorzien, en in welk ontwikkelingsstadium bevinden deze onbemande drone-toepassingen zich? Hoe snel kunnen we daadwerkelijke inzet van deze toepassingen verwachten (inclusief test- en ontwikkelfase)?
2. Hoe vullen fabrikanten, ontwikkelaars, gebruikers en beleidsmakers de mogelijke frequentiespectrumvraag / communicatiebehoefte tussen "grond" en drone nu in, en welke behoefte is er voor de toekomst, zeker de eerstkomende 5 tot 10 jaar, met een doorkijk naar 20 jaar? Is er een behoefte/noodzaak voor extra frequentiespectrum te verwachten? Zo ja, hoe snel?
3. Wat is de wettelijke taak en mogelijk daarmee samenhangende frequentiespectrumbehoefte van andere overheden ten aanzien van besturings- en navigatiecommunicatie door (nieuwe) dronetoepassingen en U-space?
4. Wat zijn de verwachtingen over de omvang van deze markt. Hoeveel droneverkeer is er in het Nederlands luchtruim te verwachten? Zijn hier al prognoses van en zo ja, welke groei laten deze zien de komende 10 tot 15 jaar?
5. Wat zijn de mogelijke bedreigingen met betrekking tot het frequentiespectrumgebruik van en door drones en hoe hoog zijn de eisen die aan dat gebruik worden gesteld?
6. In hoeverre is te verwachten dat bij inzet van drones en de beoogde luchtverkeersleiding gebruik gemaakt zal gaan worden van bestaande draadloze communicatienetwerken?

1.2 Definities en afbakening

In dit onderzoek richten we ons op onbemande luchtvaartuigen. Tenzij anders vermeld wordt met *onbemand* in dit onderzoek bedoeld: zonder bemanning aan boord (in het Engels wordt 'unmanned' gebruikt en in sommige gevallen het specifiekere 'uncrewed'). We gebruiken hiervoor in de tekst de term 'drone'. Daarnaast refereren we regelmatig aan

'UAS' (*Unmanned Aerial System*). UAS verwijst naar een onbemand luchtvaartuig en eventueel bijbehorende systeemelementen. Deze term is geadopteerd door onder andere ICAO. [2]

In de literatuur en de sector zijn naast het begrip UAS diverse, deels overlappende, termen en definities in gebruik. De term *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) verwijst naar een onbemand luchtvaartuig; de term RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*) naar een luchtvaartuig dat op afstand wordt bestuurd.

Wanneer wordt gesproken over de communicatie met een drone die nodig is om deze te besturen, dan gebruiken we hiervoor de term *command & control-communicatie*, afgekort tot C2-communicatie. Een andere in de telecommunicatiesector veelgebruikte term hiervoor is *Control and Non-Payload Communication* (CNPC).

U-space is een concept waarbij drones in daarvoor aangewezen luchtruim veilig, efficiënt en eventueel autonoom, over grotere afstanden en in complexere omgevingen en/of met veel (bemand of onbemand) verkeer kunnen vliegen. [3] [4] U-space realiseert als het ware een geautomatiseerde 'luchtverkeersleiding' voor drones. De kern van U-Space is de *Common Information Service (CIS)* die informatie-uitwisseling tussen gebruikers en dienstverleners faciliteert. Een drone-operator neemt de U-spacediensten af bij een dienstaanbieder (de USSP: *U-space Service Provider*). Hierbij gaat het onder andere om (1) identificatie van drones en vluchten, (2) geobewustzijn (het voorkomen dat drones vliegen op plaatsen waar dit niet de bedoeling is), (3) luchtverkeersinformatie (waarmee wordt voorkomen dat drones de bemande luchtvaart in de weg zitten) en (4) vluchtautorisatie (het in goede banen leiden van vluchten binnen U-space). Deze onderdelen worden meer generiek (en ook buiten Europa) ook wel *Unmanned Traffic Management (UTM)* genoemd. Andere voorbeelden van U-Spacediensten zijn bijvoorbeeld weersinformatie. Een drone-operator neemt de U-Spacediensten af bij een dienstaanbieder (de USSP: *U-Space Service Provider*).

De inzet van drones voor defensie- en andere militaire toepassingen valt buiten de scope van dit onderzoek.

1.3 Achtergrond

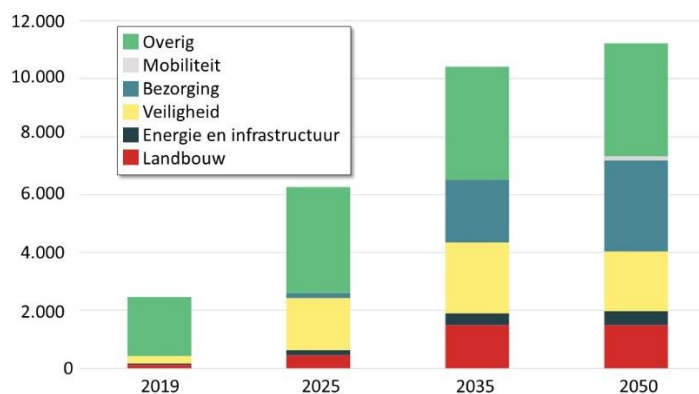
Het gebruik van drones in Nederland nam de afgelopen jaren sterk toe. Zo bedroeg in 2015 het aantal

drones voor beroepsmatig gebruik nog maar 170. In 2019 was dit aantal al toegenomen tot bijna 2.500. Al enkele jaren worden er diverse proeven uitgevoerd die, naast afgebakende havens en industrieterreinen, zich ook afspelen boven de openbare ruimte. Denk hierbij aan het transporteren van medisch materiaal en waardevolle goederen.

In 2025 zullen drones in Nederland naar verwachting vooral ingezet worden in de sectoren landbouw en veiligheid [5]. Vanaf 2035 neemt het gebruik van drones binnen de sector energie en infrastructuur evenals bezorging naar verwachting sterk toe (zie Figuur 1). Rond 2050 worden de eerste "vliegende taxi's" in het luchtruim verwacht. Wat ons betreft geeft dit een nadrukkelijke aanwijzing voor de afbakening van het marktonderzoek.

Het groeiende dronegebruik zal een groeiende vraag naar draadloze communicatie met zich meebrengen. Ons inziens zijn daarbij drie categorieën te onderscheiden: (1) communicatie voor het besturen van drones (C2), (2) de toepassings specifieke behoefte, en (3) specifieke frequentiebehoefte. Binnen de eerste categorie kan onderscheid worden gemaakt tussen communicatie met de bestuurder en met luchtverkeersleiding. We bespreken deze behoeften hieronder afzonderlijk.

"De ontwikkeling in het aantal drones in de sectoren bezorging en mobiliteit komt relatief laat op gang"



Figuur 1 Verwachte ontwikkeling van het aantal professioneel gebruikte drones in Nederland [6]

Communicatiebehoefte voor command & control

Traditioneel gaat het hierbij om rechtstreekse communicatie tussen een enkel grondstation en een drone. Wanneer een drone grotere afstanden gaat overbruggen, is uitgebreidere infrastructuur (bijvoorbeeld een netwerk van grondstations) nodig. C2-communicatie dient betrouwbaar te zijn, een hoge mate van beschikbaarheid te kennen (bestand

te zijn tegen verstoring) en een lage 'latency' te hebben. De voor dergelijke signalen benodigde bandbreedte is over het algemeen echter relatief beperkt.

Om drones op toenemende schaal en toekomstige toepassing ervan veilig te kunnen ondersteunen, wordt in Europa hiertoe het U-spaceconcept gerealiseerd. De eerste stap van U-space wordt van kracht in 2023, en representeert een platform voor netwerkidentificatie, geobewustzijn, luchtverkeersinformatie en vluchtautorisatie voor drones. In U-spaceluchtruim zijn de genoemde diensten verplicht en er kunnen daarnaast aanvullende diensten of vereisten gelden. Iedereen kan U-spaceluchtruim aanvragen, en iedere organisatie kan een U-space Service Provider (USSP) worden: een open markt. Naast communicatie van de drone met de bestuurder op de grond wordt in U-space ook draadloze communicatie met de USSP voorzien. Anders dan bij de bemande luchtvaart zullen grondgebonden radarsystemen geen of geen primaire rol hebben bij het monitoren en begeleiden van droneverkeer, maar zullen hiervoor radio/telecommunicatiesystemen worden gebruikt.

Toepassings specifieke communicatiebehoefte

Naast de eerdergenoemde noodzakelijk communicatie tussen drone en operator zijn er diverse toepassingen die leiden tot een communicatiebehoefte. Voor de hand ligt het livestreamen van (hoogwaardige) camerabeelden of sensor-informatie. Met name wanneer het gaat om hoogwaardige camerabeelden kan een communicatiebehoefte ontstaan met hoge bandbreedtes. Een reguliere 4K-videostream vraagt (met compressie) al een bandbreedte van ongeveer 15 Mbit/s – met moderne codecs als AV1 kan dit worden teruggebracht tot 8 Mbit/s. Afhankelijk van de toepassing (denk aan hoogwaardige infraroodsensoren voor precisielandbouw) kan de databehoeftte zelfs nog groter zijn. Daar staat tegenover dat de betrouwbaarheid, beschikbaarheid en latency wellicht iets minder van belang zijn dan bij het C2-verkeer.

Specifieke frequentiebehoefte

Enkele toepassingen die zich op dit moment in de pioniersfase bevinden, kennen tot slot een specifieke *spectrumbehoefte*. Anders dan in de vorige categorie gaat het niet louter om het uitwisselen van gegevens, maar een toepassing die gekoppeld is aan een specifiek stuk spectrum. Denk hierbij bijvoorbeeld aan het uitrusten van drones met 'mini-radars' voor

obstakel detectie, of het inzetten van drones voor het opzetten van (tijdelijke) communicatienetwerken.

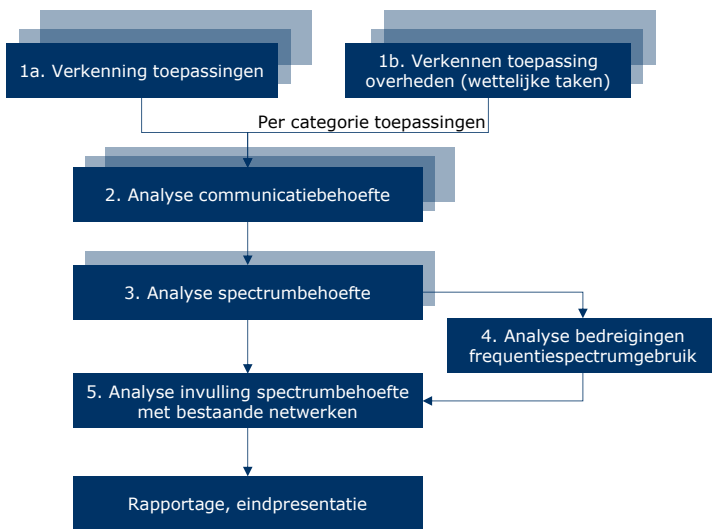
1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 bespreken we de methodologie van ons onderzoek in meer detail. Vervolgens zullen we in hoofdstuk 3 verder ingaan op bestaande drone-toepassingen en de marktontwikkeling van deze toepassingen om deze daarna te vertalen naar de Nederlandse context. In hoofdstuk 4 zullen we de communicatiebehoefte van deze toepassingen in meer detail bestuderen gevolgd door een analyse van de impact hiervan op het spectrum in hoofdstuk 5. De informatie uit de verschillende hoofdstukken brengen we samen in een integrale analyse in hoofdstuk 6, waarbij we gestructureerd ingaan op de onderzoeksvragen.

2 Methodologie

Om de eerder benoemde onderzoeksvragen te beantwoorden hebben we verschillende onderzoeksstappen uitgevoerd. De onderzoeksstappen zijn beknopt weergegeven in onderstaande Figuur 2. Deze stappen en de bijbehorende onderzoeksmethoden zullen we in dit hoofdstuk beschrijven.

Voor het uitvoeren van deze stappen hebben we hoofdzakelijk gebruik gemaakt van literatuurstudie en interviews. Een overzicht van gesprekspartners is te vinden in Bijlage 1.



Figuur 2: Schematisch overzicht onderzoeksstappen

Stap 1: Verkenning toepassingen

In deze eerste stap beantwoorden we onderzoeksvragen 1 en 3. Het doel van deze stap is het in beeld brengen van UAS-markt. Enerzijds brengen we de ontwikkeling in kaart vanuit het perspectief van productontwikkelaars en doelgroepen (bv. havens). Anderzijds nemen we ook het perspectief van overheden mee (bv. Ministerie van I&W), om op deze manier ook zicht te krijgen op de daarmee samenhangende wettelijke taken. We inventariseren in deze stap onder andere welke toepassingen worden verwacht, welke partijen deze toepassingen te gaan gebruiken en waar en wanneer toepassingen verwacht worden. We hebben ons, conform de offerteaanvraag, hoofdzakelijk gericht op Nederland, maar hielden ook de belangrijkste internationale ontwikkelingen in het oog voor zover relevant voor Nederland. Voor het verkennen van de toepassingen hebben we gebruikt gemaakt van interviews en literatuurstudie.

Trendanalyse

In onderzoeksvraag 4 wordt gevraagd om de verwachte marktontwikkeling van UAS-toepassingen in kaart te brengen. De marktontwikkeling van deze toepassingen heeft effect op alle onderzoeksstappen (1 t/m 5): een toename in een bepaalde UAS toepassing heeft effect op de communicatie- en spectrumbehoefte en kan leiden tot verstoringen. De vraag m.b.t. marktontwikkeling speelt dus een integrale rol in het rapport en komt terug in de verschillende onderzoeksstappen.

Vertaling naar Nederlandse context

Na het identificeren van de belangrijkste toepassingen was het zaak om deze in de Nederlandse context te plaatsen. Met andere woorden: hoe realistisch zijn de toepassingen in Nederland (is er een duidelijke businesscase, of is er sprake van belemmerende wet- en regelgeving), op welke locaties in het land zullen ze daadwerkelijk toegepast worden en in welke mate. Door dit op een systematische manier te doen voor de geïdentificeerde toepassingen krijgen we meer gevoel voor het ontstaan van mogelijke 'hotspots': plekken waar veel verschillende toepassingen samenkomen en mogelijk knelpunten op het gebied van communicatie- en spectrumbehoefte kunnen ontstaan. Dit visualiseren we aan de hand van geografische kaarten.

Stap 2: Analyse communicatiebehoefte

In deze stap dragen we bij aan de beantwoording van onderzoeksvraag 2. We brengen in deze stap op basis van interviews en literatuuronderzoek in kaart welke communicatiebehoefte de UAS hebben en maken daarbij onderscheid tussen in Command and Control (C2) communicatie, payloadcommunicatie en communicatie t.b.v. positierapportage. We brengen daarbij enerzijds de communicatiebehoefte in kaart (Benodigde bandbreedte (Mbit/s), Maximale latency (ms), Betrouwbaarheid (%) etc.). Daarnaast was het ook van belang om te bepalen hoe groot de behoefte is. Dit hebben we gedaan door zowel de locatie waar toepassingen voorzien worden als de frequentie waarin vluchten (zullen gaan) plaatsvinden te bepalen. Op basis van deze gegevens hebben we in kaart gebracht waar grote communicatiebehoefte is, en waar dus mogelijk knelpunten kunnen ontstaan in de toekomst.

Stap 3: Analyse spectrumbehoefte

Ook deze stap draagt bij aan het beantwoorden van onderzoeksvraag 2 en is een opmaat naar de beantwoording van onderzoeksvraag 5 en 6. In deze stap vertalen we de communicatiebehoefte (stap 2) naar spectrumimpact. We bespreken deze impact per 'oplossingsrichting' voor communicatie (o.a. landmobiele communicatie en satellietcommunicatie). We kijken in deze stap ook naar ontwikkelingen in andere landen op het gebied van spectrum en de inzet daarvan voor drones. Deze informatie dient als belangrijke input voor stap 4 en 5.

Stap 4: Analyse bedreigingen frequentiespectrumgebruik

Op basis van de in de eerdere stappen verzamelde informatie over de communicatie- en spectrumbehoefte ontstaat een beeld van de minimumvereisten waaraan de draadloze communicatie met drones moet voldoen. De impact van het niet behalen van deze vereisten is voor het 'downlinkverkeer' naar verwachting sterk afhankelijk van de toepassing – het wegvallen van de cameraverbinding bij een landbouwdrone hoeft bijvoorbeeld niet direct een probleem te zijn omdat deze beelden ook worden opgeslagen en later kunnen worden geanalyseerd. Voor de besturing en communicatie met luchtverkeersleiding ligt dit mogelijk anders. Bij het eerste geval hebben we vooral (op basis van literatuuronderzoek en interviews) ingezoomd op de specifieke toepassing. Ten aanzien van het tweede punt zijn met name de terugvalmogelijkheden en -procedures relevant: hoe functioneert U-space wanneer een drone niet tijdig kan communiceren? Een aandachtspunt in deze stap was de vraag in hoeverre meerdere communicatiekanalen zouden kunnen worden gecombineerd om de betrouwbaarheid te vergroten (bijvoorbeeld: rechtstreekse communicatie gecombineerd met communicatie via een landmobiel netwerk). Om deze vragen te beantwoorden hebben we gebruik gemaakt van deskstudie en interviews, maar met name ook de expertise van Jan van Rees.

Stap 5: Analyse invulling spectrumbehoefte met bestaande netwerken

In deze stap combineren we de resultaten van stap 1 tot en met 4 en beantwoorden we onderzoeksvraag 6. Op basis van de geïdentificeerde UAS-toepassingen en hun communicatie- en spectrumbehoefte hebben we bepaald in hoeverre de bestaande

draadloze communicatienetwerken in Nederland tegemoet kunnen komen aan deze behoefte.

3 Toepassingen en trends

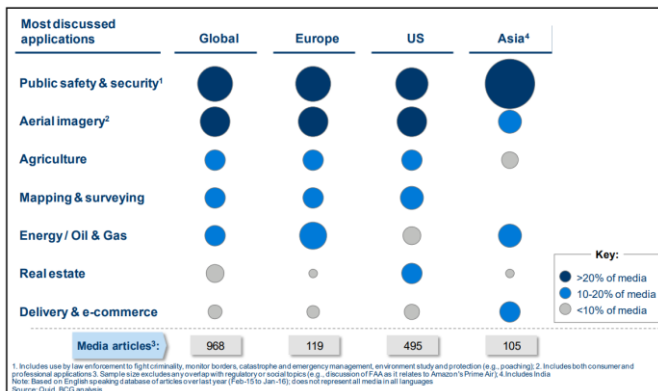
In dit hoofdstuk gaan we primair in op onderzoeksvragen 1 en 3, waarbij we de UAS-markt in kaart brengen. Enerzijds brengen we de ontwikkeling in kaart vanuit het perspectief van productontwikkelaars en doelgroepen (bijv. (lucht)havens). Anderzijds nemen we ook het perspectief van overheden mee om op deze manier ook zicht te krijgen op de daarmee samenhangende wettelijke taken.

3.1 Voorziene toepassingen

Om te kunnen bepalen wat de spectrum- en communicatiebehoeften van UAS-toepassingen zal zijn is het allereerst van belang om een lijst met voorziene toepassingen op te stellen. Op basis van een uitvoerige literatuurstudie achten wij (in meer of mindere mate) de volgende toepassingen/toepassingsgebieden relevant in Nederland:

- Vliegende taxi's/personenvervoer
- Pakketbezorging
- Medisch (spoed)transport
- Landbouw
- Infrastructuurinspectie
- Calamiteiten

In 2016 werd door SESAR (Single European Sky ATM Research) al een onderzoek uitgevoerd waarin de media-aandacht voor dronetoepassingen werd onderzocht (zie Figuur 3) [7]. Destijds bleek er met name veel aandacht te zijn voor veiligheids-, inspectie- en landbouwtoepassingen te zijn. We zullen op basis van recentere studies bepalen of dit beeld nog steeds klopt en deze toepassingen in meer detail beschrijven. Ook zullen we stilstaan bij de haalbaarheid van deze toepassingen in de Nederlandse context (zie paragraaf 3.3).



Figuur 3: Media-aandacht per dronetoepassing (2016) in verschillende regio's [7].

3.1.1 Vliegende taxi's/personenvervoer

Een van de meest tot de verbeelding sprekende UAS-toepassingen is personenvervoer. Al enkele jaren wordt er gesproken over 'vliegende taxi's', maar de vraag is hoe realistisch dergelijke toepassingen in Nederland zijn.

Van echte vliegende taxi's is nog geen sprake en voorlopig lijken pilots zich te beperken tot het buitenland. Zo wordt er in Parijs op korte termijn personenvervoer met drones verwacht [8]. Momenteel worden er testvluchten uitgevoerd tussen twee vliegvelden in Parijs, over een afstand van ongeveer 22 kilometer. De ambitie is om tijdens de olympische spelen van 2024 de eerste commerciële korte afstandsvluchten aan te bieden tussen verschillende wedstrijdlocaties [9]. De lucht taxi zou de reistijd vanaf de internationale luchthaven Charles de Gaulle aanzienlijk moeten verkorten. Ook in Zuid-Korea wordt een UAM-systeem ontwikkeld om in 2025 drones vanaf het vliegveld naar het centrum van Seoul te laten vliegen, een traject van ongeveer dertig tot vijftig kilometer (afhankelijk van het vliegveld) [10]. Daarmee zou de gemiddelde reistijd moeten afnemen van een uur naar 20 minuten. Naar verwachting zal een dergelijke vlucht ongeveer €100 euro gaan kosten.

Schatting ontwikkeling range

De drones die momenteel volop getest worden zijn de 2X van het Duitse bedrijf Volocopter en de X2 van het Chinese bedrijf XPeng. De ranges van deze drones liggen tussen de dertig en vijftig kilometer, afhankelijk van de snelheid en load van de drone. Deze drones lijken daarmee geschikt als bijvoorbeeld shuttle dienst tussen vliegvelden en stadscentra, of voor andere relatief korte trajecten. Voor langere afstanden lijkt het aanbod beperkt, al is Volocopter wel bezig met het ontwikkelen van een langeafstandsdrone met een range van ongeveer honderd kilometer, de VoloConnect. [11] De use case van dit type drone lijkt nog niet heel erg concreet. Volocopter geeft zelf aan dat dit type drone bestemd is voor het verbinden van steden met buitenwijken of omliggende dorpen. Dit type vlucht lijkt logisch in steden als London of Istanbul, maar niet in (relatief kleine) Nederlandse steden.

Schatting ontwikkeling aantal drones

Hoewel de technologie zich snel ontwikkelt, is de vraag hoe realistisch het scenario is dat er taxi's in Europa gaan rondvliegen. De grootste belemmering voor commerciële vluchten is Europese wet- en regelgeving. Transport van mensen valt binnen de Europese wetgeving in de categorie "certified". Deze meest risicovolle categorie betreft vluchten die plaatsvinden 'met vervoer van mensen' of 'met vervoer van gevaarlijke goederen, wat bij ongevallen kan leiden tot een groot risico voor derden' (EASA, 2019). De wet- en regelgeving rondom drones is sterk in ontwikkeling, maar het ligt niet in de lijn der verwachting dat commercieel personenvervoer met drones op korte termijn mogelijk/toegestaan is. Als er überhaupt sprake zal zijn van personenvervoer met drones is de verwachting dat deze in eerste instantie bestuurd zullen worden door een piloot aan boord. Pas in een later stadium zal volledige autonoom transport plaatsvinden. In dit onderzoek zullen we personenvervoer met drones dan ook alleen meenemen in het 2040 scenario, en niet in de scenario's van 2025 en 2030. Dit is in lijn met het eerdere onderzoek van SEO, Decisio en To70. [6] Zij schatten het aantal drones bestemd voor personenvervoer op 0 in 2035 en op 140 in 2050. Als we een lineair groei-model hanteren zou dit betekenen dat er in 2040 ongeveer 45 drones bestemd voor personenvervoer zullen rondvliegen.

3.1.2 Pakketbezorging

Een andere veelbesproken toepassing van drones is pakketbezorging. Daarmee zouden drones (deels) de traditionele pakketbezorging per bus vervangen. In Australië wordt deze vorm van pakketbezorging al getest en gebruikt. Wing (een dochterbedrijf van Google) vervoert rondom Brisbane pakketten tot anderhalve kilo over een afstand van ongeveer tien kilometer [12]. En dit doet het succesvol: in 2021 had het bedrijf al 10.000 pakketten bezorgd in Australië en momenteel staat het aantal bezorgde pakketten wereldwijd op 250.000 [13]. Momenteel breidt Wing haar diensten uit in Finland en Ierland.

Schatting ontwikkeling range

Zoals eerder beschreven beperkt de range van transport drones zich nu veelal tot afstanden van ongeveer 10 tot 15 kilometer. De marktleider Wing heeft recent een nieuwe 'Aircraft library' gepubliceerd waarin het de nieuwste dronemodellen voor pakketbezorging heeft gepresenteerd [14]. De focus blijft op 'last mile delivery' en dus niet op het

transporteren van pakketten over lange afstanden. Typische ranges van dergelijke drones liggen tussen de tien en twintig kilometer. Wel wordt er gewerkt aan drones die zwaardere pakketten kunnen vervoeren over de eerdergenoemde afstanden van 10-20 kilometer.

We hebben enkele voorbeelden gevonden van pakketdrones die gericht zijn op het overbruggen van langere afstanden, bijvoorbeeld in Canada [15]. Dergelijke drones zijn aanzienlijk groter en lijken daardoor ook niet geschikt voor pakketbezorging in Nederland. In Nederland is door de relatief grote bevolkingsdichtheid beperkte ruimte voor dergelijke drones om pakketten aan huis te bezorgen, zeker niet in stedelijke omgeving.

Schatting ontwikkeling aantal drones

Echter, het is zeer onwaarschijnlijk dat drones het merendeel van de huidige grondbezorging zullen overnemen. Alleen PostNL bezorgt dagelijks al meer dan 1 miljoen pakketjes, het volledig vervangen van regulier grondtransport lijkt (op korte termijn) dus geen reële optie. De technologie is simpelweg niet ver genoeg ontwikkeld om deze aantallen te kunnen vervoeren. Verder is ook hier de huidige wetgeving een belemmerende factor. De maatschappelijke acceptatie van deze diensten is laag en ook de autonomie van de bezorgdrones zorgen voor knelpunten met huidige wet- en regelgeving. Piloten moeten nu de drone nog in het zicht houden, zelf of met behulp van een waarnemer. Daarnaast mogen er niet meerdere drones aangestuurd worden onder verantwoording van één piloot. Op basis van deze beperkende factoren ligt dronebezorging op de (zeer) korte termijn (komende 5 jaar) niet in de lijn der verwachting.

Richting 2035 wordt dronebezorging een reëler scenario. Volgens een onderzoek van SEO, Decisio en To70 [6] zal het aantal drones voor pakketbezorging in 2035 oplopen tot 2.170 en in 2050 tot 3.140. Deze drones zouden ongeveer 19 pakketten per dag kunnen vervoeren. Dit zou betekenen dat er per dag ongeveer 41.000 vluchten zijn voor pakketbezorging in 2035 en 60.000 in 2050. Deze cijfers zijn echter zeer ruwe indicaties die afhankelijk zijn van een aantal factoren zoals technologische ontwikkeling, maatschappelijke acceptatie van drones en ontwikkelingen op het gebied van wet- en regelgeving.

3.1.3 Medisch (snel)transport

Ook rondom medisch sneltransport worden drone-toepassingen verwacht. Denk hierbij aan het vervoeren van bloedsamples, medicatie of zelfs organen. Er zijn al meerdere pilots uitgevoerd met medisch sneltransport. Bijvoorbeeld tussen ziekenhuizen in Zwolle en Meppel en tussen de plaatsen Rhooen en Oud-Beijerland in Zuid-Holland. In Antwerpen is er al daadwerkelijk weefsel getransporteerd tussen twee ziekenhuizen. De afstand van de (test)vluchten is in alle gevallen ongeveer 15 kilometer. Drones zouden interessant alternatief voor het huidige sneltransport kunnen zijn, omdat deze ritten erg duur en weinig duurzaam zijn. Ook zouden drones een sneller en duurzamer alternatief kunnen zijn voor regulier sneltransport, zeker in drukke gebieden (met name in de Randstad).

Schatting ontwikkeling range

Hoewel de testvluchten zich meestal beperken tot afstanden van 10 tot 15 kilometer lijkt de range van de drones die gebruikt worden vele malen groter. In Nederland is de ANWB het meest actief op het gebied van experimenten met medisch transport. De drone die zij onlangs in gebruik hebben genomen (de Avy Aera 3, zie Figuur 4) heeft een range van maar liefst negentig kilometer en een maximale vliegduur van ongeveer een uur.



Figuur 4 Avy Aera 3 drone [16]

Ook in België wordt actief geëxperimenteerd met medisch sneltransport via drones, met name door Helicus. Zij gebruiken X-8 multicopter van SABCA, die qua specificaties overeenkomt met de drone die gebruikt wordt door de ANWB. Een veel grotere range (in Nederland) lijkt niet noodzakelijk.

Schatting ontwikkeling aantal drones

Zoals eerder beschreven is de ANWB het meest actief op het gebied van experimenteren met drones voor

medisch transport. In ons interview met de ANWB hebben we dan ook specifiek gevraagd naar hun verwachtingen in relatie tot de ontwikkeling van het aantal drones voor medisch transport. De ANWB verwacht rond 2028 ongeveer 80 drones nodig te hebben voor een landelijk dekkend netwerk, waarbij ook vluchten over de grens (naar België en Duitsland) mogelijk zijn. Daarbij geven ze aan dat er, naar verwachting, maximaal 40 drones tegelijkertijd in de lucht zullen zijn. De drones zullen gaan vliegen vanaf regionale hubs, die per hub over 2 tot 3 drones beschikken. Deze regionale hubs kunnen bijvoorbeeld distributiecentra zijn. Ziekenhuizen liggen niet erg voor de hand in verband met privacy. Aangezien 80 drones genoeg zijn voor een landelijk dekkend netwerk (inclusief operaties over de grens) is het aannemelijk dat het aantal drones in de toekomst niet veel verder zal toenemen (voor dit toepassingen die momenteel voorzien worden).

3.1.4 Landbouw toepassingen

De landbouwsector is ook ambitieus in haar plannen met betrekking tot de inzet van drones. Grofweg zijn er twee typen activiteiten waarbij de inzet van drones voorzien wordt: inspectie van landbouwgrond (surveillance) en het nauwkeurig toedienen van bestrijdingsmiddelen, ook wel preciselandbouw.

De drones die benodigd zijn voor inspectie van landbouwgrond zijn relatief eenvoudig. Zo heeft DJI recent een model ook de markt gebracht specifiek gericht op inspectie van landbouwgrond: de DJI Mavic 3 Multispectral (zie Figuur 5). Deze drone is uitgerust met multispectraal beeldvormingssysteem dat snel informatie over gewasgroei vastlegt. De prijs voor een dergelijke drone ligt rond de €5000 euro.



Figuur 5 DJI Mavic 3 multispectrale drone [17]

Voor het toedienen van bestrijdingsmiddelen zijn grotere, complexere en duurdere drones nodig. Een voorbeeld is de DJI Agras T30, die naast de eerdergenoemde multispectrale camera ook beschikt over een systeem om pesticiden toe te dienen (zie Figuur

6). De prijs voor een dergelijke drone ligt rond de €25.000.



Figuur 6 DJI Agras T30 drone [18]

Schatting ontwikkeling range

Momenteel is de range van de landbouwdrone al vrij indrukwekkend. Zo kan de DJI Mavic 3 Multispectral per vlucht (van een uur) ongeveer 70 hectaren beslaan¹. Voor de DJI Agras T30 is dit ongeveer 40 hectaren². Hoe deze ranges zich in de toekomst gaan ontwikkelen is niet duidelijk, maar de range lijkt niet de beperkende factor, zeker gezien het feit dat Nederlandse boeren gemiddeld een areaal hebben van 60 hectaren (wat dus met 1 à 2 vluchten te bestrijken is).

Schatting ontwikkeling aantal drones

Voor een schatting van de ontwikkeling van het aantal drones in de landbouw kijken we met name naar de schattingen in de studie van SEO, Decisio en To70. Zij schatten in dat het aantal drones voor landbouwtoepassing relatief beperkt zal blijven: van 120 drones in 2019 naar 1500 drones in 2050, waarvan het merendeel gebruikt zal worden voor inspectie van landbouwgrond (en dus niet het besproeien ervan).

Naar verwachting blijft de vraag naar drones in de landbouwsector dus beperkt. De voornaamste reden is dat het pas vanaf (middel)grote landbouwbedrijven (50-100+ hectare) rendabel is om zelf een drone aan te schaffen (een deel zal dit ook daadwerkelijk doen), kleinere bedrijven zullen met name drone-diensten inhuren voor de inspectie van hun grond. In totaal zullen er naar schatting ongeveer 1000 bedrijven een eigen drone in bezit hebben er zullen er 500 drones bestemd zijn voor "inspectie as a service". Naar verwachting zal één drone voldoende moeten zijn om 2.000 hectare aan landbouwgrond te inspecteren. Gezamenlijk zullen deze drones op termijn 1 miljoen hectare aan landbouwgrond bestrijken

¹ Zie [DJI]

² Zie [DJI]

(ongeveer de helft van alle landbouwgrond in Nederland)³.

3.1.5 Infrastructuurinspectie

Een andere belangrijke toepassingscategorie is infrastructuurinspectie. Deze categorie omvat een breed scala aan toepassingen, denk aan:

- Inspecteren van infrastructuur als dijken, windmolens, wegen en het spoor.
- Uitvoeren van verkeerinspecties
- Inspectie van nutsleidingen

Bij dit brede scala aan toepassingen is ook een breed scala aan partijen betrokken. Enkele belangrijke partijen zijn de ANWB, TenneT, ProRail en Rijkswaterstaat.

Ontwikkeling range

Omdat deze categorie zo divers is in type toepassingen is het lastig om hier een typische range aan te verbinden, zeker omdat de range in veel gevallen sterk afhankelijk is van de omvang/gewicht van de drone. Wel is het zo dat het in veel gevallen zal gaan om inspectiedrones. In eerdere voorbeelden zagen we al dat dergelijke drones een range hebben van enkele tientallen tot honderd kilometer. Een vergelijkbare range is dus aannemelijk voor drones voor veiligheids- en inspectiedoeleinden.

Schatting ontwikkeling aantal drones

Veel van deze partijen gebruiken nu al actief drones, en verwachten dat de inzet van drones in de toekomst sterk zal toenemen. Ook op de korte termijn. Dit blijkt ook uit de projecties van SEO, Decisio en To70 en de gevoerde gesprekken. Waar er in 2019 nog maar 50 drones voor inspectiedoeleinden waren zijn dit er in 2025 naar verwachting al 190. Dit aantal zal naar verwachting nog stijgen tot ongeveer 360 drones in 2050.

3.1.6 Calamiteiten

Tot slot onderscheiden we nog de categorie calamiteiten. Bij deze categorie gaat het dus om de inzet van drones bij calamiteiten/noodsituaties. Hierbij is het doel meer informatie over de calamiteit te

³ Drones in privébezit zullen naar verwachting alleen de eigen landbouwgrond bestrijken, en dus minder dan de mogelijke 2000 hectare.

verzamelen. Deze categorie kent veel verschillende toepassingen, bijvoorbeeld:

- Opsporen van drenkelingen in kustgebieden
- Inspectie bij incidenten (brand, ongelukken)
- Opsporen van drugsmokkel/uithalers in havens

Enkele belangrijke partijen binnen deze categorie zijn de politie, brandweer, ambulances, reddingsbrigade en douane.

Belangrijk bij dit type inzet is dat de drone beschikt over geavanceerde camera's. Zo maakt de douane momenteel gebruik van de DJI Matrice 300 RTK, die speciaal is ontwikkeld voor inspectiewerk en beveiligingstoepassingen [5]. Deze drone beschikt over een zeer geavanceerd camerasysteem en kan door middel van AI automatisch inspectietaken uitvoeren.



Figuur 7: DJI Matrice 300 RTK, ontwikkeld voor inspectie en veiligheidstoepassingen [19]

Ontwikkeling bereik

Net als voor de categorie infrastructuurinspectie geldt dat de categorie calamiteiten veel verschillende toepassingen en eindgebruikers kent. Vanwege deze diversiteit is de ontwikkeling van de range lastig bepalen. Voor de drone die gebruikt wordt door de douane geldt dat deze een bereik heeft van ongeveer 60 kilometer. Een range van enkele tientallen kilometers lijkt realistisch voor drones in deze toepassingscategorie.

Ontwikkeling aantal drones

De inzet van drones bij calamiteiten lijkt zeer belangrijk te gaan worden. Waar in 2019 veiligheidsdiensten nog 260 drones in bezit hebben voor inspectie bij calamiteiten, zal dit aantal naar verwachting oplopen tot 1800 in 2025 [6]. Er wordt slechts een beperkte stijging van het aantal drones verwacht tussen 2025 en 2050, omdat wordt

verwacht dat drones efficiënter ingezet zullen worden (bijvoorbeeld door inzet vanaf centrale hubs en het delen van drones tussen veiligheidsdiensten).

3.1.7 Conclusie

In dit hoofdstuk hebben we de belangrijkste drone-toepassingen besproken. Deze toepassingen zijn samengevat in Tabel 1.

De verwachtingen van de omvang van de markt verschillen sterk per toepassing. Tabel 1 geeft een overzicht weer van de geschatte marktomvang per toepassing (in aantallen drones) in 2035. Deze prognoses zijn hoofdzakelijk gebaseerd op een eerder onderzoek door SEO, Decisio en To70 [6] en zijn gevalideerd in interviews.

De verwachtingen van de omvang van de markt verschillen sterk per toepassing. Tabel 1 geeft een overzicht weer van de geschatte marktomvang per toepassing (in aantallen drones) in 2035. Deze prognoses zijn hoofdzakelijk gebaseerd op een eerder onderzoek door SEO, Decisio en To70 [6] en zijn gevalideerd in interviews. Personenvervoer en pakketbezorging zijn twee toepassingen die sterk tot de verbeelding spreken en er wordt dan ook veel over geschreven in de media. Echter, de daadwerkelijke implementatie van deze toepassingen wordt pas verder in de toekomst verwacht. Ook in de landbouw wordt de toepassing van drones verwacht, met name voor inspectie van landbouwgrond en precisielandbouw. De eerste toepassingen worden de komende jaren verwacht. Vanaf 2025 zal het aantal drones in de landbouw (eigen bezit of *as a service*) geleidelijk aan toenemen tot ongeveer 1500 in 2035. Daarna zal het aantal drones naar verwachting stabiel blijven. Voor medisch transport en inspectie en surveillance doeleinden wordt nu al actief getest en gebruik gemaakt van drones. Uitbreiding van deze toepassingen wordt dan ook op de korte termijn verwacht. Voor medisch transport is het verwachte aantal drones beperkt en de ANWB schat ongeveer 80 drones nodig te hebben voor een landelijk dekend netwerk. Voor inspectie en surveillance doeleinden worden ongeveer 2000 drones voorzien (dit is dan ook een zeer brede categorie, met veel verschillende toepassingen).

Tabel 1 Overzicht toepassingen

Toepassing	Mogelijke implementatoren	Vanaf wanneer	Waar	Aantal (2035)
Personenvervoer	Private aanbieders: Volocopter, XPeng	2040 – 2050	Shuttlediensten, bijvoorbeeld tussen vliegveld en stad	0-10
Pakketbezorging	Pakketbezorgers: PostNL, UPS, DHL, e.a.	2035 – 2050	<i>Last mile transport:</i> Vanaf cityhubs naar woningen/bedrijven	2.000-3.000
Medisch transport	ANWB	2023	Tussen ziekenhuizen en andere zorginstellingen	50-100
Landbouw	Boeren en 'as a service' dienstverleners	2025	Boven landbouwgrond	1.000-2.000
Infrastructuurinspectie	Rijkswaterstaat, TenneT, ProRail	Nu	Snelwegen, spoor, dijken, kustlijn	200-400
Calamiteiten	Politie, brandweer, ambulance	Nu	Havengebieden, vliegvelden, kustgebieden etc.	2.000-2.500

3.2 Operationele concepten

Voor de hierboven beschreven toepassingen zijn verschillende *operationele concepten* denkbaar (plaatsing en routes van de UAS's). Het onderscheid tussen de operationele concepten is in het kader van dit onderzoek relevant, omdat het bepalend is voor de locaties, routes en inzetfrequentie van de onbemande luchtvaartuigen (en daarmee de dichtheid). Op hoofdlijnen zien we de volgende varianten (Tabel 2).

Line of sight, VLOS en BVLOS

Zowel in de draadloze telecommunicatie als luchtvaart speelt het begrip *line of sight* (zichtlijn). Bij

draadloze verbindingen is sprake van een zichtlijn als een radiosignaal zich rechtstreeks tussen zender en ontvanger kan voortplanten, zonder te worden gehinderd door obstakels (daarbij spelen de atmosfeer en kromming van de aarde uiteraard onverminderd een rol). In de luchtvaart wordt gesproken van 'operatie onder **VLOS**' (Visual Line Of Sight) wanneer de bestuurder van een onbemand luchtvaartuig het luchtvaartuig zelf rechtstreeks kan zien, en operatie 'onder **BVLOS**' (*Beyond VLOS*) wanneer dat niet (altijd) het geval is. De afkortingen VLOS en BVLOS verwijzen in het vervolg van de tekst naar de luchtvaartbetekenis van deze termen.

Tabel 2 Operationele concepten voor UAS-diensten

Ad-hocmodel	Punt-puntmodel	Hubmodel
<p>In het ad-hocmodel wordt een UAS (bijvoorbeeld over de weg) getransporteerd naar een doel, en stijgt deze in de buurt van het doel op. Een voorbeeld is een makelaar die naar een specifiek pand toe rijdt en een UAS oplaat om foto's van het pand te maken. Het gaat hierbij in principe om VLOS-operatie op basis van direct sturing, maar ook BVLOS is in principe denkbaar.</p>	<p>In het punt-puntmodel zijn de UAS gestationeerd op vaste locaties en vliegen zij min of meer vaste routes tussen vaste locaties. Voorbeelden van toepassingen zijn pendeldiensten en transport van goederen tussen verschillende locaties (bijvoorbeeld vestigingen van een bedrijf).</p>	<p>In het hubmodel is een UAS gestationeerd op een centrale locatie, van waaruit vluchten worden uitgevoerd naar doelen (rechtstreeks of meerdere doelen achter elkaar in een route). Dit model past bijvoorbeeld bij pakketbezorging. Bij het hubmodel is er sprake van een goed gedefinieerd verzorgingsgebied (bijvoorbeeld een stad of wijk). Daarnaast wordt in het verzorgingsgebied regelmatig gevlogen. Dit model wordt ook wel het <i>drone in a box</i>-model genoemd, wanneer het gaat om drones die 'paraat' moeten zijn en worden ingezet bij calamiteiten. Deze inzet is onregelmatiger.</p>

3.3 Vertaling naar de Nederlandse context

Na het identificeren van de belangrijkste toepassingen is het van belang om deze in de Nederlandse context te plaatsen. Met andere woorden: hoe realistisch zijn de toepassingen in Nederland? Op deze vraag zullen we in deze paragraaf verder ingaan.

3.3.1 Vliegende taxi's/personenvervoer

Zoals eerder beschreven spreken 'vliegende taxi's' sterk tot de verbeelding. Echter, op korte termijn lijkt grootschalige implementatie van dit type vervoer in Nederland onrealistisch. Wanneer de markt voor vliegende taxi's van de grond komt is het goed voorstelbaar dat deze markt zich op een

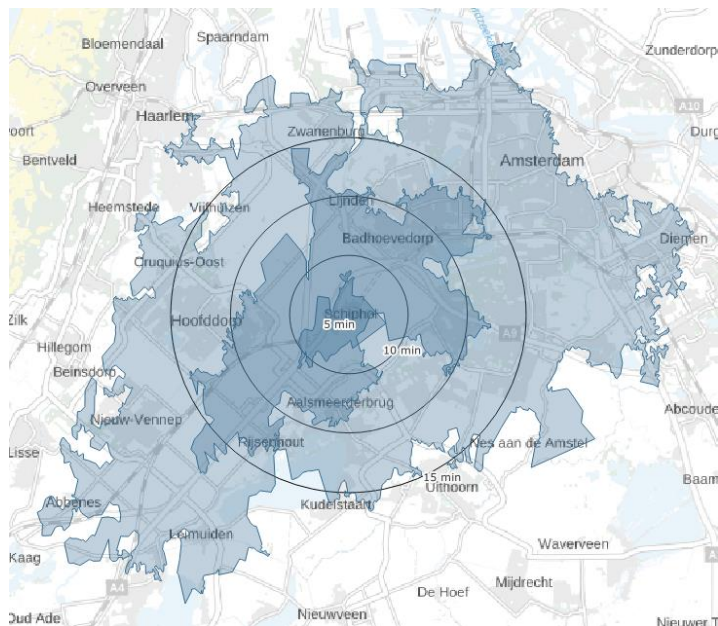
vergelijkbare manier ontwikkelt als de markt voor flietsbezorgers: grote kapitaalinjecties zorgen voor een snelle groei van de markt waarbij verschillende partijen de markt proberen te domineren. Wanneer één partij de overhand krijgt zal er een shake-out effect optreden waarbij veel aanbieders zullen verdwijnen.

Vliegende taxi's zullen moeten gaan concurreren met huidige vormen van transport als het openbaar vervoer en taxi's. In Nederland is het openbaar vervoer zeer goed georganiseerd en wanneer plaatsen slecht bereikbaar zijn met het openbaar vervoer bestaan er alternatieven als deelauto's/deelscooters of taxi's. De *use case* van vliegende taxi's lijkt dan ook beperkt. Ook worden helikopters in ons land niet of nauwelijks gebruikt voor personenvervoer. Er is hier dan ook geen markt te winnen voor drones. Verder

zullen vliegende taxi's naar alle waarschijnlijkheid een premiumdienst worden en blijven. De vraag is wie er bereid is voor een dergelijke dienst te betalen en waarom deze mensen nu niet betalen voor vervoer per helikopter. Het is ook goed voorstelbaar dat culturele aspecten ervoor zorgen dat er in Nederland minder vraag is naar vliegende taxi's dan in, bijvoorbeeld, Dubai.

Als vliegende taxi's daadwerkelijk zullen gaan vliegen zal dit zeer waarschijnlijk in de vorm van punt-punt shuttlediensten zijn. Het merendeel van de gevonden buitenlandse pilots is ook op deze manier ingestoken. Daarbij wordt vaak geëxperimenteerd met trajecten tussen vliegvelden en stadscentra.

De vraag is wat in Nederland het voordeel zou zijn van een dergelijke dienst ten opzichte van het goed georganiseerde (openbare) vervoer. Ter illustratie nemen we een hypothetische vliegende taxidienst rondom luchthaven Schiphol als voorbeeld. Figuur 8 toont een analyse van het gebied dat vanaf Schiphol te bereiken is met de auto in 5, 10 en 15 minuten (blauwe vlakken) en het gebied dat een vliegende taxi bij gemiddeld 60 km/u kan bereiken in dezelfde tijden (zwarte cirkels). Merk op dat een groot deel van het centrum van Amsterdam binnen 15 minuten met de auto bereikbaar is, terwijl de vliegende taxi niet verder komt dan de A10. Met de trein duurt het traject Schiphol – Amsterdam Centraal 14 minuten. Een reden om toch met een vliegende taxi te gaan zou de verkeersdrukte kunnen zijn (een typische reistijd met de auto tussen Schiphol en het centrum is ongeveer 21 minuten en een trein sluit wellicht niet altijd aan). Merk wel op dat daarvoor in de plaats wellicht 'verkeersdrukte' in de lucht rondom Schiphol bij zal komen kijken. Om afgezien van verkeersdrukte een substantiële tijdswinst op te leveren zou een drone substantieel sneller dan 60 km/u moeten vliegen, of een bereik moeten hebben waarmee ook locaties buiten de verkeersinfrastructuur van de hoofdstad zouden kunnen worden aangevlogen.



Figuur 8 Gebied dat vanaf Schiphol met de auto te bereiken is in 5, 10 en 15 minuten in blauw; afstand die een drone bij 60 km/u kan afleggen in dezelfde tijd aangegeven met cirkels (analyse Dialogic op basis van OpenStreetMap-gegevens; Bron onderlaag kaart: BRT, PDOK, CC-BY-4.0)

Bij deze casus speelt tot slot sterk de vraag of er wel gevlogen zal mogen worden in de buurt van drukbevolkte gebieden met het oog op veiligheid en geluidsoverlast. Al met al lijkt de *use case* voor vliegende taxi's in Nederland beperkt.

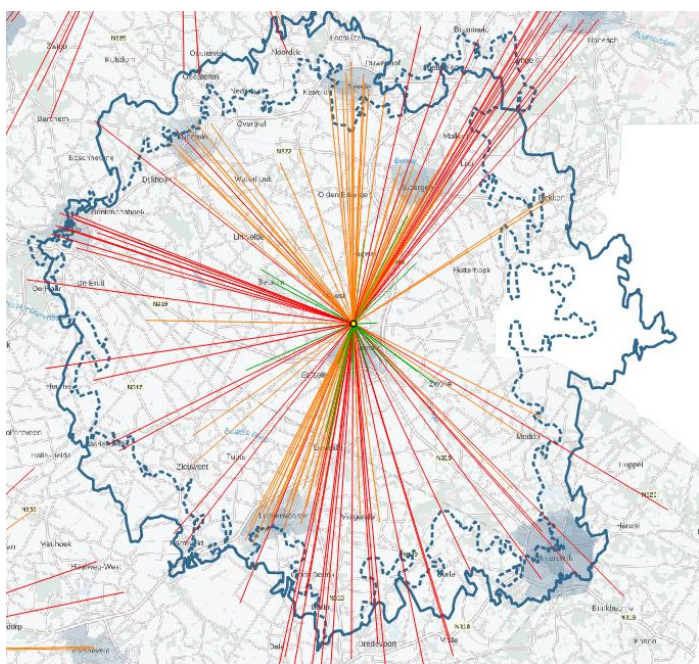
3.3.2 Pakketbezorging

Voor het bezorgen van pakketten concurreert de UAS met alternatieven over de grond, zoals bezorging per bestelbus of de fiets. De vraag is wanneer bezorging per UAS wel of juist niet een beter alternatief is dan deze bestaande vormen van bezorging.

Een UAS kan in sterk verstedelijkte omgevingen waarschijnlijk (zeker in eerste instantie) niet overal gemakkelijk landen. Daarnaast is geluidsoverlast een beperkende factor. De meeste toegevoegde waarde van UAS voor pakketbezorging zit dan ook waarschijnlijk in buitenwijken en buitengebieden. Figuur 9 toont een voorbeeld van een gebied in Nederland waar dit op deze manier zou kunnen werken. Vanaf een centraal punt kunnen meerdere (niet-verstedelijkte) buurten zoals kleinere dorpskernen worden aangevlogen binnen 15 kilometer. Veelal zijn deze locaties vanaf hetzelfde punt echter ook binnen 15 kilometer rij-afstand te bereiken.

Een 'voordeel' voor de UAS ten opzichte van de auto ontstaat wanneer er (natuurlijke) obstakels op de

weg voorkomen (zoals een rivier, waardoor moet worden omgedreden naar een brug of boot, de hemelsbrede afstand tussen hub en bezorgadres veel kleiner is dan de rijafstand). Daarnaast zou de bezorgtijd een rol kunnen spelen. Een drone legt de 15 kilometer in ongeveer een kwartier af, terwijl een auto langer onderweg kan zijn (vanwege opstoppingen, snelheidslimieten). In Figuur 9 worden de binnen 15 minuten per auto bereikbare adressen getoond met de stippellijn. Dit gebied is iets minder groot, maar nog altijd is het voordeel van bezorging door de lucht relatief beperkt. Dit is anders op specifieke plekken in Nederland, zoals tussen Den Helder en Texel: daar kan met een drone substantiële tijds winst worden behaald.



Figuur 9 Voorbeeld van pakketbezorging door de lucht vanaf een centrale locatie, van waaruit een aantal dorpskernen kan worden bereikt (rode lijnen: 10+ km, oranje: 5-10 km, groene lijnen 0-5 km hemelsbreed). De blauwe

lijn geeft aan welke adressen vanaf hetzelfde punt met de auto kunnen worden bereikt binnen 15 kilometer rijafstand. (Bron onderlaag kaart: BRT, PDOK, CC-BY-4.0).

Het aantal vliegbewegingen en UAS dat gelijktijdig in de lucht is, hangt uiteraard sterk af van het aantal pakketten dat bezorgd wordt, maar nadrukkelijk ook van de fijnmazigheid van het netwerk van 'hubs' en de maximale afstand tussen hub en bezorgadres. Een haalbare afstand lijkt ongeveer 15 kilometer (30 kilometer retour) te zijn. Hoewel het efficiënter is om meerdere adressen op één route aan te doen wordt dit in de praktijk uiteraard beperkt door het maximale gewicht dat de UAS kan dragen (daarnaast kost meerdere keren opstijgen wellicht meer energie).

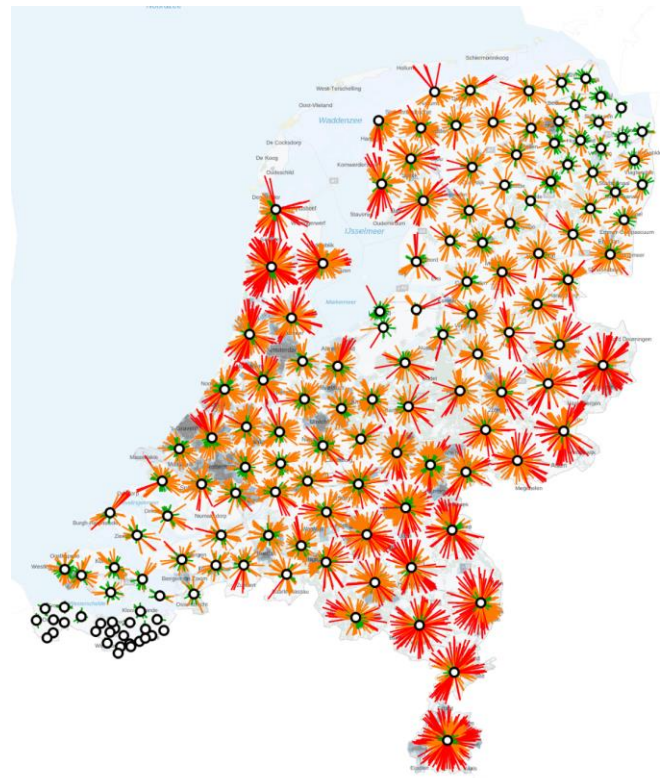
Figuur 10 toont een hypothetisch scenario waarin 50 hubs over het land zijn verspreid⁴, en van waaruit UAS's binnen een straal van 15 kilometer pakketten aan adressen in matig- tot niet stedelijke buurten bezorgen. Nederland telt (2021) in totaal 17,5 miljoen inwoners verdeeld over 14.175 buurten. Van deze buurten zijn er 9.932 matig tot niet stedelijk. In deze buurten wonen 8,8 miljoen mensen. [20] Met de vijftig hubs hieronder zou 87% van de bevolking in deze buurten kunnen worden bediend. Op basis van het drievoudige aantal hubs (150), verspreid over het hele land, zou 98% van de adressen in matig- tot niet-stedelijke buurten kunnen worden bereikt. Een dergelijk netwerk zou eruit kunnen zien als in Figuur 11. Duidelijk is dat de afstanden die vanaf de hubs worden afgelegd, korter zijn. Daar staat tegenover dat in dit scenario sprake is van een verder gevorderde uitrol, waarbij het aantal vluchten waarschijnlijk vele malen groter is dan in het andere scenario.

⁴ Op basis van K-means clustering is een vast aantal hubs (hier 50) geplaatst op de locaties zodanig dat de totale hemelsbrede afstand tussen de hubs en (de centroïde

van) de buurten werd geminimaliseerd. Er is niet gewogen voor het aantal inwoners.



Figuur 10 Hypothetisch pakketbezorgingsnetwerk op basis van 50 hubs en een maximumafstand van 15 kilometer tussen hub en bezorgadres (Bron onderlaag kaart: BRT, PDOK, CC-BY-4.0).



Figuur 11 Hypothetisch pakketbezorgingsnetwerk op basis van 150 hubs en een maximumafstand van 15 kilometer tussen hub en bezorgadres (Bron onderlaag kaart: BRT, PDOK, CC-BY-4.0).

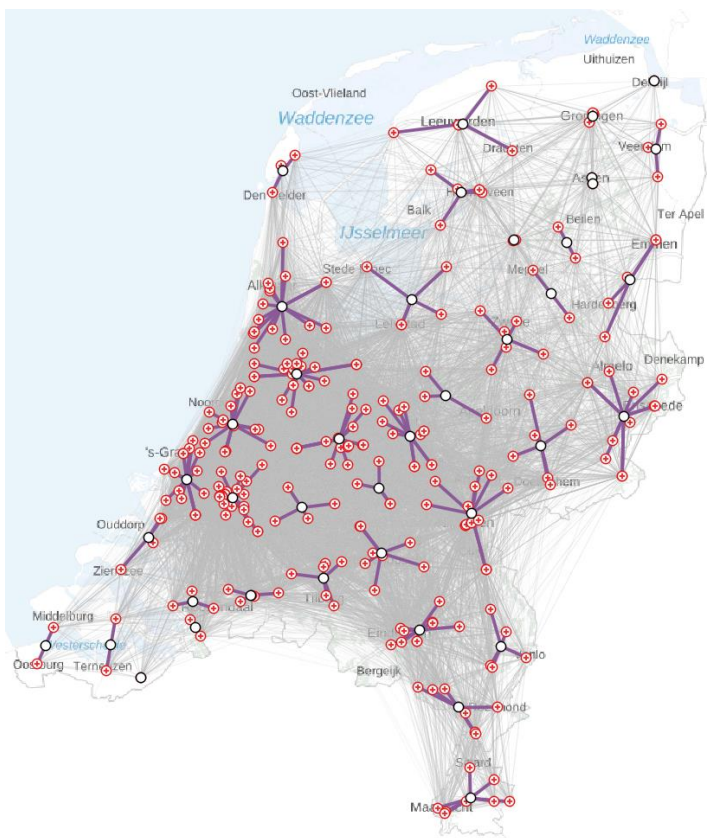
3.3.3 Medisch (spoed)transport

In Nederland zal het medische (spoed)transport per drone moeten concurreren met het reguliere medische (spoed)transport dat nu veelal plaatsvindt per auto of helikopter. Een duidelijk voordeel ten opzichte van deze vorm van transport zijn snelheid en kosten. Het reguliere medische spoedtransport is erg duur, ook per auto. Marktpartijen die zich richten op medische spoedtransport zijn duur, hoofdzakelijk omdat ze 24/7 paraat moeten staan en hun werk slechts incidenteel is. Ook kan transport per drone tijds- en duurzaamheidsvoordeel opleveren ten opzichte van medische spoedtransport over de weg, omdat verkeershinder voorkomen kan worden en er in een rechte lijn tussen ziekenhuizen kan worden gevlogen. Zeker wanneer twee ziekenhuizen gescheiden worden door water, bijvoorbeeld tussen het vaste land en de Waddeneilanden of tussen ziekenhuizen in Zuid-Holland en Zeeland, kan de tijdswinst substantieel zijn. De *use case* lijkt in Nederland, ondanks de betrekkelijk korte afstanden, evident: door middel van medisch transport met drones kan zowel tijd als geld worden bespaard.

Voor medisch (spoedeisend) transport kan gedacht worden aan punt-punttrajecten (tussen ziekenhuizen) en/of een concept op basis van hubs. Hierbij kan gebruik worden gemaakt van UAS's met een bereik tot 100 kilometer (ANWB Medical Air Assistance). Figuur 12 toont een mogelijk scenario. Hierin zijn de zorglocaties die zich binnen een hemelsbrede afstand van 100 kilometer bevinden verbonden met een dunne grijze lijn. Daarnaast zijn 40 hublocaties (het aantal dat de ANWB verwacht nodig te hebben voor een landelijk dekkend netwerk) verspreid over het land (op basis van een cluster-algoritme, zodat de totale vliegafstand wordt geminimaliseerd). De paarse lijnen geven de vlieg-routes tussen hub en zorglocaties aan.

Drones over de landsgrens

Een aantal rechtstreekse routes in Figuur 12 loopt over de landsgrenzen. Voor communicatie is in dat geval uiteraard infrastructuur in het buitenland nodig. Daarnaast kunnen er rond de landsgrens specificatie complicaties optreden (zoals het moeten overschakelen naar een buitenlands netwerk en mogelijk lagere signaalsterkte/kwaliteit in de grensregio's vanwege internationale coördinatieafspraken).



Figuur 12 Mogelijk scenario voor medisch transport met 40 hublocaties en een maximumafstand van 100 kilometer (grijze lijnen: punt-punt tussen locaties) (Bron onderlaag kaart: BRT, PDOK, CC-BY-4.0).

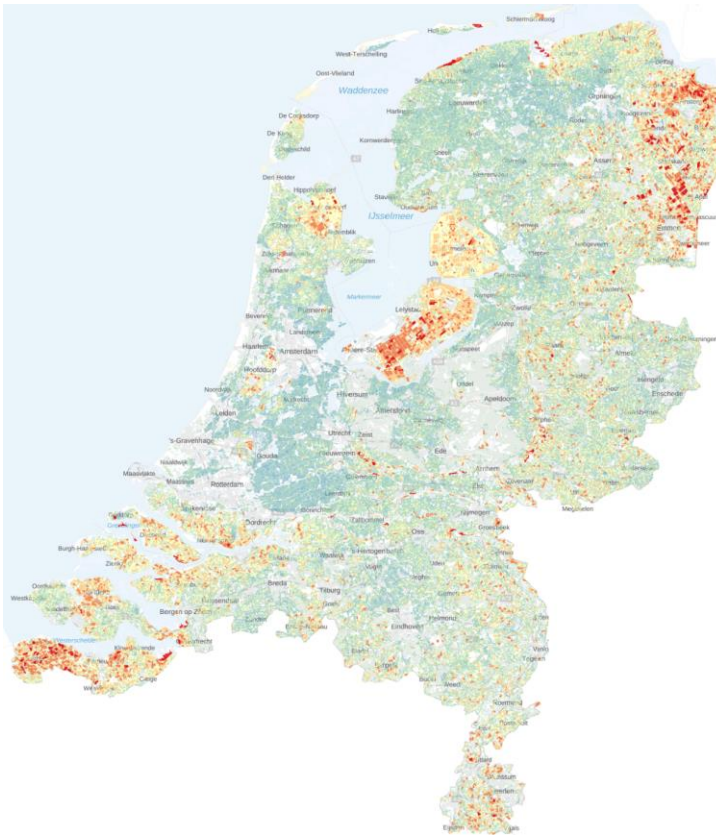
3.3.4 Landbouwtoepassingen

Zoals eerder beschreven gaan we bij de inzet van drones in de landbouw uit van twee typen gebruikers: 1) grote landbouwbedrijven die hun eigen drone bezitten en zelf hun land inspecteren en 2) kleinere landbouwbedrijven die gebruik maken van 'as a service' dronediensten waarbij professionele aanbieders de inspectie uitvoeren. Het gebruik door grotere bedrijven kunnen we goed in kaart brengen op basis van het oppervlak van de landbouwgrond. In de studie van SEO, Decisio en To70 [6] wordt

geschat dat op termijn (2035) 5% van de landbouwbedrijven met een middelgrote omvang (50-100 hectare) en 20% van de grote landbouwbedrijven (>100 hectare) een eigen drone in bezit hebben. Dit komt neer op 994 landbouwbedrijven die in het bezit zijn van een eigen drone. Samen bezitten deze bedrijven 111.890 hectare landbouwgrond. Voor de overige 16.674 landbouwbedrijven (die samen 922.374 hectare landbouwgrond bezitten) wordt verwacht dat ze gebruik zullen maken van 'as a service' diensten. Naar verwachting zijn er voor die dienstverlening in totaal 461 drones nodig. Het totale aantal drones voor de landbouwsector voor inspectiedoeleinden komt daarmee uit op 1455. Ook voor het besproeien van gewassen zullen naar verwachting drones gebruikt gaan worden. De potentiële vraag naar dit type drones is waarschijnlijk kleiner. Besproeiing door middel van drones lijkt met name relevant voor groente- en fruittelers [6]. Het gewicht dat drones kunnen dragen is beperkt en het besproeien van gewassen lijkt daarmee alleen relevant voor kleinere landbouwbedrijven, met name groente- en fruittelers. Naar verwachting zullen er 44 drones nodig zijn om aan deze vraag te voldoen. Het totaal aantal drones voor landbouwtoepassingen komt daarmee op 1499.

Waar het dronegebruik door grote landbouwbedrijven meer structureel van aard is, is het dronegebruik door kleinere landbouwbedrijven is meer incidenteel (vergelijkbaar met bijvoorbeeld de ad-hoc inspectie van windmolens) en daardoor lastiger te modelleren. We zullen dit type gebruik dan ook niet meenemen in onze modellering.

Grotere landbouwbedrijven (althans bedrijven met grote aaneengesloten percelen) bevinden zich in Nederland met name in de provincies Zeeland en Flevoland en het noordoosten van Nederland, zoals te zien is op onderstaande kaart (Figuur 13). Op deze locaties zullen landbouwbedrijven naar verwachting een eigen drone in bezit hebben en hier zal dus ook met enige regelmaat worden gevlogen. In de gebieden met kleine landbouwbedrijven (blauw/groen) zal naar verwachting meer gebruik gemaakt worden van 'as a service' dronediensten voor inspectie. Deze inspecties laten zich dus lastiger voorspellen en modelleren.



Figuur 13 Agrarische percelen in Nederland [21] gekleurd naar perceelomvang (oranje: meer dan 50 ha, rood: meer dan 100 ha) (bron onderlaag kaart: BRT, PDOK, CC-BY-4.0)

3.3.5 Infrastructuurinspectie

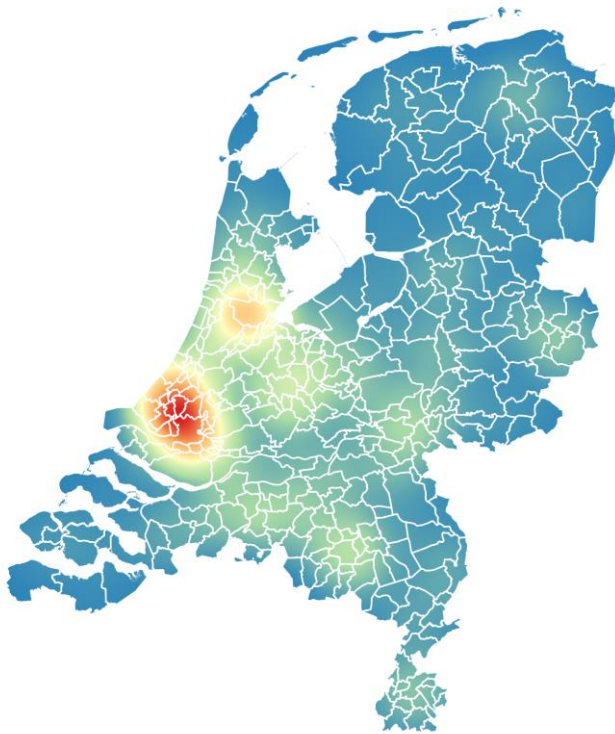
De laatste categorie die we onderscheiden infrastructuurinspectie en calamiteiten. Over het algemeen zullen de inspecties gepland zijn en verlopen via een ad-hoc model (zie Tabel 2). Denk bijvoorbeeld aan inspecties van spoorwegen, hoogspanningslijnen, dijken of windmolens. Ook zullen deze inspecties over het algemeen niet erg frequent zijn. Zo hoeven waterkeringen slechts eens in de twaalf jaar geïnspecteerd te worden [22]. Ook windmolens worden slechts eens in de een à twee jaar geïnspecteerd en ook een steeds groter deel van deze inspectie zal worden vervangen door monitoring met sensoren/AI [23]. Doordat dergelijke inspecties sporadisch worden uitgevoerd is de kans klein dat deze een grote impact zullen hebben op de communicatie- en spectrumbehoefte (ook omdat er vaak geen behoefte is aan live 4K videobeelden, in veel gevallen kunnen opnames worden teruggekeken. Wel is er sprake van direct-steering).

3.3.6 Calamiteiten

In tegenstelling tot de andere categorieën, zou de inzet van drones bij calamiteiten wel een sterke

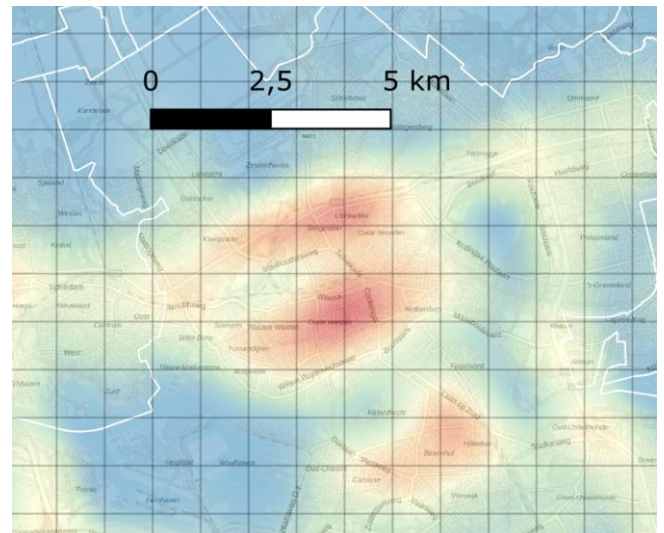
impact kunnen hebben op de communicatie- en spectrumbehoefte. Op basis van de gevoerde gesprekken ontstaat het beeld dat drones bij calamiteiten ingezet kunnen worden op basis van het 'drone-in-a-box' model. Door deze boxen strategisch op te stellen (op basis van een maximale aanvliegtijd) kan een landelijk dekkend netwerk worden gecreëerd). Hierbij kan worden gedacht aan een model waarbij iedere hulpdienst zijn eigen netwerk van 'drones-in-a-box' heeft, maar een gedeelde vloot lijkt meer voor de hand te liggen. Een enkele drone zou daarbij als first responder meerdere hulpdiensten van (eventueel verschillende soorten) informatie moeten voorzien. Nadien kunnen hulpdiensten besluiten om extra drones in te zetten voor specifieke doeleinden (infraroodbeelden, gasmetingen, etc.).

Om gevoel te krijgen voor de 'dichtheid van calamiteiten' kan bijvoorbeeld gekeken worden naar het aantal verkeersongevallen. Onderstaande Figuur 14 toont de geografische dichtheid van verkeersongevallen in 2021. Figuur 14 toont in totaal 114.219 ongevallen, wat neerkomt op gemiddeld 312 ongevallen per dag en (afhankelijk van de mate waarin ongevallen geconcentreerd overdag/in de spits plaatsvinden) gemiddeld tussen de 13 en 40 ongevallen per uur. Logischerwijs vinden er in dichtbevolkte gebieden en rondom drukke verkeersknooppunten meer ongevallen plaats (de 6-7 grootste steden van Nederland zijn duidelijk te herkennen op de kaart).



Figuur 14 Heatmap verkeersongevallen in 2021 (bron gegevens: Rijkswaterstaat [24], bron gemeente-indeling: CBS/Kadaster, 2022).

Een drone zou bij ongevallen sneller ter plaatse kunnen zijn dan een auto, zodat sneller overzicht kan worden verkregen over de situatie. Bij een gewenste 'aanvliegtijd' van maximaal 5 minuten en een vliegsnelheid van 60 km/u dient een drone op maximaal 5 kilometer van de ongevallocatie te zijn gestationeerd. Dit lijkt in een aantal gevallen goed te realiseren met een beperkt aantal drones. Als voorbeeld toont Figuur 15 een detaillering van Figuur 14 voor Rotterdam. Een groot aantal verkeersongevallen bevindt zich binnen een gebied van ongeveer 4 bij 5 kilometer, en is dus aan te vliegen door een enkele (strategisch opgestelde) drone.



Figuur 15 Locaties in Rotterdam waar de meeste verkeersongevallen plaatsvonden in 2021 (bron gegevens: Rijkswaterstaat [24], bron kaartlaag: BRT, PDOK, CC-BY-4.0). Het raster toont vlakken van 1 km².

Wanneer er naast de drones die worden ingezet bij calamiteiten ook nog een groot aantal 'reguliere drones' en andere spectrum- en communicatie behoevende apparaten actief zijn in een bepaald gebied (denk aan de haven van Rotterdam of Schiphol) is het denkbaar dat er druk op het netwerk ontstaat. Zeker omdat de meeste toepassingen ook gebruik zullen maken van live 4K videobeelden om goed zicht te krijgen op de situatie (zie §4.2).

4 Communicatiebehoefte

In dit hoofdstuk analyseren we de communicatiebehoefte van UAS. We maken een onderscheid tussen verschillende vormen van communicatie. Per vorm bespreken we de vereisten (in termen van minimum-eisen aan het onderliggende communicatiekanaal) en relevante ontwikkelingen die hier invloed op kunnen hebben.

Op hoofdlijnen zijn de volgende categorieën van communicatie te onderscheiden die specifiek van belang zijn voor UAS:⁵

- Command & control-communicatie (hierna: C2-communicatie);
- Payloadcommunicatie;
- Positierapportage.

We bespreken de specifieke communicatiebehoefte hieronder per categorie.

4.1 C2-communicatie

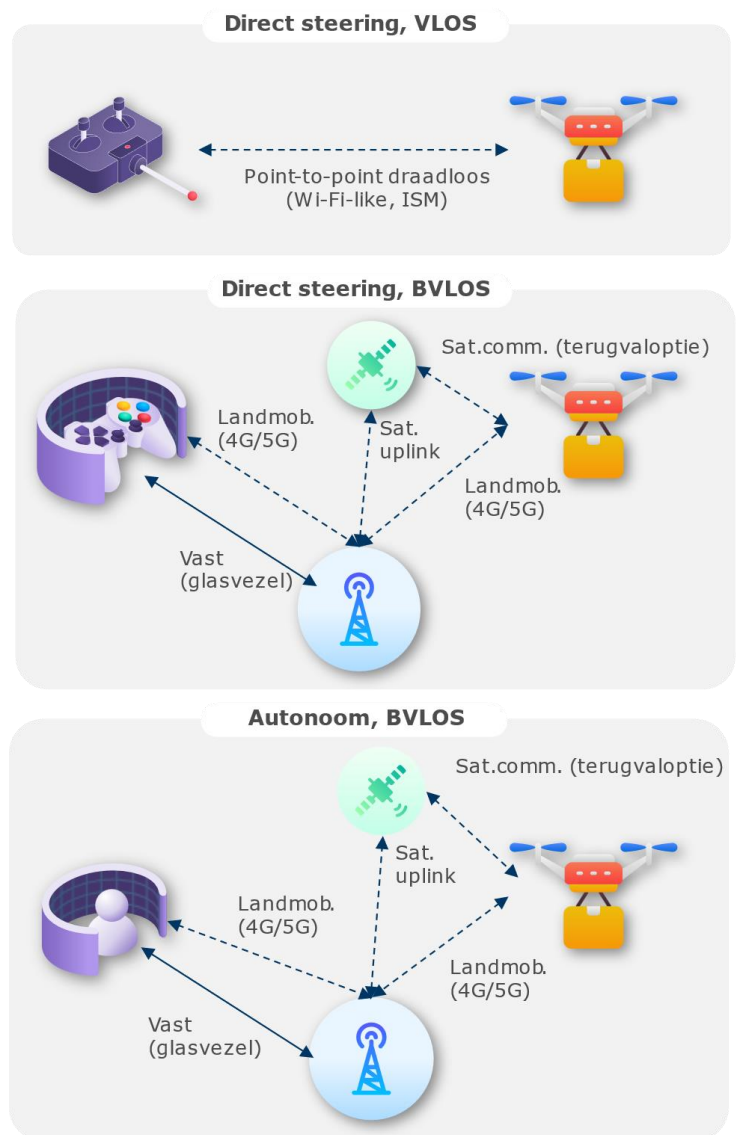
Bij C2-communicatie gaat het om de gegevens die tussen de operator en de UAS worden uitgewisseld, zoals besturingscommando's (van operator naar UAS) en sensorgegevens (zoals positie en luchtdruk, van UAS naar operator). In brede zin bedoelen we hier alle communicatie die voor besturing, en niet voor de 'payload' bedoeld is (in de literatuur soms afgekort tot CNPC: *Control and Non-Payload Communication*).

4.1.1 Besturingsmodi

Bij C2-communicatie is het relevant onderscheid te maken tussen de verschillende modi voor het besturen van een drone. Afhankelijk van de modi worden namelijk andere eisen gesteld aan de onderliggende communicatiekanalen. Figuur 16 toont deze verschillende modi schematisch.⁶

⁵ We baseren dit onder andere op de categorisering die 3GPP maakt. (ETSI/3GPP, 2022) Daarbij komt de categorisering nadrukkelijk terug in de diverse gevoerde gesprekken.

⁶ In (Valavanis, Oh, & Piegl, 2008) worden dezelfde modi genoemd, met de toevoeging van 'mesh' (waarbij UAS



Figuur 16 Verschillende modi voor besturing (C2) van UAS

Direct steering, VLOS

De meest traditionele besturingsmodus is *direct steering* bij een zichtlijn tussen UAS en operator (VLOS). Hierbij bestuurt een operator de UAS op basis van sturbewegingen, die via een rechtstreekse radioverbinding van de operator naar de UAS worden verzonden. De UAS ontvangt de sturbewegingen en past ze toe via servo's. Deze vorm van besturing

onderling communiceren). Zoals verderop zal blijven zien we deze communicatievorm niet zozeer terug bij C2-communicatie, maar mogelijk wel bij verkeer ten behoeve van *detect and avoid*.

wordt al toegepast sinds de intrede van radiografische modelbouw.⁷ Veel modernere drones bieden daarnaast een videoverbinding, die de piloot eventueel aanvullend kan gebruiken om meer overzicht over de situatie te krijgen. Moderne drones zullen daarnaast zijn uitgerust met GNSS en andere sensoren, waardoor de drone (bijvoorbeeld bij verlies van verbinding) kort autonoom kan vliegen (om een veilige hoogte op te zoeken en eventueel terug te keren) en die de operator assisteren bij besturing.

Veelal wordt gebruik gemaakt van een vergunningsvrije frequentieband en een protocol dat afgeleid is van Wi-Fi. Vrijwel alle consumentendrones werken op basis van direct steering. Daarnaast leent *direct steering* zich goed voor diverse vormen van professionele inzet, met name als dit ad-hoc toepassingen zijn – bijvoorbeeld inspecties van gebouwen en daken.

Direct steering, extended VLOS

Bij een (direct bestuurde) *extended VLOS-operatie* bevindt de UAS zich (net) buiten VLOS, maar nog binnen het radiobereik voor rechtstreekse communicatie. Een waarnemer zal bij deze operatie oog houden op de drone. De communicatiebehoefte is in dat geval vergelijkbaar met wat in de voorgaande paragraaf wordt beschreven voor 'Direct steering, VLOS'.

Wanneer een UAS (ook) *buiten* het bereik van directe radiocommunicatie vliegt (of moet kunnen vliegen), dan geldt de communicatiebehoefte voor 'Direct steering, BVLOS' (hieronder besproken).

Direct steering, BVLOS

De tweede variant is *direct steering* zonder zichtlijn tussen UAS en operator. Het is mogelijk om in dit scenario een rechtstreekse radioverbinding te gebruiken. Moderne transmissieprotocollen zoals OcuSync 3.0 van DJI hebben in de praktijk een bereik van enkele kilometers. [25] Afhankelijk van de beoogde toepassing van de UAS kan deze zich echter ook verder van de operator bevinden dan de afstand die met een rechtstreekse verbinding realiseerbaar is. Om inzetbaar te zijn op korte en langere afstanden van de operator, en in verschillende gebieden, zal bij BVLOS in de meeste gevallen vermoedelijk

gebruik worden gemaakt van een communicatie-infrastructuur. Hierbij worden eveneens rechtstreekse stuurbewegingen doorgezonden naar de drone, en kan de drone zijn uitgerust met sensoren en beperkte functionaliteit voor autonoom vliegen.

Omdat de operator zelf geen zichtlijn heeft naar het toestel is het van groot belang dat deze een overzicht kan krijgen over de situatie. Een videoverbinding vanaf de drone (en/of zeer betrouwbare en rijke sensorinformatie) is in deze modus dan ook vele malen belangrijker dan in het eerdere scenario. Deze modus stelt dan ook hoge(re) eisen aan het gebruikte communicatiekanaal.

Omdat de communicatie betrouwbaar moet zijn (zie verderop) worden veelal twee vormen van communicatie toegepast (zoals een landmobiel netwerk en communicatie via een satelliet). Bij landmobiele netwerken gaat het om landelijke openbare 4G- en 5G-netwerken. Deze netwerken zijn ingericht om een goede dekking en hoge capaciteit te bieden 'op de grond', maar niet noodzakelijkerwijs in de lucht. In de praktijk blijkt dat er desondanks een werkbare verbinding tot stand kan worden gebracht. Omdat grotere afstanden worden afgelegd (ook nog eens over complexere infrastructuur) is de latency van de verbinding hoger dan bij een directe verbinding binnen zichtlijnafstand.

De operators kunnen zich op een centrale locatie bevinden, van waaruit meerdere UAS tegelijkertijd worden bestuurd.

Autonoom, BVLOS

In de laatste variant vliegt de UAS volledig autonoom. Dat wil zeggen dat het luchtvaartuig zelf de besturing uitvoert op basis van abstracte commando's (zoals een 'waypoint' waar het luchtvaartuig naartoe dient te vliegen, of bijvoorbeeld het commando om te landen). Daarbij wordt informatie gebruikt van sensoren aan boord (zoals GNSS, sonar, camera's, barometer/altimeter, et cetera) en eventueel informatie die wordt gecommuniceerd naar het luchtvaartuig (denk aan weerinformatie, kaartinformatie, posities van andere luchtvaartuigen, et cetera).

De operators kunnen zich op een centrale locatie bevinden, van waaruit meerdere UAS tegelijkertijd worden bestuurd. Kenmerkend is dat zij hierbij geen

communicatie. Bij racedrones en voor 'first person' (FPV) besturing vinden we nog wel analoge videosystemen.

⁷ Veelal werd hiervoor analoge radiocommunicatie toegepast. Moderne drones maken gebruik van digitale

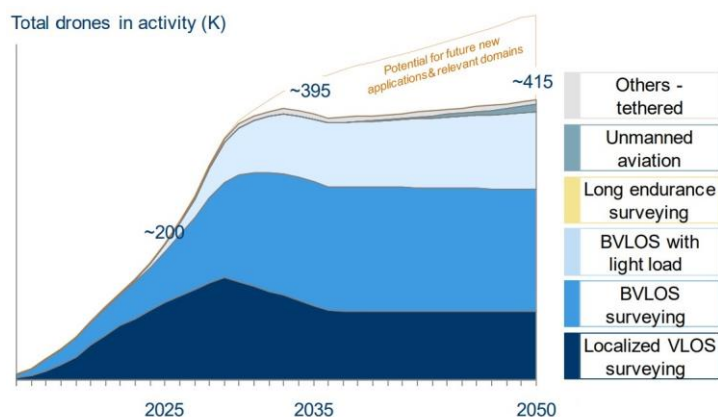
stuurbewegingen uitvoeren, maar alleen instructies geven aan de luchtvaartuigen. De videoverbinding is in deze modus niet essentieel.⁸ Er kan vergeleken met het vorige scenario dan ook worden volstaan met veel minder bandbreedte en potentieel een hogere minimale latency (voor het C2-verkeer althans).

Ontwikkeling en besturingsmodi

Afgaand op de literatuur en de gevoerde interviews verwachten we dat in de komende 5 jaar vrijwel alle UAS nog rechtstreeks bestuurd zullen worden (zowel VLOS als BVLOS). Drones worden daarbij wel voorzien van steeds meer intelligentie en steeds meer sensoren aan boord. We verwachten een geleidelijke toename van deze autonome functies (die in eerste instantie de operator zullen assisteren en daarnaast automatisch kunnen ingrijpen bij het wegvallen van de verbinding). Op termijn zal de operator steeds minder 'zelf' aan de knoppen zitten. Het moment waarop de operator alleen nog hoeft te besturen in uitzonderingsgevallen lijkt echter nog ver weg. Dit beeld wordt bevestigd in een eerder onderzoek van SESAR [7]. Zij voorzien dat voor een deel van de toepassingen, met name op het gebied van inspectie, het aantal VLOS vluchten nog zal toenemen tot 2030, maar geleidelijk aan vervangen zullen worden door BVLOS vluchten (zie Figuur 17 en Figuur 18). Onbemande luchtvaart laat ook volgens hun voorspellingen nog op zich wachten tot na 2035 en zelfs in 2050 is het aandeel van deze vluchten zeer beperkt (Figuur 18). Ook SESAR verwacht een graduele toename in het aantal vluchten dat autonoom zal worden uitgevoerd, maar wel met grote verschillen tussen sectoren. Voor inspectiedoeleinden lijken autonome vluchten realistischer dan voor (personen)transport.

Mission types	Sectors profiled in-depth				
	Agriculture	Energy	Public safety & security	Delivery & e-commerce	Mobility & transport
Localized Surveying (primarily VLOS)		Infrastructure sites	Police & fire, in-vehicle units		
Long range Surveying (primarily BVLOS)	Crop & livestock monitoring	Pipeline & power lines	Police & fire, disasters, wildlife		Railway inspection
Light load movement (primarily BVLOS)	Crop spraying / pellet application			Parcel, medical supply, delivery	
Long endurance Surveying (primarily ≥ 150m)	Large land monitoring	Pipeline & power lines	Border control, maritime, environment surveillance		
Unmanned aviation				Cargo planes, air freight	Passenger planes & rotorcraft
Others		Tethered wind energy prod.			

Figuur 17: Type vlucht (VLOS, BVLOS, autonoom) per type toepassing [7].



Figuur 18: Totaal aantal vluchten per type vlucht (VLOS, BVLOS, autonoom) over de tijd in Europa [7].

Bovenstaande leidt tot een aantal interessante gevolgen voor de behoefte aan C2-communicatie. Allereerst neemt de relevantie en de minimale betrouwbaarheid van de videofeed van de drone geleidelijk af naarmate de mate van autonomie groter wordt. De videofeed is verantwoordelijk voor relatief grote hoeveelheden data vergeleken met het overige C2-verkeer en daarmee een belangrijke factor in de totale communicatiebehoefte per drone. Daarnaast mag de maximale latency hoger zijn

⁸ Een van de gesproken drone-dienstverleners gaf zelfs aan te overwegen de camera te verwijderen van een autonoom vliegende drone, omdat deze voor de besturing niet

nodig was, terwijl de aanwezigheid ervan wel privacyvraagstukken zou kunnen oproepen.

wanneer er geen stuurbewegingen hoeven worden overgebracht.

4.1.2 KPI's en normen

De vereisten voor communicatiekanalen voor C2-communicatie zijn geïnventariseerd door (onder andere) 3GPP. [26] Tabel 3 toont de normen waaraan C2-dataverbindingen moeten voldoen, zoals gedefinieerd in de 3GPP-specificatie voor UAS in 5G-netwerken (en bevestigd in gesprekken).

In dit kader is het relevant om de C2-videocommunicatie (de videofeed ten behoeve van een operator op afstand) te splitsen van de overige C2-communicatie (het uitwisselen van stuurbewegingen, sensorinformatie, et cetera).

C2 Stuur- en sensorcommunicatie

Voor stuurbewegingen (operator-naar-UAS) stelt 3GPP een veel strengere eis aan de maximale latency (<40 ms) dan aan abstractere instructies (<1 s). Een en ander is direct te relateren aan de snelheid waarmee een UAS vliegt (bij 100 km/u legt de UAS in 1 seconde een afstand van 27,7 meter af, terwijl in 40 ms een UAS bij dezelfde snelheid slechts 1,1 meter verder is). De looptijd is kortom een directe afgeleide van de minimaal gewenste scheiding van luchtverkeer en een functie van de snelheid.

Van UAS naar operator bestaat het C2-dataverkeer met name uit berichten die aangeven wat de status en positie van de UAS is. Denk hierbij aan coördinaten (op basis van GNSS of een landmobiel netwerk), de hoogte (op basis van een hoogtemeter en/of barometer) en interne sensoren (zoals het batterijvoltage). Hierbij geldt eveneens dat de tijdigheid en betrouwbaarheid van de verbinding belangrijker is wanneer er op afstand wordt gestuurd dan wanneer de UAS autonoom vliegt op basis van abstractere instructies.

C2 Videofeed

Hierbij gaat het om videobeelden en eventueel andere rijke sensordata (van UAS naar operator) die een menselijke piloot in staat stellen de UAS te besturen. Voor autonoom vliegende drones is de verwachting dat een videostream op de langere termijn mogelijk geen noodzakelijkheid is. De videostream hoeft daarnaast alleen van voldoende kwaliteit te zijn om een situationeel overzicht te krijgen. Bij veel huidige UAS is de C2-videofeed dan ook van lagere kwaliteit dan wat de ingebouwde (payload)camera kan waarnemen en opslaan.

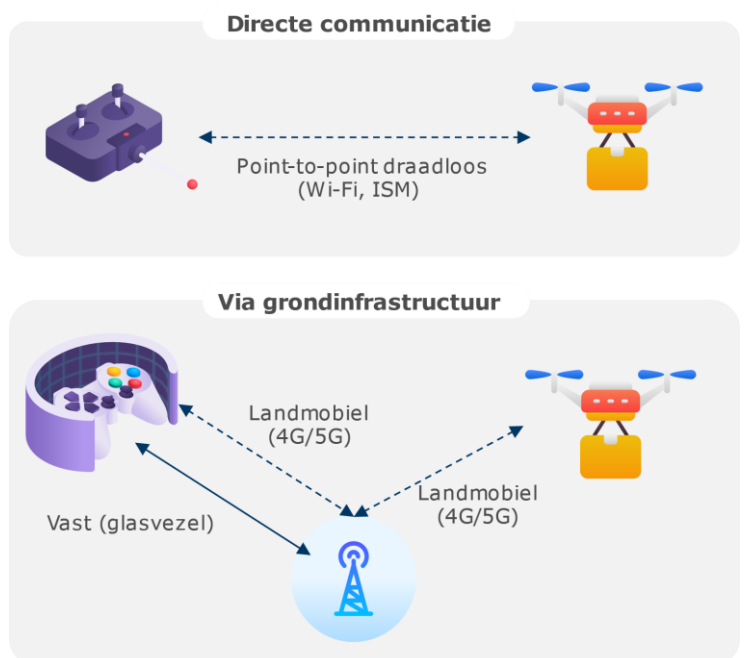
Tabel 4 toont de normen waaraan C2-dataverbindingen moeten voldoen, zoals gedefinieerd in de 3GPP-specificatie voor UAS in 5G-netwerken (en bevestigd in interviews).

4.2 Payloadcommunicatie

Payloadcommunicatie betreft het 'applicatiespecifieke' dataverkeer tussen UAS en operator. De uitgewisselde gegevens worden niet gebruikt voor de besturing van de UAS. De communicatiebehoefte is per definitie sterk afhankelijk van de applicatie, en kan daardoor sterk variëren. Een aantal veelvoorkomende voorbeelden zijn de volgende:

- Hoge-resolutie (4K+) videobeelden ten behoeve van inspectie vanuit de lucht.
- Hoge-resolutie sensorbeelden (infrarood, radar, et cetera) ten behoeve van inspectie vanuit de lucht.
- Besturing van een stuk gereedschap aan de UAS.

Voor payloadcommunicatie zien we de volgende voor de hand liggende communicatiescenario's (Figuur 19).



Figuur 19 Modellen voor payloadcommunicatie UAS

Het algemene beeld van payloadcommunicatie bij de gevonden toepassingen is dat deze communicatie weliswaar veeleisend is (vooral in termen van gevraagde bandbreedte), maar dat hierin wel vaak

flexibiliteit bestaat (zo willen gebruikers van UAS-videodrones idealiter zo snel mogelijk over de hoge-resolutievideo beschikken die wordt opgenomen vanaf de UAS, maar zou dit ook lokaal kunnen worden opgeslagen op een geheugenkaart en na landen kunnen worden uitgelezen). Anders gezegd: de communicatiebehoefte is wellicht niet vraag-, maar aanbodgestuurd. Als de aanwezige communicatie-infrastructuur het real-time uitwisselen van bijvoorbeeld 4K-video in hoge kwaliteit kosteneffectief toestaat, zullen gebruikers hier gebruik van gaan maken.

Een uitzondering is bijvoorbeeld de douane die in de Rotterdamse haven *real-time* indringers wil kunnen opsporen en volgen.

Het payloadverkeer is, per definitie, niet kritiek voor de veiligheid van de operatie van de UAS zelf. Dit betekent over het algemeen dat payloadverkeer (als het over dezelfde communicatie-infrastructuur zou verlopen als C2-communicatie) lager kan en moet worden geprioriteerd dan C2-verkeer.

4.2.1 Overzicht

Tabel 3 en Tabel 4 op de volgende pagina geven de eisen die worden gesteld aan verschillende vormen van respectievelijk C2-datacommunicatie en C2-videocommunicatie.

Tabel 3 KPI's en normen voor C2-stuur- en sensorcommunicatie van en naar een UAS (bron: o.a. [26], bewerking Dialogic)

Besturing	Richting	Typische interval berichten	Maximale grond-snelheid UAS	Typische omvang bericht ⁹	Maximale (end-to-end ¹⁰) latency	Minimale betrouwbaarheid ¹¹	Positieve acknowledged
Niet-autonome vlucht, besturing op basis van waypoints¹²	Naar UAS	>=1 s	30 km/u	100 B	1 s	99,9%	Vereist
	Van UAS	1 s	30 km/u	84-140 B	1 s	99,9%	Niet-vereist
Niet-autonome vlucht, directe handmatige besturing¹³	Naar UAS	40 ms	60 km/u	24 B	40 ms	99,9%	Vereist
	Van UAS	40 ms	60 km/u	84-140 B	40 ms	99,9%	Niet-vereist
Autonome vlucht (op basis van UAS-verkeersleiding¹⁴)	Naar UAS	1 s	300 km/u	<10 kB	5 s	99,9%	Vereist
	Van UAS	1 s ¹⁵	300 km/u	1500 B	5 s	99,9%	Vereist
Autonome vlucht (op basis van UAS-verkeersleiding), bij vertrek en landen	Naar UAS	500 ms	50 km/h	4 kB	10 ms	99%	Vereist
	Van UAS	500 ms		4 kB	140 ms	99,99%	Vereist

⁹ Op de applicatielaag, dus exclusief bijvoorbeeld headers en overhead van onderliggende lagen.

¹⁰ De volledige reactietijd tussen het ingeven van een commando en het (starten van) effectueren daarvan.

¹¹ Gedefinieerd als de kans waarmee een bericht aankomt binnen de gestelde latency-eis op de applicatielaag, gegeven netwerkdekking.

¹² Video is niet vereist noch te verwachten in deze modus.

¹³ *Direct stick steering*. Een video-feedbacksignaal is vereist in deze modus.

¹⁴ Vereisten op basis van een statische situatie tijdens een missie.

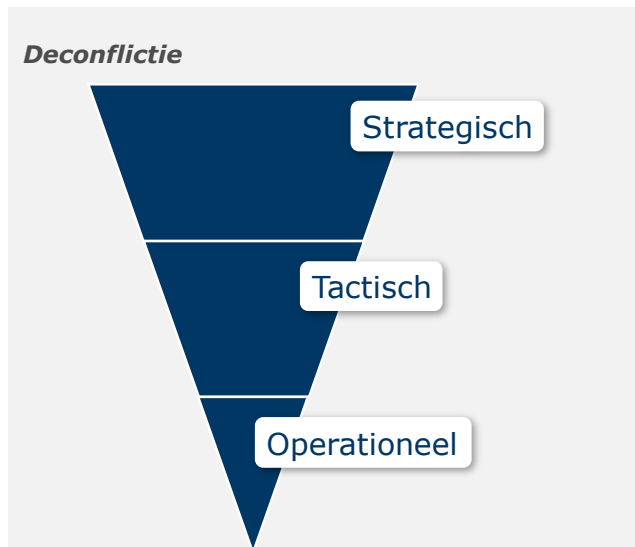
¹⁵ Het is denkbaar dat op hogere lagen hogere intervals/time-outs acceptabel zijn (tot 30 s in de uplinkrichting en 300 s in de downlinkrichting).

Tabel 4 KPI's en normen voor C2-videofeeds (bron: [26], bewerking Dialogic), bij een snelheid tot 60 km/u

Scenario	Bandbreedte benodigd	Maximale latency (end to end)	Betrouwbaarheidseis	Richting	Positieve ACK
VLOS (<i>visual line of sight</i>)	2 Mbit/s at 480p, 30 fps	1 s	99,9%	Van UAS	Niet-vereist
BVLOS (<i>beyond visual line of sight</i>)	4 Mbit/s at 720p, 30 fps	140 ms	99,99%	Van UAS	Niet-vereist

4.3 Positierapportage en andere diensten

Bij positierapportage gaat het om communicatiesignalen waarmee de UAS zich kenbaar maakt aan andere luchtvaartuigen en de luchtverkeersleiding. Op basis van deze gegevens kan de luchtverkeersleiding aanwijzingen en andere informatie verstrekken aan de UAS-operators en andere luchtvaartgebruikers, zodat deze veilig en efficiënt kunnen vliegen.



Het U-spaceconcept, maar ook conventionele luchtverkeersleiding, kent drie niveaus van conflictmanagement:

- **Strategisch:** het voor vertrek plannen van vluchten zonder conflicten met andere vluchten (bemand of onbemand). Iedere vlucht dient een plan in met een route die op het moment van vliegen geen andere geplande routes kruist.
- **Tactisch:** het monitoren en bijsturen van onderlinge afstand ('separatie') tijdens de vlucht. De verkeersleiding monitort het verkeer en verstrekt koers-, hoogte- of snelheidsinstructies om conflicten te voorkomen.
- **Operationeel:** als het plan en de verkeersleiding niet effectief blijken, het bepalen en uitvoeren van ontwijkende manoeuvres wanneer er toch een conflict dreigt op te treden.

Bij het wegvallen van de verbinding en bij autonoom vliegen is van belang dat dit mechanisme autonoom werkt, hier wordt veel onderzoek naar verricht.

4.3.1 Regelgeving

Vrijwel alle UAS¹⁶ zijn vanaf 2024 verplicht om hun aanwezigheid kenbaar te maken met 'Direct remote ID' (EU-verordening 2019/947). Daarbij meldt de UAS ten minste het registratienummer van de operator, het serienummer van de UAS, de positie en hoogte (huidig of ten tijde van opstijgen), richting en grondsnelheid, geografische positie van de operator (c.q. het opstijgpunt), noodstatus en een tijdstempel. EASA heeft hierbij gekozen voor rechtstreekse communicatie (*Direct Remote ID*), wat betekent dat de UAS periodiek een radiosignaal uitzendt met de eigen gegevens dat kan worden ontvangen met mobiele apparaten op de grond bijvoorbeeld burgers of juist handhavers. De technologie die wordt gebruikt is Bluetooth Long Range en Wi-Fi (*Neighbour Aware Network and Beacon, Wi-Fi Aware* [27]) tot 10 resp. 100 mW (EN 4709-002 [28]).

Voor het vliegen in U-spaceluchtruim, wordt naast *Direct Remote ID* ook *Networked Remote ID* vereist. Hierbij meldt de UAS de positie via een internetverbinding aan de verkeersleiding, zodat deze over grotere afstanden te volgen is en voor een groter oppervlak een verkeersbeeld kan worden opgebouwd.

In U-space zijn naast identificatie nog drie diensten verplicht om af te nemen (EU-verordening 2021/664). Het verkrijgen van vluchtautorisatie op basis van een operationeel plan, het verkrijgen van geografische informatie over het luchtruim en eventuele beperkingen en actuele verkeersinformatie. Hiervoor is de verwachting dat communicatie via het mobiele netwerk en niet air-to-air plaatsvindt.

¹⁶ Uitgesloten zijn: (1) C0-drones (gewicht <250 g), (2) C3-drones die bekabeld zijn (<25 kg en elektrisch

aangedreven, bekabeling minder dan 50 meter), C4-drones (in de praktijk modelvliegtuigen). (Gross, 2022)

ADS-B

Automatic Dependent Surveillance – Broadcast (ADS-B) is een systeem waarmee bemande luchtvaartuigen kunnen worden gevolgd ten behoeve van (bovenal) de luchtverkeersleiding. In tegenstelling tot primaire radar vereist ADS-B net als Mode S medewerking van luchtvaartuigen. Voor identificatie en hoogtebepaling zijn Mode S transponders in het meeste luchtruim in Nederland verplicht. In de EU moeten per juni 2023 grote vliegtuigen ook zijn uitgerust met *ADS-B Out* dat periodiek positie en andere relevante informatie via radiocommunicatie doorgeeft aan grondstations. Vanuit het luchtvaartuig kan eventueel ook worden geluisterd naar ADS-B-radiob berichten van andere luchtvaartuigen (*ADS-B In*). ADS-B-transponders werken gecombineerd met de Mode S transponder in de 1.090 MHz-band.

Naast deze vorm van ADS-B bestaat ADS-B UAT (*Universal Access Transceiver*). Via deze variant, die werkt in de 978 MHz-band, kan aanvullend vanaf de grond informatie over luchtvaartuigen in de omgeving beschikbaar worden gesteld aan luchtvaartuigen met ADS-B-apparatuur aan boord, over luchtvaartuigen die zelf niet zijn uitgerust met ADS-B (maar waarvan de positie anderszins bekend is bij de luchtverkeersleiding).

4.3.2 Tactische deconflictie

Om volledige verkeersinformatie te kunnen verstrekken, en op termijn ook tactische deconflictie van verkeer te kunnen realiseren, verplicht de verkeersleiding ook het bemand verkeer om zich elektronisch zichtbaar te maken in U-spaceluchtruim. Dit is in het huidige luchtruim niet altijd verplicht, noch het geval.

De identificatie van bemand verkeer in U-space vindt plaats via de *e-Conspicuity*-standaard (EASA directive 2022/024/R [29]). Er worden vier methoden

genoemd via welke een *bemand* luchtvaartuig in U-space luchtruim haar positiegegevens kan doorgeven (de USSP dient alle vier de methoden te ondersteunen): [29, p. 26]

1. ADS-B (Out) op 1090 MHz, in overeenstemming met ICAO Annex 10;
2. ADS-B (Out) op 978 MHz (UAT), in overeenstemming met ICAO Annex 10, Volume 3, Chapter 12. Dit kan alleen in landen waar deze band beschikbaar is gemaakt voor deze luchtvaarttoepassing, dit is vaak (nog) niet het geval;
3. ADS-Light via de 860 MHz-band (SRD¹⁷). [30] De regulering definieert hiervoor een technische standaard. Naast deze standaard is ook het gebruik van bestaande proprietaire oplossingen (o.a. FLARM, Open Gilder en Skytraxx zijn al in gebruik in de algemene luchtvaart) toegestaan, mits deze worden aangepast om te voldoen aan de minimum-eisen ten aanzien van de positiedoorgifte.¹⁸ [29, p. 26] [31]
4. Via mobiele telecommunicatienetwerken, inclusief middels applicaties op mobiele telefoons of andere devices, dit zal nog nader worden gespecificeerd.

Niet opgenomen in de standaard van EASA is laag vermogen ADS-B. ICAO is deze vorm aan het standaardiseren en verwacht dit in 2024 te publiceren.¹⁹ In tegenstelling tot ADS-B Light wordt deze standaard wel internationaal erkend.

De hierboven beschreven vormen van positiedoorgifte is *actief* vanuit het luchtvaartuig en werkt uiteraard alleen als alle luchtvaartuigen dit in overeenstemming met de afspraken doen. Over de vraag of in (deze diensten bij) U-space ook rekening dient te worden gehouden met niet-coöperatief verkeer (dat haar posities niet doorgeeft) verschillen de

¹⁷ SRD staat voor *Short Range Devices* in de zin van ECC-aanbeveling 70-03. (ECC, 2021) De band is bedoeld voor communicatie op lage vermogens en korte afstanden, zoals bijvoorbeeld voor draadloze autosleutels. De band wordt echter ook ingezet voor lange-afstandstoepassingen, zoals low-power wide-area IoT. Voor ADS-L wordt binnen deze band gebruik gemaakt van de frequentie 869,525 MHz, een kanaalbreedte van 250 kHz, GFSK en maximaal 500 mW/27 dBm zendvermogen (ERP). (EASA, 2022, p. 11)

¹⁸ In de praktijk zal dit betekenen dat de apparaten worden voorzien van een firmware-update die ervoor zorgt dat het apparaat (ook) het door EASA gestandaardiseerde ADS-L signaal uitzendt. Het was de verwachting dat deze apparatuur vanaf eind januari dit jaar beschikbaar zou zijn. Voor FLARM lijkt dat op moment van schrijven (eind februari 2023) nog niet het geval (FLARM Technology AG, 2023) noch voor Skytraxx. (Skytraxx GmbH, 2023)

¹⁹ Specifiek: ICAO DOC 9924 attachment A, Appendix S krijgt een hoofdstuk 4: Reduced capability 1090 MHz.

visies in de markt. Wanneer ook niet-coöperatief verkeer gedetecteerd zou moeten worden, kunnen de bovengenoemde methodes voor positiedoorgave worden aangevuld met *passieve* grondgebonden systemen zoals akoestische en elektro-optische sensoren, en actieve systemen zoals radar (van het kaliber dat op dit moment wordt ingezet voor vogel-detectie op luchthavens). Als dit niet wordt verwacht van U-space, blijft het de vraag wie wel verantwoordelijk wordt voor veiligheids- en beveiligingsrisico's van niet-coöperatief verkeer.

4.3.3 Operationele deconflictie

Bij operationele deconflictie gaat het om het ontwijken van luchtvaartuigen en obstakels die niet waren (of konden worden) voorzien. Zoals eerder toegelicht vindt operationele deconflictie zo min mogelijk plaats. Hoe hoger de betrouwbaarheid van de strategische en tactische deconflictie hoe minder het belang van operationele deconflictie.

Voor operationele deconflictie bestaat een breed scala aan technieken, welke bekend staan *als detect and avoid of sense and avoid*. Naast coöperatieve technieken (op basis van transponders) kan er gebruik worden gemaakt van 'eenzijdige' oplossingen op basis van camera's en beeldherkenning en radar.

Coöperatieve oplossingen

In de burgerluchtvaart is de bekendste oplossing TCAS (*Traffic Alert and Collision Avoidance System*). TCAS werkt via de Mode S transponder en kan de afstand, hoogte en koers van andere luchtvaartuig bepalen²⁰. Op basis van deze informatie kan worden bepaald of de separatie bij de huidige koersen op korte termijn in het geding komt. Als dat zo is biedt TCAS in de meest lichte variant een waarschuwing (*traffic information*) aan de piloot, en in de uitgebreidere versies ook aanwijzingen (die, wanneer opgevolgd, het risico op verlies van separatie wegnemen; zogenaamde *resolution advisories*). TCAS kan tussen twee of meer luchtvaartuigen coördineren, mocht dat nodig zijn.

Het gebruik van TCAS voor drones ligt niet voor de hand, in de eerste plaats omdat de piloot de uitwijkmanoeuvre moet uitvoeren en de drone deze niet aan boord heeft, en een verbinding met de operator niet altijd kan worden gegarandeerd. Daarnaast zijn

de vliegprestaties van een drone dermate anders dan die op basis waarvan TCAS is ontworpen. Drones zijn vergeleken met burgerluchtvaartuigen langzaam en vooral wendbaar in het laterale vlak. Voor onbemande luchtvaartuigen in U-space is er dus vooralsnog geen vergelijkbaar systeem of verplichting [32]. Er zijn ook juist specifieke behoeften voor drones, waar TCAS niet in voorziet, denk aan het detecteren van statische en dynamische obstakels zoals zendmasten respectievelijk mobiele hijskranen. Er zijn momenteel varianten van TCAS in ontwikkeling (onder andere ACAS X) die ook geschikt worden voor drones. [33]. EUROCAE WG-105 *UAS design and airworthiness performance standards* ontwikkelt een standaard voor *detect and avoid* in Europa.

Camera's en beeldherkenning

Drones kunnen gebruik maken van camera's (met stereo/dieptebeeld en beeldherkenning) om obstakels te herkennen en te omzeilen. Veel consumentendrones zijn voorzien van dergelijke systemen [34]. Cameragebaseerde systemen kunnen naast statische ook dynamische obstakels herkennen.

Naast camera's in het zichtbare lichtspectrum kan worden gewerkt met infraroodcamera's. Minder waarschijnlijk is dat wordt gewerkt met LiDAR (laser-scanning) of sonar (ultrasoon geluid). Deze oplossingen leggen geen beslag op het radiospectrum.

Radar

Een drone zou ook kunnen worden uitgerust met een radarsysteem. Voor drones komen daarbij 'miniradars' in beeld die gebruik maken van spectrum tussen 60 – 64 GHz. Onder andere Amazon heeft in de Verenigde Staten recent een aanvraag gedaan voor het gebruik van dit spectrum ten behoeve van radars op drones die pakketten gaan bezorgen. [35] Rond 2020 werden ook door andere bedrijven al vergelijkbare aanvragen gedaan. [36]

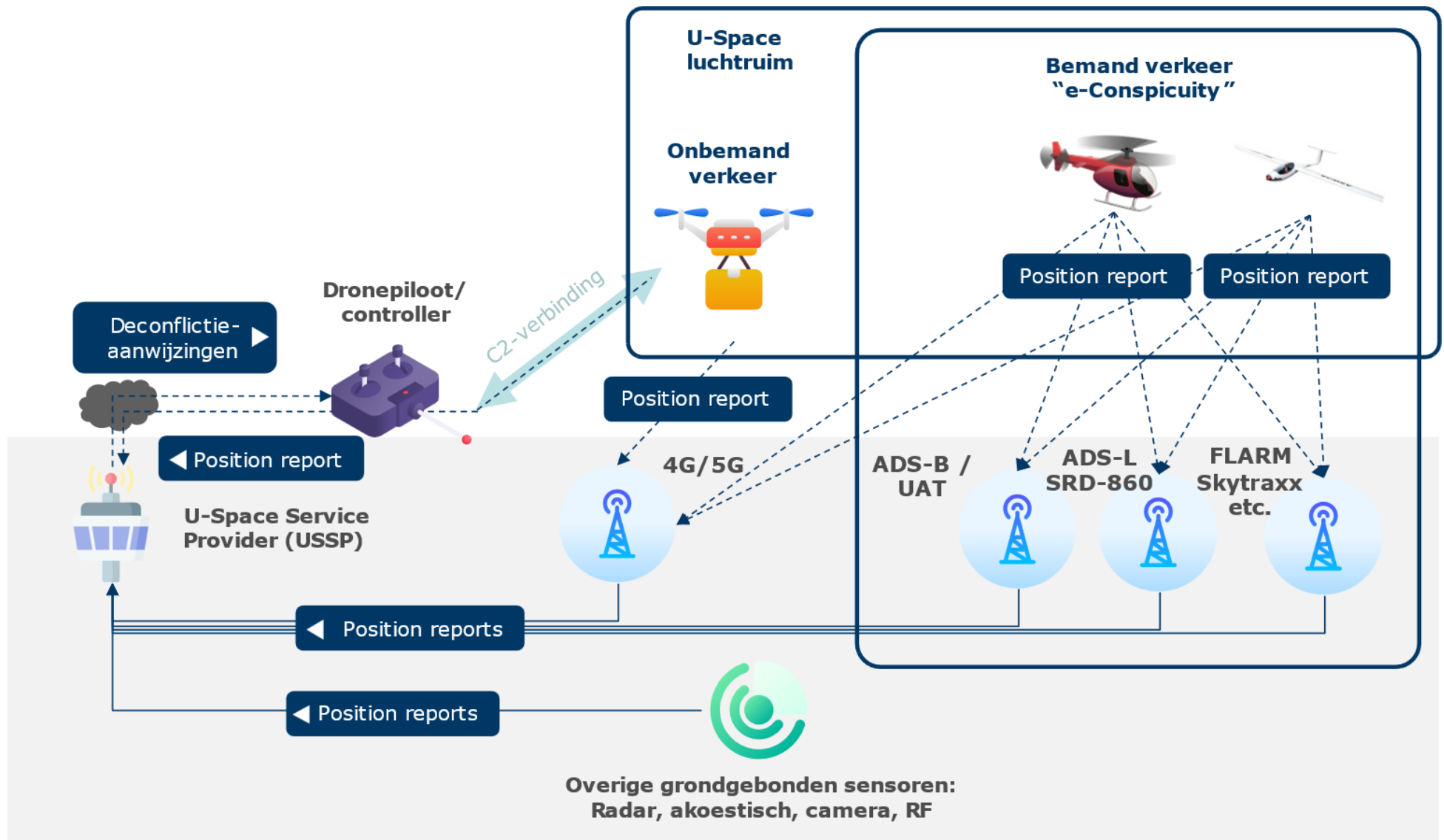
4.3.4 Terugvalopties

In alle gevallen zijn UAS voorbereid op het uitvallen van de communicatie – hetzij door storing of interferentie, hetzij door falen van de communicatieapparatuur. Een UAS zal bijvoorbeeld

²⁰ TCAS zendt meerdere keren per seconde 'ondervragingen' uit via 1.030 MHz; de antwoorden worden via

1.090 MHz (zelfde frequentie als Mode S/ADS-B) verzonden.

worden voorgeprogrammeerd om te blijven zweven, te dalen naar een veilige hoogte, te landen, rechtstreeks of via de oorspronkelijke route terug te vliegen naar de opstijglocatie. Sommige UAS zijn daarbij voorzien van sensoren zoals camera's maar ook radar om obstakels te vermijden.



Figuur 20 Scenario's in U-space voor positierapportage en deconflictie

5 Spectrumimpact

In dit hoofdstuk vertalen we de communicatiebehoefte (hoofdstuk 4) naar spectrumimpact. We bespreken deze impact per 'oplossingsrichting' voor communicatie.

5.1 Communicatiemodi

5.1.1 Mobiele communicatie (via grondgebonden netwerken)

UAS kunnen gebruik maken van landmobiele netwerken voor hun communicatie. Het ligt voor de hand dat dit op 3GPP-gebaseerde (4G- of 5G-)netwerken zijn. Om de voor C2-communicatie benodigde kwaliteitsgaranties (QoS) en gereserveerde capaciteit te kunnen realiseren kan daarbij gebruik worden gemaakt van *slicing*.

3GPP heeft daarnaast in Release 17 een onderdeel toegevoegd aan haar 5G-standaard waarmee 3GPP-netwerken worden uitgebreid met specifieke UAS-functies. Het relevante document uit de standaard is 3GPP TS 22.125 V17.6.0 (2022-03) "Uncrewed Aerial System (UAS) support in 3GPP, Stage 1, Release 17". [37]

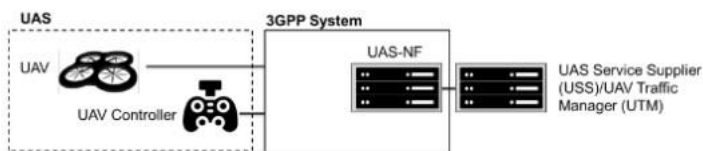


Figure 2: Example configuration of UAV entities in 3GPP Release 17 (Other configurations are possible)

Figuur 21 Mogelijke toepassing van 3GPP-connectiviteit en diensten voor UAS (bron: [37])

Figuur 21 toont een van de mogelijke vormen van inzet van 3GPP-connectiviteit en -diensten voor UAS. De UAS onderhoudt verbinding met het 3GPP-netwerk, waarbinnen een 'UAS network function' (UAS-NF) is gedefinieerd. Deze netwerkfunctie verzamelt gegevens over verbonden UAS en stuurt ze door aan een UAS-dienstaanbieder (USS) en/of UAS-verkeersleiding (UTM). Hierbij valt te denken aan de posities en identificatiegegevens van verbonden UAS. De UAS kan andersom ook gegevens opvragen via het netwerk (door te verbinden met een USS). Een 5G-netwerk kan daarnaast helpen bij plaatsbepaling van een UAS.

Openbare mobiele netwerken

Op dit moment wordt voor UAS gebruik gemaakt van 4G-connectiviteit via 'reguliere' openbare mobiele netwerken, soms in combinatie met satellietcommunicatie als terugvaloptie. De beperkte bandbreedte van C2-besturingscommunicatie vormt voor deze netwerken geen probleem, zo onderschrijft ook GSMA. [38] C2-videofeeds en payloadcommunicatie vragen uiteraard meer capaciteit van de netwerken.

Omdat de UAS boven de opstelpunten van de mobiele netwerken op de grond vliegen, 'zien' deze veel verschillende cellen in het netwerk tegelijk. Bovenal zijn de netwerken niet ingericht op gebruik boven de grond (bijvoorbeeld door de 'richting' van de antennes). Hoewel er vaak wel een zichtlijn zal zijn tussen de UAS en het basisstation, wat in principe bevorderlijk is voor de signaalkwaliteit, zal die er ook gelijktijdig zijn naar een aantal andere basisstations, wat leidt tot interferentie.

Er zijn diverse mogelijkheden om dit te verbeteren – zo kan gebruik worden gemaakt van (verticale en horizontale) gerichte signalen (*beamforming*) aan de zijde van het basisstation om het signaal naar een specifieke drone te verbeteren. Dit lukt in de open lucht boven een opstelpunt mogelijk zelfs beter dan op de grond, waar zich uiteraard diverse obstakels bevinden. Andersom kan ook vanaf het luchtvaartuig beamforming worden toegepast.

Bedreigingen

Invloed van mobiele communicatie van drones met mobiele communicatie op de grond

Communicatie met mobiele netwerken op de grond vanaf drones kan negatieve gevolgen hebben voor andere gebruikers van deze netwerken. In ECC-rapport 309 wordt ingegaan op deze effecten en worden beleidsmaatregelen voorgesteld om deze te mitigeren. [39] ECC merkt hierbij het volgende op:

The intention is to use already existing MFCN BSs, which are typically deployed to provide effective coverage at ground level. At this stage, mobile operators do not intend to develop specific network planning to respond to these new aerial uses. Due to this, coexistence studies are mostly required for UL, due to the elevated position of aerial UEs. No specific studies are required in the DL for non-AAS BSs, since the emissions characteristics are not

modified. Studies in the DL would only be required for the case of AAS base stations, where beam steering may lead to beam pointing above the horizon and may modify the emission characteristics. [39, p. 2]

Eventuele bedreigingen komen kort samengevat voort uit (1) het zenden van de drone naar het netwerk, wat vanwege de hoogte meer impact kan hebben dan een terminal op de grond, en (2) het 'omhoog' zenden van basisstations van het netwerk richting drones via beamforming (AAS: actieve antennesystemen). ECC geeft (in Tabel 1 in het rapport) een overzicht van potentiële 'slachtoffers' per band en mogelijke mitigatiemaatregelen.

Er is nog weinig te vinden over de performance van communicatie op basis van mobiele netwerken vanuit UAS, en de impact daarvan op de netwerken. Een werkgroep van GSMA heeft echter onlangs wel een specificatie gepubliceerd om dit te meten. [38]

Een UAS als basisstation

Naast bovenstaande zien we in enkele gevallen ook dat drones zélf worden ingezet als basisstation voor een mobiel netwerk. In dat geval kunnen uiteraard aanvullende bedreigingen bestaan. Deze toepassing verwachten we niet (structureel) in Nederland, vanwege de al uitstekende beschikbaarheid van mobiele connectiviteit.

Impact van het gebruik van de 3,5 GHz-band voor 5G-communicatie op luchtvaartuigen

Een laatste bedreiging die relevant is om te noemen, is de mogelijke impact van het gebruik van de 3,5 GHz-frequentie voor mobiele communicatie op radiohoogtemeters van luchtvaartuigen. Deze hoogtemeters maken gebruik van de 4,2 – 4,4 GHz-band en zouden (afgaand op een studie van RTCA [40]) kunnen worden verstoord door het mobiele gebruik. Dit probleem zou sterker kunnen worden wanneer mobiele netwerken deze frequentie ook ten behoeve van drones (en dus met 'omhooggerichte' antennes) gaan inzetten.

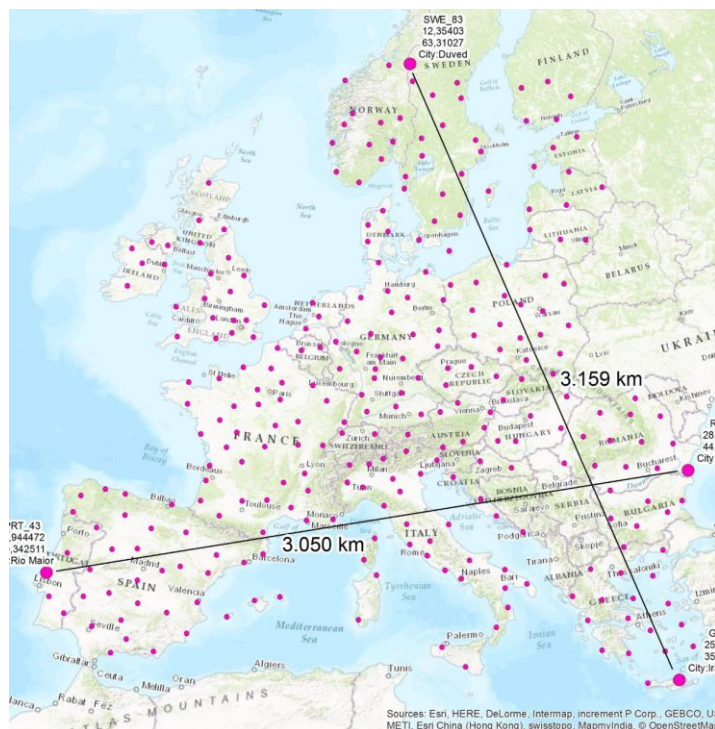
De 3,5 GHz-band is inmiddels in meerdere landen in gebruik genomen en dat levert voornamelijk problemen op, zo claimt GSMA [41]. Daarbij worden in enkele landen wel maatregelen genomen rond luchthavens. In de VS heeft de FAA geïnventariseerd in hoeverre luchtvaartuigen per type veilig kunnen landen op luchthavens in de VS. In de VS zijn maatregelen rond luchthavens genomen en zijn

aanpassingen vereist aan radiohoogtemeters (zoals filtering en aanpassing van procedures). Inmiddels rapporteert de FAA dat dit voor alle onderzochte typen geldt. [42]. De FAA heeft luchtvaartmaatschappijen verplicht om de radiohoogtemeters vóór 1 februari 2024 aan te passen. [43]

Kort samengevat is de bedreiging van mobiele communicatie voor radiohoogtemeters in de luchtvaart van voorbijgaande aard. Daarnaast is de impact in Nederland sowieso beperkter dan in de V.S.; hier loopt de 3,5 GHz-band voornamelijk tot 3.800 MHz (met besloten lokale netwerken in de bovenste 50 MHz) en is de impact beperkter ten opzichte van landen die het banddeel daarboven (ook) al inzetten voor mobiele netwerken.

European Aviation Network (EAN)

Het EAN is een netwerk dat luchtvaartuigen voorziet van breedbandconnectiviteit vanaf basisstations (Deutsche Telekom) in combinatie met satellietcommunicatie in de S-Band (Inmarsat). De ongeveer 300 grondstations hiervoor staan verspreid over 30 landen in Europa [44].



Figuur 22 De basisstations van het EAN-netwerk [45] Afbeelding © Deutsche Telekom AG

De grondstations zijn LTE-basisstations, met omhooggerichte antennes. Deze antennes kunnen zijn gemonteerd op basisstations voor de bestaande

reguliere mobiele netwerken. Desondanks staat het EAN-netwerk los van het mobiele netwerk 'op de grond': het gebruikt een aparte netwerkcode (MCC-MNC 901-53) en een frequentieband die door reguliere smartphones niet wordt ondersteund (LTE-band 65). Daarnaast is de LTE-technologie aangepast om te kunnen werken bij de hoge snelheden waarmee de vliegtuigen zich bewegen (de originele standaard ondersteunt snelheden tot 500 km/u). De cellen hebben een radius tot 75 kilometer, vele malen groter dan cellen in een 'regulier' mobiel netwerk. Het netwerk is tot 12 kilometer hoogte te gebruiken.

Het EAN-netwerk wordt gebruikt om passagiers in-flight Wi-Fi aan te bieden. Aan boord kunnen snelheden tot 75 Mbit/s (downstream) en 20 Mbit/s (upstream) worden gehaald. [44] De totale capaciteit van het netwerk zou zo'n 50 Gbit/s bedragen.

Het gebruik van EAN voor drones is mogelijk, maar ligt niet direct voor de hand. Het netwerk is ingericht voor een relatief lage dichtheid van gebruikers en heeft zeer grote cellen. In Nederland bevinden zich slechts drie basisstations voor EAN (Figuur 23). Bij gebruik door drones zou de capaciteit van deze drie basisstations tussen alle gebruikers (drones en andere luchtvaartuigen) moeten worden gedeeld. Daarnaast is de dekking gericht op hoogvliegende vliegtuigen, en is de afstand tussen de basisstations te laag om dekking te bieden voor drones op (veel) lagere hoogte.



Figuur 23 Opstelpunten voor EAN in Nederland (bron: Antenneregister, 26 januari 2023; bron onderlaag: gemeente-indeling CBS/Kadaster, 2022)

Netwerken in de 5.030 – 5.091 MHz-band

Een laatste mogelijkheid zouden specifieke netwerken in de 5.030 – 5.091 MHz-band kunnen zijn. In de VS wordt voor dergelijken netten vier blokken van 10 MHz in deze band beschikbaar gemaakt, en is daarnaast 'opportunistisch' spectrum beschikbaar voor tijdelijk gebruik (zie §5.2.2). In Nederland is vooralsnog onduidelijk hoe de band zal worden ingedeeld.

De band is op dit moment niet gestandaardiseerd als 3GPP-band (voor LTE/5G NR). [46] Het is denkbaar dat dit binnen enkele jaren alsnog gebeurt – een dergelijk initiatief zou kunnen worden genomen door 3GPP-deelnemers wanneer dit spectrum in meerdere markten beschikbaar komt. Het is ook denkbaar dat propriëtaire protocollen worden ingezet in de band (zoals uAvionix SkyLink [47]).

5.1.2 Satellietcommunicatie

UAS kunnen gebruik maken van satellietcommunicatie. Op dit moment zijn verschillende satellietcommunicatiediensten actief. Hierbij kan gebruik worden gemaakt van communicatiesatellieten in een relatief lage baan om de aarde (LEO: *Low Earth Orbit*) en in de meer traditionele geostationaire banen (GEO: *Geosynchronous Equatorial Orbit*). Behalve satellietdiensten in de Ka/Ku-band zien we steeds meer diensten opkomen op basis van 5G NR, die met reguliere 5G-apparatuur (en zelfs al sommige smartphones) kunnen worden gebruikt.

Tabel 5 toont een overzicht van een aantal relevante satellietdiensten, die zouden kunnen worden ingezet voor communicatie met drones.

Tabel 5 Verschillende satellietcommunicatiediensten relevant voor drones en hun eigenschappen (niet-uitputtend)

Dienst	Baan	Technologie	Spectrum	Bandbreedte	Opmerkingen
StarLink (gen 1)	LEO	Propriëtair	Ku/Ka/E-band	Momenteel in Europa ongeveer 100 Mbit/s per gebruiker, maximaal 10-20 Gbit/s per satelliet, verdeeld over een groot aantal verschillende cellen/spot beams.	Capaciteit is beperkt, in bepaalde gebieden is StarLink 'vol'.
StarLink (gen 2)	LEO	Propriëtair en 5G NR	Ku/Ka/E-band + 5G (o.a. PCS-1900 in de V.S. met T-Mobile)	Naar verwachting 80 – 160 Gbps per satelliet verdeeld over een groot aantal cellen/spotbeams (propriëtair) 2-4 Mbit/s per cel (5G)	Gaat boven Noord-Amerika functioneren als 5G NR-basisstation in 1900 MHz (PCS).
OneWeb	LEO	Propriëtair	Ku	6-8 Gbit/s/satelliet	
ViaSat-3	GEO	Propriëtair	Ku/Ka	Tot ongeveer 1 Tbit/s per satelliet, verdeeld over een groot aantal cellen/spot beams	GEO-satelliet met de hoogste capaciteit tot nu toe, met dito lage prijzen per GB.
GlobalStar	GEO	LTE/5G NR	S-band (3GPP-band n53) ²¹	Enkele bits/s. De capaciteit is vermoedelijk ongeveer 256 kbit/s per satelliet.	Wordt gebruikt door Apple's SOS-dienst
AST Mobile	LEO	LTE/5G NR	Low- en mid-band 3GPP. [48] Onder andere 700 MHz (3GPP-band 14) voor AT&T. Mogelijk Vodafone in Afrika (o.a. band 28) [49]		Experiment boven Noord-Amerika om te functioneren als 5G NR-basisstation in 700 MHz. [50]
Lynk	LEO	LTE/5G NR	Sub-1 GHz 3GPP-banden [51]		[51]

LEO in Ka/Ku/E-banden

Naast satellietdiensten die al langere tijd bestaan (denk aan GlobalStar en de diensten van Inmarsat) is in de afgelopen jaren een aantal nieuwe satellietdiensten in opkomst. Het meest bekend is wellicht StarLink van SpaceX, dat op basis van een vloot van (op dit moment) ongeveer 3.717 kleine satellieten [52] (in de huidige generatie ongeveer 300 kg) wereldwijd breedbandinternet aanbiedt op basis van spectrum in de Ka-, Ku- en E-band.

StarLink-connectiviteit kan en wordt al ingezet voor drones. [53] [54] Onlangs kwam StarLink in het nieuws toen het aankondigde het gebruik van haar netwerk voor militaire toepassingen in Oekraïne te gaan blokkeren. [55] LEO-connectiviteit voor drones is uitsluitend een mogelijkheid voor grotere drones, vanwege het formaat van de benodigde antennes.

Ten opzichte van geostationaire satellieten hebben satellieten in lagere banen twee grote voordelen. Allereerst is het signaalpad korter, waardoor de ondergrens voor de signaallooptijd een stuk korter

²¹ Details over de implementatie zijn niet eenduidig, maar vermoedelijk wordt band n53 gebruikt voor de communicatie van satelliet naar mobiel, en de L-band voor de uplink van mobiel naar satelliet (mogelijk op basis van GlobalStar propriëtaire technologie). Dit op basis van wat er op de huidige satelliet beschikbaar is aan transponders. Nieuwe GlobalStar-satellieten hebben wellicht andere mogelijkheden.

is. GEO-satellieten bieden communicatie met een latency tot wel 600 ms [56]. De Starlink-satellieten vliegen op een 30 tot 100 keer lagere hoogte, waardoor latencies tussen de 25 en 35 ms haalbaar zijn. Het tweede voordeel is dat door het kortere signaalpad de signaalsterkte en signaalkwaliteit beter zijn, en er dus hogere bandbreedtes kunnen worden gerealiseerd (c.q. minder spectrum of lagere vermogens kunnen worden gebruikt bij gelijkblijvende bandbreedte).

LEO in 5G-banden

De tweede generatie satellieten van StarLink is groter (ongeveer 1.200 kg) en kan naast de Ka/Ku/E-banden ook gebruik maken van 5G-frequentiebanden die normaliter 'op de grond' worden gebruikt voor mobiele netwerken (waaronder in ieder geval de PCS-1900 MHz frequentie in de V.S.). Zodoende kan een StarLink-satelliet dienstdoen als basisstation waarmee een reguliere smartphone kan connecteren.

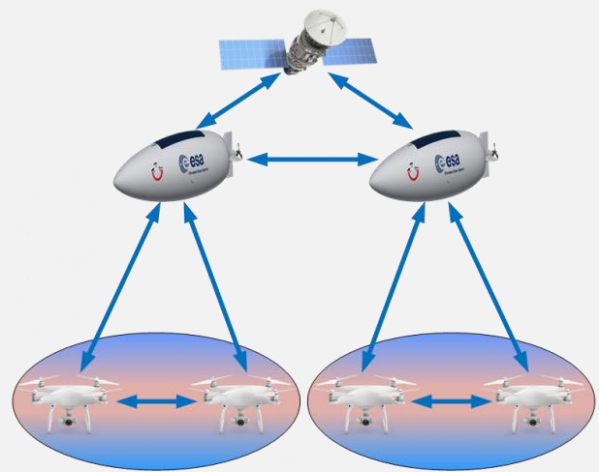
Naast StarLink zijn diverse andere partijen actief (o.a. AST SpaceMobile, Lynk) met connectiviteitsdiensten op basis van LEO-satellieten en 5G. In het geval van AST SpaceMobile gaat het om satellieten met zeer grote antenne-arrays, met een oppervlakte tot wel 64 m² (Figuur 24). Op basis van dergelijke antennes kan in een groot verzorgingsgebied connectiviteit worden geleverd. De totale capaciteit van de antenne wordt voornamelijk beperkt door het stroomverbruik (hoe meer vermogen er beschikbaar is, hoe meer mogelijkheden er zijn om te werken met bijvoorbeeld beamforming).



Figuur 24 De BlueWalker3-antenne van AST SpaceMobile (bron foto: ast-science.com), © AST SpaceMobile)

HAP's

Op lagere hoogte dan de LEO's vinden we nog een andere oplossing. High Altitude Platforms (HAP's) zijn een soort 'pseudo-satellieten' - drones die op een positie blijven zweven in de stratosfeer (ongeveer 20 kilometer hoogte, ruim boven de commerciële luchtvaart). Ook dergelijke HAP's kunnen ingezet worden voor het realiseren van connectiviteit voor drones. Onder andere ESA experimenteerde hiermee en voerde een 'feasibility test' uit - waarvan de uitkomsten onbekend zijn. [57]



Figuur 25 Inzet van HAP's in een experiment van ESA (bron: [57]).

GEO in 5G-banden

5G-communicatie kan ook worden gerealiseerd vanuit geostationaire baan. Apple introduceerde onlangs samen met GlobalStar een dienst voor het versturen van noodsignalen via satellietcommunicatie. De meest recent uitgebrachte iPhone lijkt te kunnen communiceren met de satelliet via 5G in de S-band (3GPP-band n53) al wordt er mogelijk ook (nog) gebruik gemaakt van GlobalStar-propriëtaire technologie. Deze dienst heeft echter op dit moment een zeer beperkte doorvoercapaciteit (enkele bits per seconde).

GEO in reguliere satellietbanden

Het gebruik van reguliere satellietbanden (Ku, Ka) voor (CNPC-)communicatie met drones in 'non-segregated air space' is vanaf WRC'2015 toegestaan. Het punt staat opnieuw op de agenda voor WRC'2023. Inzet is de vraag hoe de veiligheid gegarandeerd kan worden bij het gebruik van dit

bestaande communicatiemiddel. Het standpunt van CEPT, waar Nederland zich voor WRC'2023 bij voegt [58], is onder andere dat dit alleen kan wanneer kan worden voldaan aan ICAO-eisen ten aanzien van veiligheid.

Naast het gebruik van de bestaande banden speelt ook de vraag of specifiek spectrum moet worden vrijgemaakt voor deze toepassing, waarbij specifiek de (tijdens WRC'2012 aangewezen) 5.000 – 5.150 MHz-band voor 'aeronautical mobile-satellite' (AMS(R)) in beeld komt. AsiaSat – een satellietoperator – stelt in dit kader dat het gebruik van de reguliere frequenties aantrekkelijker is, omdat voor de nieuwe band nieuwe satelliettransponders nodig zijn [59].

5.1.3 Directe (punt-punt) communicatie (ground-to-air)

Een andere communicatiemodus is rechtstreekse communicatie tussen zender en ontvanger. Deze vorm van communicatie is op dit moment gangbaar bij consumentendrones en de meeste professionele drones bij VLOS-operatie.

Voor rechtstreekse communicatie wordt meestal gebruik gemaakt van vergunningvrij spectrum. Hierbij zijn vooral de ISM-banden²², die onder andere ook door Wi-Fi worden gebruikt, het meest populair. Naast de 2,4 GHz-band is er relatief veel spectrum beschikbaar in de 5 GHz-band.²³ [60] Uiteraard kunnen ook de lagere SRD-banden (868 MHz, 433 MHz) worden ingezet, maar deze hebben een beperktere bandbreedte. Drones maken veelal gebruik van Wi-Fi of een radioprotocol dat sterk op Wi-Fi lijkt.

De signaalkwaliteit is over het algemeen goed, omdat er een zichtlijn is. Daarbij speelt uiteraard wel dat het spectrum gedeeld moet worden met alle andere gebruikers, waaronder vooral Wi-Fi-netwerken op de grond. Het gebruik van de band door drones zal de capaciteit op de grond voor Wi-Fi negatief beïnvloeden (een met een Wi-Fi-netwerk verbonden apparaat 'ziet' immers ook de signalen van drones),

²² ISM (*Industrial, Scientific & Medical*)-banden waren initieel bedoeld voor (niet-telecommunicatie) toepassingen in de voornoemde sectoren. Nadien is (vergunningvrije) inzet voor zaken als NFC, draadloze telefoons en Wi-Fi/Bluetooth toegestaan. Het betreft banden die onder voorwaarden vergunningvrij kunnen worden gebruikt.

en vice versa (de drone en drone-controller 'zien' ook de Wi-Fi-signalen). Wi-Fi 6 bevat ondersteuning voor coördinatie van toewijzing van *resource elements* (vergelijkbaar met het concept van *resource blocks* uit LTE/5G NR) om het delen van capaciteit beter te laten werken. Wanneer alle UAS aan deze coördinatie kunnen deelnemen kan het spectrum efficiënter worden benut en wordt interferentie teruggedrongen.

Omdat relatief veel spectrum beschikbaar is lenen deze banden en deze vorm van communicatie zich uitstekend voor toepassingen die veel bandbreedte voor payloadverkeer nodig hebben. Uitgaand van een gemiddelde spectrale efficiëntie van 2 bit/s/Hz²⁴ heeft een kanaal van 100 MHz een theoretische bandbreedte van ongeveer 190 Mbit/s. In de 5 GHz-band is ongeveer 500 MHz aan spectrum beschikbaar. Een videostream op HD-resolutie vereist afhankelijk van de kwaliteit en de gehanteerde codering tussen de 7-15 Mbit/s (en met modernere codecs nog lager).

5.030 – 5.091 MHz

Een andere interessante band in dit kader is de 5.030 – 5.091 MHz-band. Deze is bestemd voor luchtvaartmobile satellietverbindingen voor onbemande luchtvaartuigen. [61, pp. 7.2, a.4.]. In de VS is inmiddels gestart met het vormgeven van de invulling en regelgeving van deze band, specifiek voor UAS (er ligt concreet een *notice for proposed rulemaking* [62]). Zie voor verdere toelichting §5.2.2. In de VS zijn twee blokken van 5 MHz beschikbaar voor rechtstreekse communicatie. Daarnaast is aanvullend spectrum in de band 'opportunistisch' beschikbaar (op basis van een dynamisch toewijzingssysteem).

Zendvermogens en regulering

Ten aanzien van directe communicatie in de ISM-banden (specifiek 2,4 GHz en 5 GHz) gelden in de EU andere eisen dan in de Verenigde Staten (FCC).

²³ Binnenkort kan ook de 6 GHz-band vergunningvrij worden gebruikt, maar gebruik op UAS is niet toegestaan. (Europese Commissie, 2021)

²⁴ Gebaseerd op (PolicyImpact Partners, 2022). De gegeven cijfers in dat rapport zijn per stream; Bij Wi-Fi kunnen 1 tot 4 streams worden ingezet. Bij een latency van 10 ms en twee streams ligt de efficiëntie tussen 1,2 en 2,2 bit/s/Hz.

Tabel 6 toont de verschillen tussen beide regimes.

Het verschil tussen de FCC- en EU-maxima bedraagt minimaal 10 dB en loopt op tot maximaal 22 dB. Bij een vrije-zichtverbinding verdubbelt de maximaal haalbare afstand voor de radioverbinding bij iedere 6 dB verhoging van het zendvermogen. Dit betekent dat een drone die onder de FCC-zendvermogens vliegt een veel groter bereik heeft dan diezelfde drone onder EU-zendvermogens. Ter illustratie geven we in Tabel 7 de door DJI opgegeven maximaal haalbare afstanden in FCC-gebied en onze eigen inschatting voor EU-gebied (op basis van de genoemde rekenregel) voor de Mavic 3. Deze drone uit 2021/2022 kent een EIRP-zendvermogen voor onder andere Europa van ≤ 20 dBm in 2,4 GHz en ≤ 14 dBm in de 5,8 GHz-band, terwijl dezelfde drone in FCC-gebied in beide banden ≤ 33 dBm als specificatie heeft. [25] Bij de wat oudere modellen komen andere verschillen naar voren; bij de DJI Spark uit 2017 is het verschil in de door DJI opgegeven afstanden een factor 4.

Bij consumentendrones is het verschil in zendvermogen tussen FCC- en EU-gebied kortom direct zichtbaar. Omdat dezelfde hardware wordt gebruikt in beide gebieden kan de drone dus werken op hogere zendvermogens dan toegestaan. Softwarematig

wordt het zendvermogen echter begrensd wanneer in EU-gebied wordt gevlogen. Er zijn op internet handleidingen te vinden waarmee de 'FCC-modus' van een drone desondanks (tegen de regels in) kan worden geactiveerd binnen de EU, waarmee de werkaafstand kan worden vergroot. Het bestaan van de interesse hierin wekt de indruk dat het vergroten van de werkaafstand voor dronegebruikers gewenst is en dat de EU-regels daarbij een beperking vormen.

Hogere zendvermogens in 5.470 – 5.725 MHz

Het inzetten van de 5.470 – 5.725 MHz-band voor drones zou in theorie de mogelijkheid kunnen bieden om meer zendvermogen te kunnen gebruiken, en een groter zichtbereik te kunnen ondersteunen. Dit vereist dat *airborne* gebruik van deze band niet verboden is. In het Verenigd Koninkrijk is het gebruik van deze band en ook de 5.725 - 5.850 MHz niet toegestaan [63] en de Nederlandse regelgeving lijkt dit ook niet expliciet aan te geven. [64] Technisch gezien lijken er drones te zijn die de band kunnen gebruiken (zie bijvoorbeeld DJI [65]), maar mogelijk wordt deze band vanwege regulering (radargebruik in die band) wel standaard uitgeschakeld, net als in de VS²⁵.

²⁵ Zie bijvoorbeeld (DJI, 2017) en (DJI, 2018).

Tabel 6 Regels ten aanzien van zendvermogen volgens FCC en EU in 2,4 GHz en 5 GHz (ISM; bronnen: [66], [64])

Band	Regime:	FCC	EU/NL
2.400 – 2.483,5 MHz		Maximaal 1 W zendvermogen. Tot 6 dBi antenneversterking toegestaan zonder vermogensreductie. Daarboven 1 dB vermogensreductie voor elke 3 dB extra antenne versterking vereist.	Maximaal 0,1 W EIRP ²⁶ .
5.470 – 5.725 MHz			Maximaal 1 W EIRP, gecombineerd met Transmit Power Control. Co-existentie met radar is nodig.
5.725 – 5.850 MHz		Maximaal 1 W zendvermogen. Tot 6 dBi is antenneversterking toegestaan. Voor gerichte point-to-point verbindingen is meer antenneversterking toegestaan zonder eis tot vermogensreductie.	
5.725 – 5.875 MHz			Maximaal 0,025 W EIRP (categorie korte-afstandsapparatuur)

Tabel 7 Maximaal haalbare afstanden van de DJI Mavic 3-drone (specificaties fabrikant voor FCC-gebieden [25] en berekening Dialogic voor EU, op basis van een vermogen dat 16 dBm lager ligt, en dus ca. 2,6x minder ver komt bij een open zichtlijn)

	FCC	EU (CE)
Sterke interferentie (stedelijk, beperkte zichtlijn, veel andere radiosignalen)	1,5 – 3 km	0,4 – 0,7 km (schatting Dialogic)
Gemiddelde interferentie (sub-urbaan landschap, zichtlijn, enkele andere radiosignalen)	3 – 9 km	0,7 – 2,1 km (schatting Dialogic)
Lage interferentie (open landschap, zichtlijn, weinig andere radiosignalen)	9 – 15 km	Maximaal 8 km (opgave DJI; komt overeen met de meest optimistische afstand bij een vermogen dat niet meer dan 10 dB lager ligt dan FCC) 2,1 – 3,5 km (schatting Dialogic)

Capaciteit van vergunningvrije banden

Gegeven het feit dat de huidige regelgeving zeer lage maximale zendvermogens in de 5 GHz ISM-band stelt, is voornamelijk de 2,4 GHz-band de belangrijkste band voor rechtstreekste (ground-to-air) communicatie met drones. De capaciteit voor op Wi-Fi

gebaseerde oplossingen in deze band is zeer beperkt, met slechts drie niet-overlappende kanalen van 20 MHz breed. Op zich kunnen meerdere gebruikers hetzelfde kanaal gebruiken zolang de belasting van het kanaal niet te hoog is. Wi-Fi gebruikt daarvoor CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance). Hierbij controleren gebruikers

²⁶ *Effective Isotropic Radiated Power*: het door een antenne uitgestraalde vermogen uitgedrukt als de equivalente hoeveelheid voor een isotrope antenne.

die willen zenden vooraf of het kanaal in gebruik is. Dit systeem werkt goed, onder de aanname dat alle gebruikers elkaars signaal kunnen ontvangen. In de praktijk is dat helaas vaak niet het geval en zijn er zogenaamde *hidden nodes* – gebruikers die elkaar niet kunnen ontvangen en daardoor gelijktijdig het kanaal kunnen gebruiken. Een derde gebruiker ontvangt de signalen van beide *hidden nodes* echter wel (tegelijktijdig) waarbij de signalen elkaar verstoren. Dergelijke *collisions* leiden tot pakketverlies en vereisen hertransmissie van de gegevens, waarmee de effectieve capaciteit van het kanaal daalt.

Vanwege de positie in de lucht is een drone relatief vaak zo'n "derde gebruiker" die botsingen tussen radio-uitzendingen van (voor elkaar) *hidden nodes* ontvangt. Wanneer een drone boven een gebied vliegt waar veel Wi-Fi-gebruikers zijn, zal de drone daarnaast relatief vaak een 'bezet' kanaal ervaren en daardoor beperkt worden in de zendcapaciteit. Gebruikers op de grond ontvangen andersom relatief veel signalen van drones (omdat ze die al snel kunnen 'zien'). Omdat drones met name veel capaciteit in de downlinkrichting vragen (voor video) zullen gebruikers op de grond dus eveneens lagere kanaalcapaciteit ervaren. Hoe lager de capaciteit van het kanaal, hoe lager de doorvoersnelheid en hoe hoger de latency.

Oplösungen voor het capaciteitsprobleem in Wi-Fi

Recente versies van de Wi-Fi-standaard bevatten technologieën die de bovengenoemde problemen kunnen mitigeren. De belangrijkste (in Wi-Fi 6, 802.11ax) zijn de volgende:

- Het introduceren van 'resource units' (van 26, 52, 106 en 242 subcarriers, effectief 2, 4, 8 en 20 MHz), waardoor meerdere gebruikers gelijktijdig hetzelfde kanaal van 20 MHz breed kunnen gebruiken. Dit concept is afkomstig uit de LTE/5G-wereld. [67]
- BSS coloring, waarmee beter onderscheid kan worden gebruikt tussen co-channel transmissies.
- Beamforming.

Daarnaast zijn Multi-user MIMO-functies geïntroduceerd, maar dit heeft minder relevantie voor het voorliggende scenario.

Over het geheel gezien claimt Wi-Fi 6 een 4x hogere capaciteit per gebruiker dan de voorgaande standaard. In Wi-Fi 7 worden verbeteringen

verwacht op het gebied van (onder ander) multi-link operatie, waarmee meerdere frequentiebanden kunnen worden gecombineerd om tot een betere verbinding te kunnen komen in omstandigheden met veel gebruik en interferentie.

5.1.4 Uitzenden van positie-informatie

Vanaf UAS en andere luchtruimgebruikers zien we vier vormen van 'broadcast'-signalen: positierapportage in 1.090 MHz-, 879 MHz- en de SRD-860-band, en Direct Remote ID.

Positierapportage via ADS-B in 1.090 MHz

In de EU moeten per juni 2023 grote vliegtuigen zijn uitgerust met ADS-B Out dat werkt op de 1.090 MHz frequentie, de frequentie waar ook de Mode S-transponder en TCAS gebruik van maken. Er zijn drukke luchthavens en drukke luchtruim waar deze frequentie verzadiging vertoont. In Nederland is hier geen sprake van. Omdat de verwachting is dat drones in lager luchtruim voor een van de andere vormen van positierapportage kiezen vanwege kosten en gewicht, zal hier geen probleem ontstaan. Er is een reële kans dat laagvermogen ADS-B als standaard opkomt in het lage luchtruim, vanwege het lage zendvermogen zal ook dan geen congestie ontstaan.

Positierapportage via ADS-B UAT

Een andere mogelijkheid voor positierapportage is door gebruik te maken van ADS-B Out in de ADS-B UAT-band (978 MHz). De apparatuur hiervoor zou, afgaand op interviews, relatief goedkoop moeten zijn. ADS-B in de UAT-band kan naast positierapportage ook andere functionaliteit bieden. ADS-B UAT wordt nationaal uitgerold in (in ieder geval) het VK en Noorwegen.

Over de beschikbaarheid van de UAT-band in Nederland en de EU in brede zin bestaat onduidelijkheid. In interviews wordt gesuggereerd dat de band door de NAVO voor militaire doeleinden wordt gebruikt, of dat deze door individuele lidstaten voor DME-

navigatieapparatuur²⁷ wordt ingezet (de oorspronkelijke bestemming van de band). Aangezien de band een luchtvaartfrequentie is, is de vraag of deze in de EU ingezet kan worden voor UAT vooral een luchtvaartaan gelegenheid. EASA stelt zich in dit kader afwachtend op. Wanneer lidstaten zich (samen) bewegen om de band in te zetten is het denkbaar dat ADS-B UAT in de EU alsnog wordt uitgerold.

Positierapportage via de SRD-860-band

Zoals eerder toegelicht wordt het gebruik van positierrapportagesystemen in de SRD-860-band voorzien in het U-spaceconcept. Hierbij zenden bemande luchtvaartuigen via deze band (op basis van propriëtaire protocollen of het inmiddels door EASA gestandaardiseerde protocol voor ADS-L) hun posities uit. Om deze positiemeldingen bij de U-Space-dienstenaanbieder (USSP) te krijgen is grondinfrastructuur nodig. Deze zou moeten bestaan uit een groot aantal ontvangers dat over het land verspreid is, de signalen opvangt en (via internet) doorgeeft aan de USSP. Dit is vergelijkbaar met de wijze waarop ADS-B positierrapportages worden verzameld door websites als Flightradar24 en ADSBExchange.

Capaciteit van de SRD-860-band

Een aandachtspunt is de capaciteit van de SRD-860-band bij inzet voor positiendoorgifte. Deze vorm van positiendoorgifte is één van de vormen waarmee bemand verkeer zich kenbaar mag maken in U-space. Vergelijkbare technologie is al in gebruik (o.a. FLARM). Als gevolg van de verplichting zal een deel van de bemande luchtvaart deze positiendoorgifte gaan toepassen. Omdat het gaat om relatief beperkt dataverkeer en een (naar verwachting) relatief kleine groep luchtvaartuigen verwachten we geen grote problemen als gevolg van dit extra gebruik van deze (weliswaar drukke) band.

Direct Remote ID

De verplichte Direct Remote ID-functionaliteit kan worden geïmplementeerd op basis van Bluetooth (Long Range) en Wi-Fi (Aware). Hierbij worden vermogens van 10 mW (Bluetooth) en 100 mW (Wi-Fi) gehanteerd (EN 4709-002 [28]), beide in de 2,4 GHz-band. Het bereik van deze signalen is beperkt en de vraag of remote ID het beoogd doel

bereikt. Zo niet, dan zijn hier geen veiligheidsrisico's mee gemoeid.

5.1.5 Directe onderlinge communicatie (air-to-air)

In de context van U-Space zien we geen vormen van communicatie tussen UAS onderling en/of met bemande luchtvaartuigen in de lucht. Uiteraard is dergelijke communicatie in de burgerluchtvaart wel aan de orde: bij ADS-B In 'luisteren' luchtvaartuigen naar ADS-B-uitzendingen van andere luchtvaartuigen. Daarnaast zijn grotere luchtvaartuigen (maximaal vertrekgewicht groter dan 5,700 kg) verplicht uitgerust met TCAS, een systeem waarmee luchtvaartuigen ander uitgerust verkeer kunnen ondervragen en waarmee in uiterste nood een uitwijkmanoeuvre aan de vliegers wordt geadviseerd.

5.1.6 Radar

Het gebruik van 'miniradars' op drones speelt naar verwachting voornamelijk in de 60 GHz-band. Dit gebruik kan nadelige gevolgen hebben voor ander gebruik 'op de grond' van deze band. Een groep bestaande uit Qualcomm, Facebook, Google, Intel en Samsung lobbyt voor nieuwe regels voor het gebruik van de 60 GHz-frequenties. De genoemde bedrijven maken zich zorgen over het gebruik van de band voor radar en de impact die dat op toepassingen op de grond kan hebben. [36]

5.1.7 Andere vormen

Tethered communicatie

UAS kunnen tot slot gebruik maken van communicatie via een kabel ('tethered'). Dit is met name aan de orde wanneer een kabel sowieso al benodigd is om de drone te voorzien van elektriciteit, zodat deze langer in de lucht kan blijven. Het inzetten van deze vorm van communicatie heeft zeer beperkte invloed op het spectrumgebruik.

Laser links

Het gebruik van laser links tussen een drone en een grondstation (of zelfs drones onderling) klinkt futuristisch, maar is dat allerminst. Onder andere de StarLink-satellieten maken gebruik van laser links voor communicatie *tussen* satellieten. Voor

navigatiebaken bepalen. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de looptijd van het radiosignaal.

²⁷ DME: Distance Measuring Equipment. Met DME kunnen luchtvaartuigen radiografisch de afstand tot een

besturing van militaire drones worden laserlinks eveneens getest (met als grote voordeel dat ze resistent zijn tegen jamming). [68]

Laser links bieden in potentie een zeer hoge doorvoercapaciteit. Daar staat tegenover dat laserlinks te maken hebben met obstakels in het optische domein (diffractie in de lucht). Met name het richten van het laserlicht zodat deze de ontvanger bereikt komt zeer precies (een kleine afwijking in de uitstraalhoek leidt over grote afstand tot een grote afwijking, waardoor het doel kan worden gemist).

Inzet van laser links is een zeer aantrekkelijke optie voor toepassingen die hoge bandbreedte vereisen

(denk bijvoorbeeld aan drones die dienstdoen als basisstation voor mobiele netwerken of video met zeer hoge kwaliteit real-time moeten overbrengen). Met laserlinks kan de druk op het spectrum die deze toepassingen zouden veroorzaken, aanzienlijk worden verminderd. Groot risico met de toepassing van laser in luchtruim waar ook bemande luchtvaart plaatsvindt, is verblinding van vliegers.

5.1.8 Overzicht

Tabel 8 geeft een overzicht van de besproken communicatiemodi en hun inzetbaarheid voor de verschillende communicatiebehoeften van drones in U-space.

Tabel 8 Overzicht relevante communicatiemodi, -technologieën en spectrum voor communicatie met drones

Modus	Technologie	Spectrum	C2-data	C2-video	Positierapportage	Payload	Deconflictie
Grondgebonden mobiel netwerk	4G/5G	4G/5G-banden 5.030-5.090 MHz ²⁸	✓	✓	✓ (Network ID)	✓	✓ Tactisch o.b.v. data van USSP
Grondgebonden netwerk	Propriëtair	ISM 5 GHz 5.030-5.090 MHz	✓	✓	✓ (Network ID)	✓	✓ Tactisch o.b.v. data van USSP
Grondgebonden mobiel netwerk	LTE (EAN)	LTE 65 (2100 MHz)	~	-	~	-	~
Satelliet LEO/GEO	Propriëtair	Ka/Ku/E-band	✓	✓	✓ Network ID	✓	✓ Tactisch o.b.v. data van USSP
Satelliet LEO	5G	4G/5G-banden (o.a. n65)	✓	~	✓ Network ID	✓	✓ actisch o.b.v. data van USSP
Satelliet GEO	5G	4G/5G-banden	✓	-	✓ Network ID	-	✓ Tactisch o.b.v. data van USSP
Broadcast ²⁹	ADS-L 4 SRD-860	SRD 860 MHz	-	-	✓ Bemande luchtvaartuigen in U-Space	-	✓ Tactisch (mits verkeer andere luchtvaartuigen gemonitord)
Broadcast	Propriëtair (FLARM, Skytraxx, OpenGilder, etc.)	SRD 860 MHz	-	-	✓ Bemande luchtvaartuigen in U-Space	-	✓ Tactisch
Broadcast	ADS-B	1.090 MHz	-	-	✓ Bemande luchtvaartuigen in U-Space	-	✓ Tactisch, bemande luchtvaartuigen met ADS-B In
Broadcast	ADS-B UAT	978 MHz ³⁰	-	-	✓ Bemande luchtvaartuigen in U-Space, als UAT beschikbaar	-	✓ Tactisch, bemande luchtvaartuigen met ADS-B In
Broadcast	Bluetooth LR, Wi-Fi Aware	2,4 GHz ISM	-	-	✓ Remote ID	-	
Punt-punt rechtstreeks	Wi-Fi of propriëtair	2,4, 5 GHz ISM, 5.030-5.090 MHz	✓ Bij (ext.) VLOS	✓ Bij (ext.) VLOS	✓ Network ID via operator bij (ext.) VLOS	✓	✓ Tactisch o.b.v. data van USSP
Radar	Propriëtair	60 GHz	-	-	-	-	✓ Operationeel

²⁸ Alleen wanneer de band wordt gestandaardiseerd in 3GPP, en beschikbaar komt voor UAS in Nederland.

²⁹ Een-wegcommunicatie vanaf UAS ten behoeve van ontvangers op de grond en/of andere luchtvaartuigen in de omgeving.

³⁰ Alleen als de band beschikbaar komt in de EU.

5.2 Internationaal

In deze paragraaf bespreken we ontwikkelingen in andere landen op het gebied van spectrum en de inzet daarvan voor drones. In het onderzoek is voor drie landen specifiek beleid op dit thema gevonden: het Verenigd Koninkrijk, de Verenigde Staten, en Australië.

5.2.1 Verenigd Koninkrijk: OFCOM

In juni 2022 heeft OFCOM in het Verenigd Koninkrijk een voorstel geconsulteerd met de titel "Spectrum for Unmanned Aircraft Systems (UAS) Approach to authorising the use of radio equipment on UAS" [69] welke inmiddels heeft geleid tot een beslissing. [70] OFCOM introduceert met het voorstel een 'UAS Operator Radio'-vergunning, waarmee het gebruik van mobiele netwerk- en satellietcommunicatie en het gebruik van specifieke radioapparatuur die in de toekomst mogelijk verplicht wordt (zoals radiobakens en andere veiligheidssystemen) op drones wordt toegestaan. De licentie kost 75 pond per jaar per drone-operator en geldt binnen het VK en de territoriale wateren. Naast dit regime blijft het regime voor vergunningvrij gebruik van onder andere de 2,4 GHz- en 5 GHz-band gelden (ISM). Er wordt expliciet geen toestemming verleend voor het gebruik van de 2,6 GHz-band waar interferentie kan optreden met surveillance radars.

5.2.2 Verenigde Staten: FCC

De Amerikaanse toezichthouder FCC staat drones toe om vergunningvrij spectrum te gebruiken in banden als 433 MHz, 900 MHz, 2,4 GHz en 5 GHz. In 2021 is het beleid rondom de 5 GHz-band gewijzigd. [71] [72] Hierbij is het specifieke gebruik door drones van het banddeel 5.030 – 5.091 GHz vastgelegd.

5.030 – 5.091 MHz

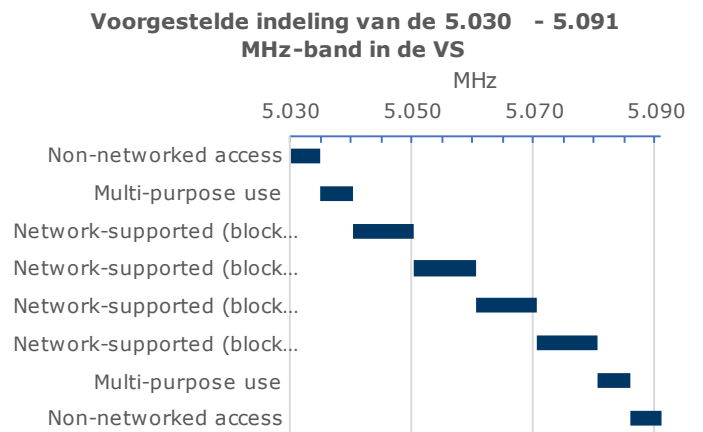
De FCC consulteert sinds januari 2023 een voorstel voor de indeling van deze band (in een *notice for proposed rule making*). [62] Een overzicht van de indeling is te zien in Figuur 26. De band faciliteert de volgende gebruiksvormen:

- Non-network access (NNA; rechtstreekse communicatie). Hiervoor worden 2 blokken van 5 MHz gereserveerd. Deze zijn vergunningvrij te gebruiken. De blokken bevinden zich aan de randen van de gehele band, waarmee ze de facto een soort 'guard band' vormen ten

opzichte van de onderliggende en bovenliggende band.

- Network supported services (NSS). Hiervoor worden vier blokken van 10 MHz voorzien. Deze blokken worden vergund.
- De resterende blokken (11 MHz in totaal) zijn bestemd voor (*opportunistisch*) tijdelijk gebruik.
- De blokken die voor NSS zijn gereserveerd mogen *opportunistisch* gebruikt worden voor NNA. De tijdelijke blokken mogen opportunistisch voor zowel NSS als NNA worden gebruikt.

Met 'opportunistisch gebruik' wordt bedoeld dat gebruik mogelijk is wanneer er geen ander gebruik van de band is. Om dit in goede banen te leiden wordt gedacht aan een dynamisch systeem voor spectrumtoegang, zoals in de VS al wordt gehanteerd voor de CBRS-band.



Figuur 26 Overzicht van de in de VS voorgestelde indeling voor de band 5.030-5.091 MHz (bron: [62], afbeelding Dialogic)

5.2.3 Australië: ACMA

In 2022 consulteerde de Australische regering een strategische roadmap rondom drones ("The RPAS and AAM Strategic Regulatory Roadmap") [73]. De Australische toezichthouder ACMA consulteerde daarnaast een voorstel voor de inzet van het banddeel 5,055 – 5,065 GHz voor CNPC (*Control and Non-Payload Communication*) voor drones. [74] Op het voorstel kwamen twee (positieve) reacties; een definitief besluit is er op moment van schrijven nog niet.

5.2.4 Europa

In de European Drone Strategy 2.0 wordt onder andere ingegaan op het faciliteren van communicatie met drones. [75] Een van de 'flagship actions' (nummer 13) betreft het beschikbaar maken van voldoende frequentieruimte ten behoeve van drones. In de strategie (punt 80) wordt specifiek verwezen naar de mogelijkheid 5G/6G-diensten met hoge bandbreedte en lage latency in te zetten.

5.2.5 Agendering op WRC

Voor WRC'2023 staat drone-communicatie een aantal keer op de agenda. De agenda-items en het Nederlandse standpunt zijn beschreven. [58] Agendapunt 1.8 betreft het gebruik van 'fixed satellite services' (FSS) voor control en non-payloadcommunicatie door UAS, en het eventueel nader accommoderen daarvan, waarbij de vraag met name speelt hoe dit gebruik veilig te realiseren is. Agendapunt 1.10 voorziet in het beschouwen van de spectrumwensen en co-existentie voor nieuwe (*non-safety*) luchtvaartmobile toepassingen.

Voor WRC'2027 zien we beperkt input op dit thema. Relevant is dat Eurocontrol voor WRC-27 formalisering van het gebruik van mobiele netwerken voor besturing van drones wil agenderen. [76]. Een specifieke allocatie van spectrum tussen 694 – 960 MHz zou hierbij aan de orde kunnen zijn. Eurocontrol neemt daarbij verder het standpunt in dat een autonome drone niet uitsluitend afhankelijk mag zijn van een 5G-netwerk voor veilige operatie, waardoor naast mobiele verbindingen ook directe communicatie aan de orde blijft.

5.3 Conclusie

Tabel 8 toont de verschillende relevante communicatiemodi, gehanteerde technologieën en het daarbij gebruikte spectrum voor communicatie met drones. Daarbij is steeds aangegeven in welke communicatiebehoefte de genoemde communicatieoplossing voorziet. Merk hierbij uiteraard op dat een drone gelijktijdig gebruik kan maken van meerdere invullingen voor dezelfde behoefte (bijvoorbeeld het gebruik van een satellietverbinding als terugvaloptie voor C2-dataverkeer dat normaalgesproken via een grondgebonden mobiel netwerk verloopt).

Voor drones die alleen onder VLOS worden ingezet lijkt de inzet van punt-puntcommunicatie in de ISM-banden het meest voor de hand te (blijven) liggen. Hiervoor kan relatief goedkope hardware worden

gebruikt. Daarnaast is er zeer veel spectrum beschikbaar, waardoor hoge kwaliteit video-downlinks mogelijk zijn. Keerzijde van het gebruik van vergunningvrij spectrum is uiteraard dat de capaciteit gedeeld moet worden tussen alle gebruikers, waaronder ook veel niet-dronegebruik.

We verwachten dat bij BVLOS-operatie (en mogelijk ook voor VLOS, afhankelijk van de beschikbaarheid van hardware en kosten) het gebruik van mobiele netwerken op basis van 5G de meest voor de hand liggende invulling zal zijn voor de communicatiebehoefte (met satellietcommunicatie als terugvaloptie). De netwerken zijn op dit moment (weliswaar in beperkte mate) te gebruiken, waardoor nu al getest kan worden. Daarbij is de benodigde hardware goedkoop en goed verkrijgbaar. Op de langere termijn (en voor langere-afstandsoperaties, of bijvoorbeeld boven zee) ligt de inzet van satellietcommunicatie meer voor de hand. Daarbij is de opkomst van op 5G-gebaseerde oplossingen interessant. Daarmee wordt het eenvoudiger om (wellicht zelfs met dezelfde hardware en een antenmodule onderop en boven op de drone) de twee communicatievormen te combineren.

5.3.1 Trends en ontwikkelingen

De inzet van spectrum voor (besturing en payloadcommunicatie met) drones is wereldwijd nog grotendeels onderwerp van discussie. De VS, het VK en Australië hebben (ogenschijnlijk tijdelijke) maatregelen getroffen waarmee inzet van een deel van de (onderkant van de) 5 GHz-band voor C2-verkeer wordt toegestaan. Daarnaast lijkt (met name voor BVLOS) de combinatie van grondgebonden mobiele netwerken (op basis van 5G) en satellieten (LEO/GEO, al dan niet op basis van 5G NR) aantrekkelijk.

Voor payloadcommunicatie wordt voornamelijk gebruik gemaakt van vergunningvrije banden (2,4 GHz en 5 GHz ISM). De mobiele industrie en satellietaanbieders positioneren zich hierbij (ook) nadrukkelijk als connectiviteitsaanbieders. Onze indruk is dat de vraag naar payloadverkeer sterk aanbodgedreven is. Wanneer de beschikbare bandbreedte van payloadcommunicatie beperkt is, zullen gebruikers met lagere resolutie videofeeds werken, en/of de data op de drone opslaan en na het landen uitlezen. Wanneer de bandbreedte beschikbaar komt verwachten we dat gebruikers hier gebruik van zullen gaan maken.

Hoewel de mobiele netwerken op dit moment te gebruiken zijn voor C2-verkeer en payloadverkeer voor

drones, zijn de netwerken hier nog niet voor geoptimaliseerd. Dat betekent dat met name de capaciteit beperkt zal zijn. Door te investeren in verticale dekking kunnen de operators op specifieke locaties de capaciteit (technisch gezien) relatief eenvoudig substantieel verbeteren. Hiermee zijn uiteraard wel substantiële investeringen in nieuwe radioapparatuur gemoeid. De specifieke functionaliteit die 3GPP voorziet ten aanzien van drones kan daarbij een aanvullend voordeel zijn van deze vorm van connectiviteit. We verwachten, gelet op de wijze waarop mobiele operators in algemene zin investeringen in hun netwerk plannen, dat eventuele aanpassingen aan het netwerk ten behoeve van UAS lokaal zullen worden gedaan, en alleen wanneer duidelijk is dat bepaalde toepassingen de extra connectiviteit zullen gaan afnemen.

Van belang is daarbij wel dat de mobiele netwerken (zeker ten aanzien van het C2-verkeer) bepaalde garanties kunnen leveren (bijvoorbeeld een gegarandeerde bandbreedte en maximale latency voor C2-dataverkeer op basis van 5G slicing). Daarnaast speelt prioritering een rol – het ligt voor de hand om bijvoorbeeld payloadverkeer van drones van hulpdiensten een hogere prioriteit te geven dan payloadverkeer van andere toepassingen. De operators maken deze keuzes zelf. Omdat hier nadrukkelijk maatschappelijke overwegingen (gaan) spelen (bijvoorbeeld bij inzet van drones door hulpdiensten of voor medisch transport) is het zinvol om als toezichthouder in gesprek te treden met de operators over dit onderwerp.

5.3.2 Bedreigingen

Wanneer we kijken naar het spectrumgebruik voor communicatie met drones in U-space zien we een aantal mogelijke bedreigingen:

1. Het gelijktijdig gebruik van propriëtaire protocollen en Wi-Fi in dezelfde ISM-band kan leiden tot inefficiënt gebruik van het spectrum.

Een aantal dronefabrikanten past eigen communicatieprotocollen toe in de 2,4 GHz-band. De interactie tussen deze protocollen en Wi-Fi is onbekend en vereist nadere studie van de betreffende protocollen.

In de nieuwe Wi-Fi 6-standaard zijn ten opzichte van de voorgangers meer niet-overlappende kanalen beschikbaar in de 2,4 GHz-band (27 in plaats van 3) waardoor het mogelijk moet zijn om met enkele tientallen drones (mits deze Wi-Fi 6 implementeren) tegelijkertijd te kunnen communiceren in één gebied

(gegeven dat er geen ander intensief Wi-Fi-gebruik op de grond is).

Daarnaast bevat de nieuwe Wi-Fi-standaard mogelijkheden om efficiënter frequentieruimte te verdelen tussen gebruikers (op basis van *resource elements* die lijken op *resource blocks* zoals bekend uit de 3GPP-standaarden).

2. Het gebruik van de ISM-banden voor directe punt-puntcommunicatie met drones zou in specifieke situaties negatieve gevolgen kunnen hebben voor de capaciteit van het gebruik hiervan op de grond (met name door Wi-Fi-netwerken) wanneer de gebruiker een UAS die uitzendt in de Wi-Fi-band kan 'zien'. Daarnaast kan de capaciteit van het spectrum een beperking vormen wanneer er een groot aantal drones tegelijkertijd is dat hoge bandbreedtes nodig heeft.

Voor gebieden waarin gelijktijdig hoge aantallen drones met video-downloads rondvliegen, lijkt het aan te bevelen om naast de 2,4 GHz ook gebruik van de 5 GHz-band (ISM en eventueel vergunde delen) voor drones maximaal te faciliteren daar waar dat mogelijk is. Het verder gelijk trekken van de Europese eisen m.b.t. zendvermogen, antennes, etc. met de FCC-eisen voor de 5,8 GHz-band kan daarnaast mogelijk ruimte bieden om extra capaciteit te realiseren.

3. Het gebruik van miniradar op drones in de 60 GHz-band kan mogelijke gevolgen hebben voor ander gebruik van de band.

We verwachten dat deze gevolgen beperkt zijn vanwege de gerichtheid van het gebruik en de sterke demping van het signaal in de atmosfeer, om twee redenen:

- Het gebruik van de 60 GHz-band is vaak gericht (voor straalverbindingen). Een UAS zou zich in het straalpad moeten bevinden om verstoring te veroorzaken.
 - Radiogolven in de 60 GHz-band doven snel uit vanwege absorptie door zuurstof in de atmosfeer. Daardoor is de reikwijdte van signalen (en daarmee eventuele verstoring) eveneens beperkt.
4. De mobiele netwerken zijn op dit moment nog niet geoptimaliseerd voor het gebruik voor communicatie met drones. Het is denkbaar dat de capaciteit van de netwerken in eerste instantie

niet voldoende zal zijn. Anderzijds kan het gebruik door drones negatieve gevonden hebben voor de capaciteit op de grond.

We verwachten dat mobiele netwerkoperators hun netwerk plaatselijk zullen optimaliseren voor communicatie met drones, zodra daar een concrete behoefte ontstaat. Vanwege de benodigde investeringen en onzekerheden ligt het voor de hand dat de netwerken hierbij de daadwerkelijke *use cases* volgen en er niet proactief zal worden geanticipeerd op voorziene *use cases*.

5. De beschikbaarheid van de 978 MHz -band voor ADS-B UAT is onduidelijk.

De band kan een rol spelen bij het faciliteren van positiedoorgifte in U-Space (en vormt daarbij vooral een alternatief voor oplossingen op basis van SRD-860).

6. Het gebruik van de SRD-860-band voor positiedoorgifte kent mogelijk capaciteitsbeperkingen. Hetzelfde zou gelden voor ADS-B in 1090 MHz, maar het lijkt er vooralsnog niet op dat UAS zelf in deze band gaan zenden binnen het U-Space-concept (eventueel op laag vermogen).

6 Conclusie

6.1 Beantwoording onderzoeksvragen

1. *Welke toepassingen voor onbemande drones worden voorzien, en in welk ontwikkelingsstadium bevinden deze onbemande drone-toepassingen (inclusief de beoogde luchtverkeersleiding) zich? Hoe snel kunnen we daadwerkelijke inzet van deze toepassingen verwachten (inclusief test- en ontwikkelfase)?*

Momenteel is er aantal klassen toepassingen die voorzien worden:

- Vliegende taxi's/personenvervoer
- Pakketbezorging
- Medisch (spoed)transport
- Landbouw
- Infrastructuurinspectie
- Calamiteiten

De ontwikkelfase en de termijn van inzet verschillen sterk tussen deze toepassingen. Drones bestemd voor personenvervoer of pakketbezorging bevinden zich nog duidelijk in de testfase en toepassing van deze drones wordt op korte termijn nog niet verwacht. De (grootschalige) toepassing van pakketbezorging met drones laat naar verwachting tot 2035 op zich wachten, voor personenvervoer lijkt dit nog verder in de toekomst te liggen (2040 - 2050).

Daarentegen lijkt de inzet van drones voor medisch (spoed)transport, inspectie (landbouw of infrastructuur) en calamiteiten wel realistisch op korte termijn. Met deze toepassingen wordt al uitvoerig getest en ze worden momenteel ook al daadwerkelijk in de praktijk toegepast. Richting 2035 zal het aantal drones bestemd voor deze toepassingen naar verwachting sterk toenemen (zie ook de conclusie bij onderzoeksvraag 4).

2. *Hoe vullen fabrikanten, ontwikkelaars, gebruikers en beleidsmakers de mogelijke frequentiespectrumvraag / communicatiebehoefte tussen "grond" en drone nu in, en welke behoefte is er voor de toekomst, zeker de eerstkomende 5 tot 10 jaar, met een doorkijk naar 20 jaar? Is er een behoefte/noodzaak voor extra frequentiespectrum te verwachten? Zo ja, hoe snel?*

C2-besturingsverkeer

De meest basale behoefte voor communicatie is die voor C2-besturingsverkeer. Het gaat daarbij om kritieke communicatie, maar relatief kleine hoeveelheden data. Voor VLOS wordt primair gebruik gemaakt van ISM-banden en propriëtaire protocollen en/of Wi-Fi. In de EU gelden hiervoor strengere vermogensseisen dan in de VS, waardoor de afstand beperkter is.

Voor BVLOS kan gebruik worden gemaakt van openbare mobiele netwerken (op basis van 4G of 5G) met satellietcommunicatie als back-upverbinding.

C2-videoverkeer

Met name het invullen van de draadloze communicatiebehoefte voor C2-videoverkeer is uitdagend, omdat het hierbij gaat om kritieke communicatie die ook nog eens relatief hoge bandbreedtes vraagt. Het is overigens denkbaar dat de behoefte aan C2-videoverkeer na verloop van tijd afneemt, omdat dit verkeer bij autonoom vliegende drones niet meer kritiek en mogelijk zelfs helemaal niet meer nodig is.

Payloadverkeer

Naast het C2-verkeer is er een behoefte aan minder kritieke, maar breedbandige communicatie voor het uitwisselen van toepassingsspecifieke gegevens (payloadverkeer). Deze behoefte is elastischer dan die voor het C2-verkeer: als er voldoende capaciteit is kunnen er bijvoorbeeld live 4K beelden gezonden worden, maar mocht deze capaciteit niet (meer) beschikbaar zijn dan kunnen drones bijvoorbeeld terugvallen op lokale opslag. We verwachten dat naarmate de beschikbare capaciteit van draadloze communicatie stijgt, de gebruikers van UAS er ook meer gebruik van zullen maken. De bestaande mobiele netwerken zijn in staat om een deel van het payloadverkeer te verwerken, maar verdere investering in de radionetwerken is nodig om dit op grotere schaal te faciliteren.

Positierapportage

Voor het rapporteren van positie zijn binnen U-space verschillende kanalen te gebruiken, waaronder mobiele netwerken, satellietcommunicatie of de C2-verbinding ('networked ID'). Daarnaast kan gebruik worden gemaakt van uitzending in de SRD-860-band (op basis van ADS-L). Inzet van de ADS-B UAT-band (978 MHz) is een laatste optie, maar het is nog onduidelijk of deze band in de EU hiervoor beschikbaar komt. Naast positierapportage in U-Space dienen UAS tot slot ook hun identiteit en positie kenbaar te maken (Remote ID) via Bluetooth of Wi-Fi in de 2,4 GHz-band.

Alternatieven en ontwikkelingen

In de toekomst zou de 5.030 – 5.091 MHz-band kunnen worden ingezet voor communicatie met UAS.

Naast mobiele netwerken kunnen drones gebruik maken van satellieten voor communicatie. Nieuwere LEO (Low Earth Orbit)-systemen zoals StarLink en OneWeb (en een aantal aangekondigde nieuwe constellaties) bieden hoge bandbreedte met relatief lage kosten. Vanwege de gehanteerde techniek en benodigde (grotere) antennes zal dit overigens alleen een mogelijkheid zijn voor grotere drones. Het is te verwachten dat de benodigde eindgebruikersapparatuur op termijn meerdere verschillende constellaties zal ondersteunen, waardoor deze uitwisselbaar en te combineren zijn. Zeker voor drones die langere afstanden moeten afleggen lijkt communicatie via satellieten relevant te zijn. Daarnaast kan met satellietcommunicatie redundantie worden gecreëerd.

Tot slot is de ontwikkeling van laser links zeer relevant. Met laser links kan de druk op het spectrum die deze toepassingen zouden veroorzaken, worden verminderd, en is betrouwbare rechtstreekse communicatie te realiseren (resistent tegen *jamming*). De technologie is wel gedemonstreerd maar nog niet breed ingezet.

3. Wat is de wettelijke taak en mogelijk daarmee samenhangende frequentiespectrumbehoefte van andere overheden ten aanzien van bestuurs- en navigatiecommunicatie door (nieuwe) dronetoepassingen en U-space?

Vanuit de eigen taakstelling voorzien diverse overheidsinstellingen in de inzet van drones. De meest relevante inzetvormen zijn (infrastructuur)inspectie met drones, toezicht en handhaving (bijvoorbeeld in havengebieden) en inzet bij calamiteiten (de drone kan als eerst op een plaats ongeval aankomen, zodat er eerder kan worden opgeschaald of afgeschaald).

In principe wordt op dit moment gewerkt aan het U-spaceconcept waarin coöperatieve drones en bemande luchtvaart in U-space zichtbaar zijn door het uitzenden van (onder andere) positierapportages. De U-space serviceprovider (USSP) speelt een centrale rol in het verzamelen van de posities en het geven van deconflicte-aanwijzingen. In hoeverre rekening moet worden gehouden met niet-coöperatieve drones, en hoe dat moet plaatsvinden, is nog niet duidelijk. De USSP's maken overigens in sommige gevallen wel gebruik van gegevens verkregen via sensoren op de grond (waaronder radar, optische en akoestische sensoren) om de eigen gegevens aan te vullen.

4. Wat zijn de verwachtingen over de omvang van deze markt. Hoeveel droneverkeer is er in het Nederlands luchtruim te verwachten? Zijn hier al prognoses van en zo ja, welke groei laten deze zien de komende 10 tot 15 jaar?

De verwachtingen van de omvang van de markt verschillen sterk per toepassing. Onderstaand geven we de geschatte marktomvang per toepassing weer (in aantallen drones) in 2035. Deze prognoses zijn hoofdzakelijk gebaseerd op een eerder onderzoek door SEO, Decisio en To70 [6] en zijn gevalideerd in interviews.

- Vliegende taxi's/personenvervoer: 0-10
- Pakketbezorging: 2.000-3.000
- Medisch (spoed)transport: 50-100
- Landbouw: 1.000-2.000
- Infrastructuurinspectie: 200-400
- Calamiteiten: 2.000-2.500

Naar verwachting zullen deze aantallen richting 2050 niet veel verder stijgen. Enerzijds omdat drones efficiënter ingezet kunnen worden, bijvoorbeeld doordat hulpdiensten drones gaan delen. Anderzijds omdat de range/vliegduur van drones verder zal toenemen, waardoor er minder drones nodig zijn voor de voorziene toepassingen.

Het is (zeker voor vliegende taxi's en mogelijk ook pakketdrones) denkbaar dat de markt zich op een vergelijkbare manier ontwikkelt als de markt voor flietsbezorgers: grote kapitaalinjecties zorgen voor een snelle groei van de markt, waarbij verschillende partijen de markt proberen te domineren. Vervolgens treedt een shake-out op, waarbij veel aanbieders zullen verdwijnen. Bij lage toetredingskosten en -barrières is het echter ook denkbaar dat in eerste instantie juist veel kleinere

(lokale/regionale) aanbieders actief worden (die later wellicht fuseren).

5. *Wat zijn de mogelijke bedreigingen met betrekking tot het frequentiespectrumgebruik van en door drones en hoe hoog zijn de eisen die aan dat gebruik worden gesteld?*

Wanneer we kijken naar het spectrumgebruik voor communicatie met drones in U-space zien we een aantal mogelijke bedreigingen en knelpunten:

1. Het gelijktijdig gebruik van propriëtaire protocollen en Wi-Fi in dezelfde ISM-band kan leiden tot inefficiënt gebruik van het spectrum.
2. Het gebruik van de ISM-banden voor directe punt-puntcommunicatie met drones zou in specifieke situaties negatieve gevolgen kunnen hebben voor de capaciteit van het gebruik hiervan op de grond (met name door Wi-Fi-netwerken) wanneer de gebruiker een UAS die uitzendt in de Wi-Fi-band kan 'zien'. Daarnaast kan de capaciteit van het spectrum een beperking vormen wanneer er een groot aantal drones tegelijkertijd hoge bandbreedtes nodig heeft.
3. Het gebruik van miniradar op drones in de 60 GHz-band kan mogelijke gevolgen hebben voor ander gebruik van de band. We verwachten dat deze gevolgen beperkt zijn vanwege de gerichtheid van het gebruik en de sterke demping van het signaal in de atmosfeer.
4. De mobiele netwerken zijn op dit moment nog niet geoptimaliseerd voor het gebruik voor communicatie met drones. Het gebruik door drones kan negatieve gevolgen hebben voor de capaciteit op de grond. Het gebruik van de 3,5 GHz-band kan hierbij impact hebben op radiohoogtemeters; dit probleem is echter oplosbaar en van voorbijgaande aard (gelet op de huidige stand van zaken in de Verenigde Staten).
5. De beschikbaarheid van de 978 MHz -band voor ADS-B UAT is onduidelijk.
6. Het gebruik van de SRD-860-band voor positie-doorgifte kent mogelijk capaciteitsbeperkingen. Dit verdient, afhankelijk van de ontwikkelingen in kader van U-Space, nader onderzoek. Hetzelfde zou gelden voor ADS-B op 1.090 MHz, maar het lijkt er vooralsnog niet op dat UAS zelf in deze band gaan zenden binnen het U-Space-concept.

6. *In hoeverre is te verwachten dat bij inzet van drones en de beoogde luchtverkeersleiding gebruik gemaakt zal gaan worden van bestaande draadloze communicatienetwerken?*

In U-space staat de USSP centraal als luchtverkeersleider. De USSP verzamelt positierapportages van drones en bemande luchtvaart in U-space en verstrekt aan de operator (c.q. drone zelf) deconflictie-aanwijzingen. De benodigde communicatie kan daarbij via verschillende kanalen verlopen. De bemande luchtvaart wordt verplicht positie te rapporteren via ofwel broadcastsystemen in de 860 MHz-band (SRD), via mobiele netwerken, ofwel via ADS-B Out in 1.090 MHz, ofwel via ADS-B Out in de UAT-band (978 MHz). Drones verzorgen hun positierapportage ofwel via de operator (bij VLOS) ofwel via mobiele netwerken en/of satellietcommunicatie. Satellietcommunicatie kan daarbij als terugvaloptie dienen voor de mobiele netwerken, en relevant zijn in specifieke scenario's (grotere afstanden, boven zee, et cetera). De terugkoppeling van deconflictie-aanwijzingen naar de drones c.q. de operator kan via dezelfde kanalen verlopen.

6.2 Aanbevelingen

Uit het onderzoek komt een aantal aanbevelingen naar voren voor RDI:

1. Stimuleer de inzet van moderne standaarden die (op basis van *resource blocks/elements*, richtantennes en *beamforming*) efficiënter gebruik van spectrum door/met UAS mogelijk maken en bedreigingen verminderen. Specifiek zou de inzet van Wi-Fi 6 in de 2,4 GHz-band een positief effect kunnen hebben.
2. Monitor in hoeverre er bij UAS-toepassingen met een rechtstreekse verbinding behoefte bestaat naar groter bereik/hogere capaciteit.
3. Monitor in hoeverre de mobiele netwerkoperators capaciteits- en kwaliteitsgaranties aanbieden die nodig zijn voor C2-verkeer en andere communicatiebehoeften van bijvoorbeeld drones van hulpdiensten.
4. Informeer de markt over de (Europese) status van de ADS-B UAT-band (978 MHz). Blijf de Europese ontwikkelingen op dit vlak monitoren zodat tijdig kan worden geacteerd wanneer de band in andere landen voor UAS-positierapportage wordt ingezet.

5. Informeer de markt over hoe de 5.030 – 5.091 MHz-band in Nederland kan worden ingezet voor UAS, zodra op dit vlak ontwikkelingen zijn in internationaal verband.

7 Verwijzingen

- [1] Dutch Drone Delta (2022). *Urban Air Mobility, Verkenning van kansen en belemmeringen*
- [2] SESAR (2015). *European ATM Master Plan 2015* [web.archive.org] SESAR.
- [3] EASA. *U-space: a quick overview* [www.easa.europa.eu]
- [4] de Jager, W. (2020). *EU droneregels: wat is U-space en wanneer krijg je ermee te maken?* [www.dronewatch.nl]
- [5] Jager, W.d. (2020). *DJI introduceert Matrice 300 RTK voor inspectiewerk en security-toepassingen* [www.dronewatch.nl]
- [6] Jongeling, A., Adler, M., Hoelsloot, N., Koopman, M., Groskamp, P., Snaauw, B., en Verboon, T. (2022). *Maatschappelijke effecten van drones* [www.seo.nl] SEO.
- [7] SESAR (2016). *European Drones Outlook Study. Unlocking the value for Europe* [www.sesarju.eu]
- [8] Reuters (2021). *Drone taxi take first spin in air traffic near Paris* [www.reuters.com]
- [9] Crumley, (2021). *After first French public demo, Volocopter eyes air taxi service for Paris 2024 Olympics* [dronedj.com]
- [10] Reuters (2021). *South Korea tests system for controlling air taxis* [www.reuters.com]
- [11] Fingas, J. (2022). *Volocopter's longer-range drone taxi completes its first test flights* [techcrunch.com]
- [12] ANP (2021). *Business Insider* [www.businessinsider.nl]
- [13] Heater, B. (2022). *One size doesn't fit all for Wing's drone deliveries* [techcrunch.com]
- [14] Wing (2022). *Wing's aircraft library* [wing-prod.blogspot.com]
- [15] Dronesexpress (2020). *Drone Delivery Canada Unveils Its Largest and Farthest Range Cargo Delivery Drone, The 'Condor'* [dronesexpress.ca]
- [16] Bueters, P. (2021). *Met deze 'drone for good' wil Patrique Zaman de luchtvaart opnieuw uitvinden* [mtsprout.nl]
- [17]. *DJI Mavic 3 Multispectral* [www.heliguy.com]
- [18] Koningdrone. *DJI T30 Agras* [koningdrone.nl]
- [19] Droprise. *DJI Matrice 300 RTK* [www.droprise.be]
- [20] CBS (2022). *Toelichting Wijk- en Buurtkaart 2020, 2021 en 2022* [www.cbs.nl]
- [21] Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (2020). *Dataset: Agrarisch Areaal Nederland (AAN)* [www.pdok.nl]
- [22] NOS (2023). *Helpt van de dijken voldoet nog niet aan norm voor 2050* [nos.nl]
- [23] Eppinga, A. (2022). *Over vijf jaar wil Tarucca alle windmolens in Nederland monitoren* [innovationorigins.com]
- [24] Rijkswaterstaat (2022). *Dataset Verkeersongevallen Nederland - Ongevallen 2019 - 2021 (RWS)* [data.overheid.nl]
- [25] DJI (2021). *DJI Mavic 3. Specs* [www.dji.com]
- [26] ETSI/3GPP (2022). *TS 122 125 V17.6.0 (2022-04). 5G; Unmanned Aerial System (UAS) support in 3GPP* [www.etsi.org]
- [27] Wi-Fi Alliance. *Wi-Fi Aware* [www.wi-fi.org]
- [28] CEN (2020). *Aerospace series - Unmanned Aircraft Systems - Part 002: Direct Remote identification* [www.nen.nl] NEN.
- [29] EASA (2022). *Explanatory Note to Decisions 2022/022/R, 2022/023/R & 2022/024/R* [www.easa.europa.eu]
- [30] EASA (2022). *Decision 2022/024/R. Technical Specification for ADS-L transmissions using SRD-860 frequency band (ADS-L 4 SRD-860)* [www.easa.europa.eu]
- [31] Foltin, V.(.. *Airspace integration of UAS and UAM* [vtol.org]
- [32] Thales (2020). *Collision avoidance: when drones can fly with the other traffic* [www.thalesgroup.com]
- [33] Skybrary. *ACAS X* [skybrary.aero]
- [34] Droneblog. *Obstacle Avoidance in DJI Drones (Explained for Beginners)* [www.droneblog.com]
- [35] Broadband Breakfast (2022). *DRONES Amazon Asks FCC to Allow Drones in 60-64 GHz Band in Preparation For New Delivery Service* [broadbandbreakfast.com]
- [36] Fierce Wireless (2020). *Qualcomm, Facebook, Google want new rules for 60 GHz* [www.fiercewireless.com]
- [37] 3GPP (2022). *3GPP TS 22.125 V17.6.0 (2022-03). Technical Specification Group Services and System Aspects, Uncrewed Aerial System (UAS) support in 3GPP, Stage 1, Release 17*
- [38] GSMA (2022). *Aerial Connectivity Joint Activity - Work Task #2: Reference Method for assessing Cellular C2 Link Performance and RF Environment Characterization for UAS* [www.gsma.com]
- [39] ECC (2020). *ECC Report 309. Analysis of the usage of aerial UE for communication in current MFCN harmonised bands* [docdb.cept.org]
- [40] RTCA, Inc. (2020). *Assessment of C-Band Mobile Telecommunications Interference Impact on Low Range Radar Altimeter Operations* [www.rtca.org]
- [41] GSMA (2022). *5G and Aviation Altimeters. Co-existence with IMT in 3.3-4.2 GHz and 4.5 - 4.8 GHz* [www.gsma.com]
- [42] FAA (2023). *5G and Aviation Safety* [www.faa.gov]

- [43]FAA (2023). *14 CFR Part 39. Airworthiness Directives; Transport and Commuter Category Airplanes* [public-inspection.federalregister.gov]
- [44]European Aviation Network (2021). *Introduction to EAN* [www.europeanaviationnetwork.com]
- [45]Deutsche Telekom. *EAN LTE-based ground network* [www.telekom.com]
- [46]3GPP (2023). *TS 38.101* [www.3gpp.org]
- [47]uAvionix (2023). *SkyLink. Enterprise C-Band BVLOS CNPC* [uavionix.com]
- [48]AST SpaceMobile (2023). *SpaceMobile Network. Our Technology* [ast-science.com]
- [49]Vodafone (2022). *Vodafone's collaboration with AST SpaceMobile and what it means* [www.vodafone.com]
- [50]All Things FirstNet (2022). *AST SpaceMobile gets OK from FCC to test sat-to-phone tech with AT&T in U.S.* [allthingsfirstnet.com]
- [51]Lynk (2021). *Lynk Files for FCC License to Enable Global Mobile Connectivity* [lynk.world]
- [52]McDowell, J. (2023). *Starlink Statistics* [planet4589.org]
- [53]Nippon.com (2023). *Drone Delivery Service Using Starlink Launched in Japan* [www.nippon.com]
- [54]Deutsche Welle (2022). *Ukraine using Starlink for drone strikes* [www.dw.com]
- [55]Roulette, J. (2023). *SpaceX curbed Ukraine's use of Starlink internet for drones -company president* [www.reuters.com] Reuters.
- [56]FCC (2015). *Measuring Broadband America Fixed Report - 2015* [www.fcc.gov]
- [57]ESA (2022). *RPAS-HAPS - Broadband Satellite Communications to Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS) Using High Altitude Pseudo-Satellites* [artes.esa.int]
- [58]Nationale Voorbereidingscommissie WRC-2023 (2022). *Voorlopig Nederlands Standpunt voor de World Radiocommunications Conference 2023* [www.rdi.nl] Agentschap Telecom.
- [59]Hovstad, P. (2022). *Controlling Unmanned Aircraft Through Regular Commercial FSS Transponders. Good Or Bad Idea?* [www.asiasat.com] AsiaSat.
- [60]Tweakers (2021). *Nederlandse overheid stelt 6GHz-band beschikbaar voor Wi-Fi 6E* [tweakers.net]
- [61]Minister van Economische Zaken (2019). *Nationaal frequentieplan 2014 (NFP2014)* [wetten.overheid.nl] Den Haag,
- [62]FCC (2023). *FCC 22-101. Spectrum Rules and Policies for the Operation of Unmanned Aircraft Systems. Notice of proposed rulemaking* [docs.fcc.gov]
- [63]Ofcom (2021). *Installing a 5 and 6 GHz wireless access system? Here's what you need to know.* [www.ofcom.org.uk]
- [64]Minister van Economische Zaken (2021). *Regeling gebruik van frequentieruimte zonder vergunning en zonder meldingsplicht 2015* [wetten.overheid.nl]
- [65]DJI. *DJI Transmission: Specs* [www.dji.com]
- [66]FCC (2023). *Code of Federal Regulations, Title 47, § 15.247 Operation within the bands 902-928 MHz, 2400-2483.5 MHz, and 5725-5850 MHz.* [www.ecfr.gov]
- [67]National Instruments (2023). *Introduction to 802.11ax High-Efficiency Wireless* [www.ni.com]
- [68]QinetiQ (2022). *QinetiQ deliver world's first demonstration of a laser controlled drone during flight* [www.qinetiq.com]
- [69]Ofcom (2022). *Spectrum for Unmanned Aircraft Systems: Approach to authorising the use of radio equipment on*
- [70]OFCOM (2022). *Spectrum for Unmanned Aircraft Systems (UAS). Approach to authorising the use of radio equipment on UAS* [www.ofcom.org.uk]
- [71]FCC (2021). *WTB Seeks to Refresh the Record on UAS Use of The 5 GHZ Band* [www.fcc.gov]
- [72]FCC (2020). *Report on Section 374 of the FAA Reauthorization Act of 2018* [docs.fcc.gov]
- [73]Australian Department of Infrastructure, Transport, Regional Development and Communications (2022). *RPAS and AAM Strategic Regulatory Roadmap – Public Consultation* [consultation.casa.gov.au]
- [74]ACMA (2022). *New interim arrangements for remotely piloted aircraft systems in 5055–5065 MHz band - consultation 17/2022* [www.acma.gov.au]
- [75]Europese Commissie (2022). *A Drone Strategy 2.0 for a Smart and Sustainable Unmanned Aircraft Eco-System in Europe* [transport.ec.europa.eu] Brussel,
- [76]Eurocontrol (2022). *Q&A Eurocontrol Spectrum Webinar* [www.eurocontrol.int]
- [77]Valavanis, K.P., Oh, P., en Piegl, L.A. (2008). *Unmanned Aircraft Systems* [books.google.nl] Springer.
- [78]Gross, B. (2022). *Primer on EASA Remote ID Regulations* [www.elsight.com]
- [79]Businesswire (2022). *XPENG X2 Completes First Global Public Flight in Dubai* [www.businesswire.com]
- [80]Van Koningsbruggen, P., en Vroemen, D. (2020). *Drone Beleidsvisie en ActieplanGouda,*
- [81]T-Mobile (2018). *Netwerk voltooid: EAN is klaar voor vertrek!* [newsroom.t-mobile.nl]
- [82]Clark, M., en Lawler, R. (2022). *T-Mobile and SpaceX Starlink say your 5G phone will connect to satellites next year* [www.theverge.com]
- [83]Straight, B. (2022). *The evolution of Wing drone delivery* [www.freightwaves.com]
- [84]ECC (2021). *ERC Recommendation 70-03. Relating to the use of Short Range Devices (SRD)* [docdb.cept.org] CEPT.

- [85]PolicyImpact Partners (2022). *Analysis of Wi-Fi 6E and 5G spectrum efficiency at 6 GHz* [6ghz.info]
- [86]FIGO/Strict (2016). *Research into the Radio Interference Risks of Drones* [www.rdi.nl]
- [87]DJI (2017). *FCC ID: SS3-OAS11709 declaration of frequency bands restriction* [fcc.report]
- [88]DJI (2018). *FCC ID:SS3-RM5001808 declaration of frequency bands restriction* [fcc.report]
- [89]FLARM Technology AG (2023). *EASA publishes U-Space regulation, further defines e-Conspicuity* [www.flarm.com]
- [90]Skytraxx GmbH (2023). *Skytraxx 4.0 download* [en.skytraxx.eu]
- [91]Europese Commissie (2021). *Annex to the Commission Implementing Decision on the harmonised use of radio spectrum in the 5 945-6 425 MHz frequency band for the implementation of wireless access systems including radio local area networks (WAS/RLANs)* [digital-strategy.ec.europa.eu] Brussel,

Diverse pictogrammen en afbeeldingen in dit rapport zijn gebruikt onder licentie van Freepik Company S.L.

Bijlage 1. Overzicht gesprekspartners

Organisatie	Gesprekspartner
KPN	Han de Glint, Ellen Aartsen
ANWB/MDS	Simon Prent
I&W	Wilbert Ritsema, Ron van de Leijgraaf
Dronewatch en commercieel operator	Wiebe de Jager
Port of Rotterdam	Niels Kalshoven, Ori Marom
uAvionix Europe	Rudy Muller



Contact:

Dialogic innovatie & interactie
Hooghiemstraplein 33-36
3514 AX Utrecht
Tel. +31 (0)30 215 05 80
www.dialogic.nl

