Dedicated to innovation in aerospace

NLR-CR-2022-033 | oktober 2022

Rekenvoorschrift voor de berekening van de geluidbelasting als gevolg van helikoptervluchten

Op basis van het NORAH model

OPDRACHTGEVER: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Koninklijke NLR - Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum

Dedicated to innovation in aerospace

Rekenvoorschrift voor de berekening van de geluidbelasting als gevolg van helikoptervluchten

Op basis van het NORAH model

RAPPORTNUMMER
NLR-CR-2022-033

AUTEUR(S)
K.M. Knepper
S.J. Heblij

RUBRICERING RAPPORT
ONGERUBRICEERD

DATUM
oktober 2022

KENNISGEBIED(EN)
Vliegtuiggeluidseffecten op de omgeving
Helikoptertechnologie

TREFWOORD(EN)
Geluidsbelasting
Helikopters
NORAH

Probleemstelling

Voor de Nederlandse luchthavens wordt overwogen om voor vliegtuigen met vaste vleugels de geluidbelasting te bepalen met behulp van het Europese ECAC Doc29 model. Op het moment dat Doc29 het huidige rekenmodel (NRM) vervangt ontstaat een leemte: de bijdrage van helikopters aan de geluidbelasting wordt dan niet meer in kaart gebracht. Op termijn wordt er voor helikopterverkeer een alternatieve oplossing voorzien in de vorm van het NORAH2 model, wat specifiek bedoeld is als Europees geluidmodel voor helikopters. NORAH2 is echter nog in ontwikkeling en zal nog enkele jaren op zich laten wachten.

Het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat heeft NLR opdracht gegeven om een rekenvoorschrift op te stellen dat gebaseerd is op de eerste versie van NORAH, dat enkele jaren geleden in opdracht van de Europese Commissie is ontwikkeld. Dit rekenvoorschrift kan dienen als interim-oplossing, welke naast het Doc29 model kan worden gebruikt om de geluidbelasting als gevolg van het helikopterverkeer te bepalen.

Beschrijving van de werkzaamheden

Dit voorschrift beschrijft voor Nederlandse luchthavens (incl. helihavens) een methodiek voor de berekening van de Lden en Lnight geluidbelasting, uitgedrukt in dB, ten gevolge van vliegverkeer met helikopters. Het voorschrift is grotendeels gebaseerd op de eerste versie van het NORAH model en sluit aan op het beschikbare softwareprototype.

In de eerste plaats beschrijft dit voorschrift het model zelf. Voor het uitvoeren van een berekening zijn echter, naast een voorschrift en een software-implementatie hiervan, ook diverse invoergegevens benodigd. Deze worden deels vastgesteld in overleg met de opdrachtgever en/of het bevoegd gezag. Andere delen van de invoergegevens zijn onderdeel van het model, of worden vastgelegd in dit rekenvoorschrift.

Vaak zijn ook bewerkingen nodig op de invoergegevens. Dergelijke bewerkingen worden beschreven in dit voorschrift. Zo wordt toegelicht welke bewerkingen toegepast moeten worden om van radargegevens tot een gemodelleerde vliegbaan te komen, die geschikt is voor het NORAH model en bijbehorende software.

Verder zijn er na de geluidberekening die per vlucht wordt uitgevoerd, nog diverse nabewerkingen nodig om de geluidbelasting te bepalen. Ook deze nabewerkingen worden in dit rekenvoorschrift beschreven. Hierbij wordt zo veel mogelijk de aansluiting gezocht bij de berekeningsmethode voor vliegtuigen met vaste vleugels, zodat bijdrages van beide verkeerssegmenten op efficiënte wijze kunnen worden opgeteld tot een totale geluidbelasting.

NLR
Anthony Fokkerweg 2
1059 CM Amsterdam
p) +31 88 511 3113
e) info@nlr.nl i) www.nlr.nl

Dedicated to innovation in aerospace

NLR-CR-2022-033 | oktober 2022

Rekenvoorschrift voor de berekening van de geluidbelasting als gevolg van helikoptervluchten

Op basis van het NORAH model

OPDRACHTGEVER: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

AUTEUR(S):

K.M. Knepper NLR
S.J. Heblij NLR

Koninklijke NLR - Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum

Niets uit dit rapport mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt, op welke wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de eigenaar en/of opdrachtgever.

OPDRACHTGEVER	**Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat**
CONTRACTNUMMER	**31174427**
EIGENAAR	**NLR**
NLR DIVISIE	**Aerospace Operations**
VERSPREIDING	**Beperkt**
RUBRICERING TITEL	**ONGERUBRICEERD**

GOEDGEKEURD DOOR:		
AUTEUR	**REVIEWER**	**BEHERENDE AFDELING**
K.M. Knepper	M. Tuinstra Martijn Tuinstra 2022.10.20 10:26:45 +02'00'	M.H. Nagelsmit Digitally signed by Martin Nagelsmit Date: 2022.10.20 11:36:13 +02'00'
DATUM 2 0 1 0 2 2	DATUM	DATUM

Inhoudsopgave

Symbolen 5

Afkortingen 7

1 Inleiding 8
1.1 Algemeen 8
1.2 Aanleiding 8
1.3 Interim methode 9
1.4 Leeswijzer 9

2 Berekeningsmethode geluidblootstellingsniveau 11
2.1 Geluidniveaus op de rekenpunten 11
2.2 Bepaling van het bronniveau 11
2.3 Propagatie 13
2.3.1 Afstandsverzwakking 13
2.3.2 Luchtdemping 13
2.3.3 Bodemdemping 13
2.4 Geluidblootstellingsniveau 15
2.5 Frequentieweging 15

3 Vliegbaanmodellering 16
3.1 Algemeen 16
3.2 Modellering van routes of grondpaden 16
3.3 Profiel op basis van radargegevens 16
3.4 Vliegbaanverlenging 18
3.4.1 Toepassing 18
3.4.2 Methode 18

4 Substitutie 21
4.1 Algemeen 21
4.2 Indelingslijsten 21
4.3 Indelingsmethode 23

5 Rekenraster en nabewerkingen 25
5.1 Rekenraster 25
5.1.1 Luchthavens met vastvleugelig verkeer 25
5.1.2 Helihavens 25
5.2 Visualisatie met behulp van contouren 26

6 Bepaling geluidbelastingsniveau 27
6.1 Geluidblootstellingsniveaus 27
6.1.1 Substitutiecorrectie 27
6.1.2 Algemene grondplaat correctie 28
6.2 Geluidbelastingsniveau 29
6.2.1 Sommatie van geluidblootstellingsniveaus 29
6.2.2 Correctiefactor voor ontbrekend verkeer 29

Referenties 31

Symbolen

Grootheid	Eenheid	Beschrijving
c	m/s	Geluidssnelheid
d	$-$	Numerieke afstand
F	$-$	Grenslaagverliesfactor
f	Hz	Frequentie
f_c	Hz	Middenfrequentie van een tertsband
f_{corr}	$-$	Correctiefactor voor ontbrekend verkeer
H_{den}	$-$	Hindersom geluidbelasting gehele etmaal
H_{night}	$-$	Hindersom geluidbelasting nachtperiode
h_{rel}	$-$	Luchtvochtigheid
I	$-$	Maat voor de hoeveelheid constructieve/destructieve interferentie
k	$1/m$	Golfgetal
L	dB	Bronterm
L_0	dB	Het geluidsniveau per tertsband op een rekenpunt
ΔL_a	dB	Luchtdemping
L_{AE}	dB	Geluidsblootstellingsniveau
L_{den}	dB	Geluidbelastingsniveau gehele etmaal
ΔL_{EPNL}	dB	Substitutiecorrectie
ΔL_g	dB	Bodemdemping
ΔL_{IGPM}	dB	Grondplaatcorrectie
L_{night}	dB	Geluidbelastingsniveau nachtperiode
ΔL_p	dB	Propagatieterm
ΔL_s	dB	Afstandsverzwakking
N	$-$	Aantal vluchten
p_{atm}	Pa	Atmosferische druk
Q	$-$	Bolvormige reflectiecoëfficiënt
ΔR	m	Weglengteverschil tussen het directe en gereflecteerde weglengte
r	m	Afstand tussen helikopter en rekenpunt
r_h	m	Referentieafstand van 60m
s	m	Afstand / afgelegde weg
T	s	Tijdsinterval
T	K	Temperatuur
t	s	Tijd
V	m/s	Vliegsnelheid
w	$-$	Weegfactor etmaalperiode
x	m	X – coördinaat van het Carthesisch assenstelsel
$\boldsymbol{x_0}$	m	Locatie van het rekenpunt, (x_0,y_0,z_0)

Grootheid	Eenheid	Beschrijving
y	m	Y – coördinaat van het Carthesisch assenstelsel
$\boldsymbol{y_h(t)}$	m	Tijdsafhankelijke locatie van de helikopter, $(x_h(t), y_h(t), z_h(t))$
Z_s	$-$	Grondimpedantie
z	m	Z – coördinaat van het Carthesisch assenstelsel
α	$1/m$	De dempingscoëfficiënt per tertsband
γ	°	baanhoek
$\delta_{\gamma,V}$	$-$	Wegingsfunctie
Θ	°	Grondkoers
θ	°	Poolhoek
λ	m	Golflengte
ξ	°	invalshoek van de aankomende golf
σ	$kPa \cdot s/m^2$	Stromingsweerstand van het materiaal
τ	s	Referentietijd
φ	°	Azimuthoek
ψ	$-$	argument van de bolvormige reflectiecoëfficiënt

Afkortingen

ACRONIEM	OMSCHRIJVING
EASA	European Union Aviation Safety Agency
ECAC	European Civil Aviation Conference
ICAO	International Civil Aviation Organization
IEC	International Electrotechnical Commission
IGPM	Inverted Ground-Plane Microphone
NLR	Koninklijke NLR - Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum
NORAH	NOise of Rotorcraft Assessed by a Hemisphere-approach
NRM	Nederlands Rekenmodel
SAE	Society of Automotive Engineers

1 Inleiding

1.1 Algemeen

Dit voorschrift legt voor Nederlandse luchthavens en helihavens de methodiek vast voor de berekening van de Lden en Lnight geluidbelasting, uitgedrukt in dB, ten gevolge van vliegverkeer met helikopters. Deze geluidbelasting wordt bepaald buitenshuis, op een waarneemhoogte van 1,2 m boven de lokale ondergrond.

Dit voorschrift is uitsluitend bedoeld voor het vliegverkeer met helikopters. Het is niet geschikt voor het bepalen van de geluidbelasting als gevolg van het vliegverkeer door vliegtuigen met vaste vleugels. Daar waar de geluidbelasting van het geheel van vliegverkeer bepaald moet worden, zal een ander model met bijbehorend voorschrift ingezet moeten worden om de bijdrage van dit overige verkeer te bepalen. De bijdrage aan de geluidbelasting van zowel het helikopterverkeer als het niet-helikopterverkeer kan vervolgens worden opgeteld om de totale geluidbelasting als gevolg van het vliegverkeer te bepalen.

Voor het uitvoeren van een berekening zijn, naast dit voorschrift en een software-implementatie hiervan, ook diverse invoergegevens benodigd. Deze worden deels vastgesteld in overleg met het bevoegd gezag. Andere delen van de invoergegevens zijn onderdeel van het model, of worden vastgelegd in dit rekenvoorschrift. Daar waar bewerkingen nodig zijn op de invoergegevens, worden deze bewerkingen zo veel mogelijk vastgelegd in dit voorschrift.

1.2 Aanleiding

De geluidbelasting als gevolg van het vliegverkeer op de Nederlandse luchthavens wordt berekend met behulp van het Nederlands Rekenmodel of NRM [1][2]. Deze methode wordt gebruikt voor zowel het vastvleugelig verkeer als voor de helikopters. Voor de luchthaven Schiphol wordt het Europese model ECAC Doc29 [3][4] geïntroduceerd [5]. Deze methode vervangt daarmee het NRM. Voor de regionale luchthavens wordt het gebruik van Doc29 overwogen, maar heeft de besluitvorming hierover nog niet plaatsgevonden.

ECAC Doc29 zelf ondersteunt formeel maar beperkt helikopterverkeer, waarbij helikopters alleen met het model mogen worden doorgerekend op het moment dat ze de totale geluidbelasting niet domineren [3]. Zeker lokaal is niet te garanderen dat dit het geval is. De bij Doc29 horende database met invoergegevens bevat daarnaast geen gegevens voor helikopters. Deze beperkingen maken dat Doc29 niet geschikt is voor helikopterverkeer. Er ontstaat bij een overstap naar Doc29 dus een leemte: de bijdrage van helikopters aan de geluidbelasting wordt niet in meer in kaart gebracht.

Het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat heeft het NLR daarom opdracht gegeven een rekenvoorschrift op stellen voor het bepalen van de geluidbelasting als gevolg van helikopterverkeer. Dit rekenvoorschrift biedt een oplossing in de vorm van een rekenvoorschrift specifiek voor helikopters, welke naast een rekenvoorschrift voor vastvleugelig verkeer kan worden gebruikt. Het voorschrift is grotendeels gebaseerd op de technische specificatie van een Europees geluidmodel voor helikopters [12], welke in opdracht van de Europese Commissie is ontwikkeld .

1.3 Interim methode

Van dit model, of rekenmethode, voor het bepalen van het geluid als gevolg van helikopteroperaties bestaan meerdere versies. In 2017 is de eerste versie van het model opgeleverd in het kader van het Europese Commissie contract MOVE-C2-2014-269. Het model is ontwikkeld door een consortium bestaande uit NLR, SINTEF en ANOTEC met begeleiding van EASA. Hierbij is tevens een prototype softwaremodel opgeleverd. Deze software heeft de naam NORAH gekregen (NOise of Rotorcraft Assessed by a Hemisphere-approach) [9][10].

De methode zelf is nog in ontwikkeling. In 2020 is het originele consortium binnen een 4-jarig contract in opdracht van EASA begonnen met de verdere ontwikkeling van de methode [11]. Het doel hierbij is om de mogelijkheden van het model verder uit te breiden. Tevens zal de database met geluidgegevens verder worden uitgebreid door meer geluidmetingen aan helikopters uit te voeren.

Om op dit moment al een oplossing te kunnen bieden voor het helikopterverkeer, wordt voor dit rekenvoorschrift aangesloten bij de originele methode uit 2017. Naast het feit dat het vervolgonderzoek nog niet is afgerond en de aanpassingen nog niet zijn gevalideerd, speelt hierbij ook nog een praktisch aspect: alleen van de originele methode is al een software-implementatie beschikbaar waarmee de berekeningen daadwerkelijk kunnen worden uitgevoerd. Wel wordt de originele methode om praktische redenen op enkele vlakken aangevuld via dit rekenvoorschrift. Voor meer informatie over de aanvullingen en achterliggende redenen, zie Appendix A van referentie [13]

Dit betekent dat voorliggend rekenvoorschrift kan worden gezien als vastlegging van een interim methode. Op het moment dat het vervolgonderzoek is afgerond en daarmee NORAH2 beschikbaar is, kunnen er redenen zijn om over te stappen op deze nieuwe versie. Dit betreft in de eerste plaats het beschikbaar komen van verbeteringen en aanvullingen op de methode. Daarnaast geldt dat NORAH2 op termijn bedoeld is om gebruikt te worden in relatie tot de verplichtingen uit de Environmental Noise Directive. Dit zou een aanleiding kunnen vormen om tegen die tijd over te stappen op een voorschrift gebaseerd op NORAH2.

1.4 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft de berekeningsmethode voor het bepalen van het geluidniveau op de rekenpunten[1]. Dit betreft allereerst de bepaling van het bronniveau van de helikopter, afhankelijk van de vliegcondities en de uitstralingshoeken. Naast het bronniveau wordt de waarde van een propagatieterm bepaald. Deze is gedefinieerd in paragraaf 2.3. Op basis van de berekende geluidniveaus worden ten slotte de A-gewogen geluidblootstellingsniveaus bepaald.

Voor het modelleren van de vliegbaan is het gebruik van radargegevens het uitgangspunt Dit wordt in hoofdstuk 3 beschreven. Voor de vliegbaan wordt er hierbij onderscheid gemaakt naar het grondpad (paragraaf 3.2) en het verticale profiel (paragraaf 3.3). De methode voor het verlengen van de vliegbaan tot aan de start- of landingslocatie in het geval dat radardata niet toereikend is, is vastgelegd in paragraaf 3.4.

[1] Ook wel waarneempunten of observatiepunten.

Bij het uitvoeren van een geluidberekening zullen de helikoptertypes die in de praktijk opereren gerepresenteerd moeten worden door de types die binnen de database van het model beschikbaar zijn. Hoofdstuk 4 bevat daarvoor indelingslijsten, aangevuld met een methode voor types die niet in de lijsten zijn opgenomen.

Geluidberekeningen worden typisch uitgevoerd op een raster (of netwerk) met gelijkmatig verdeelde rekenpunten. De te maken keuzes hiervoor worden gespecifieerd in paragraaf 5.1. Hierbij wordt, indien van toepassing, zo veel mogelijk aangesloten bij berekeningen die voor de desbetreffende luchthaven voor het vastvleugelig verkeer worden gemaakt. Dit principe geldt ook bij het maken van contouren, zoals besproken in paragraaf 5.2.

De bepaalde geluidblootstellingsniveaus per vlucht (hoofdstuk 2) worden ten slotte gesommeerd tot de geluidbelasting als gevolg van alle vluchten gezamenlijk. Hierbij worden diverse correcties toegepast, zowel op de geluidblootstellingsniveaus, als op de bepaalde geluidbelasting. Dit wordt omschreven in hoofdstuk 6.

2 Berekeningsmethode geluidblootstellingsniveau

2.1 Geluidniveaus op de rekenpunten

Het geluidsniveau L_o per tertsband op een rekenpunt is een functie van de locatie van het rekenpunt $\boldsymbol{x_0}$, de tijdsafhankelijke positie van de helikopter $\boldsymbol{y_h(t)}$ en de middenfrequentie f_c van de tertsband:

$$L_o(f_c, \boldsymbol{x_o}, \boldsymbol{y_h}(t)) = L(f_c, \varphi, \theta, V, \gamma) + \Delta L_p \qquad 1$$

Het niveau wordt bepaald op basis van:

- Een bronterm L, afhankelijk van de middenfrequentie, de uitstralingshoeken (φ en θ), de vliegsnelheid V en de baanhoek γ,
- Een propagatieterm ΔL_p

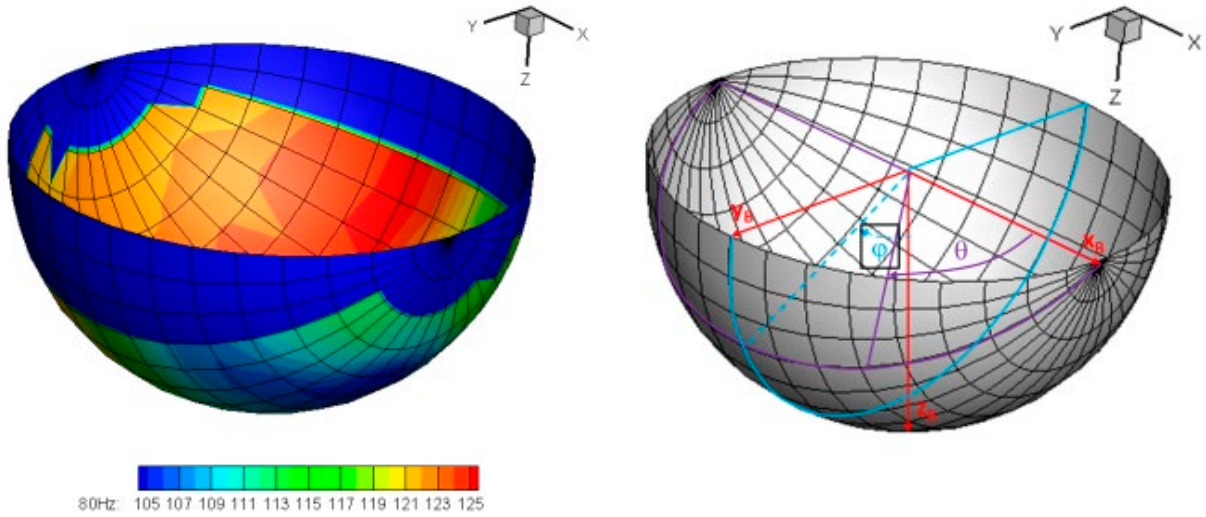
De bronniveaus zijn gebaseerd op metingen, verwerkt in zogenaamde hemisferen (geluidbollen). Deze hemisferen zijn gedefinieerd (zie ook Figuur 1) als functie van de azimut φ (links-rechts) en poolhoek θ (voor-achter), in vakken van 10 graden. Per helikoptertype zijn verschillende hemisferen beschikbaar, waarbij elke hemisfeer past bij een specifieke vliegconditie: een combinatie van de vliegsnelheid en de baanhoek (V en γ).

2.2 Bepaling van het bronniveau

Om de helikopter geluidsbron te beschrijven is gebruik gemaakt van een hemisfeer, i.e. een halve geluidbol zoals afgebeeld in Figuur 1. In deze hemisferen wordt voor de geluidniveaus gebruik gemaakt van een referentie afstand van 60m. Ze bevatten effecten van atmosferische absorptie bij ICAO atmosferische referentie condities ($p_{atm} = 101325Pa, T = 298.15K, h_{rel} = 70\%$). De hemisferen zijn gegeven in tertsbanden voor frequenties tussen de 10Hz (10^e band) en 10kHz (40^e band). De hemisferen zijn gedefinieerd as een functie van de azimutale hoek φ en poolhoek θ, in intervallen van 10 graden. De emissiehoeken zijn op de volgende manier gerelateerd aan het Cartesische coördinatenstelsel in het helikopter assenstelsel:

$$\begin{aligned} x_{hem} &= r_h \cos\theta \\ y_{hem} &= r_h \sin\theta \sin\varphi \\ z_{hem} &= r_h \sin\theta \cos\varphi \end{aligned} \qquad 2$$

Waarvoor geldt dat $-90° \leq \varphi \leq 90°$ en $0° \leq \theta \leq 180°$. Negatieve en positieve azimut hoeken, φ, komen respectievelijk overeen met bakboord en stuurboord van de helikopter. Voor poolhoeken, θ, van minder dan 90° straalt geluid naar voren uit en voor poolhoeken van groter dan 90° straalt het geluid uit in achterwaartse richting van de helikopter, zoals te zien is in Figuur 1.



Figuur 1: Voorbeeld van een hemisfeer van de 80Hz tertsband (links), en definitie van het coördinatensysteem (rechts)

Zoals hierboven beschreven zijn de niveaus in de hemisferen gedefinieerd als functie van de poolhoek en de azimutale hoek in intervallen van 10 graden. Om bronniveaus uit een hemisfeer (geldig voor een bepaalde vliegconditie) te verkrijgen voor een specifieke emissierichting wordt bilineaire interpolatie toegepast:

$$L_{i,j}(f_c, \varphi, \theta) = 10\log_{10}\left(\begin{bmatrix} \frac{\varphi^{m+1}-\varphi}{\Delta\varphi} & \frac{\varphi-\varphi^{m}}{\Delta\varphi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 10^{\frac{L_h(f_c)_{i,j}^{m,n}}{10}} & 10^{\frac{L_h(f_c)_{i,j}^{m,n+1}}{10}} \\ 10^{\frac{L_h(f_c)_{i,j}^{m+1,n}}{10}} & 10^{\frac{L_h(f_c)_{i,j}^{m+1,n+1}}{10}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\theta^{n+1}-\theta}{\Delta\theta} \\ \frac{\theta-\theta^{n}}{\Delta\theta} \end{bmatrix}\right) \quad 3$$

waar m en n de azimut en pool index zijn, waarvoor geldt dat $\varphi^m < \varphi < \varphi^{m+1}$ en $\theta^n < \theta < \theta^{n+1}$.

Als gevolg van beperkingen aan de metingen zijn niet altijd alle vlakken (uitstraalrichtingen) van een hemisfeer gedefinieerd. Wanneer data nodig is die buiten het beschikbare bereik van de hemisfeer valt zal extrapolatie toegepast moeten worden vanuit het dichtstbijzijnde interval, waardoor eventuele gaten in de hemisfeer gevuld worden. Het dichtstbijzijnde interval is gevonden door $\rho_{m,n}$ te minimaliseren:

$$\underset{m,n}{\operatorname{argmin}}(\rho_{m,n}) \quad 4$$

waar $\rho_{m,n}$ de absolute hoek tussen het interval en de gewenste waarde van φ en θ is, gedefinieerd als:

$$\rho_{m,n} = \cos^{-1}(\mathbf{x}(\varphi,\theta)\cdot\mathbf{x}_{m,n}) \quad 5$$

De vectoren $\mathbf{x}$ en $\mathbf{x}_{m,n}$ zijn gegeven door vergelijking 2, met $r_h = 1$. In het geval dat er meerdere dichtstbijzijnde intervallen zijn wordt het energetische gemiddelde van de dichtstbijzijnde intervallen genomen.

2.3 Propagatie

De propagatieterm ΔL_p zoals gedefinieerd in vergelijking (1) is opgebouwd uit drie elementen:

$$\Delta L_p = \Delta L_s + \Delta L_a + \Delta L_g \qquad 6$$

Hierin is:

- ΔL_s De afstandsverzwakking (zie paragraaf 2.3.1)
- ΔL_a De luchtdemping (zie paragraaf 2.3.2)
- ΔL_g De bodemdemping (zie paragraaf 2.3.3)

2.3.1 Afstandsverzwakking

De helikopter wordt gemodelleerd als puntbron met onbelemmerde bolvormige uitbreiding. De afstandsverzwakking wordt daarmee als volgt bepaald:

$$\Delta L_s = -20\, log_{10} \frac{r}{r_h} \qquad 7$$

Waarbij r de afstand is tussen helikopter en rekenpunt en r_h de referentieafstand van 60 m is, op basis waarvan de hemisferen zijn opgesteld. Afstand r mag hierbij ook waarden kleiner dan 60 m aannemen, waarbij een waarde van nul wordt voorkomen door toepassing van een minimum vlieghoogte (zie paragraaf 3.4.2).

2.3.2 Luchtdemping

De luchtdemping wordt, per tertsband als volgt bepaald:

$$\Delta L_a(f_c) = -\alpha(f_c)(r - r_h) \qquad 8$$

De dempingscoëfficiënten α per tertsband worden, in lijn met ECAC Doc29 [3][4] bepaald met behulp van de methode zoals beschreven in SAE-AIR-5534[8]. Hierbij dienen de atmosferische omstandigheden uit de ICAO standaardatmosfeer toegepast te worden:

- *Luchtdruk* $p_{atm} = 101325$ Pa
- *Temperatuur* $T = 288.15$ K
- *Relatieve luchtvochtigheid* $h_{rel} = 70\%$

2.3.3 Bodemdemping

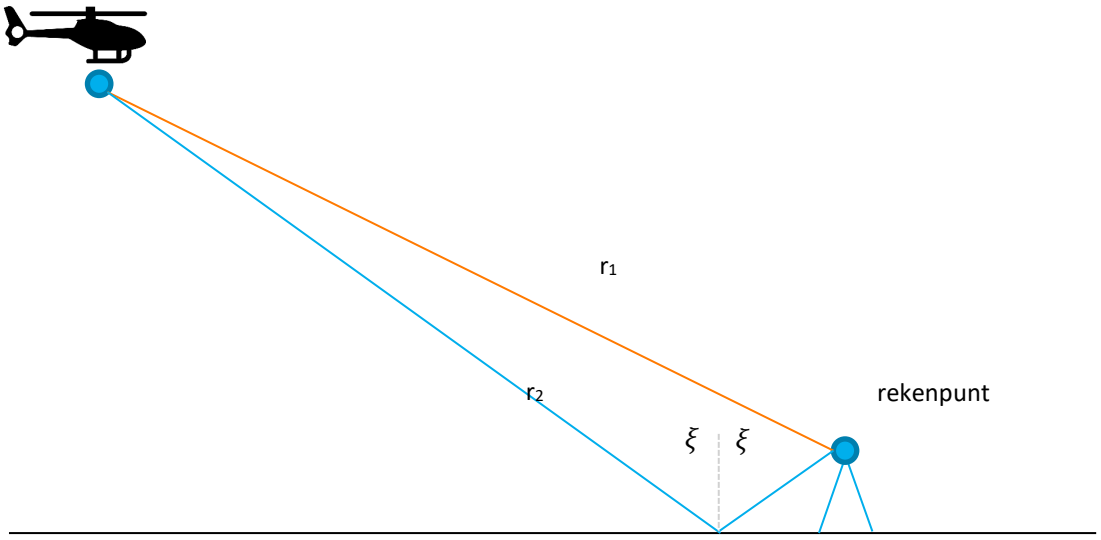
Voor de bodemdemping wordt, overeenkomstig met ECAC Doc29 [3][4] uitgegaan van een zachte bodem.
Een akoestisch zachte bodem komt overeen met een met grassen bedekte bodem. De bodemdemping wordt als volgt bepaald:

$$\Delta L_g = 10\,log\left\{1 + \frac{r_1^2}{r_2^2}|Q|^2 + 2\frac{r_1}{r_2}|Q|I\right\} \quad 9$$

Waarbij I, de maat voor de hoeveelheid constructieve/destructieve interferentie, is gedefinieerd als:

$$I = \frac{sin\left(\frac{0.727 f_c \Delta R}{c}\right)}{\frac{0.727 f_c \Delta R}{c}} cos\left(\frac{6.325 f_c \Delta R}{c} + \psi\right) \quad 10$$

Hierbij is r_1 de afstand tussen helikopter en rekenpunt en r_2 de afstand tussen helikopter en rekenpunt via het reflecterende grondoppervlak, zoals geïllustreerd in Figuur 2.



Figuur 2: Afstand tussen helikopter en rekenpunt; rechtstreeks (r_1) en gereflecteerd via het grondoppervlak (r_2)

Verder is ΔR het weglengteverschil (r_2-r_1), c de geluidsnelheid bij de in paragraaf 2.3.2 gedefinieerde condities en is ψ het argument van de reflectiecoëfficiënt voor een gekromd golffront Q. Deze is gedefinieerd als:

$$Q = R_p + \left(1 - R_p\right)F(d) \quad 11$$

Hierbij is:

$$R_p = \frac{Z_s\,cos\,\xi - 1}{Z_s\,cos\,\xi + 1} \quad 12$$

Hierbij is Z_s de grondimpedantie en ξ de invalshoek van de aankomende golf. Deze is zichtbaar in Figuur 2, waar het propagatiepad, voor directe en gereflecteerde geluidsgolven tussen de bron (helikopter) en het rekenpunt, weergegeven is. De grenslaagverliesfactor[2] F wordt als volgt bepaald:

$$F(d) = 1 + id\sqrt{\pi}e^{-d^2}\,erfc(-id) \quad 13$$

[2] Indien de complementaire errorfunctie *erfc* niet beschikbaar is in de toegepaste programmeertaal, kan gebruik gemaakt worden gemaakt van de implementatie zoals omschreven in referentie [11].

als functie van numerieke afstand d:

$$d = \frac{(1+i)}{2}\sqrt{kr_2}\left(\frac{1}{Z_s} + cos\,\xi\right) \qquad 14$$

waar k, het golfgetal, is gedefinieerd als $k = 1/\lambda$, waar λ de golflengte is. De grondimpedantie is gedefinieerd als:

$$Z_s = \left\{1 + 0.0511\left(\frac{f}{\sigma}\right)^{-0.754}\right\} + i\left\{0.0768\left(\frac{f}{\sigma}\right)^{-0.732}\right\} \qquad 15$$

Waarbij voor σ een vaste waarde van 200 kPa·s/m^2 wordt aangehouden, overeenkomstig met graslandschap.

2.4 Geluidblootstellingsniveau

Het geluidblootstellingsniveau per vlucht $L_{AE,i}$ wordt voor vlucht *i* bepaald door integratie over de tijd. Omdat het model geïmplementeerd wordt als tijdstapsimulatie met tijdstap *dt* wordt numerieke integratie toegepast:

$$L_{AE,i} = 10\,log_{10}\left(\frac{1}{\tau}\sum_z 10^{\frac{L_{A,i,z}}{10}} \cdot dt\right) \qquad 16$$

Hierbij is $L_{A,i,z}$ het A-gewogen geluidniveau (zie paragraaf 2.5) voor vlucht *i* tijdens de tijdstap met index *z* en is τ de referentieperiode van 1 s.

2.5 Frequentieweging

Een lineair gemeten geluiddrukniveau is geen goede geen goede maat voor de ondervonden hinder van een bepaald geluid, omdat de gevoeligheid van het menselijk oor niet voor alle frequenties gelijk is. Hiervoor wordt gecorrigeerd door middel van een frequentieafhankelijke weging: de A-weging. Hierbij wordt voor alle beschikbare tertsbanden (10^e t/m 40^e band) het frequentiefilter toegepast, zoals gedefinieerd in IEC 61627-1:2003 [7]. Op deze wijze wordt vanuit het geluidsniveau L_o per tertsband (zie vergelijking 1) het A-gewogen geluidsniveau L_A verkregen.

3 Vliegbaanmodellering

3.1 Algemeen

Voor het modelleren van de vliegbaan is het gebruik van radargegevens het uitgangspunt. Hiervoor zijn verschillende bronnen beschikbaar. De bron voor radargegevens dient voor elke luchthaven afgestemd te worden met het bevoegd gezag. Bij het selecteren van deze bron is het van belang dat niet wordt gekozen voor het gebruik van ruwe, onbewerkte radargegevens, waarop nog geen controle, filtering en/of middeling op basis van meerdere bronnen heeft plaatsgevonden. Dergelijke ruwe gegevens kunnen onrealistische posities bevatten, bijvoorbeeld als gevolg van radarreflecties.

Verder is het van belang dat de tijdstap tussen opeenvolgende positiewaarnemingen niet groter is dan 2 s. Omdat veel radargegevens worden geleverd met een tijdresolutie van 4 s, zullen deze gegevens geïnterpoleerd moeten worden voordat deze in de berekening worden toegepast. Voor de interpolatie kunnen de principes uit paragraaf 3.4.2 worden toegepast.

Binnen dit rekenvoorschrift wordt onderscheid gemaakt tussen aankomende en vertrekkende vluchten. Indien nodig, dienen radargegevens te worden opgesplitst in separate vliegbewegingen, waar aankomst en vertrek als aparte vliegbeweging worden geteld . Het opsplitsen van een track wordt gedaan op de positie die het verst van het luchthaven is gelegen.

3.2 Modellering van routes of grondpaden

Bij het modelleren van routes (of grondpaden) is het gebruik van radargegevens het uitgangspunt. De positie van de helikopter in het horizontale vlak (x_h en y_h) als functie van de tijd worden één op één overgenomen uit de bewerkte radargegevens. Wel wordt eventueel verlenging toegepast, op het moment dat een deel van het grondpad niet beschikbaar is vanuit de radargegevens. Dit is beschreven in paragraaf 3.4.

Naast de positie van de helikopter dient ook de koersrichting van de helikopter bepaald te worden. Deze wordt verondersteld gelijk te zijn aan de grondkoers en wordt bepaald met:

$$\Theta = \mathrm{atan}_2(\Delta x, \Delta y) \qquad 17$$

3.3 Profiel op basis van radargegevens

Ook voor het modelleren van het verticale profiel is gebruik van radargegevens het uitgangspunt. Op basis hiervan wordt de hoogte (z_h) ten opzichte van het lokale luchthavenniveau bepaald. Ook hier geldt dat, indien een deel van de vliegbaan niet beschikbaar is, verlenging wordt toegepast (paragraaf 3.4).

Voor de selectie van de best bijpassende hemisfeer, dient ook de baanhoek γ te worden bepaald. Deze is als volgt gedefinieerd:

$$\gamma = \text{acos}(\Delta z/\Delta s\ ) \qquad 18$$

Voor de hemisfeerselectie dient daarnaast de vliegsnelheid bepaald te worden. Onder de aanname van geen wind, is deze gedefinieerd als:

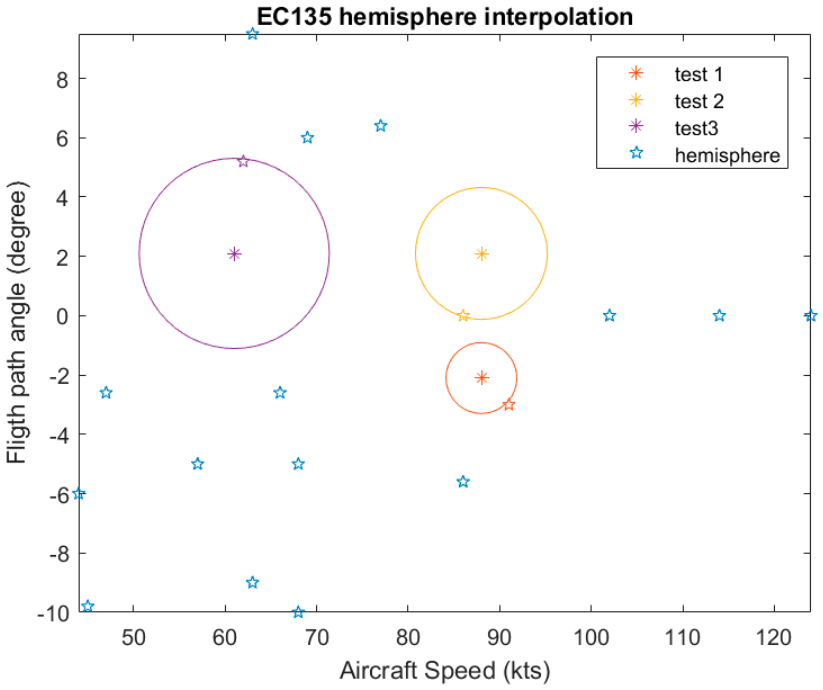
$$V = \frac{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}}{\Delta t} \qquad 19$$

De keuze voor de best passende hemisfeer vindt plaats op basis van vliegsnelheid, V en baanhoek, γ en wordt bepaald door middel van een dimensieloze interpolatie. Hiertoe wordt een wegingsfunctie $\delta_{\gamma,V}$ gebruikt waarin op basis van de vliegsnelheid en de baanhoek de afstand tot elk van de beschikbare hemisferen wordt vastgesteld:

$$\delta_{\gamma,V} = \sqrt{\left(\frac{(\gamma_{track} - \gamma_{hemi})}{(\gamma_{max} - \gamma_{min})}\right)^2 + \left(\frac{(V_{track} - V_{hemi})}{(V_{max} - V_{min})}\right)^2} \qquad 20$$

Hierbij zijn $\gamma_{max}, \gamma_{min}, V_{max}, V_{min}$ de hoogste en laagste waarden voor baanhoek γ vliegsnelheid V waarvoor hemisferen voor de desbetreffende helikopterklasse beschikbaar zijn.

Minimalisatie van wegingsfunctie $\delta_{\gamma,V}$ leidt tot de meest representatieve hemisfeer. Een illustratie van de werking van de interpolatie kan gevonden worden in Figuur 3, waarin voor 3 vliegcondities (test 1, 2 en 3) de beste keuze voor een hemisfeer getoond wordt.



Figuur 3: Effect van de dimensieloze wegingsfunctie voor de vliegsnelheid en de baanhoek. De asterisken geven 3 testpunten aan waarvoor de beste hemisfeer gezocht wordt. De sterren geven alle beschikbare hemisferen voor de EC135 aan. De sterren wiens kleur overeenkomt met een van de asterisken duiden de beste optie (i.e. dichtstbijzijnde) voor de hemisfeer aan. De cirkels zijn een puur visuele indicatie om aan te tonen dat er geen betere hemisfeer aanwezig is (kortste afstand)

Om effecten van mogelijke onnauwkeurigheden in radardata tegen te gaan, wordt de uiteindelijke selectie van alle hemisferen voor een specifieke vluchtbeweging nog gefilterd. Als er 2 keer dezelfde hemisfeer voor en na een punt in de vliegbaan van een beweging zit dan kan wordt aangenomen dat het hier om een constant vluchtelement gaat en wordt voor het betreffende punt dezelfde hemisfeer toegepast. Op deze manier wordt bijvoorbeeld een korte klim- of daalbeweging in een verder volledig level flight segment verwijderd. Een voorbeeld van de werking van dit filter is hieronder gegeven.

In: [1,1,**2**,1,1,3,4,7,7,8,7,9,9,9,8,8]
Uit: [1,1,**1**,1,1,3,4,7,7,8,7,9,9,9,8,8]

Figuur 4: Afwijkende selectie tussen 2 voorgaande en 2 opvolgende hemisferen wordt beschouwd als ruis. De conditie 2 wordt in dit voorbeeld gecorrigeerd naar conditie 1. Let op: de 8 wordt hier niet gecorrigeerd naar een 7, omdat deze niet aan beide zijden door twee achtereenvolgende condities 7 wordt omsloten

3.4 Vliegbaanverlenging

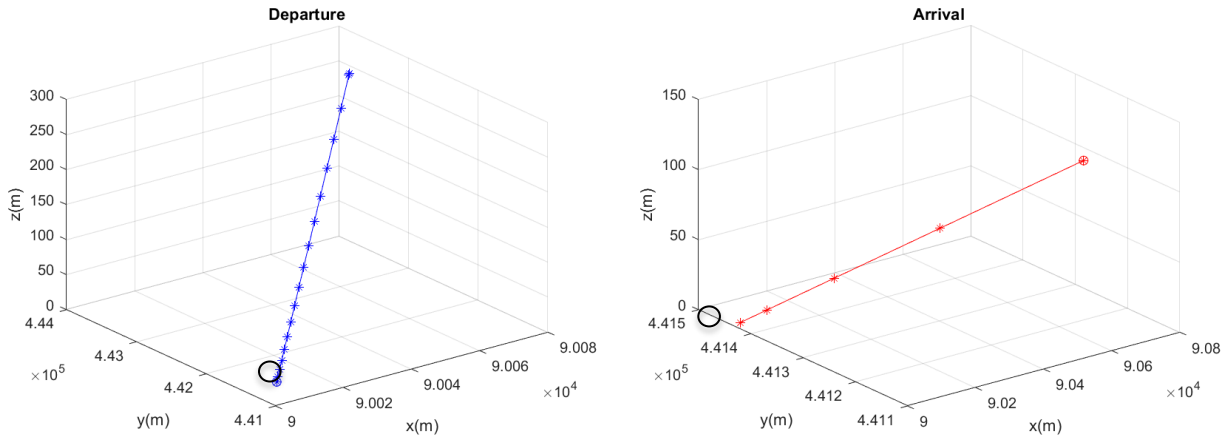
3.4.1 Toepassing

Bij radargegevens, ontbreekt vaak het begin en einde van de vliegbaan nabij de luchthaven. Door de lage vlieghoogte is de helikopter niet altijd zichtbaar voor de radarinstallatie. Voor geluidberekeningen is het van belang om de vliegbaan te verlengen tot en met de landingslocatie dan wel vanaf de vertreklocatie. Onder welke aannames de vliegbaan moet worden verlengd, kan verschillen per luchthaven. Op het moment dat al het helikopterverkeer gebruik maakt van één specifieke helikopterlandingsplaats, is de locatie waar het vluchtpad naartoe verlengd moet worden eenduidig. Als er echter meerdere landingsplaatsen zijn of als sommige helikopters ook gebruik maken van start- en landingsbanen, dan is dit niet evident. De keuze voor de locatie(s) waar de verlenging naar wordt uitgevoerd dient te worden afgestemd met het bevoegd gezag. De methode om vervolgens de verlenging uit te voeren is in dit voorschrift vastgelegd.

3.4.2 Methode

Verlenging vindt plaats vanaf de eerst bekende positie (vertrekkende vlucht) of de laatst bekende positie (aankomende vlucht) naar de afgestemde start- of landingslocatie. Op deze start- of landingslocatie wordt een hoogte van 10 voet en snelheid van 15 knopen aangenomen.

Voor de verlenging wordt een lineair verband aangenomen, zowel voor het verloop van de snelheid, als het verloop van de hoogte. De vliegbaan wordt gereconstrueerd door een rechte lijn tussen het eerste/laatste punt van de radargegevens en het start- of landingspunt. In Figuur 5 zijn twee voorbeelden opgenomen.

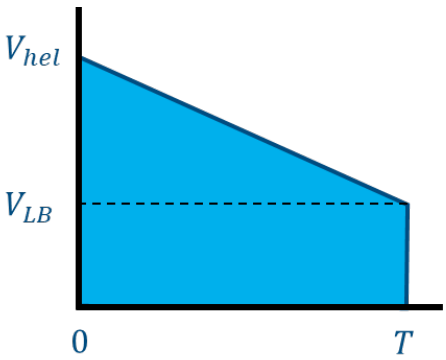


Figuur 5: Voorbeeld van het verloop in hoogte van een verlengingssegment, links voor vertrek, rechts voor een aankomst. De sterren geven steeds het tijdsinterval aan, waaraan te zien is dat de snelheid toeneemt bij vertrek en afneemt bij aankomst, naarmate de helikopter dichterbij de start- of landingslocatie (zwarte cirkel) is

Voor de verlengde vluchtpaden dienen voor elke positie de benodigde invoergegevens te worden bepaald (t, x, y, z, i, Θ). Uit Figuur 6 kan worden afgeleid dat de totale tijd, T, die het kost om het segment te vliegen is gegeven door:

$$T = \frac{ds_T}{V_{gem,T}}, \qquad V_{gem,T} = \frac{V_{LB} + V_{hel}}{2} \qquad 21$$

ds_T Afgelegde weg van het totale verlenging
$V_{gem,T}$ Gemiddelde snelheid van het totale verlenging
V_{LB} (Taxi) snelheid op de landingslocatie (15 knopen)
V_{hel} Laatste / eerste bekende helikoptersnelheid voor landing / start, respectievelijk.



Figuur 6: Voorbeeld van de lineaire snelheidsafname van de laatst bekende vliegsnelheid, V_{hel}, naar de vliegsnelheid op de baan V_{LB} in tijd T, voor een helikopter landing

De verlenging is opgedeeld in segmenten met dezelfde tijdstap als de rest van de vliegbaan met mogelijke uitzondering van het segment dat aansluit op de landingslocatie. Dit is voor de start het allereerste segment en voor de landing het allerlaatste segment. Voor deze segmenten geldt ook dat V lineair is en de toename van de snelheid per tijdstap dus constant is. Hieruit volgt:

$$\frac{dv}{dV_T} = \frac{dt}{T} \qquad 22$$

dV_T verandering in snelheid voor de totale verlenging
dt Tijdstap tussen helikopterposities
dv verandering in snelheid tussen posities

Vergelijkingen 21 en 22 combineren leidt tot een waarde voor de verandering in snelheid:

$$dv = (V_{LB} - V_{hel})\frac{dt}{T} \qquad 23$$

De verandering in afgelegde weg van segment i, ds_i, is gegeven door de gemiddelde snelheid van dat segment, $V_{gem,i}$ maal de toename in tijd:

$$ds_i = V_{gem,i} \cdot dt \qquad 24$$

De relatieve verandering in x, is gelijk aan de relatieve verandering in y en z, i.e.

$$\frac{dx_i}{dx_T} = \frac{dy_i}{dy_T} = \frac{dz_i}{dz_T} \qquad 25$$

Waar dx_T, dy_T, dz_T de totale veranderingen zijn in x, y en z en (dx_i, dy_i, dz_i) de veranderingen in x, y en z per segment. dy_i en dz_i kunnen dan herschreven worden als functie van dx_i,dx_T en dy_T of dz_T respectievelijk:

$$dy_i = dx_i \cdot \left(\frac{dy_T}{dx_T}\right), \qquad dz_i = dx_i \cdot \left(\frac{dz_T}{dx_T}\right) \qquad 26$$

De verandering in afgelegde weg per segment is gedefinieerd als:

$$ds_i^2 = dx_i^2 + dy_i^2 + dz_i^2 \qquad 27$$

Combineren en herschrijven van vergelijkingen 26 en 27 leidt tot:

$$dx_i^2 = \sqrt{\left(\frac{ds_i^2}{1 + \left(\frac{dy_T}{dx_T}\right)^2 + \left(\frac{dz_T}{dx_T}\right)^2}\right)} \qquad 28$$

Vervolgens kan dx_i ingevuld worden in vergelijking 27 en zijn x, y en z nu berekend worden voor elk segment.
Via vergelijkingen 18 en 17 kunnen nu ook de baanhoek en de koersrichting bepaald worden. De baanhoek kan dan weer samen met de vliegsnelheid volgens de methode van paragraaf 3.3 gebruikt worden om op elke positie de juiste hemisfeer te kiezen.

4 Substitutie

4.1 Algemeen

In Europa vliegen ongeveer 350 verschillende helikoptertypes rond. Gezien de benodigde inspanning en bijbehorende kosten is het niet realistisch om voor alle helikopter types in Europa een database met hemisferen op te stellen. Daarom wordt binnen NORAH substitutie toegepast. Bij de substitutiemethode word een groep van verschillende helikopters met vergelijkbare karakteristieken ondergebracht in één helikopterklasse, waarvan vergelijkbare geluidemissiekarakteristieken verwacht kunnen worden. De indelingsmethode wordt beschreven in dit hoofdstuk. Voor de Nederlandse situatie zijn echter veel van de gebruikte helikoptertypen al eerder ingedeeld. Het resultaat van deze indeling is opgenomen in paragraaf 4.2. Alleen voor types die niet in de bestaande indelingslijsten zijn opgenomen, dient de indelingsmethode uit paragraaf 4.3 geraadpleegd te worden.

Om binnen een klasse toch onderscheid te kunnen maken tussen de geluidniveaus van de verschillende helikoptertypes wordt op de berekende geluidniveaus van het referentietype van de klasse nog een substitutiecorrectie ΔL_{EPNL} toegepast. Deze correctie wordt bepaald op basis van de verschillen in certificatieniveaus van de referentiehelikopter binnen de klasse en het helikoptertype dat in die klasse ingedeeld is. De afleiding en toepassing van deze correctie wordt in Hoofdstuk 6 beschreven.

4.2 Indelingslijsten

Om te bepalen in welke klasse een helikopter ingedeeld moet worden, wordt binnen de indelingsmethode gekeken naar de eigenschappen van de helikopter. Veel helikoptertypes zijn door de ontwikkelaars van NORAH ingedeeld op basis van een uitgebreide lijst met eigenschappen. De lijst met beschikbare helikopter klassen en bijbehorende helikopter types, zoals voorgeschreven in NORAH1 is gegeven in Tabel 1.

Tabel 1: Lijst van beschikbare helikopter klassen binnen NORAH1 en de bijbehorende helikopter types. De helikopters tussen haken zijn gespiegelde configuraties

Helikopter klasse	Type aanduiding	Bijbehorende helicopter types
AS350 Ecureuil	AS50	AS50, ALO2, ALO3, LAMA, PSW4
Bell 206 JetRanger	B06	B06, B06T, B47T, H12T, R66
Bell 412	B412	B412, B430, S76, LYNX
EC120 Colibri	EC20	EC20, EC30, GAZL
EC135	EC35	EC35, EC145T2
Robinson 22	R22	R22, CH7, V500, SH4, [A600], [BABY], [DRAG], [EXEC], [SCOR] en een aantal zelfbouw helikopters: EliSport CH-77, Ranabot, Cicaré CH-7T Spirit Tandem, BHR Mustang F260N, BHR Mustang F290, Hungarocopter HC-01, Italian Rotors T22, BHR Fandango F360, [LCA Helicopter LH212]
Robinson 44	R44	R44, B47G, B47J, ELTO, UH12
Schweizer 300	H269	H269, BRB2, EN28, [ZA6]

Sommige helikopters hebben type indicatoren die tussen haken staan, zoals de [A600] in de 'Robinson 22 klasse', om aan te duiden dat de hoofd/staart rotor configuratie gespiegeld is ten opzichte van de klasse referentie. In deze gevallen moet de azimut hoek gespiegeld worden, i.e. $\varphi = -\varphi$ in vergelijking 1. De optie om te spiegelen zit echter nog niet in NORAH1 ingebouwd. Bij het gebruik van de NORAH1 software dienen de gebruikte hemisferen voor het desbetreffende type gespiegeld te worden.

Op basis van eerdere berekeningen die zijn uitgevoerd voor Nederlandse luchthavens zijn in aanvulling op Tabel 1 nog diverse andere helikoptertypen ingedeeld op basis van certificatieniveaus en/of maximaal startgewicht. Dit betreft met name zwaardere helikoptertypen. Het resultaat van deze in deling is opgenomen in Tabel 2.

Tabel 2: Aanvullende lijst helicopter types met bijbehorende klasse voor NORAH1[3]

Helikopter klasse	Type aanduiding	Bijbehorende helicopter types
AS350 Ecureuil	AS50	
Bell 206 JetRanger	B06	EN48
Bell 412	B412	A139, AH64, AS3B, AS32, AS55, AS65, EC125, EC155, EH10, H47, NH90, S61, S330
EC120 Colibri	EC20	
EC135	EC35	A109
Robinson 22	R22	
Robinson 44	R44	
Schweizer 300	H269	G2CA

Op het moment dat types gemodelleerd dienen te worden die niet in Tabel 1 of Tabel 2 zijn opgenomen, dient gebruik te worden gemaakt van de indelingsmethode, zoals beschreven in paragraaf 4.3.

[3] Op het moment dat gebruik zou worden gemaakt van de uitgebreidere database die is voorzien voor NORAH2, moet deze tabel worden herzien.

4.3 Indelingsmethode

De indelingsmethode beschouwt eerst de geluidscertificatieniveaus van de in te delen helikopter. De methode voor het bepalen van deze niveaus staat beschreven in paragraaf 6.1.1. Daarnaast zijn de certificatiegegevens van het voor de klasse representatieve type van belang. Deze worden afgeleid uit de *Rotorcraft noise database* (EASA Certification Noise Levels [12]). Het representatieve type en de bijbehorende nadere typeaanduiding van de beschikbare klassen is weergegeven in Tabel 3.

Tabel 3: Lijst van representatieve types

Helikopter klasse	Representatief type	Nadere typeaanduiding (met motortypeaanduiding)
AS350 Ecureuil	AS50	AS 350 B3
Bell 206 JetRanger	R66	R66
Bell 412	B412	412 (PT6T-3B)
EC120 Colibri	EC20	EC 120 B
EC135	EC35	EC135 P2
Robinson 22	R22	R22 Beta
Robinson 44	R44	R44 II
Schweizer 300	H269	269C-1

Bij het vaststellen van de geluidcertificatieniveaus worden bij voorkeur certificatiegegevens op basis van ICAO Annex 16 Hoofdstuk 8 toegepast, waarbij onderscheid wordt gemaakt naar niveaus bij de start en de nadering. Indien dit niet mogelijk is, wordt gebruik gemaakt van de gegevens op basis van ICAO Annex 16 Hoofdstuk 11, waar dit onderscheid niet gemaakt wordt.

Op het moment dat voor de nadere typeaanduiding zoals weergegeven in Tabel 3 meerdere certificatieniveaus zijn opgenomen in de database, wordt voor de niveaus van het representatieve type uitgegaan van het laagst opgenomen niveau.

De indeling wordt vervolgens als volgt uitgevoerd:

1. Kies het representatieve type waarvan de verschillen in certificatieniveaus met het in te delen type zo klein mogelijk zijn, met als randvoorwaarde dat geen van de niveaus van het in te delen type hoger mag zijn dan die van het geselecteerde representatieve type. Ga bij het bepalen van het verschil uit van het cumulatieve absolute verschil (start+ nadering) op basis van Hoofdstuk 8 certificatiegegevens.
2. Indien van de in te delen helikopter geen certificatieniveaus op basis van Hoofdstuk 8 bekend zijn, wordt ingedeeld op basis van een zo klein mogelijk verschil in certificatieniveaus op basis van Hoofdstuk 11.
   Ook hier geldt als randvoorwaarde dat het certificatieniveau van het in te delen type niet hoger mag zijn dan het niveau van het geselecteerde representatieve type.
3. Indien voorgaande stappen geen uniek resultaat hebben opgeleverd, wordt het startgewicht gebruikt als doorslaggevende factor. Hierbij wordt gestreefd naar een zo klein mogelijk verschil in maximaal startgewicht tussen het representatieve type en het in te delen type, met als randvoorwaarde dat het maximale startgewicht van het in te delen type niet hoger mag zijn dan het maximale startgewicht van het gekozen representatieve type.

4. Indien voorgaande stappen geen of geen uniek resultaat hebben opgeleverd, wordt ingedeeld op basis van uitsluitend het startgewicht. Hierbij wordt gestreefd naar een zo klein mogelijk verschil in maximaal startgewicht tussen het representatieve type en het in te delen type, met als randvoorwaarde dat het maximale startgewicht van het in te delen type niet hoger mag zijn dan het maximale startgewicht van het gekozen representatieve type.
5. Indien voorgaande stappen geen resultaat hebben opgeleverd, wordt gekozen voor het representatieve type met het hoogste maximale startgewicht.

Een indeling anders dan die opgenomen in Tabel 1 of Tabel 2 dient altijd met het bevoegd gezag te worden afgestemd. Daarnaast dienen aanpassingen en keuzes voor helikopterklasse indeling opgenomen te worden in de rapportage behorend bij een geluidbelastingsberekening.

5 Rekenraster en nabewerkingen

5.1 Rekenraster

De geluidbelasting wordt berekend in rekenpunten. Voor specifieke gevallen kan het nodig zijn om de berekening uit te voeren voor één of enkele losse rekenpunten, maar meestal wordt een berekening uitgevoerd voor een raster (of netwerk) met gelijkmatig verdeelde berekeningspunten. De te kiezen rekenpunten binnen het raster zijn hierbij afhankelijk van de situatie. Voor luchthavens waarbij ook sprake is van vastvleugelig vliegverkeer gelden andere uitgangspunten dan voor helihavens.

5.1.1 Luchthavens met vastvleugelig verkeer

Voor luchthavens waarbij ook sprake is van vastvleugelig vliegverkeer wordt voor de berekening van de geluidbelasting van het helikopterverkeer aangesloten bij de rekenpunten die worden gehanteerd voor de berekeningsmethode van de geluidbelasting voor het vastvleugelig verkeer van de betreffende luchthaven. Door hetzelfde rekenraster en/of losse rekenpunten te hanteren voor beide verkeerssoorten kunnen de twee resultaten op eenduidige wijze worden opgeteld tot de totale geluidbelasting als gevolg van het vliegverkeer.

Hierbij wordt opgemerkt dat voor de interim methode voor het helikopterverkeer altijd wordt verondersteld dat de rekenpunten zich in het in het horizontale platte vlak op 1,2 m boven het lokale luchthavenniveau bevinden. Dit geldt ook als voor de berekeningsmethode voor het vastvleugelig verkeer andere uitgangspunten gelden.

Daarnaast geldt dat de afmetingen van het rekenraster zo moeten worden gekozen, dat ook na optelling van de geluidbelasting van beide verkeerssoorten de contour van de laagst te presenteren contourwaarde de randen van het rekenraster niet mag kruisen.

5.1.2 Helihavens

Voor helihavens, waarbij de geluidbelasting als gevolg van vliegverkeer uitsluitend met het NORAH model wordt bepaald dient gebruik gemaakt te worden van een raster met gelijkmatig verdeelde berekeningspunten. D onderlinge afstand van de rekenpunten bedraagt 20 m, zowel in Noord-Zuid richting, als in Oost-West richting. De rekenpunten worden uitgelijnd op het Rijksdriehoekstelsel, dusdanig dat alle gebruikte coördinaten veelvouden van 20 zijn. Alle rekenpunten bevinden zich in het horizontale platte vlak op 1,2 m hoogte boven het lokale niveau van de helihaven.

5.2 Visualisatie met behulp van contouren

Nadat de geluidbelasting is bepaald kan het noodzakelijk zijn om de geluidbelastingscontouren (lijnen die punten met een gelijke geluidbelasting verbinden) te bepalen. Voor luchthavens waarbij ook sprake is van vastvleugelig vliegverkeer wordt de bijdrage van het helikopterverkeer aan de geluidbelasting opgeteld bij de geluidbelasting als gevolg van het vastvleugelig verkeer. Voor het bepalen van de contouren van de totale geluidbelasting wordt verwezen naar het rekenvoorschrift en/of afspraken die gelden voor het vastvleugelig verkeer.

Voor situaties waarbij geen sprake is van vastvleugelig verkeer dient de methode voor het genereren van de contouren te worden afgestemd met het bevoegd gezag.

6 Bepaling geluidbelastingsniveau

De geluidbelasting wordt bepaald door eerst de geluidblootstellingsniveaus per vlucht (zie hoofdstuk 2) te corrigeren voor de substitutiecorrectie en de grondplaatcorrectie. Deze stappen staan beschreven in paragraaf 6.1. Vervolgens worden de geluidbelastingsniveaus bepaald door de geluidblootstellingsniveaus te sommeren en te corrigeren voor verkeer dat als gevolg van ontbrekende of onjuiste gegevens niet doorgerekend kan worden (niet-verwerkt verkeer). Dit staat beschreven in paragraaf 6.2.

6.1 Geluidblootstellingsniveaus

Het geluidblootstellingsniveau per vlucht ($L_{AE,i}$) zoals bepaald door NORAH met de methode zoals beschreven in hoofdstuk 2 wordt gecorrigeerd met een substitutiecorrectie per vlucht ($\Delta L_{EPNL,i}$) en een constante grondplaatcorrectie (ΔL_{IGPM}):

$$L_{AE,i,c} = L_{AE,i} + \Delta L_{EPNL,i} + \Delta L_{IGPM} \qquad 29$$

Dit resulteert in het gecorrigeerde geluidblootstellingsniveau per vlucht ($L_{AE,i,c}$) welke wordt gebruikt voor de bepaling van de geluidbelasting.

6.1.1 Substitutiecorrectie

Zoals beschreven in paragraaf 4.3 worden voor alle in te delen helikopters de geluidcertificatieniveaus bepaald. Hiervoor zijn verschillende bronnen beschikbaar:

1. De in de luchthavenadministratie geregistreerde geluidcertificatieniveau(s) voor de desbetreffende vlucht of van de gebruikte helikopter op basis van het vliegtuigregistratienummer.
2. De in een luchtvaarttuigregister opgenomen geluidcertificatieniveau(s) van de gebruikte helikopter op basis van het vliegtuigregistratienummer. Dit kan het Nederlandse register zijn voor in Nederland geregistreerde helikopters, maar ook een buitenlands of internationaal register.
3. De geluidcertificatieniveaus die zijn opgenomen in de *Rotorcraft noise database* (EASA Certification Noise Levels [14]), waarbij het hoogst opgenomen niveau[4] van het desbetreffende helikoptertype wordt toegepast.

Bij voorkeur wordt de eerste methode toegepast om de geluidcertificatieniveau(s) te bepalen. Op het moment dat deze gegevens niet beschikbaar zijn, wordt de eerstvolgende methode toegepast.

Bij methode 3 wordt opgemerkt dat op het moment dat van een bepaalde vlucht alleen het ICAO vliegtuigtype bekend is, er vaak meerdere certificaten in de database van toepassing kunnen zijn. In dat geval wordt een conservatieve aanname gedaan, waarbij het hoogst mogelijke niveau wordt toegepast. Dit hoogste niveau wordt hierbij, indien van toepassing, apart voor starts en landingen bepaald.

[4] Voor specifieke gevallen kan een dergelijke conservatieve aanpak onbedoelde bijeffecten hebben. In deze situaties kan het nodig zijn om in overleg met het bevoegd gezag een meer realistische aanname te doen, bijvoorbeeld op basis van gemiddelde waarden uit historische gegevens.

Indien de gebruikte helikopter wel is opgenomen in een (publiek toegankelijk en digitaal benaderbaar) luchtvaarttuigregister, maar er geen geluidcertificatieniveaus(s) zijn geregistreerd, is het toegestaan om aanvullende gegevens uit het register toe te passen om vervolgens met behulp van methode 3 een betere inschatting van geluidcertificatieniveaus(s) te verkrijgen. Zo kunnen bijvoorbeeld met een nadere typeaanduiding of een geluidcertificaatnummer de exacte geluidcertificatieniveaus worden achterhaald, of kan er in elk geval een betere inschatting worden verkregen.

De substitutiecorrectie $\Delta L_{EPNL,i}$ wordt vervolgens voor elke vliegbeweging vastgesteld op basis van het verschil in certificatieniveau tussen het representatieve type en het ingedeelde type van de desbetreffende vliegbeweging. Bij voorkeur worden hierbij certificatiegegevens op basis van ICAO Annex 16 Hoofdstuk 8 toegepast, waarbij onderscheid wordt gemaakt naar niveaus bij de start en de nadering. De substitutiecorrectie wordt daarmee:

$$\begin{aligned} \Delta L_{EPNL,i} &= L_{takeoff,i} - L_{takeoff,klasse} \text{ voor vertrekkende vluchten} \\ \Delta_{LEPNL,i} &= L_{approach,i} - L_{approach,klasse} \text{ voor aankomende vluchten} \end{aligned} \qquad 30$$

Op het moment dat certificatieniveaus op basis van Hoofdstuk 8 niet beschikbaar zijn voor het representatieve type of het ingedeelde type, wordt de substitutiecorrectie vastgesteld op basis van de certificatie gegevens van op basis van ICAO Annex 16 Hoofdstuk 11. Hierbij wordt geen onderscheid gemaakt tussen vertrekkende en aankomende vluchten:

$$\Delta L_{EPNL,i} = L_{overflight,i} - L_{overflight,klasse} \qquad 31$$

Op het moment dat ook de certificatieniveaus op basis van Hoofdstuk 11 niet beschikbaar zijn voor het representatieve type of het ingedeelde type, wordt één-op-één substitutie wordt toegepast. $\Delta L_{EPNL,i}$ wordt dan voor de desbetreffende vliegbeweging op nul gesteld.

Voor helikoptertypes die niet zijn ingedeeld op basis van Tabel 1 uit paragraaf 4.2 geldt ten slotte nog de voorwaarde dat de substitutiecorrectie $\Delta L_{EPNL,i}$ niet kleiner dan nul mag zijn.

6.1.2 Algemene grondplaat correctie

Voor de geluidmetingen die ten grondslag liggen aan de gegevens in de NORAH database wordt gebruik gemaakt van microfoons die geïnverteerd op een grondplaat worden geplaatst. Bij het verwerken van de meetgegevens wordt vervolgens aangenomen dat er bij de microfoon een volledige reflectie plaatsvind met bijbehorende drukverdubbeling. Hiervoor worden de gemeten niveaus vervolgens gecorrigeerd, door ze 6 dB te verlagen.

In praktijk, gezien de eindige afmetingen van de grondplaat, zal deze theoretische drukverdubbeling niet volledig optreden. Vooruitlopend op een definitieve uitspraak van de ontwikkelaars, wordt voorlopig een algemene correctie toegepast van +1.3 dB op de berekende geluidblootstellingsniveaus.

$$\Delta L_{IGPM} = 1.3 \qquad 32$$

Voor een uitgebreidere toelichting en onderbouwing van de correctiewaarde, zie referentie [13].

6.2 Geluidbelastingsniveau

Het geluidbelastingsniveau als gevolg van helikopterverkeer wordt verkregen door de geluidblootstellingsniveaus per vlucht te sommeren, waarbij afhankelijk van het tijdstip van de operatie, weegfactoren worden toegepast. Dit wordt gespecificeerd in paragraaf 6.2.1. Ten slotte wordt in paragraaf 6.2.2 het verkregen geluidbelastingsniveau nog gecorrigeerd voor niet-verwerkt verkeer.

6.2.1 Sommatie van geluidblootstellingsniveaus

De hindersommen H_{den} en H_{night} van het helikopterverkeer worden bepaald door het sommeren van de gecorrigeerde geluidblootstellingsniveaus per vlucht:

$$H_{den} = \sum_i w_{den,i} \cdot 10^{\frac{L_{AE,i,c}}{10}}$$
$$H_{night} = \sum_i w_{night,i} \cdot 10^{\frac{L_{AE,i,c}}{10}} \qquad 33$$

Hierbij worden, afhankelijk van het tijdstip van de vlucht, de weegfactoren gebruikt zoals weergegeven in Tabel 4.

Tabel 4: Weegfactoren voor de bepaling van de hindersommen

Periode	Tijdstip operatie	Weegfactor $w_{den,i}$	Weegfactor $w_{night,i}$
Dag	07:00:00 ≤ t < 19:00:00	1	0
Avond	19:00:00 ≤ t < 23:00:00	$\sqrt{10}$	0
Nacht	23:00:00 ≤ t < 07:00:00	10	1

6.2.2 Correctiefactor voor ontbrekend verkeer

De hindersommen zoals bepaald in paragraaf 6.2.1 worden gecorrigeerd voor vluchten die in de berekening ontbreken, als gevolg van incomplete en/of onjuiste gegevens. De correctiefactor f_{corr} wordt hierbij als volgt bepaald:

$$f_{corr} = 1 + \frac{N_{nv}}{N_v} \qquad 34$$

Hierbij is N_v het aantal verwerkte vluchten en N_{nv} het aantal niet verwerkte vluchten. De correctiefactor f_{corr} wordt zowel voor de L_{den} berekening als voor de L_{night} berekening apart bepaald.

De gecorrigeerde hindersommen $H_{den,c}$ en $H_{night,c}$ worden als volgt bepaald:

$$H_{den,c} = H_{den} \cdot f_{corr,den}$$
$$H_{night,c} = H_{night} \cdot f_{corr,night} \qquad 35$$

Op basis hiervan wordt ten slotte de geluidbelasting (per rekenpunt) bepaald met:

$$L_{den} = 10 \ \ log_{10}(H_{den,c}) - 10 \cdot {}^{10}log(T_{den})$$
$$L_{night} = 10 \ \ log_{10}(H_{night,c}) - 10 \cdot {}^{10}log(T_{night}) \qquad 36$$

Hierbij is T_{den} de totale duur van de periode waarover de L_{den}-waarde wordt bepaald, uitgedrukt in seconden. Dit is typisch een geheel jaar, bestaande uit 31 536 000 s in niet-schrikkeljaren. T_{night} is de totale duur van de periode waarover de L_{night}-waarde wordt bepaald, uitgedrukt in seconden. Hierbij worden per etmaal alleen de 8 uren van de nachtperiode meegerekend. Bij een geheel niet-schrikkeljaar bedraagt de T_{night} 10 512 000 s.

Daar waar ook sprake is van vastvleugelig verkeer en de totale geluidbelasting als gevolg van het vliegverkeer bepaald moet worden, is het praktischer om de gecorrigeerde hindersommen van het helikopterverkeer ($H_{den,c}$ en $H_{night,c}$) eerst op te tellen bij de (gecorrigeerde) hindersommen als gevolg van het vastvleugelig verkeer, voordat de L_{den} en L_{night} waarden worden bepaald.

Referenties

[1] H.M.M. van der Wal, P. Vogel en F.J.M. Wubben, Voorschrift voor de berekening van de L_{den} en L_{night} geluidbelasting in dB(A) ten gevolge van vliegverkeer van en naar de luchthaven Schiphol, Part 1: Berekeningsvoorschrift, NLR-CR-2001-372-PT-1, 2001.

[2] Voorschrift voor de berekening van de L_{den}-geluidbelasting in dB(A) voor overige burgerluchthavens, onderdeel van Regeling burgerluchthavens, geraadpleegd via www.wetten.nl, versie geldend vanaf 07-11-2019.

[3] ECAC, 'Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports', ECAC Doc29, Volume 1, 4th Ed., 2016.

[4] ECAC, 'Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports', ECAC Doc29, Volume 2, 4th Ed., 2016.

[5] Kamerbrief over rekenmethode Doc29 voor regionale luchthavens, kamerstuk 31936-870, 11 augustus 2021.

[6] ISO1996-1:2003(Eng) "Acoustics — Description, measurement and assessment of environmental noise — Part 1: Basic quantities and assessment Procedures"].

[7] IEC 61627-1: 2003 "Electroacoustics – Sound level meters – Part 1: Specifications".

[8] Society of Automotive Engineers: "Aerospace Recommended Practice, Application of pure-tone atmospheric absorption losses to one-third octaveband level". SAE-ARP-5534, 2013.

[9] M. Tuinstra, J. Stevens, N. van Oosten and H. Olsen, 'Towards a European helicopter noise calculation method', 44th European Rotorcraft forum, ERF-2018-46, 2018.

[10] M. Tuinstra, N. van Oosten and H. Olsen, 'The development of a European helicopter noise model', 44th European Rotorcraft forum, ERF-2018-50, 2018.

[11] Netherlands Aerospace Centre (NLR), Rotorcraft noise modelling method, EASA Research project report, D1.5 of Special Contract O1 Noise, 2021.

[12] M.Gervais, V. Gareton, A. Dummel and R. Heger, Validation of EC130 and EC135 environmental impact assessment using HELENA, American helicopter soc., 66th annual forum, Phoenix, 2010.

[13] K.M. Knepper, S.J. Heblij, Adviesrapport: het gebruik van het NORAH model voor het bepalen van de geluidbelasting van helikopters, NLR-CR-2022-033, 2022.

[14] EASA Certification Noise Levels, geraadpleegd via www.easa.europa.eu/domains/environment/easa-certification-noise-levels

[15] S.J. Heblij, J. Derei, Methodenrapport Doc29, NLR-CR-2019-076, 2019.

Dedicated to innovation in aerospace

Koninklijke NLR - Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum

Het onderzoekscentrum Koninklijke NLR werkt op objectieve en onafhankelijke wijze met zijn partners aan een betere wereld van morgen. NLR biedt daarbij innovatieve oplossingen en technische expertise en zorgt voor een sterke concurrentiepositie van het bedrijfsleven.

NLR is ruim 100 jaar een kennisorganisatie met de diepgewortelde wil om te blijven vernieuwen en zet zich in voor een duurzame, veilige, efficiënte en effectieve lucht- en ruimtevaart.
De combinatie van diepgaand inzicht in de klantbehoefte, multidisciplinaire expertise en toonaangevende onderzoeksfaciliteiten, maakt snel innoveren mogelijk. NLR vormt in binnen- en buitenland de spilfunctie tussen wetenschap, bedrijfsleven en overheid, en overbrugt de kloof tussen fundamenteel onderzoek en toepassingen in de praktijk. Daarnaast werkt NLR als Groot Technologisch Instituut ruim tien jaar in de TO2-federatie samen aan toegepast onderzoek in Nederland.

Vanuit de hoofdvestigingen in Amsterdam en Marknesse en twee satellietvestigingen, draagt NLR bij aan een veilige en duurzame maatschappij en werkt met partners in vele (defensie)programma's, onder andere aan complexe composieten constructies voor verkeersvliegtuigen en aan doelgericht gebruik van het F-35-jachtvliegtuig. Daarnaast geeft NLR invulling aan Nederlandse en Europese (klimaat)doelstellingen conform de Luchtvaartnota, de European Green Deal, Flightpath 2050, en door deelname aan programma's zoals Clean Sky en SESAR.

Voor meer informatie bezoek: **www.nlr.nl**

Postal address
PO Box 90502
1006 BM Amsterdam, The Netherlands
e) info@nlr.nl **i)** www.nlr.org

Royal NLR
Anthony Fokkerweg 2
1059 CM Amsterdam, The Netherlands
p) +31 88 511 3113

Voorsterweg 31
8316 PR Marknesse, The Netherlands
p) +31 88 511 4444