



Klimaatbestendig Schiphol

Syntheserapport HSMS02



Copyright © 2013

Nationaal Onderzoekprogramma Kennis voor Klimaat (KvK). Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd, in geautomatiseerde bestanden opgeslagen en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm, geluidsband of op welke andere wijze ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van het Nationaal Onderzoekprogramma Kennis voor Klimaat. In overeenstemming met artikel 15a van het Nederlandse auteursrecht is het toegestaan delen van deze publicatie te citeren, daarbij gebruik makend van een duidelijke referentie naar deze publicatie.

Aansprakelijkheid

Hoewel uiterste zorg is besteed aan de inhoud van deze publicatie aanvaarden de Stichting Kennis voor Klimaat, de leden van deze organisatie, de auteurs van deze publicatie en hun organisaties, noch de samenstellers enige aansprakelijkheid voor onvolledigheid, onjuistheid of de gevolgen daarvan. Gebruik van de inhoud van deze publicatie is voor de verantwoordelijkheid van de gebruiker.



Klimaatbestendig Schiphol

Syntheserapport HSMS02

Dr. A. Kattenberg¹⁾
Dr. G. Verver¹⁾
Dr. ir. C..D. Homan¹⁾
Ing. R. Jilderda¹⁾
Dr. ir. R. Leander¹⁾
Ir. I.L. Wijnant¹⁾
A. Stepek M.Sc, B.Sc.¹⁾



⁽¹⁾ KNMI

KvK nr. KvK99/2013
ISBN 978-94-90070-69-4

Met dank aan AAS, LVNL, KNMI

Dit onderzoeksproject (projectnummer HSMS02; projecttitel 'Klimaatbestendig Schiphol') werd uitgevoerd in het kader van het Nationaal Onderzoekprogramma Kennis voor Klimaat (www.kennisvoorklimaat.nl). Dit onderzoeksprogramma wordt medegefinancierd door het Ministerie van Infrastructuur en Milieu.



Inhoudsopgave

Syntheserapport HSMS02	9
Samenvatting	11
Summary	13
1 Inleiding	16
1.1 Het project Klimaatbestendig Schiphol	16
1.2 Invloed van weer en klimaat op Schiphol	17
1.3 Projectformulering en project monitoring i.s.m. de stakeholder	19
1.4 Algemene vraagstelling	21
1.5 Specifieke vragen	22
1.6 Deelprojecten, aanvullend onderzoek en achtergrondonderzoek	24
1.6.1 De deelprojecten	24
1.6.2 Relevant KNMI onderzoek	25
2 Methoden	28
2.1 Huidig klimaat	28
2.1.1 Gebruikte gegevensset	28
2.1.2 Inhomogeniteiten	28
2.2 Klimaatverandering	29
2.2.1 Klimaatscenario's	29
2.2.2 Hoe is informatie over klimaatverandering meegenomen in dit project?	31
2.3 Simulaties van baangebruik met het programma DAISY	31
3 Wind	38
3.1 Inleiding en verantwoording van de onderzoeksvraag	38
3.2 Methode en resultaten	46
3.2.1 de eerste onderzoeksvraag	46

3.2.2	de tweede onderzoeksvraag.....	52
3.3	Conclusies	60
3.4	Aanbevelingen	61
3.5	Literatuur	65
4	Zicht en bewolking	67
4.1	Introductie	67
4.2	Methode en resultaten.....	70
4.2.1	Waargenomen veranderingen	70
4.2.2	Mist-kansen in het huidige klimaat.....	74
4.2.3	Plaatselijke mistvorming.....	75
4.2.4	Slecht-zicht klimatologie.....	78
4.3	Referenties.....	81
4.4	Verder lezen.....	82
5	Neerslag.....	83
5.1	Introductie.....	83
5.2	Ontstaan van neerslag	85
5.3	Huidig klimaat	87
5.3.1	extreme neerslag.....	88
5.3.2	sneeuw	90
5.3.3	hagel	91
5.3.4	ijsvorming	91
5.4	Toekomstig klimaat.....	92
5.5	Conclusie.....	93
5.6	Verder lezen.....	93
6	Temperatuur	95
6.1	Inleiding en verantwoording van de onderzoeksvraag.....	95
6.2	Minimum en maximum temperatuur.....	98



6.2.2	Extreme minimum en maximum temperaturen	99
6.2.3	Gevoelstemperatuur	99
6.3	Toekomstig klimaat.....	100
6.3.1	Gemiddelde temperatuur	100
6.3.2	Minimum- en maximumtemperatuur	102
6.3.3	Extreme minimum en maximumtemperaturen	103
6.3.4	Gevoelstemperatuur	104
6.4	Conclusies	105
6.5	Verder lezen.....	105
7	Bovenlucht.....	107
7.1	Introductie	107
7.2	Verticale profielen van wind, temperatuur en luchtvochtigheid.....	109
7.3	Ruimtelijke verschillen.....	111
7.4	Afwijkingen van de ICAO standaardatmosfeer	111
7.5	Klimatologie en trends in de tropopauzehoogte en temperatuur	112
7.6	Klimatologie van inversies	113
7.7	Toekomstig klimaat.....	115
7.8	Conclusies	115
7.9	Verder lezen.....	116
8	Conclusies en aanbevelingen	117
8.1	Algemeen	117
8.2	Uit de deelstudies	118
8.2.1	conclusies	118
8.2.2	aanbevelingen	121
8.3	Lessons learned: Kenniscocreatie door onderzoekers en maatschappelijke actoren.....	121
8.3.1	Te leren lessen	127

8.4 Referenties:.....	128
Annex I Leden projectteam en reviewers	131
Bijlage I: Langjarige gemiddelden Schiphol, tijdvak 1981-2010	133
Literatuurverwijzingen	135



Syntheserapport HSMS02

In dit syntheserapport worden opzet, verloop, resultaten en conclusies van het 'Kennis voor Klimaat' project HSMS02 "Klimatologie en klimaatscenario's voor Mainport Schiphol" gepresenteerd en aanbevelingen gedaan voor verder onderzoek. Naar aanleiding van vragen van de stakeholder is onderzoek uitgevoerd waarover gedetailleerd gerapporteerd is in een zestal deelrapporten. In hoofdstuk 1 wordt een overzicht gegeven van de onderzoeksvragen en de deelonderzoeken. In dit Syntheserapport wordt de belangrijkste informatie van het project samen gebracht: de opzet en het verloop van het project, samenwerking met de stakeholder, een overzicht van het onderzoek dat gedaan is in het kader van dit project en een samenvatting van resultaten, conclusies, bevindingen en aanbevelingen .



Samenvatting

Het project “Klimaatbestendig Schiphol” geeft informatie over de klimaatvariabelen die voor de luchthaven Schiphol van belang zijn voor de dagelijkse operatie: wind, zicht, neerslag, temperatuur en de karakteristieken van de bovenlucht. Hierbij wordt zowel het huidige als het toekomstige klimaat besproken. De informatie wordt door Schiphol gebruikt voor de jaarlijkse capaciteitsplanning en meer strategische beslissingen zoals bijvoorbeeld de bepaling waar in de toekomst nieuwe start- en landingsbanen moeten worden aangelegd.

Het windklimaat op Schiphol blijkt vooral gevoelig voor veranderingen in de ruwheid in de omgeving rondom het vliegveld. In dit onderzoek zijn de gevolgen van een toenemende trend in de regionale ruwheid (ruwheid, die samenhangt met grondgebruik en bebouwing, tot enkele kilometers van het vliegveld) op de operatie gekwantificeerd. Toenemende regionale ruwheid zal de windsnelheid op 10 m boven de grond doen afnemen met minder dan 1% per decade. Hierdoor is de nadelige invloed van hoge windsnelheden op de capaciteit van het vliegveld de afgelopen decennia afgenomen. Echter de natuurlijke jaar op jaar variaties van het grootschalige windveld zijn vaak groter dan de invloed van de langzame maar gestage toename van de regionale ruwheid. Het toekomstige windklimaat is onzeker: klimatologische numerieke modellen (die overigens uitgaan van een constante ruwheid) geven hier geen eenduidig antwoord op.

Slecht zicht condities op Schiphol zijn tussen 1955 en 2010 met gemiddeld 2% per jaar in frequentie afgenomen. Vooral in de jaren tachtig is een verbetering waargenomen. Aan de ene kant houdt deze verbetering verband met een afname van de concentratie van hygroscopische aerosolen in de lucht als gevolg van effectieve maatregelen tegen luchtvervuiling. Aan de andere kant zal verstedelijking van de omgeving (invloed van Amsterdam) en een veranderde circulatie een rol spelen. Doordat deze invloeden lastig te kwantificeren zijn, is het niet mogelijk een kwantitatief zichtscenario op te stellen. We nemen niet aan dat in de nabije toekomst slecht-zicht condities weer frequenter zullen voorkomen, maar met schoner wordende lucht als belangrijkste invloed zal de zichtverbetering ook steeds kleiner worden.

Bij neerslag is voor Schiphol vooral het optreden van extreme neerslaghoeveelheden en het optreden van bevroren neerslag (sneeuw, hagel of ijzel) van belang. Extreme regenval bemoeilijkt de vliegbewegingen vooral als overtollig water niet snel kan worden afgevoerd. Bij hogere temperaturen in een veranderend klimaat wordt verwacht dat de extreme neerslagintensiteiten zullen toenemen. De jaar op jaar variatie in het optreden van sneeuw en hagel is zeer groot. Door meer en heftiger convectieve activiteit in een warmer wordende atmosfeer zal hagel in de toekomst waarschijnlijk vaker voorkomen.

De temperatuur is op meerdere manieren van belang voor Schiphol. Bij temperaturen onder het vriespunt is er een hoger risico op gladheid door sneeuw en ijzel en wordt het sneeuw- en ijsvrij maken van vliegtuigen deel van de werkzaamheden. De buitentemperatuur bepaalt ook de noodzaak van het koelen of verwarmen van gebouwen en vliegtuigen en daarmee de energiekosten van de luchthaven. Voor specifieke operaties zijn er grenswaarden van de temperatuur. Zo moet voor het asfalteren van de banen de temperatuur boven tien graden Celsius liggen. Wat betreft de temperatuur is het voor de luchthaven dus van belang hoe vaak bepaalde temperaturen over- of onderschreden worden. Hier is in dit rapport een overzicht van gemaakt. Voor werkomstandigheden buiten is de gevoelstemperatuur van belang. In een veranderend klimaat zal de temperatuur (en ook de gevoelstemperatuur) naar alle waarschijnlijkheid toenemen.

Een goede beschrijving van de klimatologie van de bovenlucht is van belang voor het zo efficiënt mogelijk uitvoeren van vliegbewegingen. Op verzoek van LVNL zijn verschillende verticale profielen van wind, temperatuur en relatieve vochtigheid voor het huidige klimaat uit de "ERA-interim heranalyse" in dit rapport en het deelrapport opgenomen.

In het laatste hoofdstuk, dat de conclusies en aanbevelingen uit het rapport samenvat, wordt ook het verloop van het project en de samenwerking en communicatie tussen opdrachtgever, opdrachtnemer en stakeholder besproken. De bevindingen bevestigen conclusies uit eerdere studies, dat grote kennisproducties een eigen dynamiek kennen, waarbij veel te winnen is met een zorgvuldige selectie en begeleiding van de deelnemers en het proces dat ze doormaken.



Summary

The project “Climate Proof Schiphol” provides information about the climate variables that are relevant for the daily operation at Schiphol airport: wind, visibility, precipitation, temperature and the characteristics of the upper air. Both the current and the future climate are described. The information will be used by Schiphol for the annual capacity planning and more strategic decisions, for example optimal siting of new runways.

The wind climate of Schiphol seems to be most influenced by changes in the roughness of the area surrounding the airport (the roughness is associated with land use and buildings). The consequences of the trend in regional roughness for airport operations have been quantified. The observed increase in regional roughness will decrease the windspeed at 10 m above the ground with less than 1% per decade. This has lessened the negative influence of strong winds on the capacity of the airport in the past decades. However, the natural year-to-year variations in the large scale wind are much larger than the long-term slow increase in regional roughness. The future wind climate is unsure: numerical climate models (that all assume no change in roughness however) give no clear signal.

Low visibility occurrences at the airport decreased between 1955 and 2010 with on average 2% per year. Especially in the mid-eighties a significant improvement was observed. On the one hand this improvement is related to a decrease in the concentration of hygroscopic aerosols in the atmosphere, resulting from effective clean air measures. On the other hand urbanisation in the region (influence of Amsterdam) and a changing circulation can play a role. These influences are difficult to quantify and it is currently not feasible to make a visibility scenario. We do not assume that the frequency of low visibility conditions will increase in the near future, but because cleaner air is the most important driver, future improvements will be small.

When considering precipitation, it is the occurrence of extreme rainfall or of frozen precipitation (snow, hail and black ice) which is especially important for airport operations. Extreme rainfall hinders operations especially if excess water cannot be removed fast enough. With temperatures rising in a future climate, precipitation intensities are expected to increase. Year-to year variation in the occurrence of snow and hail is large. Hail will probably occur more often in the future.

Temperature is important for Schiphol Airport in various ways. With temperatures below freezingpoint, there is a higher risk of slipperiness due to snow or black ice and removing snow and ice from the planes becomes part of the work. The temperature outside also dictates the need for cooling or heating of buildings and planes and therefore the energy costs for the airport. For specific operations there are thresholds of temperature. E.g. to asphalt runways the

temperature has to be above ten degrees Celsius. When considering the effects of temperature it is therefore important to quantify how often certain thresholds are reached. An overview of this is given in the report. With respect to outdoor working conditions, the wind chill equivalent temperature is important. In a changing climate temperatures (and wind chill equivalent temperatures) will most probably rise.

A good description of the upper air climatology is important for optimising flight operations. At the request of LVNL, various vertical profiles of wind, temperature and relative humidity for the current climate, derived from the “ERA-interim reanalyses” are described in this and the background report.

In the last chapter, summarising the conclusions and recommendations from the report, also the development of the project and the cooperation and communication between the commissioner, commissionee and stakeholder are discussed. It is confirmed, what other earlier studies have concluded, that big knowledge co productions have their own dynamics in which careful selection and coaching of participants in the process can be beneficial.



1 Inleiding

1.1 Het project Klimaatbestendig Schiphol

'Klimaatbestendig Schiphol' is één van de drie deelprojecten van het Kennis voor Klimaat project 'Hotspot Mainport Schiphol'¹.

Klimaatbestendig Schiphol is uitgevoerd door het KNMI in opdracht van het Nationaal Onderzoeksprogramma Kennis voor Klimaat. Stakeholders van het project waren Amsterdam Airport Schiphol (AAS) en de Luchtverkeersleiding Nederland (LVNL).

De belangrijkste motivatie van KvK voor het Hotspot programma komt voort uit de wens om het nationaal onderzoek te richten op economisch en maatschappelijk belangrijke zaken.

De belangrijkste motivatie voor de stakeholders van Schiphol zijn het behouden en vergroten van de veiligheid en efficiëntie van de operaties op Schiphol. Het is belangrijk dat de stakeholder m.b.t. deze veiligheid en efficiëntie "iets kan" met de antwoorden van de uitvoerder. De uitvoerder moet er daarentegen voor waken dat de antwoorden wetenschappelijk verantwoord zijn. Dat betekent dat er ook vragen zijn die met de huidige klimatologische kennis niet of alleen met bepaalde aannamen te beantwoorden zijn. Een intensieve interactie tussen uitvoerders en stakeholders is daarom van groot belang. Ondanks regelmatig contact bleek het lastig te zijn om de klimatologische vragen goed boven tafel te krijgen. Wellicht omdat de stakeholder gewend was om weergereleerde vragen te stellen aan de uitvoerder en het in dit geval om klimaatonderzoek ging? Wat klimaatonderzoek betreft kwamen stakeholder en uitvoerder uit verschillende werelden. Op het gebied van weer en kennis over de operatie op Schiphol niet (bij het project waren van de kant van het KNMI ex-luchtvaartmeteorologen betrokken met ruim 20 jaar ervaring met het werk met en voor Schiphol) en mede daarom is het uiteindelijk gelukt om de opera-

-
- ¹ HSMS01: *Wind Visions* over het ontwikkelen van een wind- zicht monitoringssysteem voor kritieke weersomstandigheden in een veranderend klimaat.
 - HSMS02: *Klimaatbestendig Schiphol* over de rol van het huidige en veranderende klimaat op Schiphol.
 - HSMS03: *IMPACT* over de mogelijke impact van klimaatverandering op kritieke weersomstandigheden op Schiphol.



tionele vragen van de stakeholder te prioriteren, de onderliggende klimatologische vragen vast te stellen en te bepalen welk deel van deze vragen met de huidige kennis van de wetenschap beantwoord konden worden. Maar dat heeft in dit project relatief veel tijd en energie gekost. Een goed voorbeeld van het belang van interactie tussen stakeholder en uitvoerder m.b.t. het definiëren van de “juiste” vraag is het inzicht dat voor de operationele planning van Schiphol (1 jaar vooruit) kennis over de natuurlijke variabiliteit (wat is de bandbreedte waar de luchthaven rekening mee moet houden) misschien wel belangrijker is dan kennis over het gemiddelde windklimaat (30 jaar gemiddelde).

Project ‘Klimaatbestendig Schiphol’ is uitgevoerd in de periode van begin 2009 tot medio 2013 en bestond uit een zestal deelprojecten waarover apart gerapporteerd is.

In dit **Syntheserapport** van HSMS02 wordt een overzicht gegeven van het hele project en worden de resultaten, conclusies en aanbevelingen uit de deelonderzoeken samengebracht en in context geplaatst.

1.2 Invloed van weer en klimaat op Schiphol

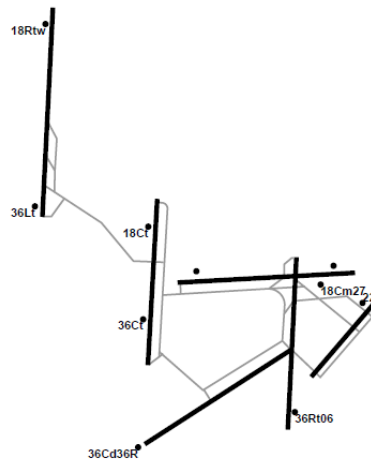
Het weer heeft grote invloed op de dagelijkse operatie van Schiphol. Zo kan dichte mist of harde wind er bijvoorbeeld toe leiden dat er minder vluchten kunnen worden uitgevoerd dan aanvankelijk gepland. Het is daarom voor Schiphol van groot belang om op de hoogte te zijn van de karakteristieken van het huidige klimaat (hoe vaak komen omstandigheden voor die de operatie bemmeren?) en van eventuele veranderingen in de toekomst.

Op de luchthaven wordt gewerkt aan een zo veilig en efficiënt mogelijke operatie. Er is daarom een streven naar optimalisatie van o.a. de volgende activiteiten:

- opstijgen en landen van vliegtuigen
- toewijzen van banen aan vertrekkende en landende vliegtuigen
- verbinden van lokale verkeersstromen met (inter)continentaal vliegverkeer
- reparatiewerkzaamheden en onderhoud aan de banen

Bij het plannen en uitvoeren van deze activiteiten zijn het actuele weer en de weersverwachtingen vaak bepalend.

Figuur 1.1: *Overzicht van de landingsbanen op Schiphol en meetlocaties voor weer/klimaat(rechts). Er zijn 3 noord-zuid gerichte banen (v.l.n.r. Polderbaan, Zwanenburgbaan en Aalsmeerbaan), 2 zuidwest-noordoost gerichte banen (Kaagbaan en de korter Oostbaan) en 1 oost-west gerichte baan (Buitenveldertbaan). 18Cm27 is het hoofdwaarneemstation op de luchthaven. Bron: www.schiphol.nl*



Er zijn op Schiphol zes landings- en startbanen in gebruik: 5 start- en landingsbanen voor handelsverkeer en een kortere baan (Oostbaan) voor General Aviation verkeer (kleinere vliegtuigen). Deze zijn weergegeven in de figuur hierboven. Op piekuren worden twee of drie banen gebruikt om al het vliegverkeer te kunnen afhandelen. De banen die het minste geluidsbelasting geven, hebben de voorkeur, maar welke banen gebruikt kunnen worden is afhankelijk van de weersomstandigheden, en dan vooral van de windrichting en -sterkte.

Langs elke baan worden de meteorologische condities in de gaten gehouden. Zowel aan het einde als aan het begin van iedere baan staat een automatisch weerstation dat wind, zicht en andere weerselementen (bijv. of het regent) registreert. Op het hoofdwaarneemstation (18Cm27, zie de figuur hierboven, rechts²) worden ook andere parameters gemeten zoals temperatuur en luchtdruk.

Naast de dagelijkse operationele werkzaamheden wordt op Schiphol ook een *planning* gemaakt voor de korte en langere termijn. Van groot economisch en strategisch belang is het vaststellen van de dagelijkse en jaarlijkse luchthaven-capaciteit en de (gewenste) capaciteitsgroei op de lange termijn. Een belangrijk stuk gereedschap bij deze planning is het zogenaamde DAISY model. Het uitgangspunt in dit model is de ranglijst van preferente baancombinaties, zo samengesteld dat de capaciteit maximaal is en de geluidsbelasting minimaal. Welke baancombinaties gebruikt kunnen worden, hangt vooral af van wind en zicht: volgens een beslisschema wordt de gunstigste toegestane combinatie gekozen.

² De waarnemingen van dit hoofdstation zijn op de KNMI website terug te vinden.



1.3 Projectformulering en project monitoring i.s.m. de stakeholder

Er is binnen het project regelmatig overleg geweest met de stakeholder, d.w.z. Amsterdam Airport Schiphol (AAS) en de Luchtverkeersleiding Nederland (LVNL). In de groep aanwezigen bij de vergaderingen hebben zowel van de zijde van de stakeholder als van de uitvoerder in de loop van de tijd wisselingen plaatsgevonden. Niettemin vormen deze ontmoetingen een waardevol en cruciaal onderdeel van het onderzoeksproces. In de dialoog moest namelijk duidelijk worden wat de belangrijkste behoeften waren van de stakeholder en hoe men de bevindingen gepresenteerd wilde hebben. Ook moest helder worden wat de mogelijkheden en beperkingen van de uitvoerders waren (bijvoorbeeld m.b.t. de huidige kennis over klimaat, de klimaatmodellen en de kwaliteit en beschikbaarheid van waarnemingen).

Het onderzoeksvoorstel HSMS02 is in mei 2009 goedgekeurd. Er wordt vermeld in het verslag van desbetreffende vergadering dat de relatie met HSMS01 en HSMS03 nog ingevuld moet worden (hier wordt ook een adviserende rol van HSMS02 t.b.v. IMPACT genoemd). De meest bepalende weer variabelen voor het operationeel plan zijn vastgesteld, te weten zicht (in klassen), windsnelheid en richting (met name in de oost-west component), wolkenbasis en –bedekking. Met name snelle veranderingen in deze weer variabelen hebben een grote impact op de operatie. Toegevoegd (maar niet primair) zijn neerslag en temperatuur interessant. De klimatologie van de bovenlucht wordt hier nog niet genoemd. Dit element is er later bijgekomen, mede op verzoek van andere betrokkenen vanuit Schiphol.

De belangen van LVNL en AAS lopen soms uiteen. AAS (Amsterdam Airport Schiphol) is verantwoordelijk voor alle operaties aan de grond, op het terrein van de luchthaven, LVNL (Luchtverkeersleiding Nederland) voor alle vliegbevingen in de Amsterdam FIR (Flight Information Region) van de grond tot aan FL245 (daarboven EUROCONTROL), d.w.z. alle vliegroutes inclusief de grondbewegingen op de luchthaven van en naar de start- of landingsbaan. Bij onweersbuien zal AAS bijvoorbeeld vooral geïnteresseerd zijn in de kans op verticale ontladingen (er mag bij onweer niet getankt worden op Schiphol) en LVNL vooral in downdrafts en de mate van turbulentie en ijsaanzetting. Bovenluchtklimatologie is nauwelijks relevant voor AAS. Op basis van de gesprekken met de AAS en LVNL vertegenwoordigers is de focus van het huidige project komen te liggen op klimaatvragen die relevant zijn voor de operatie en de planning van het vliegverkeer, niet op zaken als het comfort van passagiers in de terminals of de veiligheid van het grondpersoneel (ontladingen). Ook dat zijn klimaatonderwerpen die voor Schiphol interessant kunnen zijn.

Reeds in het beginstadium van de besprekingen kwam het DAISY-model ter sprake als 'impact' model om de invloed van het weer op de luchthaven operatie (capaciteit en planning) te simuleren. Eigenlijk is de hoofdvraag welke historische data aan DAISY moeten worden aangeboden om de huidige situatie te representeren. Er wordt gespeculeerd over de invloed van de tijdsresolutie (10

minuten versus uur) en voorgesteld om bestanden voor DAISY aan te maken waarin elk uur wordt gerepresenteerd door het slechtste 10-minuten tijdvak.

De meeste vergaderingen om de voortgang te monitoren hebben de neiging 'weerselement-gewijs' te verlopen (overeenkomstig de indeling naar betrokken KNMI'ers), meestal beginnend bij temperatuur en zicht. Er is weinig uitwisseling tussen die onderwerpen, hoewel de betrokkenen van KNMI zich qua commentaar meestal niet tot hun eigen onderwerp beperken. De discussies zijn soms erg inhoudelijk van aard en achteraf gezien misschien niet altijd interessant of goed te volgen voor de Schiphol-vertegenwoordiging.

De interactie, overdracht van informatie tussen beiden partijen kan als volgt worden samengevat:

VAN	NAAR	DE (SOORT) INFORMATIE DIE WORDT OVERGEDRAGEN
KNMI	Schiphol	Achtergrondkennis op meteorologisch en klimatologisch vlak
KNMI	Schiphol	Resultaten van analyses, meestal per weerselement en inhoudelijk gedetailleerd. Uitleg van methodiek, interpretatie van bevindingen.
KNMI	Schiphol	Inventarisatie van opgeslagen meteorologische gegevens en eventuele problemen daarmee in verband met de analyses.
Schiphol	KNMI	Achtergrondkennis m.b.t. de luchthaven operatie
Schiphol	KNMI	Verzoek om zeer specifieke variant van de geleverde informatie in een format dat Schiphol praktisch uitkomt
Schiphol	KNMI	Invloed van weer op de operatie en hoe deze te kwantificeren met het DAISY model (bv. de geldende wind- en zichtnormen, de maatregelen en beslisschema's)



Schiphol	KNMI	Veranderingen op het Schiphol terrein en meetpraktijk die bepaalde resultaten kunnen verklaren.
KNMI	Schiphol	Uit de waarnemingen bevestigen of ontkennen van vermoedens (m.b.t. het al of niet vaker/minder vaak voorkomen van bepaalde weerssituaties).

1.4 Algemene vraagstelling

De *algemene vraagstelling* voor het project HSMS02 is geformuleerd binnen een KvK voorloper van HSMS02, het project Hotspot Schiphol Region (HSRS01), waarbij ook andere regionale spelers waren betrokken, zoals de Provincie Noord Holland en de Waterschappen:

“Welke weer/klimaat variabelen zijn van belang voor de operaties en ontwikkeling van Schiphol? Wat weten we over de huidige klimatologie daarvan? Zijn er trends? Valt iets te zeggen over ontwikkelingen op kortere en langere termijn?”.

In overleg met de stakeholders is bij aanvang van het project en bij uitwerking van de deelprojecten de algemene vraagstelling verder uitgewerkt en toegespitst op specifieke wensen van de stakeholders. Daarbij is vanzelfsprekend gekeken in hoeverre het beantwoorden van de vragen mogelijk of haalbaar was in het kader van dit project.

Bij het specificeren van de deelvragen, is gebruik gemaakt van informatie uit soortgelijke studies voor andere luchthavens. Het *“Heathrow Airport Limited Climate Change Adaptation Reporting Power Report”*³ dat gepubliceerd werd in mei 2011, volgt een risico assessment/risico management benadering op basis van de MetOffice’s UKCP09 scenario’s⁴. Hoewel de klimaatomstandigheden en de specifieke gevoeligheden en kwetsbaarheden van Heathrow Airport en

³ <http://archive.defra.gov.uk/environment/climate/documents/adapt-reports/08aviation/heathrow-airport.pdf>

⁴ <http://ukclimateprojections.defra.gov.uk/>

Schiphol verschillend zijn en hoewel zo'n rigoureuze risico benadering voor Schiphol noch gevraagd, noch mogelijk is (de KNMI'06 klimaatscenario's voor Nederland geven geen kansschattingen), zijn een aantal inzichten en algemene conclusies uit het Heathrow rapport gebruikt voor het Schiphol onderzoek. Zo concludeert het Heathrow rapport dat het 'op dit moment niet zinnig is om een gedetailleerde inschatting van de gevolgen van klimaatverwachtingen op de langere duur (meer dan enkele tientallen jaren) te geven omdat a) het niet relevant is omdat er geen plannings gemaakt worden zo ver vooruit en b) de klimaatverwachtingen op die tijdschaal toenemend onzeker zijn'.

Ook bij het huidige Schiphol onderzoek blijkt het voor het bepalen van de onzekerheden en risico's nuttiger te zijn om te kijken naar het huidige klimaat (inclusief de waargenomen extremen en trends) dan naar onzekere klimaatverwachtingen voor 10 of meer jaar vooruit.

In het "*Airport Climate Adaptation and Resilience*"⁵ rapport van het Amerikaanse 'Airport Cooperative Research Program', dat in 2012 verscheen, wordt de mogelijke invloed van klimaatverandering voor allerlei luchthavens – er zijn honderden internationale vliegvelden in de VS! – bekeken. Dit ACRP rapport presenteert o.a. een uitgebreide tabel met mogelijke klimaatinvloeden op de veiligheid en de operaties van luchthavens compleet met mogelijke impacts en mogelijke adaptatie strategieën, gebaseerd op een groot literatuuronderzoek. Delen van die tabel worden geciteerd in de volgende hoofdstukken van dit HSMS02 Syntheserapport om de belangen van de stakeholder en de keuzes die voor dat hoofdstuk t.a.v. de onderzoeksvraag zijn gemaakt te illustreren.

1.5 Specifieke vragen

In verband met de algemene vraagstelling blijkt Schiphol vooral geïnteresseerd in:

- **Het 'sustainability'-level**
De luchthaven garandeert de uitgifte van een aantal 'slots' per jaar. Dit aantal wordt steeds voor het komende jaar vastgesteld. Om slots uit te geven die met een hoge mate van zekerheid kunnen worden uitgevoerd, wordt vooraf bepaald of in een jaar met gemiddelde weersomstandigheden het gewenste aantal slots kan worden gehaald. Het daadwerkelijke aantal slots dat per dag kan worden uitgevoerd, is afhankelijk van de gebruikte baancombinaties, de weersomstandigheden en andere onvoorziene omstandigheden.

⁵ http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/acrp/acrp_syn_033.pdf



- **De geluidsbelasting**

De normen voor geluidsbelasting stellen per baancombinatie een grens aan de capaciteit, terwijl het toestaan van baancombinaties mede door de weersomstandigheden bepaald wordt.

Schiphol is geïnteresseerd in het klimaat op de luchthaven (gemiddelde weer en de natuurlijke variatie om het gemiddelde) omdat dat bepalend is voor het 'sustainability' level. Extremen (zoals Beperkt Zicht Omstandigheden C en D) hebben op jaarbasis een minder grote invloed op de 'sustainability' dan afwijkingen van het gemiddelde die minder extreem zijn, maar vaker voorkomen (zoals marginaal zicht).

Naast de algemene vraagstelling, die in het begin van het project werd geformuleerd, kwamen in de loop van het onderzoek een aantal *extra onderwerpen* naar voren die vroegen om nadere bestudering.

- Een van de belangrijkste toevoegingen was een onderzoek naar de *klimatologie en trends in het zicht*.
- Het onderzoek naar neerslag klimatologie en scenario's voor Schiphol kon gedeeltelijk voortbouwen op het onderzoek dat het KNMI doet voor de klimaatscenario's van Nederland, , maar extra onderzoek was nodig m.b.t. de volgende punten:
 - *Ruimtelijke verschillen*: zowel de gemiddelde neerslag verdeling als de statistiek van neerslagextremen blijkt sterk locatieafhankelijk, met name door een kust-effect in de (na)zomer en de vroege herfst, als het zeewater opgewarmd is.
 - *Sneeuw klimatologie*.
 - *Windrichting bij onweersbuien*
- Vanwege een discussie binnen Eurocontrol over het verhogen en harmoniseren van de transition altitude (TA, een vooraf vastgestelde hoogte waaronder een vlieger altijd weet op welke hoogte hij zich ten opzichte van obstakels bevindt) binnen Europa kwam er vanuit de luchtverkeersleiding Nederland (LVNL) de vraag naar *actuele QNH waarden boven verschillende delen van Nederland*. De QNH is de luchtdruk op zeeniveau herleid via de ICAO-standaardatmosfeer en wordt gebruikt voor de afstelling van de sub-schaal van de hoogtemeter in het vliegtuig.
- In 2012 voerde het KNMI een nieuwe manier voor de bepaling van de *gevoelstemperatuur* in. Omdat de gevoelstemperatuur in principe van belang is voor de werkomstandigheden van het buitenpersoneel op Schiphol werd besloten om de temperatuur klimatologie, scenario's en extremenstatistiek ook in termen van gevoelstemperatuur te presenteren.

1.6 Deelprojecten, aanvullend onderzoek en achtergrondonderzoek

Om de hierboven genoemde onderzoeksvragen te kunnen beantwoorden is luchtvaartmeteorologische kennis en kennis van de operatie op Schiphol nodig. Daarom zijn gedurende het gehele project KNMI klimaatonderzoekers met veel luchtvaartmeteorologische kennis en ervaring bij HSMS02 betrokken geweest (eerst Geert Groen, later Andrew Stepek en Ine Wijnant). Als klimatologie moest worden opgesteld op basis van waarnemingen, ging daar een studie naar de beschikbaarheid en kwaliteit van de waarnemingen aan vooraf. In een aantal gevallen is bij het opstellen van de klimatologie (ook) gebruik gemaakt van modeldata (klimaatprojecties of modelheranalyses). Voor (onderdelen van) andere onderzoeksvragen gaat het om toepassen van een reeds bestaande methode op het specifieke geval van Schiphol.

Het onderzoek dat voor KvK project HSMS02 werd gedaan bestaat dan ook uit een aantal deelprojecten en een aantal verdiepingen van bestaand of lopend KNMI onderzoek.

1.6.1 De deelprojecten

- *The Wind Climatology of Schiphol* (Andrew Stepek, Dirk Wolters, Xueli Wang en Ine Wijnant)
Bepaling en beschrijving van de wind klimatologie van Schiphol hoort bij de algemene vraagstelling. Er is hierbij speciaal gekeken naar dwars- en rugwind in relatie tot de ligging van start en landingsbanen. Klimaat projecties geven geen duidelijke of consistente verandering van het windklimaat op middelbare breedte. De metingen op Schiphol laten wel een afnemende trend zien die kan worden toegeschreven aan veranderende bebouwing en landgebruik.
- *Temperature Climatology for Schiphol, for present-day and climate scenarios in 2050* (Dirk Wolters en Jules Beersma)
De klimatologie van dagelijkse, maandelijkse en jaarlijkse minimum en maximum temperaturen wordt afgeleid van waarnemingen op Schiphol in de periode 1981-2010. Voor het toekomstig klimaat werd aangehaakt bij het lopende klimaat scenario onderzoek in het kader van KNMI'06 en KNMInext.
- *Climatology of temperatures below -70 °C near tropopause on Atlantic-tracks* (Dirk Wolters, Jan Hemink en Geert Groen)
De Onderzoeksraad voor Veiligheid (OVV) wilde weten hoe vaak (in klimatologische zin) temperaturen beneden -70°C voorkomen op Noord Atlantische routes in verband met het bevriezen van brandstof. Dit kon worden uitgezocht met behulp van de ERA-interim heranalyse.
- *Visibility: climatology and changes* (Robert Leander)
Het zicht onderzoek bouwt voort op onderzoek naar aerosolen die voor mondiale klimaat van belang zijn. Een geleidelijke



verbetering van zichtcondities hangt samen met vermindering van de aerosol concentraties.

- *Temperature- and cloud-distribution during daytime for aircraft cooling capacity at Schiphol, climatology 1990-2009* (Dirk Wolters)
Als vliegtuigen aan de grond uren in de volle zon staan bij hoge omgevingstemperatuur moeten ze inwendig gekoeld worden. Om in te kunnen schatten hoe vaak dit voorkomt, is onderzoek gedaan naar de combinatie omgevingstemperatuur en bedekkiingsgraad.
- *Extreme precipitation statistics for Amsterdam Airport Schiphol* (Rudmer Jilderda)
In verband met de waterveiligheid van Nederland doet het KNMI onderzoek naar neerslag en neerslag extremen, dat voor het HSMS02 project werd toegespitst op Schiphol.
- *Upper Air Climatology of Amsterdam FIR, using ERA-Interim 1989-2009* (Dirk Wolters en Geert Groen)
De Luchtverkeersleiding Nederland (LVNL) vroeg om de klimatalogie van wind (richting en snelheid), temperatuur en vocht in hun "Flight Information Region" (FIR), om te gebruiken als input bij het monitoren van 'air traffic control'.
- *Wind chill equivalent temperature (WCET) Climatology and scenarios for Schiphol Airport* (Geert Groen)
Het KNMI voerde in 2012 een nieuwe methodologie in voor het bepalen van 'wind chill' (gevoelstemperatuur). Omdat de gevoelstemperatuur van belang kan zijn bij buiten werkzaamheden op Schiphol werden tabellen voor schatting van de gevoelstemperatuur, zowel voor het huidige als voor een mogelijk toekomstig klimaat opgeleverd.

1.6.2 Relevant KNMI onderzoek

Een flink deel van het HSMS02 onderzoek bouwt voort op bestaand of lopend KNMI onderzoek en veel van de resultaten zouden niet binnen het bestek van dit project behaald zijn zonder deze bestaande expertise en kennis. We noemen een aantal belangrijke voorbeelden daarvan:

Klimaatscenario's voor Nederland

De klimaatscenario's voor Nederland die het KNMI publiceert zijn gebaseerd op analyses en vergelijkingen van alle beschikbare mondiale klimaat projecties, op experimenten met regionale klimaatmodellen en op metingen en analyses van het Nederlandse klimaat van de afgelopen tientallen jaren. De referentie voor de huidige KNMI'06 scenario's is:

Van den Hurk et al (2006) WR 2006-01: KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands. Wetenschappelijk rapport WR 2006-01, Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, De Bilt.

Het lopende onderzoek rond de scenario ontwikkeling heeft direct en indirect het HSMS02 werk beïnvloed.

Windonderzoek

Er zou geen goed onderbouwde en bruikbare trend in de windsnelheid van Schiphol gedetecteerd en geduid kunnen worden zonder het eerdere KNMI onderzoek naar potentiële windsnelheid:

Wieringa, J. en P. Rijkoort (1983), Windklimaat in Nederland, Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut

Verkaik, J. W. (2000), Evaluation of Two Gustiness Models for Exposure Correction Calculations, Journal of Applied Meteorology, 39(9), 1613-1626

Wever N en G. Groen (2009), Improving potential wind for extreme wind statistics. Wetenschappelijk rapport WR2009-02, Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, De Bilt.

Wever N (2012) Quantifying trends in surface roughness and the effect on surface wind speed observations, Journal of Geophysical Research, 117, D11104, doi:10.1029/2011JD017118.

Bakker AMR and Van den Hurk BJM (2011), Estimation of persistence and trends in geostrophic wind speed for the assessment of wind supply in Northwest Europe, Clim. Dyn. DOI 10.1007/s00382-011-1248-1

Zicht

Voor zicht liggen de publicatie waaraan KNMI heeft meegewerkt meestal in de toegepaste sfeer en die hebben, niet geheel toevallig, direct met luchtvaart te maken. Voorbeelden zijn:

Hove, R. ten en J.B. Wijngaard, *Improved low visibility and ceiling forecasts at Schiphol Airport. KNMI-publicatie: KDC/2008/0089.*

Wijngaard, J.B., D.H.P. Vogelesang, J. van Bruggen en N. Maat, *Low visibility and ceiling forecasts at Schiphol; Part 1-Assessment of the current system. KNMI-publicatie: 1/10/2007.*

Daarnaast zijn er ook wetenschappelijke publicaties van meer fundamentele aard, waarvan de conclusies overigens de bevinding van afnemende mistkanalen op een Europese schaal bevestigen:

Oldenborgh, G.J. van, P. Yiou en R. Vautard, *On the roles of circulation and aerosols in the decline of mist and dense fog in Europe over the last 30 years. Atm. Chem. Phys., 2010, 10, 4597-4609, doi:10.5194/acp-10-4597-2010.*



Vautard, R., P. Yiou en G.J. van Oldenborgh, *The decline of fog, mist and haze in Europe during the last 30 years: a warming amplifier?* Nature Geoscience, 2009, **2**, 115-119, doi:10.1038/NGEO414.

Een voorbeeld van mist-onderzoek in de context van radar, ook uitgevoerd door KNMI, is

Boers, R., H. Klein Baltink, H.J. Hemink, F.C. Bosveld en M. Moerman, *Ground-based observations and modeling of the visibility and radar reflectivity in a radiation fog layer.* Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2013, **30**, 288-300, doi:10.1175/JTECH-D-12-00081.1.

Het achtergrondrapport dat voor dit project is gemaakt bevat uitvoerigere informatie over de zicht- en bewolkingsklimatologie voor het huidige en toekomstige klimaat op Schiphol:

Leander, R.: Climatology of visibility and clouds at Schiphol airport, De Bilt, 2012, www.knmi.nl/samenw/kbs/doc/visibility.pdf

2 Methoden

2.1 Huidig klimaat

2.1.1 Gebruikte gegevensset

Het klimaat geeft de kenmerken van het weer gedurende een langere periode, meestal 30 jaar. Deze periode wordt de normaalperiode genoemd. De beschrijving van het klimaat bestaat niet alleen uit gemiddelden, maar ook uit afwijkingen van die gemiddelden en de kans dat deze afwijkingen voorkomen (zie Bos-atlas van het klimaat en www.klimaatatlas.nl).

Het klimaat van Schiphol wordt bepaald met behulp van de meetreeksen van het hoofdwaarneemterrein en van de verschillende meetlocaties naast de banen. Voor dit rapport is zoveel mogelijk gebruik gemaakt van de normaalperiode 1981-2010. Soms was deze echter ten tijde van de studie nog niet bekend, en is de normaalperiode 1971-2000 gebruikt. Dit staat dan duidelijk vermeld. Voor de studie naar wind is vooral de periode van 1971 tot 1995 gebruikt omdat na 1995 de windsnelheden zijn afgerond op hele meters per seconde in plaats van in knopen (1 knoop \approx 0,5 m/s) wat tot kunstmatige verschillen kan leiden in het voorkomen van bepaalde grenswaarden (zie hoofdstuk 3).

Naast de meetgegevens van de weerstations is ook gebruik gemaakt van aanvullende informatie zoals ERA-Interim reanalysis data en verticale profielen van de meetmast in Cabauw. Deze aanvullende bronnen zullen nader worden toegelicht in de desbetreffende hoofdstukken.

2.1.2 Inhomogeniteiten

Inhomogeniteiten zijn veranderingen in de gemeten waarden die niet zijn veroorzaakt door veranderingen van de weerparameter zelf maar door bijvoorbeeld veranderingen in de omgeving van het meetstation, van de meetmethode of door een verplaatsing van een instrument. Zo zullen bijvoorbeeld gebouwen die te dicht bij een windmeter worden geplaatst zorgen voor een verandering in de gemeten windsterkte als de wind uit de richting van die gebouwen komt zonder dat er daadwerkelijk een verandering in het windklimaat op grotere schaal heeft plaatsgevonden.

Het is dus van groot belang om goed te documenteren wanneer meetinstrumenten verplaatst zijn, verwisseld zijn voor andere instrumenten of wanneer er



significante veranderingen in de omgeving van het instrument zijn opgetreden (bijv. het kappen/planten van bomen, bebouwing of een verandering in welke gewassen met verbouwt). Zo hebben op Schiphol de uitbreiding van de luchthaven en het oprukken van de bebouwing van de omliggende dorpen en steden invloed gehad op bepaalde metingen. Eventuele inhomogeniteiten zijn geanalyseerd en nauwkeurig beschreven in de deelrapporten. Daar waar mogelijk zijn de metingen ook gecorrigeerd voor inhomogeniteiten (bijvoorbeeld de potentiële windreeksen t.b.v. het windonderzoek).

2.2 Klimaatverandering

2.2.1 Klimaatscenario's

Het klimaat in Nederland verandert. Hoe het verandert is vooral afhankelijk van de wereldwijde temperatuurstijging en van veranderingen in de stromingspatronen van de lucht in onze omgeving (West Europa) en de daarmee samenhangende veranderingen in de wind.

Het is niet mogelijk om een precieze uitspraak te doen over de veranderingen die ons in de komende eeuw te wachten staan, aangezien er onzekerheden bestaan over de emissies van broeikasgassen (en de achterliggende sociaal-economische en technologische ontwikkelingen). Verder zijn de computermodellen die gebruikt worden om het toekomstige klimaat te berekenen nog niet uitontwikkeld. Om toch uitspraken te kunnen doen over de mogelijke verandering in de toekomst heeft het KNMI vier klimaatscenario's ontwikkeld.

Klimaatscenario's zijn consistente en plausibele beelden van een mogelijk toekomstig klimaat. Klimaatscenario's zijn geen lange termijn weersverwachtingen: ze doen geen uitspraken over het weer op een bepaalde datum, maar alleen over het gemiddelde weer en de kans op extreem weer in de toekomst.

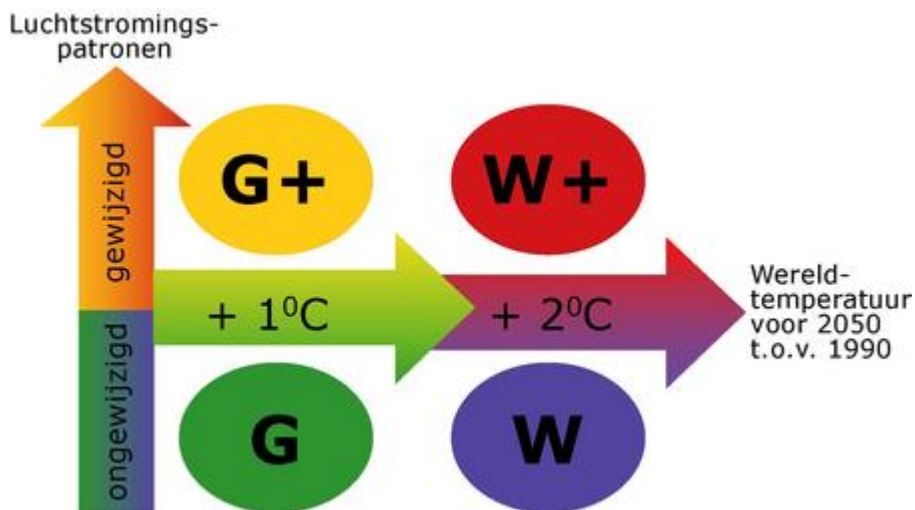
De KNMI'06 klimaatscenario's omvatten grotendeels alle mogelijke toekomstige klimaatveranderingen in Nederland op basis van verschillende emissiescenario's en de onzekerheden over het klimaatsysteem. De KNMI'06 klimaatscenario's geven een beeld van de veranderingen in temperatuur, neerslag, wind en zeespiegel voor een klimatologische periode van 30 jaar t.o.v. de referentieperiode 1976-2005. De scenario's voor 2050 zijn dus representatief voor het klimaat in de periode rond dat jaar (tussen 2036 en 2065).

In de KNMI'06 klimaatscenario's is geen gekwantificeerde informatie gegeven over eventuele veranderingen in de jaar-op-jaar variatie en natuurlijke schommelingen op langere termijn, zoals die ook in het verleden zijn voorgekomen. Vooral voor de gemiddelde windsnelheid zijn die schommelingen relatief groot ten opzichte van de veranderingen in de scenario's.

Schommelingen en trends

Weer en klimaat zijn grillig. Klimatologen beschrijven klimaatverandering in termen van 'trends' en 'schommelingen'. Trends zijn geleidelijke veranderingen in één bepaalde richting, schommelingen de variaties daaromheen. (Bosatlas van het klimaat, 2011)

Figuur 2.1: Schematisch overzicht van de vier KNMI'06 klimaatscenario's.



De vier KNMI'06 klimaatscenario's voor Nederland en omgeving gaan uit van een mondiale opwarming van 1°C (G: gematigd) of 2 °C (W: warm) rond 2050 en respectievelijk 2°C of 4°C rond 2100. In de G+ en W+ scenario's treedt er een wijziging op in het luchtstromingspatroon. In deze scenario's waait het relatief vaker uit westelijke richtingen in de winter en relatief vaker uit oostelijke richtingen in de zomer.

De belangrijkste bevindingen die in elk van de scenario's naar voren komen zijn:

- de opwarming zet door: hierdoor komen zachte winters en warme zomers vaker voor
- de winters worden gemiddeld natter en ook de extreme neerslaghoeveelheden nemen toe
- in de zomer neemt de hevigheid van extreme buien toe, maar het aantal natte dagen neemt juist af
- de berekende veranderingen in het windklimaat zijn klein ten opzichte van de natuurlijke grilligheid
- de zeespiegel blijft stijgen.

Meer informatie over de KNMI'06 klimaatscenario's is te vinden onder www.knmi.nl/klimaatscenarios.



2.2.2 Hoe is informatie over klimaatverandering meegenomen in dit project?

Voor Schiphol is vooral klimaatinformatie voor de komende vijf tot tien jaar van belang voor de planning van de capaciteit van de luchthaven. Daarom is in deze studie gekozen voor twee tijdshorizonten: rond het jaar 2010 (1996-2025) en rond het jaar 2050 (2036-2065).

Voor windrichting en windsnelheid is het echter zeer moeilijk om projecties voor de toekomst te maken. In het deelrapport over wind is een projectie gemaakt voor de komende tien jaar (2013-2022). Dit is gedaan door te kijken naar waargenomen trends in het huidige windklimaat. Verder vooruit kijken dan tot de periode tot 2022 is echter niet mogelijk door de grote onzekerheden die de klimaatscenario's geven. Bovendien was verder vooruitkijken voor Schiphol niet relevant (operationale planning gaat 1 jaar vooruit en de geluidoverlastverwachting 10 jaar).

Ook voor de klimaatvariabele zicht is het lastig om een uitspraak te doen voor de toekomst. Hier is alleen een uitspraak gedaan op basis van de huidige trend. Of deze trend zich in de toekomst zal voortzetten is echter niet duidelijk.

Voor de temperatuur en de neerslag is gekeken naar de KNMI'06 klimaatscenario's. De waarden voor de temperatuur en de neerslag in de jaren rondom 2010 en 2050 zijn verkregen door de observaties in de periode 1981-2010 te 'transformeren' naar observaties rond 2010 en 2050 met behulp van de veranderingen die worden aangegeven in de KNMI'06 scenario's. Er is hierbij rekening gehouden met het feit dat extremen anders veranderen dan gemiddelden. Nader informatie over het transformeren van de observaties is te vinden in Bakker & Bessembinder (2012).

Voor de klimatologie van de bovenlucht zijn geen uitspraken gedaan over eventuele toekomstige veranderingen omdat er vanuit de luchtverkeersleiding geen behoefte aan was.

2.3 Simulaties van baangebruik met het programma DAISY

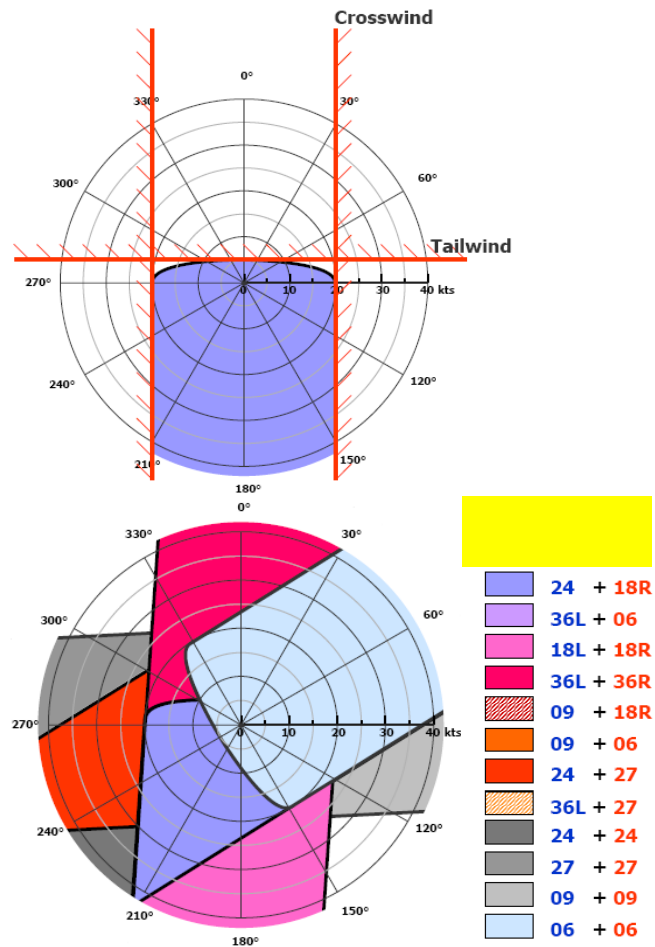
Momenteel wordt bij het opstellen van het operationeel plan voor Schiphol door LVNL een model infrastructuur genaamd DAISY toegepast om de invloed van de weersgesteldheid te bepalen. De belangrijkste componenten van DAISY zijn:

- Simulatie van de beschikbaarheid en keuze van banenconfiguraties (weersinvloed)
- Simulatie van het vluchtaanbod
- Het toekennen van 'slots' aan de aanvragers.
- De berekening van trajectoriën van toestellen.

- Drie-dimensionaal model van de geluidsbelasting (woonwijken etc.) die hieruit volgt.

Met namen de laatste component uit dit rijtje is bijzonder kostbaar, mede doordat het niet door LVNL zelf wordt uitgevoerd. De eerste component is rechtstreeks afhankelijk van meteorologische invoer. De conditie van wind, zicht en wolkenbasis bepalen samen met het baanpreferentie schema welke configuratie van start- en landingsbanen op een bepaald punt in de simulatie van toepassing is. In de preferentie volgorde speelt de geluidsbelasting een grote rol. Het bepalen van de configuratie verloopt als volgt:

- De gebruikte preferentielijst wordt gekozen op basis van
 - Onderhoudstoestand (één baan kan bijvoorbeeld in onderhoud zijn).
 - Piekfase (op vaste tijden van de dag worden de configuraties zó gekozen om een piek in ingaand of juist uitgaand verkeer te kunnen verwerken, of er is op dat moment geen sprake van een piekdrukke).
 - Zichtconditie (twee verschillende lijsten worden gebruikt naar gelang het zicht onbelemmerd is, of gehinderd (marginaal zicht, $RVR < 5000$ m, of slechter).
- Voor iedere baan (waarvan de oriëntatie exact bekend is) worden dwarswind en rugwind component uitgerekend uit de op dat uur heersende wind.
- Een baan valt af, wanneer deze dwarswind of rugwind de geldende limieten overschrijden.
- De preferentielijst wordt doorlopen beginnend bij de meest preferente configuratie. De eerste configuratie wordt gekozen waarvoor de wind voor alle banen binnen de gestelde limieten blijft.



In de windroos hierboven (bron: E. Gordijn) wordt uitgebeeld hoe de keuze van een baanconfiguratie tot stand komt bij een gegeven windsterkte en -richting. Iedere baan (met bijbehorende richting) wordt in dit diagram gerepresenteerd door een strook die correspondeert met de tolerantie van de desbetreffende baan voor wind en die wordt afgebakend door de dwars- en rugwind limieten (rechter figuur). Per combinatie markeert de overlap tussen de 'stroken' behorende bij die combinatie de toegestane windvectors (in het geval van kruisende banen is de toegestane regio typisch een soort driehoek met de punt naar buiten gericht). Als voor elke baancombinatie zo'n regio wordt gemarkeerd, begint bij de minst preferente combinatie, ontstaat een diagram als in de rechter figuur. Hieruit kan voor een gegeven wind de meest preferente toegestane baancombinatie worden afgelezen. De witte delen van de cirkel corresponderen met situaties waarin géén van de combinaties echt voldoet.

We gebruiken het schema hierboven om voor verschillende perioden te kijken naar het gecombineerde effect van wind en zicht (wolkenbasis is even buiten beschouwing gelaten, omdat we aannemen dat wind en zicht de grootste invloed hebben) op:

- De verandering in de beschikbaarheid van baanconfiguraties
- De verandering in de *keuze* van de baanconfiguratie

Dit laatste is wezenlijk verschillend van het eerste. De volgorde van voorkeur voor configuraties heeft hierop een sterke invloed. Het doorrekenen van het baangebruik geeft uitsluitsel of en hoe de invloed van de weersgesteldheid op de beschikbaarheid en keuze van baanconfiguraties is veranderd en welk aspect, wind (dwars- of rugwind) of zicht (via de keuze van de preferentielijst), de meeste invloed heeft.

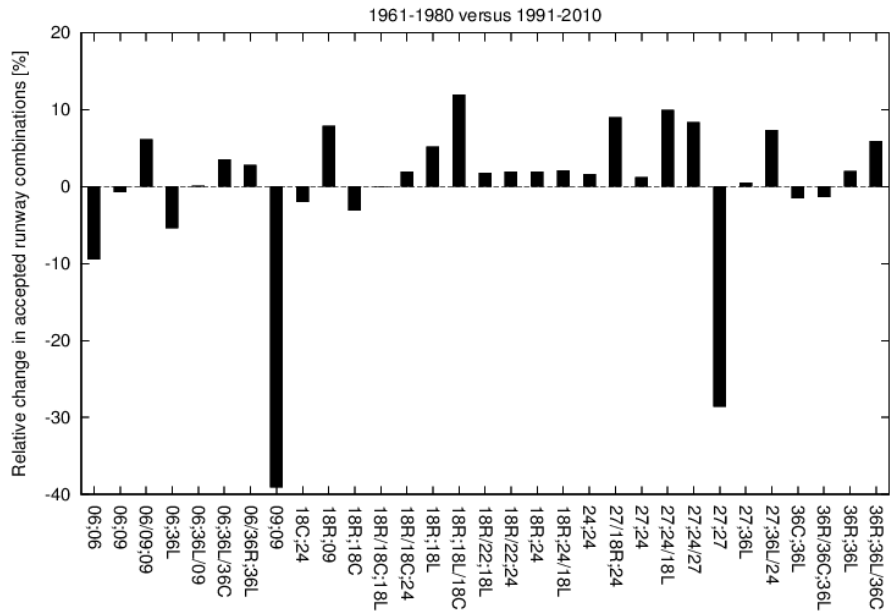
Met de beschikbare waarnemingen kan bijvoorbeeld voor verschillende perioden het 'baangebruik' worden geteld. De onderstaande tabel laat dit in procenten zien voor de periode 2001-2010, 1991-2010 en 1961-1980. De verschillen tussen de perioden in de verhoudingen tussen de combinaties is marginaal. Veranderingen zouden zo op het oog en volgens dit model nauwelijks effect hebben op de keuze van baanconfiguraties.

in	out	2001-2010	1991-2010	1961-1980
Geen toegestane combinatie		0.19	0.18	0.23
06	36L	8.63	8.70	10.72
06	36L/36C	12.28	11.85	10.57
06/36R	36L	12.27	11.85	10.55
18R	18C	0.00	0.02	0.02
18R/18C	18L	0.01	0.01	0.01
18R/18C	24	11.38	11.85	13.16

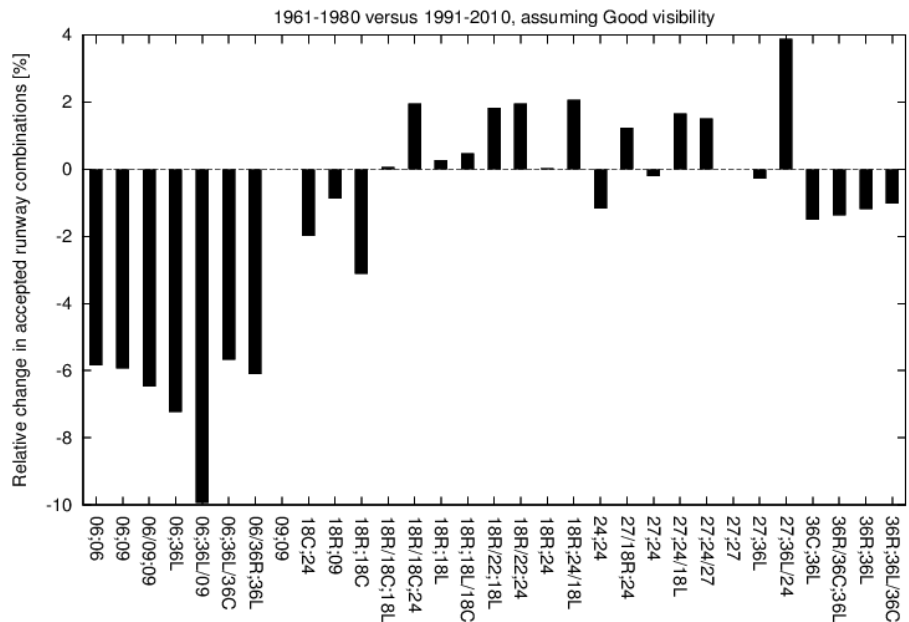


18R	18L/18C	0.01	0.01	0.01
18R	24	37.64	37.99	36.79
18R	24/18L	11.45	11.89	13.09
27	24	0.31	0.38	0.54
27	24/27	0.11	0.15	0.24
36C	36L	3.53	3.06	2.17
36R/36C	36L	1.22	1.14	1.04
36R	36L/36C	0.97	0.92	0.86

Ook kan gekeken worden hoe vaak, volgens de regels, een bewuste baancombinatie beschikbaar is, en hoe dit verandert. In de onderstaande figuur zijn weer de perioden 1961-1980 en 1991-2010 vergeleken. Horizontaal zijn de verschillende combinaties weergegeven (in de notatie de landings- en startbanen gescheiden door ';'). Ook hier is te zien dat de veranderingen in de beschikbaarheid van baancombinaties gering is, behalve voor de combinaties 09;09 en 27;27 (die overigens dezelfde baan, aanduiden) waar een sterke afname te zien is.



Om deze figuur te maken hebben we goede en marginale zichtcondities bij elkaar gevoegd, zodat er afwisselend een andere set van schema's gebruikt wordt. Onder goed zicht worden beide eerder genoemde baancombinaties niet gebruikt, dus kan de afname in dit plaatje evengoed het resultaat van een zichtverbetering zijn. Dit vermoeden wordt bevestigd (zie de figuur hieronder) als 'goed-zicht' aan het model wordt opgelegd, zodat nog maar één set van schema's wordt gebruikt.



Hierin is dus alleen het effect van de wind (invloed door de dwarswind en rugwind beperkingen) te zien. De veranderingen in de beschikbaarheid van baan-



combinaties vallen nu binnen de 10%. Uit de veranderingen is af te leiden dat vooral de beschikbaarheid van baan 06 afneemt.

Uiteraard zijn dit slechts voorbeelden van het mogelijke directe gebruik van wind- (en zicht-) data in dit model. Men zou de schema's kunnen variëren, kunnen kijken naar het effect van onderhouds situaties (het buiten operatie stellen van een baan) of met de wind beperkingen kunnen schuiven om gevoeligheden in kaart te brengen. Ten overvloede wordt hierbij nog opgemerkt dat het hier niet gaat om een historische registratie van het baangebruik, maar om de uitwerking die het historische weer gehad zou hebben, gegeven de huidige regels.

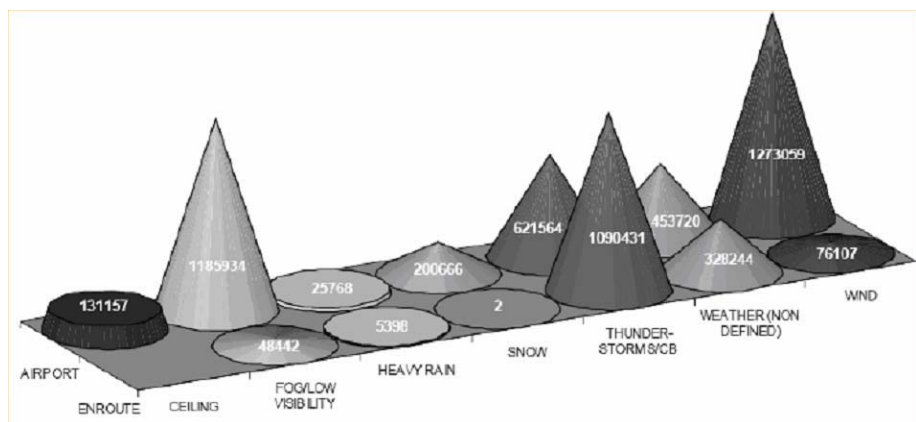
Het komt bijvoorbeeld in dit model voor dat geen van de combinaties in het schema op grond van de limieten is toegestaan. Ook in de praktijk zal dit gebeuren. De luchtverkeersleider zal dan zelf voor de meest gunstige oplossing moeten kiezen, waarbij de regels (van het model) overtreden worden (ook de gezagvoerders hebben hier een woord in). In de ergste gevallen zal een luchthaven gesloten moeten worden. Dergelijke situaties vallen uiteraard buiten het bestek van deze beschouwing.

3 Wind

3.1 Inleiding en verantwoording van de onderzoeksvraag

Wind is een belangrijke factor als het gaat om vliegveiligheid en veiligheid op de luchthaven, maar heeft ook economische gevolgen omdat het de operationele capaciteit van de luchthaven beïnvloedt. Zo is in figuur 3.1 te zien dat van alle weersomstandigheden die kunnen leiden tot vertragingen op de luchthaven, de invloed van wind het grootst is.

Figuur 3.1: Het aantal "weer" gerelateerde vertragingen in het Europese luchtruim in 2007 (Bron: EUROCONTROL).



Er zijn meerdere studies gedaan naar de impact van weer en klimaatverandering op het vliegverkeer op een luchthaven. Zo heeft het KNMI in een eerder Kennis voor Klimaat onderzoeksproject i.s.m. de LVNL (Luchtverkeersleiding), Schiphol-AAS (Amsterdam Airport Schiphol - Airside operations) en KLM (Dispatch) een inventarisatie gemaakt van kritieke weerparameters die de operatie op Schiphol beïnvloeden [Jacobs et al, 2011]. De bevindingen in dat rapport komen overeen met wat tijdens onze gesprekken met LVNL en AAS naar voren kwam en staan in tabel 3.1 samengevat.

	Belang	Kritische drempelwaarden	Type wind
LVNL	Hoog: wind bepaalt voor een groot deel de baankeuze.	Dwars- (> 20 kts) en rugwindlimieten (> 7 kts) i.v.m. bruikbaarheid van een baan. Deze limieten gelden inclusief windstoten, waarbij windstoten tot 10 kts niet worden meegenomen (d.w.z. tot 10 knopen boven de gemiddelde wind).	Windsnelheid- en richting op 10 m hoogte leidend in beslisproces, maar ook hoogtewinden worden meegenomen. Informatie over windschering via piloten. Sterke windschering < 100 vt kan sporadisch leiden tot baanverandering.

Tabel 3.1: impact wind op luchtvaartoperaties rondom Schiphol (zie uitleg dwars- en rugwind in en bij figuur 3.4)



AAS	<u>Middelhoog</u> : indirect belang i.v.m. baankeuze (invloed op capaciteit); direct belang bij planning baanonderhoud, met name windrichting 1-24 uur vooruit en bij situaties met extreme wind i.v.m. mogelijk herpositioneren van vliegtuigen aan de gates (neus in de wind).	Idem LVNL m.b.t. capaciteit en onderhoud beslisproces; m.b.t. ingrijpen in grondoperaties i.v.m. extreme wind zijn er geen "harde" drempelwaarden.	Windsnelheid- en richting op 10 m hoogte leidend in beslisproces.
KLM	<u>Hoog</u> : tijdens vliegoperaties "en route" (vliegtijden, brandstofgebruik, turbulentie) of bij landing/vertrek (veiligheid).	Geen eenduidige drempelwaarden: afhankelijk van vliegtuig en piloot en over het algemeen ruimer dan LVNL drempelwaarden.	Behoeft aan meting windschering en "wake vortex" rondom Schiphol.

Een goed voorbeeld van een studie naar de gevolgen van klimaatverandering voor een luchthaven, is een studie gedaan voor Heathrow Airport [HAL, 2011]. Hierbij wordt per "business unit" gekeken naar de verwachte effecten van klimaatverandering. Er wordt daarbij onderscheid gemaakt tussen effecten op de korte (tot 2020) en op de (middel)lange termijn (2020-2060). Bovendien wordt aangegeven of het risico dat samenhangt met het effect significant, matig of laag is.

In het (in dit hoofdstuk beschreven) windonderzoek t.b.v. Klimaatbestendig Schiphol is gefocust op de effecten op korte termijn (5-10 jaar vooruit). Dit omdat dat de periode is waarin LVNL en AAS geïnteresseerd zijn voor de operationele planning (1 jaar vooruit) en de geluidbelastingprognose t.b.v. de milieu effect rapportage MER (5-10 jaar vooruit). Om dezelfde reden is alleen gekeken naar de invloed van wind op de operatie en bijvoorbeeld niet naar schade als gevolg van wind.

In de Heathrow studie [HAL, 2011] worden drie effecten (risico op korte termijn: laag) genoemd die wind kan hebben op de operatie:

1. Toename windsnelheid: meer vertragingen
2. Afname wind: langere levensduur vleugeltip wervel
3. Verandering van de overheersende windrichting: invloed op baangebruik en vluchtschema's

Feitelijk is het niet de trend in de windsnelheid op zich die bepalend is voor de toekomstige operatie op een luchthaven, maar de trend in dwars- en rugwindfrequenties. Dat is dan ook waar dit onderzoek zich op heeft gericht. Het is wel essentieel om eerst de onderliggende trend in de windsnelheid te bepalen om te begrijpen waardoor die trend veroorzaakt wordt en in te kunnen schatten of die trend zich voortzet in de toekomst.

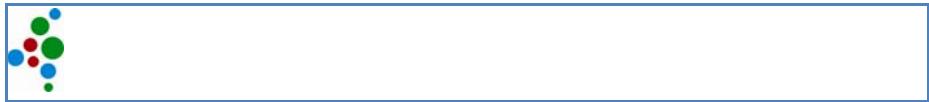
Er is geen afgerond onderzoek gedaan naar overheersende windrichting (de Schiphol meetreeks bleek inhomogeen; zie kader bij aanbevelingen), maar er is wel aanleiding om aan te nemen dat een trend in de windrichting is. Van Oldenborgh [Oldenborgh, 2003] heeft namelijk op basis van metingen in De Bilt aangetoond dat er vanaf 1950 in de maanden februari t/m april sprake is van een toename van het aantal gevallen met zuidwestenwind en een afname van noordoostenwinden. Informatie over windrichting wordt wel gebruikt bij de bepaling van dwars- en rugwindfrequenties (componenten van de windsnelheid loodrecht respectievelijk parallel aan de baan) in het huidige klimaat, maar een trend in windrichting is niet bepaald en/of toegepast voor dwars- en rugwind frequenties in het toekomstige klimaat. In de Heathrow studie [HAL, 2011] wordt de overheersende windrichting aangemerkt als de grootste onzekerheid voor het toekomstige windklimaat, maar Heathrow heeft alleen maar 2 parallelle banen (oost-west gericht). Schiphol met banen in verschillende richtingen zal minder last hebben van eventuele verandering in overheersende windrichting.

Wat de invloed van een afnemende wind op de levensduur van wervels is, valt buiten de scope van dit onderzoek.

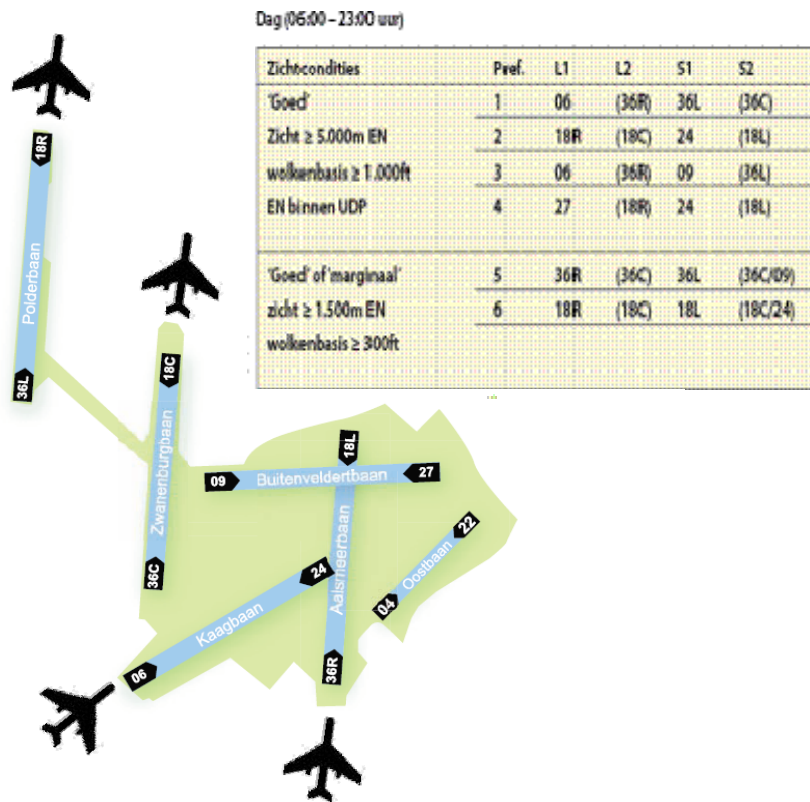
Samengevat: het windonderzoek dat in dit rapport wordt gepresenteerd, richt zich in overleg met LVNL en AAS op effecten op de korte termijn (5-10 jaar vooruit i.v.m. jaarplanning en MER) en op de operatie (de vraag of dwars- en rugwindfrequenties veranderen). Om de trend in de dwars- en rugwindfrequenties naar de toekomst te kunnen vertalen, is het essentieel dat we kennis hebben van de onderliggende trend in de windsnelheid.

Voor het begrijpen van het programma (Daisy) dat op Schiphol gebruikt wordt voor het bepalen van de planning voor volgend jaar en de geluidbelastingprognose voor 5-10 jaar vooruit, is het belangrijk om te weten hoe de keuze voor start- en landingsbaancombinaties in zijn werk gaat.

Bij de keuze van de baancombinaties wordt in eerste instantie uitgegaan van een preferentieschema. In het preferentieschema staan de baancombinaties die het minst geluidsbelasting geven bovenaan. In figuur 3.2 staat het preferentieschema voor overdag (in de nachtperiode ziet het schema er anders uit omdat dan de Buitenveldertbaan niet gebruikt mag worden) en een schematische weergave van de eerste preferentie waarbij gebruik gemaakt wordt van de Kaag- en Aalsmeerbaan om te landen en de Polder- en de Zwanenburgbaan om te starten. In figuur 3.3 is te zien waarom een aanvliegroute vanuit het zuiden en zuidwesten en vertrek naar het noorden het minst geluidsbelasting opleveren: in die richtingen is de minste bebouwing.



Figuur 3.2: preferentie-schema voor overdag en schematische weergave van preferentie 1 (baancombinatie met minimale geluidsbelasting).



41

Figuur 3.3: Toename van de bebouwing rondom Schiphol (grijs) sinds voor 1950 tot 2000 in vijf opeenvolgende periodes (vóór 1950, 1950-1960, 1960-1970, 1970-1980 and 1980-2000). Lichtere tinten geven de meer recente periodes weer en gebieden met bebouwing zijn weergegeven in rood, kassen in paars, bossen in groen en water in blauw (Bron: Gordijn et al 2007).



Nu hangt het echter van de weersomstandigheden af of de luchthaven (LVNL) gedwongen wordt baancombinaties te kiezen die lager op de preferentielijst staan en meer geluidsbelasting geven. De luchthaven is verplicht om altijd één start- en één landingsbaan aan te bieden waar geen belemmeringen zijn m.b.t. zicht, wolkenbasis en wind(stoten). Bovendien mag op die zogenaamde “primaire banen” geen sprake zijn van hevige neerslag, zwaar onweer met veel ontladingen of gevaarlijke neerslagsoorten zoals hagel, sneeuw en ijsel. Naast de “primaire banen”, mag de luchthaven (LVNL) ook andere banen aanbieden, maar de piloten zijn niet verplicht deze te accepteren. Voor welke baancombinatie gekozen wordt, zal dan ook voor een groot deel bepaald worden door het heersende en te verwachten weer, met name de windrichting. Planning op Schiphol gaat altijd in blokjes van 20 minuten en met name tijdens de piekperiodes (reeks van drie of vier blokjes, ongeveer 80 minuten) wil men liever geen wijzigingen in baangebruik. Daarom zal de keuze voor een baancombinatie vaak afhangen van de “slechtste” weersomstandigheden in de verwachting, met name tijdens de piekperiodes.

Wat de wind betreft, mogen start- of landingsbanen niet gebruikt worden als dwars- en rugwindlimieten worden overschreden. De dwarswind is de component van de windvector loodrecht op de landingsbaan; rugwind is de windcomponent parallel aan de landingsbaan in de richting waarin het vliegtuig vliegt (figuur 3.4).



Figuur 3.4: 2007 Boeing E-3A
Dwarswind landing (Wikipedia)

Feitelijk zijn dwars- en rugwindlimieten afhankelijk van de ruwheid van de baan (en dus van regen, sneeuw of ijs) en van de condities m.b.t. zicht en lage bewolking. Als de banen ruw genoeg zijn, het zicht boven de 5 km blijft en de wolkenbasis hoger is dan 1000 voet, dan is de dwarswindlimiet 20 knopen en de rugwindlimiet 7 knopen. Banen op Schiphol blijven ruw genoeg bij regen en worden altijd sneeuw- en ijsvrij gemaakt, maar als zicht en/of wolkenbasis marginaal of slecht zijn, zullen de dwars- en rugwindlimieten op Schiphol naar beneden worden bijgesteld. Bij windstoten 10 knopen (of meer) hoger dan de gemiddelde wind, wordt i.p.v. de relevante component van de gemiddelde



windsnelheid, de relevante component van de windstoot vergeleken met de dwars- en rugwindlimieten.

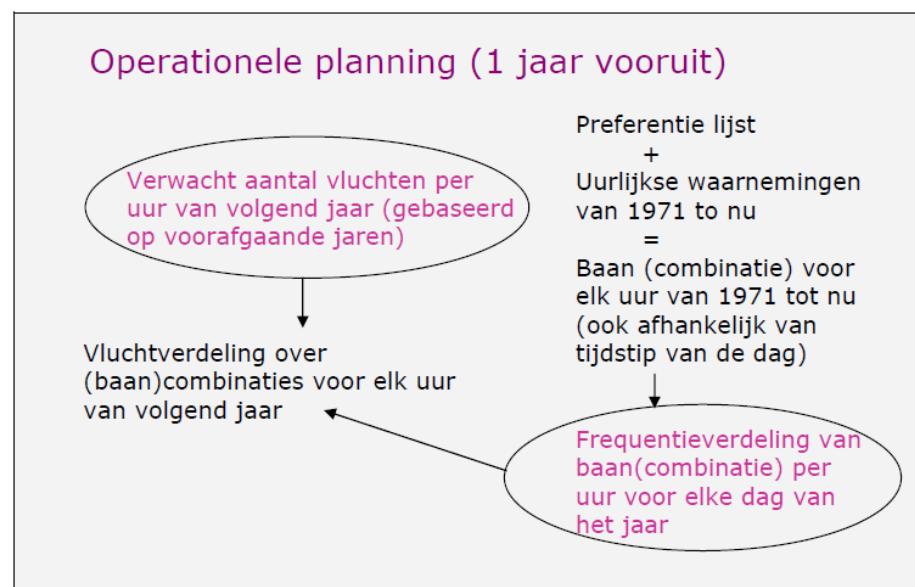
Samengevat: bij de keuze voor start- en landingsbaan gaat de LVNL uit van een preferentielijst (baancombinatie met minimale geluidsbelasting heeft eerste voorkeur), maar daarvan moet soms op grond van weersomstandigheden worden afgeweken. Bij overschrijding van dwars- en rugwindlimieten zorgt de wind ervoor dat bepaalde banen niet kunnen worden gebruikt.

In figuur 3.5a t/m c is schematisch aangegeven hoe Daisy werkt:

Figuur 3.5a: bepaling frequentieverdeling baancombinaties voor elke dag van het jaar, voor elk uur met behulp van programma Daisy (stap 1 en 2 in de tekst)



Figuur 3.5b: bepaling operationele planning voor komend jaar met behulp van programma Daisy (stap 3 in de tekst)





Figuur 3.5c: bepaling geluidbelastingprognose voor 5-10 jaar vooruit met behulp van programma Daisy (stap 4 in de tekst)



In stap 1 van het programma Daisy wordt voor elk uur vanaf 1971 op basis van uurlijkse waarnemingen van wind, zicht en wolkenbasis bepaald welke baancombinatie op basis van de preferentielijst gekozen had moet worden. Daarbij is het mogelijk om de keuze voor bepaalde baancombinaties uit te sluiten i.v.m. onderhoud. In werkelijkheid zullen de baancombinaties die Daisy berekent, afwijken van de door de LVNL gekozen baancombinaties: Daisy houdt bijvoorbeeld geen rekening met buien of wind op hoogte. Het kan ook zo zijn dat de LVNL-medewerker een weersverslechtering verwacht en een baancombinatie lager op de preferentielijst kiest om niet het risico te lopen tijdens een drukke periode (bijvoorbeeld tijdens de in- of outbound peak) van baan te moeten wisselen. Omdat de door Daisy berekende baancombinaties niet overeenkomen met de operationele werkelijkheid heeft men ervoor gekozen Daisy te “tunen”. Dit is gedaan door in het programma niet uit te gaan van een tailwind limiet van 7 kts, maar van 3 kts.

In stap 2 berekent Daisy op basis van de baancombinaties voor elk uur van de dag vanaf 1971 (resultaat stap 1) voor elke dag van het jaar voor elk uur frequentieverdelingen van baancombinaties.

De volgende stap (stap 3) is het berekenen van de operationele planning voor volgend jaar. Daisy berekent op basis van de frequentieverdeling van de baancombinaties voor elk uur van het jaar (uitkomst stap 2) en het verwachte aantal vluchten per uur (geschat op basis van voorafgaande jaren) voor elk uur van het jaar een verdeling van de vluchten over de banen (figuur 3.5b).

De verwachting van de geluidbelasting (stap 4) is nog ingewikkelder en daarvoor heeft Daisy ook informatie nodig over het type vliegtuig, gekozen routes en gevolgde procedures (figuur 3.5c).

Opvallend is dat de input voor het Daisy programma bestaat uit uurlijkse waarnemingen van wind, zicht en bewolking voor de periode 1971 tot heden en er dus impliciet vanuit gegaan wordt dat deze waarnemingen representatief zijn voor het jaar waarvoor men de operationele planning respectievelijk de geluidbelastingprognose wil maken. KNMI heeft daarom in dit windonderzoek een betere en wetenschappelijk onderbouwde inschatting gemaakt van de gemiddelde dwars- en rugwind frequenties per baan (en de spreiding om het gemiddelde) voor 1 en 5-10 jaar vooruit. Daarbij wordt aangenomen dat er een operationele planning berekend moet worden voor 2011 en een geluidbelastingprognose voor 2018 (een jaar in het midden van de periode tot 10 jaar vooruit: 2013-2022).

Samengevat luidt de (tweeledige) onderzoeksvraag:

- 1) Is er een trend in de gemiddelde windsnelheid die naar alle waarschijnlijkheid de komende 10 jaar aanhoudt en zo ja, hoe groot is die trend?
- 2) Kan er een wetenschappelijk onderbouwde inschatting gemaakt worden van de gemiddelde dwars- en rugwind frequenties per baan voor 2011 en 2018 en de spreiding om dat gemiddelde?

3.2 Methode en resultaten

3.2.1 de eerste onderzoeksvraag

Eerste onderzoeksvraag: is er een trend in de gemiddelde windsnelheid die naar alle waarschijnlijkheid de komende 10 jaar aanhoudt en zo ja, hoe groot is die trend?

Zoals in sectie 1 aangegeven, is eigenlijk de trend in dwars- en rugwindfrequenties bepalend voor de toekomstige operatie op een luchthaven, maar is het belangrijk inzicht te hebben in de onderliggende trend in windsnelheid om te begrijpen waardoor die trend veroorzaakt wordt en in te kunnen schatten of die trend zich voortzet in de toekomst.

Wind ontstaat primair als gevolg van horizontale verschillen in luchtdruk in de atmosfeer. De windsnelheid en – richting worden in de grenslaag beïnvloedt door het aardoppervlak: de wind wordt afgeremd en krimpt. De mate waarin dat gebeurt, is afhankelijk van de oppervlakteruwheid. In de literatuur [Wieringa/Rijkooft, 1983] wordt onderscheid gemaakt tussen de lokale ruwheid (bepaald door de eigenschappen van de bodem, begroeiing en bebouwing op enkele honderden meters van het meetpunt en van invloed op de wind tot een hoogte van 60 m) en de regionale- of mesoruwheid (bepaald door de eigen-

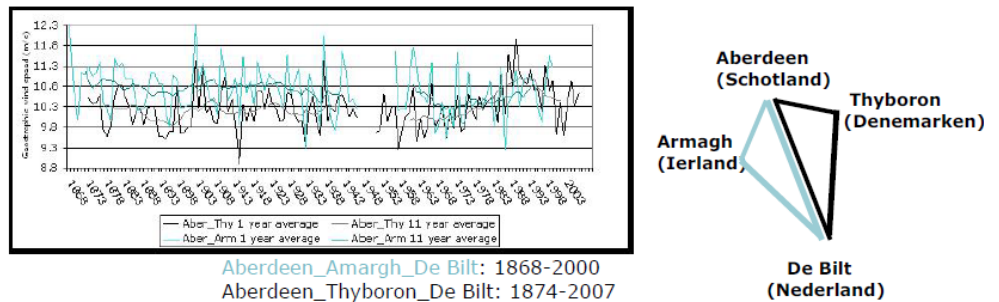


schappen van de bodem, begroeiing en bebouwing tot enkele kilometers van het meetpunt en van invloed op de wind tot de top van de grenslaag). De grenslaag is 0.2 tot 2 km diep en boven de grenslaag wordt de wind niet meer afgeremd en waait de wind evenwijdig aan de isobaren. Een maat voor deze ongestoorde wind is de geostrofische wind.

3.2.1.1 Trend in geostrofische wind

47

Figuur 3.6: Geostrofische wind bepaald m.b.v. ongeveer 130 jaar aan drukmetingen in De Bilt, Aberdeen (Schotland), Armagh (Ierland) en Thyboron (Denemarken) (Bron: Bakker, 2011)



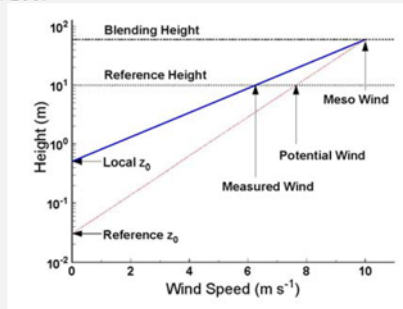
Om te onderzoeken of er een trend aanwezig is in de geostrofische wind, is gebruik gemaakt van onderzoek van Bakker [2011]. In dit onderzoek wordt de geostrofische wind berekend op basis van drie drukmetingen (figuur 3.6). Om te bepalen of er op Schiphol sprake is van een trend in de geostrofische wind, is gebruik gemaakt van twee meetreeksen van ongeveer 130 jaar, één gebaseerd op drukmetingen in Armagh (Ierland), Aberdeen (Schotland) en De Bilt, de andere gebaseerd op drukmetingen in Thyboron (Denemarken), Aberdeen en De Bilt. In figuur 3.6 zijn deze reeksen aangegeven als Aber_Thy (1874-2007) in zwart en Aber_Arm (1868-2000) in blauw. Te zien is dat er geen significante lange termijn trend is in de geostrofische wind, wel grote (multi)deceniale fluctuaties die toe te schrijven zijn aan natuurlijke variabiliteit: de hoogste 11-jaar gemiddelde wind is 10% hoger dan de laagste. Verder lijkt de periode die Schiphol gebruikt in Daisy (1971-heden) qua gemiddelde en variabiliteit niet veel af te wijken van de langjarige reeks.

3.2.1.2 Trend in windsnelheid als gevolg van veranderingen in regionale ruwheid

Zoals eerder in deze sectie aangegeven, wordt onderscheid gemaakt tussen lokale en regionale ruwheid. Omdat veranderingen in lokale ruwheid (enkele honderden meters van het meetpunt) moeilijk te voorspellen zijn voor een toekomstig klimaatscenario (één hangar extra kan grote gevolgen hebben voor de lokale ruwheid op Schiphol), is er in dit onderzoek voor gekozen om de invloed van lokale ruwheid uit te sluiten. Dit is mogelijk door gebruik te maken van zogenaamde potentiële windreeksen (zie kader: potentiële wind). Voor meetpunten boven land is de potentiële wind gelijk aan de wind op de meetlocatie alsof er in een straal van enkele honderden meters om het meetpunt alleen maar gras zou groeien (met een ruwheid van 0.03 m). Op die manier is de potentiële wind onafhankelijk van de lokale (en windrichtingafhankelijke) ruwheid. Bij het berekenen van de potentiële wind wordt rekening gehouden met eventuele veranderingen in meethoogte of meetinstrumenten. De potentiële windreeksen zijn daarom veel homogener dan de ongecorrigeerde “ruwe” meetreeksen.

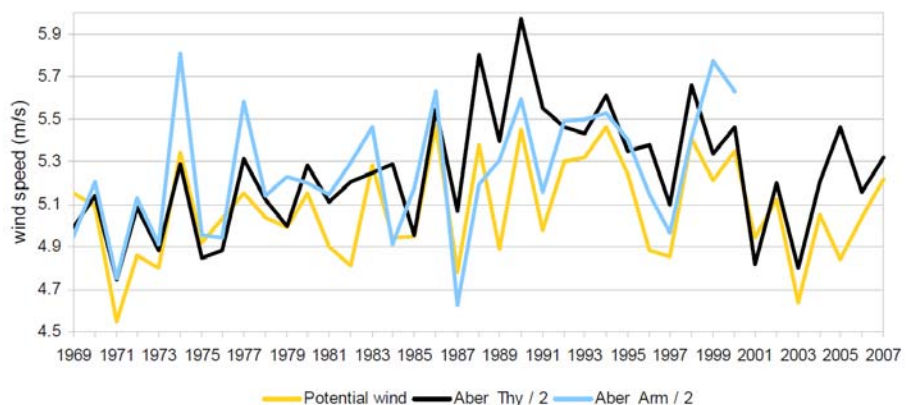
Potentiële wind

De potentiële wind is de wind gecorrigeerd voor lokale oppervlakteruwheid z_0 (horizontale schaal van enkele honderden meters). De lokale ruwheid heeft invloed op de wind tot de menghoogte (60 m). De regionale- of mesoruwheid (schaal van enkele kilometers) heeft invloed op de wind in de hele atmosferische grenslaag (hoogte atmosferische grenslaag varieert van ongeveer 200 m tot 2 km), maar wordt bij het berekenen van de potentiële wind genegeerd. De potentiële wind wordt berekend door uitgaande van de lokale ruwheidslengte en een logaritmisches windprofiel (m.a.w. een neutrale opbouw van de atmosfeer hetgeen boven land geldt bij uurgemiddelde windsnelheden hoger dan 5 m/s [Tennekes 1973]) de wind te berekenen op de menghoogte (60 m) waar de lokale ruwheid geen invloed meer heeft op de windsnelheid en deze 60 m wind terug te transformeren naar 10 m hoogte uitgaande van een ruwheid van 3 cm boven land (open terrein met gras) en 2 mm boven zee:



Via http://www.knmi.nl/klimatologie/onderzoeksgegevens/potentielle_wind/up_upd/ (methode Wever/Groen) [2009] en http://www.knmi.nl/klimatologie/onderzoeksgegevens/potentielle_wind/methode_Verkaik [2000] zijn de potentiële windreeksen te downloaden. Het verschil tussen beide methodes zit hem eigenlijk in de berekening van de lokale ruwheid op de meetstations. Om de potentiële wind te kunnen bepalen, moeten we de in elk geval de richtingsafhankelijke (sectoren van 20°) ruwheid op het station kennen. Dit wordt om de 3 jaar berekend om te zien of er veranderingen zijn opgetreden. Er zijn een tweetal methoden om de ruwheid te bepalen: direct uit variaties in windsnelheid m.b.v. de *sigma-analyse* (hoe groter de ruwheid, des te groter standaarddeviatie van de gemeten windsnelheid σ_u) of indirect m.b.v. de *vlaaganalyse* (de verhouding windstoot/gemiddelde windsnelheid f_x/f_g is een maat voor de ruwheid). Omdat de standaarddeviaties pas sinds 2003 volledig beschikbaar zijn, zijn ruwheidslengten in Verkaik alleen gebaseerd op de vlaaganalyse (f_x/f_g berekend op uurlijkse intervallen). Uit het onderzoek van Wever&Groen [2009] bleek dat de potentiële wind berekend m.b.v. een vlaaganalyse op uurlijkse intervallen in de winter te hoog zijn voor windrichtingen tussen west en noord. Daarom hebben Wever&Groen de potentiële wind series van Verkaik gecorrigeerd gebruik makend van correctiefactoren die zij berekend hebben door de potentiële wind series van Verkaik (vlaaganalyse) te vergelijken met series gebaseerd op de sigma-methode met 10 minuten data van gemiddelde wind en standaarddeviatie (beschikbaar sinds 2003).

Figuur 3.7: jaargemiddelde potentiële wind Schiphol (geel) en (voor de leesbaarheid van de figuur gehalveerde) jaargemiddelde geostrofische wind op basis drukmetingen De Bilt-Aberdeen-Thyboron (zwart) en De Bilt-Aberdeen-Armagh (blauw). Potentiële windreeks van Schiphol loopt van 1969 tot heden, Aber_Thy reeks is compleet van 1957-2007 en Aber_Arm reeks van 1957-2000.



Voor het trendonderzoek is gebruik gemaakt van de jaargemiddelde potentiële windreeksen van Schiphol (1969-heden) gebaseerd op de sigma-analyse van Wever en Groen (figuur 3.7). Om de trend zichtbaar te maken die alleen nog af kan hangen van een verandering in de regionale ruwheid wordt de potentiële windreeksen ontdaan van de (natuurlijke) variatie van de Aber-Thy en Aber_Arm



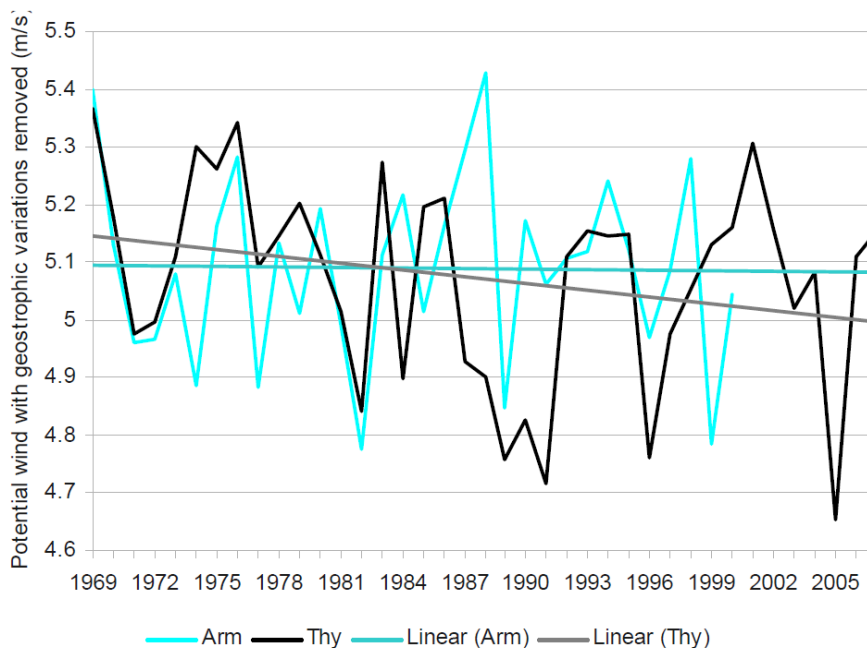
geostrofische windreeksen. Dit gebeurt door de geostrofische anomalie te vermenigvuldigen met een schaalfactor van de Schiphol potentiële windreeks en dit product wordt dan van de jaargemiddelde potentiële windsnelheid afgetrokken. De anomalie is het verschil tussen de jaargemiddelde geostrofische windsnelheid en het gemiddelde over de hele periode vanaf 1969 (maat voor de afwijking van de geostrofische wind in het betreffend jaar t.o.v. hele periode). De schaalfactor is gelijk aan de standaarddeviatie van de hele potentiële windreeks gedeeld door de standaarddeviatie van de hele geostrofische windreeks (maat voor de variatie van de potentiële wind t.o.v. de geostrofische). Er zijn meerdere redenen om het jaargemiddelde en niet de uurlijkse of de maand- of seizoensgemiddelde potentiële windreeks te gebruiken (zie kader: Aggregatie).

Aggregatie.

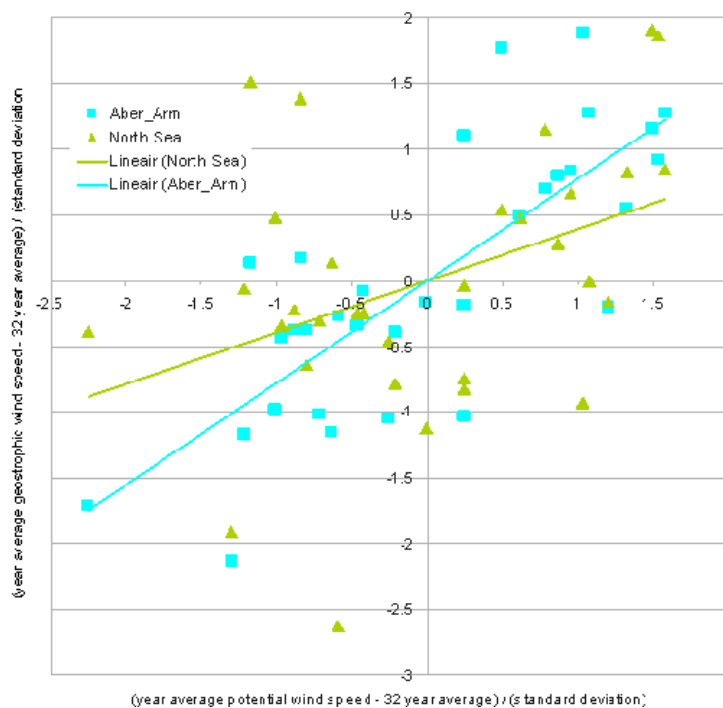
- Trends in de windsnelheid kunnen wel berekend worden met uurlijkse metingen, maar het is belangrijk om de oorzaak van de trend te weten om te kunnen bepalen hoe waarschijnlijk het is dat de trend aanhoudt in de toekomst. Van alle oorzaken voor afname van de windsnelheid, zet alleen de toename van de regionale ruwheid met enige zekerheid door. Om die trend te analyseren zijn metingen van de geostrofische windsnelheid nodig en die metingen waren alleen beschikbaar op dagbasis (Bakker 2011). De analyse van de trend in windsnelheid is daarom niet uitgevoerd met uurlijkse metingen.
- Voordeel van het gebruik van jaargemiddelde potentiële windsnelheid is dat de kleine fouten die in de uurlijkse data zitten als gevolg van het niet altijd neutraal zijn van de atmosfeer, over een jaar worden uitgemiddeld. Dit geldt niet voor maand- en seizoensgemiddelden: daar wordt het effect van veranderende stabiliteit niet voldoende uitgemiddeld. Onderzoek naar de onnauwkeurigheid van de potentiële wind bij stabiele en onstabiele situaties valt buiten de scope van dit onderzoek.

In figuur 3.8 is jaargemiddelde potentiële wind Schiphol te zien minus de geschaalde anomalie van de jaar op jaar variatie van geostrofische wind. Op basis van kleinste kwadraten lineaire regressie laat de jaargemiddelde potentiële wind op Schiphol verminderd met de jaar op jaar anomalie van de geostrofische wind gebaseerd op de Aber_Thy drukmetingen (zwart) een dalende trend zien van 0,8% per decade (10 jaar). Gebruik makend van de Aber_Arm drukmetingen is de trend niet significant. Deze trends zijn geheel toe te schrijven aan veranderingen in de regionale ruwheid.

Figuur 3.8: jaargemiddelde potentiële wind Schiphol minus de geschaalde anomalie van de jaar op jaar variatie van geostrofische wind levert een dalende trend van 0.8%/decade op voor de reeks geschaald met de Aber_Thy wind (zwart). Voor de Aber_Arm geschaalde reeks (blauw) is geen significante trend gevonden. Deze trends zijn geheel toe te schrijven aan veranderingen in de regionale ruwheid.



Figuur 3.9: Correlatie tussen de geostrofische en de potentiële wind. Naast de Aber_Thy en Aber_Arm reeksen die gebaseerd zijn op waarnemingen (druk) is ook gekeken naar geostrofische windsnelheden uit 40 jaar ECMWF reanalyses (1958-1998) [Upala, 2005], maar de geostrofische windsnelheden gebaseerd op de waarnemingen correleerden beter met de potentiële wind op Schiphol. Hoogste correlatie coëfficiënt Aber_Arm (0.77), laagste ERA40 Noordzee (0.39). beide staan in de figuur. Correlatie coëfficiënt Aber_Thy (0.74) en ERA40 Nederland (0.64).



Huidige klimaatmodellen geven geen eenduidig beeld van de te verwachten trend in de windsnelheid en windrichting (zie kader: KNMIO6 scenario's voor wind). Ook wordt de invloed van veranderende ruwheid op de wind niet gemodelleerd terwijl uit de literatuur is bekend dat een toename van de regionale ruwheid zorgt voor een afname van de windsnelheid. De dalende trend van 0.8% per decade op basis van de Aber_Thy reeks is conform de bevindingen van Wever [2012]. Hij vond voor Schiphol in de periode 1981-2009 een dalende

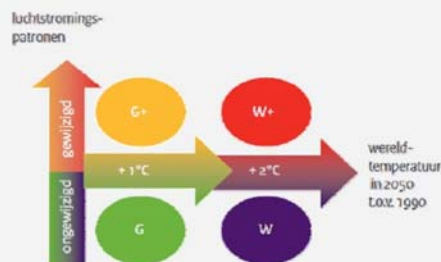


trend in de windsnelheid als gevolg van een toenemende regionale ruwheid (0.6% per decade). Vautard [2010] heeft de windsnelheid geanalyseerd op het hele noordelijk halfrond (1979-2008) en ook daar geconcludeerd dat de afnemende trend in de windsnelheid boven land gedeeltelijk veroorzaakt wordt door een toename van de regionale ruwheid. De trend gevonden op basis van de Aber_Thy reeks komt dus beter overeen met wat bekend is uit ander onderzoek, maar daar staat tegenover dat de Aber_Arm reeks een iets betere correlatie heeft met de potentiële windreeks op Schiphol en de geostrofische wind daar een fractie beter lijkt weer te geven (figuur 3.9). Daarom is er in het onderzoek voor gekozen uit te gaan van twee scenario's voor toekomstig klimaat: één gebaseerd op een afnemende trend in de gemiddelde windsnelheid van 0.8% per decade en een andere die uit gaat van geen verandering.

KNMI06 scenario's voor wind

In de KNMI06 scenario's [Van den Hurk, 2006] zijn voor de 4 klimaatscenario's verwachtingen gegeven voor de verandering van het jaarmaximum van de daggemiddelde wind tussen 1990 (als representatief voor de periode 1975-2005) en 2050:

- G geen verandering (geen trend)
- G+ 2% toename (komt overeen met toename van 0.3% per decade)
- W 1% afname (komt overeen met afname van 0.2% per decade)
- W+ 4% toename (komt overeen met toename van 0.7 % per decade)



Samengevat luidt het antwoord op de eerste onderzoeksvraag:

1. Is er een trend in de gemiddelde windsnelheid die naar alle waarschijnlijkheid de komende 10 jaar aanhoudt en zo ja, hoe groot is die trend? De trend als gevolg van verandering in de regionale ruwheid zet waarschijnlijk door. Er wordt uitgegaan van twee scenario's: geen verandering of een dalende trend van 0.8% per decade.

3.2.2 de tweede onderzoeksvraag

Tweede onderzoeksvraag: Kan er een wetenschappelijk onderbouwde inschatting gemaakt worden van de gemiddelde dwars- en rugwind frequenties voor 2011 en 2018 en de spreiding om dat gemiddelde?

Om dwars- en rugwindfrequenties te bepalen zijn uurlijkse waarnemingen nodig van windsnelheid, windrichting en windstoten. Onder uurlijkse waarnemingen wordt verstaan het 10 minuten gemiddelde vlak voor het hele uur van waarneming (voor windsnelheid en windrichting) en het maximale 3 seconde gemiddelde in het afgelopen uur (voor windstoten). Omdat voor 1971 alleen windstoten werden opgeslagen van meer dan 25 knopen, zijn waarnemingen van voor 1971 niet bruikbaar voor dit onderzoek. Ook de windsnelheidsmetingen na 1995 zijn niet bruikbaar omdat deze zijn opgeslagen in m/s in plaats van in knopen (1 m/s = 1.94 kts). Omdat dwars- en rugwindlimieten zijn vastgelegd in knopen leidt het opslaan van windsnelheden in m/s tot fouten in de frequenties (bij rugwindfrequenties kan de fout bij bepaalde banen oplopen tot 10%). Meer informatie over het besluit om windsnelheden niet in knopen, maar in m/s op te slaan in onderstaand kader.

Opslag windmetingen in m/s in plaats van in knopen

Op basis van een aanbeveling van WMO ging het KNMI in 1996 over van het rapporteren van windsnelheden in hele knopen op de rapportage in hele m/s (1 m/s = 1.9439 kts). Basis voor de windwaarnemingen zijn de codes uit de SYNOP (windsnelheid in m/s, windrichting in decagraden) en de KLIM (hoogste en uurgemiddelde windsnelheid in m/s) en beide codes laten geen getallen achter de komma toe. De SYNOP code ligt internationaal vast (WMO). De KLIM is een nationale code en kan geschikt gemaakt worden voor getallen achter de komma, maar dat zou jaren werk zijn omdat er zo veel applicaties aan vastzitten. De waarnemingen uit de SYNOP en de KLIM worden gevalideerd en opgeslagen in het KIS (Klimatologisch Informatie Systeem).

Naast de data in KIS, zijn op het KNMI ook de "ruwe" (ongevalideerde) 10 minuten en 1 minuut data opgeslagen (in tienden m/s). De 10 minuten data tot 2003 zijn echter verminkt (laatste meting van elke dag ontbreekt) en dus beperkt bruikbaar. "Ruwe" 1 minuut metingen zijn er vanaf 1988 en ondanks het feit dat deze database niet erg toegankelijk is, kunnen deze 1 minuut data (mits gevalideerd) wellicht gebruikt worden om de uurlijkse data vanaf 1995 te vervangen. Vanaf het moment van invoer van RobuKIS (gepland voor 2014), worden gevalideerde windsnelheden in tienden m/s opgeslagen.

Als er uitgegaan wordt van geen trend in de windsnelheid (en geen trend in de windrichting), veranderen ook de dwars- en rugwindfrequenties niet en zijn deze voor 2011 en 2018 gelijk zijn aan de dwars- en rugwindfrequenties berekend

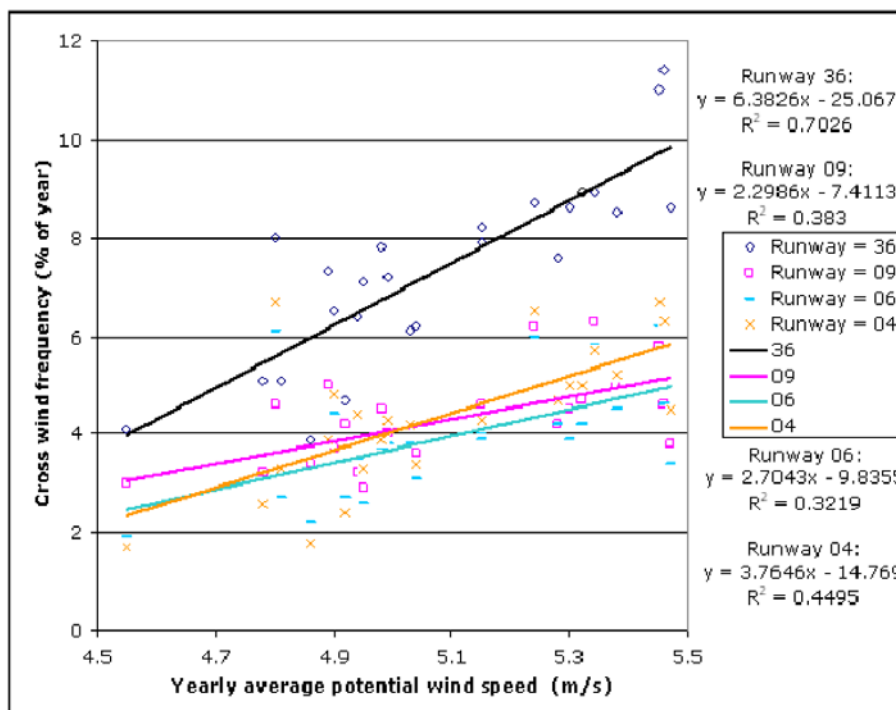


op basis van de uurlijkse data van 1971-1995. Hierbij is er vanuit gegaan dat de lokale ruwheid en de geostrofische windsnelheid van 1971-1995 representatief zijn voor het huidige klimaat (zie deelrapport wind voor onderbouwing). Het is beter om de windmetingen uit de periode 1971-1995 te gebruiken dan de windmetingen uit 1971-2011 omdat de windsnelheden en windstoten na 1995 afgerond zijn naar hele m/s en voor 1996 naar hele knopen. De dwars- en rugwindfrequenties berekend met de uurlijkse windmetingen van 1971-1995 zijn in tabel 3.2 samengevat.

Tabel3.2: Dwars- en rugwindfrequenties (% van de tijd) horend bij het windklimaat van rond 2011 en rond 2018 uitgaande van een onveranderd windklimaat en gebaseerd op de uurlijkse waarnemingen van 1971-1995. In 5 niveaus wordt onderscheid gemaakt tussen windarme (10%) t/m windrijke jaren (90%). In de tabel is af te lezen dat op baan 18/36 de helft van de jaren (50% percentiel) dwarswindfrequenties hebben \leq 7.6%. Op baan 18/36 varieert de dwarswindfrequentie van maximaal 4.9% in windarme jaren (10% percentiel) tot minimaal 9% in windrijke jaren (90% percentiel). Immers 90% van de jaren hebben dwarswindfrequenties \leq 8.9% dus de 10% hoogste jaren hebben frequenties die hoger zijn dan 8.9% (minimaal 9.0% dus).

2011/2018, geen trend in windsnelheid	Dwarswind frequentie (%)				Rugwind frequentie (%)								
	18 / 36	09 / 27	06 / 24	04 / 22	36	09	06	04	18	27	24	22	
Baan													
10% van de jaren \leq	4.9	3.2	2.5	2.5	20	22	24	24	12	10	11	11	
30% van de jaren \leq	6.4	3.7	3.4	3.9	23	26	27	26	14	11	12	12	
50% van de jaren \leq	7.6	4.2	3.8	4.3	24	27	29	30	14	13	13	13	
70% van de jaren \leq	8.4	4.6	4.2	5	27	29	32	32	16	14	14	15	
90% van de jaren \leq	8.9	5.5	5.9	6.4	27	32	35	34	17	15	16	16	

Figuur 3.10: significante lineaire verbanden (kleinste kwadraten methode) tussen de dwarswindfrequentie (percentage van het jaar) gebaseerd op de uurlijkse windmetingen uit periode 1971-1995 en de jaargemiddelde potentiële windsnelheid voor alle vertrek en landingsbanen op Schiphol (04/22, 06/24, 09/27 en 18/36).



Uitgaande van een dalende trend in de windsnelheid (maar geen verandering in de windrichting), worden de dwarswindfrequenties in 2011 en 2018 als volgt berekend:

- Eerst wordt het gemiddelde potentiële windsnelheid voor de periode 1969-2011 bepaald.
- Aangenomen wordt dat de gemiddelde potentiële windsnelheid voor de periode 1969-2011 representatief is voor het windklimaat van rond 1990
- Vervolgens wordt de windsnelheid in 2011 resp. 2018 berekend op basis van een -0.8% per decade trend ten opzichte van 1990
- Tot slot wordt uitgaande van deze windsnelheden en op basis van de lineaire verbanden in figuur 3.10 de dwarswindfrequentie per baan voor 2011 en 2018 bepaald

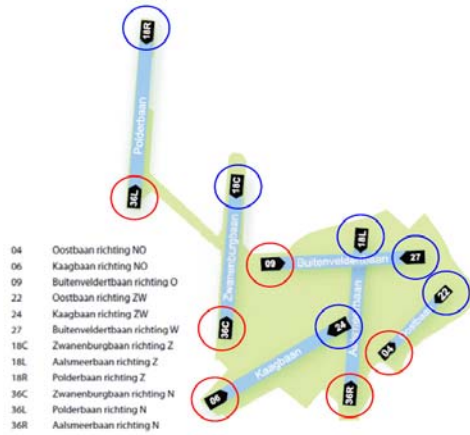
De berekening van de rugwindfrequenties voor 2011 en 2018 gaat op een vergelijkbare manier. Voor een deel van de Schipholbanen (figuur 3.11) kon echter geen significant lineair verband worden gevonden tussen de jaargemiddelde potentiële wind en de rugwindfrequentie (figuur 3.11).

Het direct toepassen van de trend op de uurlijkse waarnemingen (1971-1995) om zo een kunstmatige uurlijkse reeks te maken voor toekomstig klimaat en vervolgens bijbehorende dwars- en rugwindfrequenties te berekenen, bleek niet mogelijk. Met een trend in de gemiddelde windsnelheid van -0.8% per decade wordt bijvoorbeeld 8 knopen (boven de rugwindlimiet) pas na 134 jaar 7 knopen (onder de rugwindlimiet). Een afname van 8 naar 7 knopen, vraagt een 12,5% (1/8) afname in de windsnelheid. Met metingen gearhiveerd met een



precisie van 1 knoop veranderen de rugwindfrequenties de eerste 134 jaar niet, maar in werkelijkheid zal het aantal gevallen van rugwind veel sneller afnemen.

Figuur 3.11: alleen significante lineaire verbanden (bepaald volgens de kleinste kwadraten methode) tussen de rugwindfrequentie (percentage van het jaar) en de jaargemiddelde potentiële windsnelheid voor de banen die gebruikt worden van zuid naar noord (36), van west naar oost (09) en van zuid-west naar noordoost (04).



● Significant lineair verband voor banen 04, 06, 09, 36: bepaal rugwind frequenties uitgaande van een 0.8%/decade afname van de jaargemiddelde windsnelheid

● Geen significant lineair verband voor banen 18,22,24,27: gemiddelde rugwindfrequentie op basis van uurlijkse data 1971-1995 (is eigenlijk de maximale ruuwind frequentie)

De dwars- en rugwindfrequenties horend bij het windklimaat van 1969, 2011 en 2018 zijn samengevat in tabel 3.3a, b en c. Bij het berekenen van deze frequenties in een veranderend windklimaat is gebruik gemaakt van de lineaire relaties tussen de jaargemiddelde potentiële wind en de dwars- en rugwindfrequenties uit de periode 1971-1995 (in figuur 3.10 staan de dwarswindfrequenties). De standaarddeviatie van de dwarswindfrequenties t.o.v. de lineaire relaties is 1%. Dus 6% in tabellen 3.3a, b en c betekent eigenlijk tussen 5 en 7%. De standaarddeviatie van de rugwindfrequenties is 3%. Voor de banen zonder significante relatie tussen jaargemiddelde potentiële windsnelheid en rugwindfrequentie is de standaarddeviatie van de frequenties 2%. Voor deze banen verandert de rugwindfrequentie weinig bij veranderingen in jaargemiddelde windsnelheid en wordt uitgegaan van de frequenties die horen bij een onveranderd windklimaat (tabel 3.2 gebaseerd op uurlijkse waarnemingen 1971-1995). In feite moeten deze frequenties beschouwd worden als maximale rugwindfrequenties. Bij een scenario van afnemende windsnelheid t.g.v. toenemende regionale ruwheid zijn de windsnelheden en de rugwindfrequenties in 1971-1995 immers hoger dan in de periode erna.

Tabel 3.3a: Dwars- en rugwindfrequenties (% van de tijd) horend bij het windklimaat van rond 1969 uitgaande van de afnemende trend in de potentiële windsnelheid a.g.v. toenemende regionale ruwheid gemeten over de periode 1969-2011. De windsnelheden representatief voor de percentielen van 1969 worden berekend m.b.v. de trend (-0.8% per decade) en met uitgangspunt de windsnelheden representatief voor de percentielen van 1990 (de percentielen van de hele reeks omdat 1990 het middenjaar van de reeks is). Daarna worden de frequenties van deze tabel bepaald m.b.v. de lineaire verbanden tussen jaargemiddelde potentiële windsnelheid en frequenties (o.a. van figuur 3.10).

1969, afnemende trend in windsnelheid	Dwarswind frequentie (%)				Rugwind frequentie (%)			
	18 / 36	09 / 27	06 / 24	04 / 22	36	09	06	04
Baan								
10% van de jaren ≤	6.1	3.8	3.4	3.6	23	25	26	27
30% van de jaren ≤	6.9	4.1	3.7	4.1	24	26	28	28
50% van de jaren ≤	7.6	4.4	4	4.5	25	28	30	30
70% van de jaren ≤	8.7	4.8	4.5	5.2	26	30	32	32
90% van de jaren ≤	9.8	5.1	4.9	5.8	27	32	35	34

Tabel 3.3b idem voor 2011

2011, afnemende trend in windsnelheid	Dwarswind frequentie (%)				Rugwind frequentie (%)			
	18 / 36	09 / 27	06 / 24	04 / 22	36	09	06	04
Baan								
10% van de jaren ≤	5.1	3.4	2.9	3	22	23	24	25
30% van de jaren ≤	5.9	3.7	3.3	3.5	23	25	26	27
50% van de jaren ≤	6.6	4	3.6	3.9	23	26	27	28
70% van de jaren ≤	7.7	4.4	4	4.5	25	28	30	30
90% van de jaren ≤	8.7	4.7	4.5	5.2	26	30	32	32

Tabel 3.3c idem voor 2118

2018, afnemende trend in windsnelheid	Dwarswind frequentie (%)				Rugwind frequentie (%)			
	18 / 36	09 / 27	06 / 24	04 / 22	36	09	06	04
Baan								
10% van de jaren ≤	4.9	3.4	2.9	2.9	21	23	23	25
30% van de jaren ≤	5.7	3.7	3.2	3.4	22	24	25	26
50% van de jaren ≤	6.4	3.9	3.5	3.8	23	26	27	28
70% van de jaren ≤	7.5	4.3	4	4.4	25	28	29	30
90% van de jaren ≤	8.5	4.7	4.4	5.0	26	29	32	32

Tabellen 3.3a t/m c geven de resultaten van de berekeningen van de dwars- en rugwindfrequenties voor 1969 (het begin van de meetreeks waarop de trend in windsnelheid gebaseerd is), 2011 en 2018 weer, waarbij rekening is gehouden met een afnemende potentiële windsnelheid (ontdaan van de natuurlijke variatie gevonden in de geostrofische windsnelheid) van 0.8% per decade t.g.v. toenemende regionale ruwheid.

In de tabellen zijn dwars- en rugwindfrequenties voor "gemiddelde" jaren in blauw aangegeven. In feite representeert deze categorie jaren de mediaan omdat de verdeling niet helemaal symmetrisch is: in 50% van de jaren in de periode 1969-2011 is de wind hoger, in 50% lager.

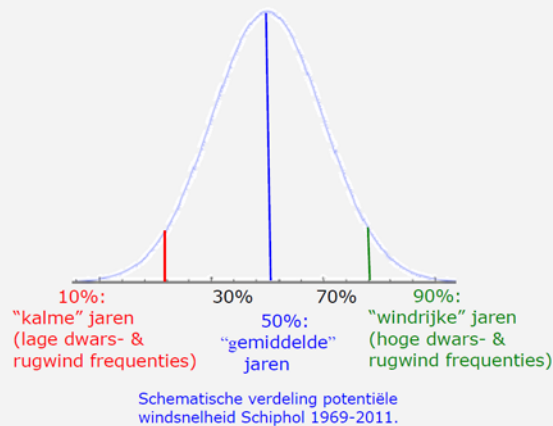
Om inzicht te krijgen in de jaar op jaar variatie van de dwars- en rugwindfrequenties, zijn deze ook bepaald voor de windarme (10%), windrijke (90%) en



tussenliggende (30 en 70%) jaren, dus voor 5 percentielen (zie kader). Voor tabel 3.2 zijn de percentielen van de frequenties berekend, van tabel 3.3a, b en c de percentielen van de windsnelheid. Bij een onveranderd windklimaat (tabel 3.2) wordt uitgegaan van de dwars- en rugwind frequentieverdeling van 1971-1995 en de frequenties worden vervolgens ingedeeld in percentielen. Bij een veranderend windklimaat (tabel 3.3a, b en c) wordt de windsnelheid voor de periode 1969-2011 ingedeeld in percentielen en worden de lineaire relaties tussen de frequenties en de windsnelheid (o.a. in figuur 3.10) gebruikt om per percentiel (en per baan) de dwars- en rugwindfrequentie horend bij de windsnelheid te bepalen.

Percentielen

Op basis van de verdeling van de jaargemiddelde potentiële windsnelheid op Schiphol (1969-2011) kan een indeling van de jaren gemaakt worden in percentielen waarbij het 10% percentiel de windarme of "kalmte" jaren vertegenwoordigt (met lage dwars- en rugwind frequenties), het 50% percentiel de gemiddelde jaren en het 90% percentiel de windrijke jaren (met hoge dwars- en rugwind frequenties). Op deze manier werden tabel 3a, b en c gemaakt.



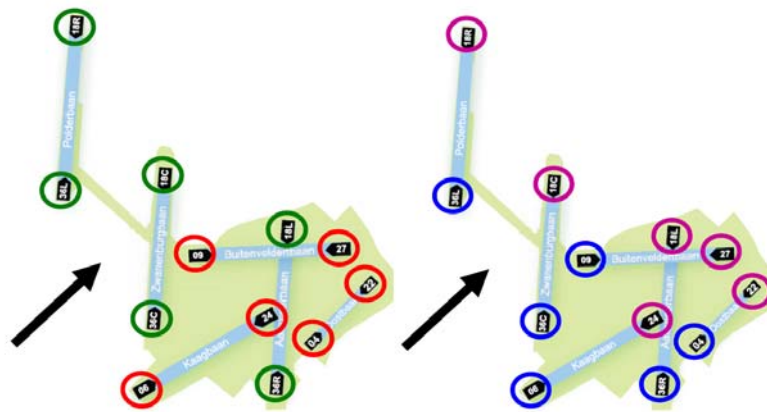
De dwars- en rugwindfrequenties van dezelfde baan kunnen niet opgeteld worden om de totale frequentie van de tijd van baanbeperkingen te krijgen omdat er soms tegelijkertijd sprake is van zowel dwars- als rugwind.

Vanzelfsprekend zijn met een overheersende windrichting uit een richting tussen west en zuidwest (figuur 3.13) de dwarswindfrequenties op de noord-zuid gerichte banen (18/36) hoger dan op de oost-west en noordoost-zuidwest gerichte banen (09/27, 06/24 en 04/22). Om dezelfde reden zijn de rugwindfrequenties, van bijvoorbeeld tabel 3.2 (ook opgenomen in figuur 3.13), op banen 36,09,06 en 04 (20-35%) hoger dan op banen 18,27, 24 en 22 (10-17%).

In principe zouden alle frequenties in tabel 3.2 niet groter moeten zijn dan die van 3.3a en niet lager dan 3.3b omdat de windsnelheid afneemt. Dit is het geval voor alle frequenties behalve die van het 10% percentiel. De verklaring hiervoor is dat de onderliggende datasets verschillend zijn: de percentielen van tabel 3.2 zijn berekend met een dataset van 25 jaar (1971-1995) en 3.3a en 3.3b met 43 jaar (1969-2011). Wat ook een rol speelt, is dat de afnemende trend in de windsnelheid procentueel van aard is: lagere windsnelheden nemen in abso-

lute waarde (bijvoorbeeld in knopen) minder af dan hogere windsnelheden. Dit wordt bewezen in het uitgebreide deelrapport over wind. De 90% percentielen van de jaargemiddelde windsnelheid nemen daarom sneller af (in knopen) dan de 10% percentielen. Dwars- en rugwindlimieten zijn gedefinieerd als absolute waarden (respectievelijk 20 en 7 knopen) dus een procentuele afname heeft een groter gevolg voor de dwars- en rugwindfrequenties voor het 90% percentiel dan voor het 10% percentiel van de jaargemiddelde windsnelheid. Daarom laten tabel 3a, b en c ook een met de tijd (en afnemende windsnelheid) kleiner wordende spreiding van de frequenties rondom de mediaan zien.

Figuur 3.13: bij overheersende windrichting uit richtingen tussen west en zuidwest zijn de dwarswind frequenties op de noord-zuid gerichte banen (18/36) hoger dan op de oost-west en noordoost-zuidwest gerichte banen (09/27, 06/24 en 04/22). Om dezelfde reden zijn de rugwindfrequenties op banen 36,09,06 en 04 (20-35%) hoger dan op banen 18,27,24 en 22 (10-17%). De tabel is gelijk aan tabel 3.2.



2011/2018, geen trend in windsnelheid		Dwarswind frequentie (%)				Rugwind frequentie (%)							
Baan	18 / 36	09 / 27	06 / 24	04 / 22	36	09	06	04	18	27	24	22	
10% van de jaren ≤	4.9	3.2	2.5	2.5	20	22	24	24	12	10	11	11	
30% van de jaren ≤	6.4	3.7	3.4	3.9	23	26	27	26	14	11	12	12	
50% van de jaren ≤	7.6	4.2	3.8	4.1	34	27	29	30	14	13	13	13	
70% van de jaren ≤	8.4	4.6	4.2	5.1	27	29	32	32	16	14	14	15	
90% van de jaren ≤	8.9	5.5	5.9	6.4	27	32	35	35	17	15	16	15	

De jaar op jaar variatie van de frequenties binnen het windklimaat van 2018 (tabel 3.3c) is veel groter dan de afname in de mediaan frequentie tussen 1969 (tabel 3.3a) en 2018. Voor zowel dwars- als rugwindfrequenties is het verschil tussen de 90 en 10% extreme frequenties ongeveer drie keer groter dan het verschil tussen de mediaan frequenties. Dit laat zien dat de veranderingen veroorzaakt door de toegenomen ruwheid van de afgelopen 40-50 jaar klein zijn t.o.v. de natuurlijke jaar op jaar variatie van de wind. Desondanks, heeft de afname van de windsnelheid belangrijke gevolgen voor de operatie op Schiphol. Zo komen bij windrijke jaren (90% percentiel) in het windklimaat van 2018 t.o.v. dat van 1969 gevaarlijke dwarswindsituaties op de 18/36 banen 1.3% minder vaak voor: in 1969 (tabel 3.3a) 9.8% en in 2018 (tabel 3.3c) 8.5% van de tijd. In relatieve zin t.o.v. de 9.8% dwarswindfrequentie van 1969, is de afname 13%.

Niet alle afnames van de dwars- en rugwindfrequenties zijn even sterk als in het voorbeeld hierboven. Sommige zijn zelfs kleiner dan de standaarddeviatie van de frequenties t.o.v. de lineaire relaties (van o.a. figuur 3.10) gebruikt om



tabellen 3.3a, b en c te maken: 1% (0.7% voor baan 09/27) voor dwarswind- en 3% voor rugwindfrequenties. Dit betekent dat de kleine verschillen tussen tabel 3.2b (2011) en 2c (2018) niet significant zijn: de afname van de windsnelheid over zo'n betrekkelijke korte periode is onvoldoende groot.

Tussen 1969 en 2018 is de afname van de dwarswindfrequenties van de belangrijkste banen (de drie 18/36 banen) significant voor alle percentielen. Over die periode is ook de afname van de rugwindfrequenties van baan 06 significant voor alle percentielen en de afname van de rugwindfrequenties van baan 09 voor het 90% percentiel. Dat de afname van de 18/36 dwarswindfrequenties significanter zou zijn dan voor de andere banen was wel te verwachten. Figuur 3.10 laat zien dat de relatie tussen jaargemiddelde potentiële windsnelheid en dwarswindfrequentie van baan 18/36 sterker is dan die van de andere banen. Hetzelfde geldt voor de afname van de rugwindfrequenties van baan 06 met een sterkere lineaire relatie dan de andere banen. Een verklaring hiervoor is dat de wind overwegend uit richtingen tussen west en zuidwest komt: juist de richtingen die het vaakst voor dwarswind op baan 18/36 en rugwind op baan 06 zorgen. Windsnelheden uit deze richtingen bepalen meer dan windsnelheden uit andere richtingen (omdat die minder vaak voorkomen) het jaargemiddelde van de windsnelheid. De minst significante verschillen tussen 1969 en 2018 zijn die van de 70% en 90% percentielen van de rugwindfrequentie van baan 36. Het 70% percentiel in 1969 is bijvoorbeeld 26% en met inachtneming van de standaarddeviatie van de lineaire relatie (3%) vertegenwoordigt dit cijfer de spreiding 23-29%. In 2018 is deze dwarswindfrequentie afgenomen naar 25%. Hoewel een stijging van de frequentie van 23% naar 25% onmogelijk is als de windsnelheid afneemt (en windrichting ongewijzigd blijft), zijn alle dalingen tussen 0 en 4% (van 29 naar 25%) waarschijnlijk met de grootste kans dat de afname 1% bedraagt. De afname van de resterende frequenties tussen 1969 (tabel 3.3a) en 2018 (tabel 3.3c) is duidelijker omdat de afname meer dan de helft is van de standaarddeviatie van de bijbehorende lineaire relatie. De resterende rugwindfrequenties nemen allemaal met 2% af terwijl de standaarddeviatie 3% is. Het 10% percentiel van baan 36 neemt bijvoorbeeld af van 20-26% (23% in tabel 3.3a) naar 21% (tabel 3.3c). Voor dwarswind nemen de mediaan frequenties (uitgedrukt in % van de tijd) met 0.5-1.2% af, afhankelijk van de baan. In relatieve zin (t.o.v. de frequenties in 1969) komt dat neer op een daling van 11-16%. Voor rugwind is de absolute daling 2-3% van de tijd en de relatieve daling 7-10%.

Samengevat luidt het antwoord op de tweede onderzoeksvraag:

2. Kan er een wetenschappelijk onderbouwde inschatting gemaakt worden van de gemiddelde dwars- en rugwindfrequenties per baan voor 2011 en 2018 en de spreiding om dat gemiddelde?
 - De dwars- en rugwindfrequenties berekend als representatief voor het windklimaat van rond 2011 waren niet significant anders dan voor 2018.
 - Vergeleken met het windklimaat van rond 1969 is de relatieve afname

van de mediaan dwarswindfrequentie voor 2018 11-16%, afhankelijk van de baan. De relatieve afname in de mediaan rugwindfrequentie is 7-10%.

- De jaar op jaar variatie van de dwars- en rugwindfrequenties in 2018 is 3 keer hoger dan de afname van de mediaan frequenties tussen 1969 en 2018 als gevolg van een afnemende trend in de windsnelheid. De spreiding van de frequenties t.o.v. de mediaan staat in tabellen 3.3a, b en c beschreven en zal in een toekomstig klimaat met hogere regionale ruwheid en lagere windsnelheden afnemen.

3.3 Conclusies

Voor de luchthaven Schiphol zijn de belangrijkste conclusies:

- De gemiddelde potentiële windsnelheid ontdaan van de natuurlijke variatie in de geostrofische wind laat twee scenario's zien: geen verandering of een afnemende trend van 0.8% per decade als gevolg van de toegenomen regionale ruwheid. Op basis daarvan blijven dwars- en rugwindfrequenties gelijk of nemen ze in vergelijking tot het windklimaat van rond 1969 af. Dwarswindfrequenties nemen in het afnemende wind scenario voor 2018 met 11-16% af (afhankelijk van de baan). De afname in de mediaan rugwindfrequentie is 7-10 %. De verschillen tussen 2011 en 2018 zijn niet significant ten opzichte van de nauwkeurigheid van de gebruikte methode. De procentuele afnamen gelden dus zowel voor 1 jaar vooruit (operationele planning) als voor 5-10 jaar vooruit (geluidsbelasting MER).
- De jaar op jaar variatie van de dwars- en rugwindfrequenties in 2018 is 3 keer hoger dan de afname van de mediaan frequenties tussen 1969 en 2018 als gevolg van een afnemende trend in de windsnelheid
- De uitkomsten van verschillende numerieke mondiale klimaatmodellen geven geen eenduidig beeld van wat er met de windsnelheid gaat gebeuren: een lichte afname, een lichte toename en geen verandering komen allemaal voor. Bovendien houden deze modellen geen rekening met veranderingen in ruwheid
- Van de geverifieerde windwaarnemingen zijn alleen de metingen in de periode 1971-1995 geschikt om dwars- en rugwindfrequenties te berekenen op de verschillende banen op Schiphol omdat de precisie van de gearchiveerde windsnelheden in 1996 veranderd is van hele knopen in hele m/s. De prognose van het baangebruik zoals op dit moment gedaan wordt bij de operationele jaarplanning en geluidsbelastingprognose zou verbeterd kunnen worden door naar andere windwaarnemingen te kijken dan de uurlijkse waarnemingen van de periode 1971 tot heden. De precisie van de windsnelheden na 1996 kan verbeterd worden door de hogere



precisie 1 minuut waarnemingen te valideren en naar uurlijkse waarden te aggregeren.

3.4 Aanbevelingen

- Verder onderzoek naar trend in windrichting (zie kader "Trend onderzoek windrichting")
- Resultaten onderzoek toepassen in Daisy
- 1 minuut data valideren en gebruiken voor bepaling van de frequenties (zie kader "Opslag windmetingen in m/s in plaats van in knopen")
- Klimaatonderzoek naar andere windgerelateerde weerselementen (windschering, zeewind, levensduur wervels (zie kaders "windschering" en "zeewind"))

61

*Figuur 3.14: 24-8-2012
Cross wind 45 kts Lajes
Azores (Paulo Santos,
Daily mail)*



Trend onderzoek windrichting:

Van Oldenborgh [2003] heeft op basis van metingen in De Bilt aangetoond dat er vanaf 1950 in de maanden februari t/m april sprake is van een toename van zuidwestenwinden en een afname van noordoostenwinden. Ook in het kader van dit onderzoek is geprobeerd te achterhalen of de windrichting (in dit geval op Schiphol) verandert, maar er waren sterke aanwijzingen dat de reeks inhomogeen was en het homogeniseren van de reeks m.b.v. de metadata zou een te tijdrovende exercitie worden.

Inhomogeniteiten:

- Verandering archivering van windmetingen in **1996** (daarvoor knopen, daarna m/s).
- Verplaatsing hoofdmeetterrein van lokatie Postrijck naar 19R in **1976**.
- Variabele meetlokaties van **1978 t/m 2003**.

1996: Bij een windsnelheid van nul, wordt geen windrichting gegeven. Vanaf 1996 is het aantal uren per jaar waarop dat gebeurt veel groter, omdat de windsnelheid vanaf dat moment gearchiveerd wordt in m/s en niet in knopen. Voor 1996 is een windsnelheid van minder dan een 0,5 knoop nul, vanaf 1996 geldt dat voor een windsnelheid van minder dan een 0,5 m/s (≈ 1 knoop). Daarmee verdubbelt het aantal gevallen met een windsnelheid van nul en geen windrichting (windstil weer). Dit veroorzaakt een kunstmatige negatieve trend (niet gebaseerd op klimaatverandering) voor andere windrichtingen: het aantal uren met wind uit een bepaalde richting neemt af omdat het aantal uren met geen windrichting na 1996 verdubbelt.

1976: Om geen last te hebben van de inhomogeniteiten veroorzaakt door de overgang van knopen in m/s in 1996, is onderzocht of de verdeling van de windrichting verandert voor windsnelheden ≥ 8.5 m/s. Deze drempel is gekozen omdat het de enige redelijk vaak voorkomende windsnelheid is waar de drempel in hele knopen bijna gelijk is aan die in hele m/s (≥ 17 knopen ofwel ≥ 16.5 knopen is gelijk aan ≥ 9 m/s ofwel ≥ 8.5 m/s omdat 16.5 knopen ≈ 8.5 m/s). Van de gevalideerde uurlijkse waarnemingen van de 10 minuten gemiddelde windsnelheid uit de periode 1969-2011 met waarden ≥ 8.5 m/s (hier is dus niet gekeken naar potentiële wind) laten de meeste windrichtingen tussen zuid en west een positieve trend zien. Voor richting 240 is de trend $+0.153\%$ per jaar. De andere significante positieve trends liggen tussen $+0.034$ en $+0.071\%$ per jaar. De negatieve trends zijn kleiner en liggen tussen -0.002 en -0.050% van de uren per jaar. Voor 40% van de richtingen met een negatieve trend is de trend significant (5% confidence level). Het is niet helemaal zeker of de (op zich significante) positieve trend in het aantal uren met windsnelheid ≥ 8.5 m/s uit windrichtingen tussen zuid en west een gevolg is van klimaatveran-



dering omdat in 1976 het hoofdmeetterrein verplaatst is van locatie Post Rijk naar 19R (tegenwoordig 18C genoemd). Op lokatie Postrijk stonden bomen op 60 m afstand in richtingen tussen 180 en 280 terwijl op 18C de ruwheiden in die richting veel lager zijn (en de windsnelheden dus hoger).

1978 t/m 2003: een derde inhomogeniteit kwam aan het licht bij het bestuderen van het aantal uren met een variabele windrichting: deze lag tussen 1978 en 2004 rond de 300 uur per jaar en in de periode ervoor en erna rond de 100 uur per jaar. Dat heeft te maken met het feit dat in de periode 1978 t/m 2003 metingen werden opgeslagen van de meetlocatie die het meest geschikt was voor de baancombinatie die op dat moment in gebruik was. Het is aannemelijk dat dit leidt tot een toename van het aantal uren met een variabele wind omdat omschakeling van de ene naar de andere locatie vaker plotselinge veranderingen in windrichting geeft. Vanaf begin 2004 zijn alle windmetingen weer afkomstig van de hoofdmeetterrein.

Windschering.

Baanveranderingen a.g.v. sterke windschering in de onderste 1000 voet komt volgens LVNL niet vaak voor en als het voorkomt, duurt het niet lang [Jacobs et al, 2011]. In elk geval wordt informatie over windschering niet gebruikt bij het maken van de jaarlijkse capaciteitsplanning. Metingen van de wind op 10 meter hoogte zijn leidend voor de operatie op Schiphol.

Windschering wordt niet direct gemeten: informatie over de effecten van windschering op het landende vliegtuig zijn van de piloten zelf afkomstig. Sinds de tweede helft van de jaren 80 staat er wel een SODAR op Schiphol, maar als piloten gevaarlijke windschering melden is dat vaak bij sterke wind en het is bekend dat SODARs bij windsnelheden op 10 m hoogte van meer dan 10 m/s onbetrouwbaar zijn [Mikkelsen, 2009]. Dit komt door een combinatie van toegenomen achtergrond geluid en de neutrale stabiliteitsopbouw die bij sterke wind optreedt.

De SODAR op Schiphol is sinds de tweede helft van de jaren 80 twee keer vervangen. De resolutie van de eerste SODAR was dusdanig slecht dat de inschattingen van windschering redelijk onnauwkeurig waren. Van de twee meest recente SODARs zijn in totaal 11 jaar metingen (met gelijke hoogteresolutie) bewaard gebleven. Voor een verschijnsel dat niet vaak voorkomt is de reeks aan de korte kant.

Zeewind.

Zeewind is niet in het rapport opgenomen omdat het zeewindfront slechts op 3% van de dagen in de zomermaanden mei t/m augustus Schiphol bereikt [Terpstra, 1981]. Een gedetailleerd onderzoek hiernaar kost zeer veel tijd. Zeewind als zodanig wordt niet geregistreerd, en zou dus eerst uit de beschikbare winddata moeten worden verkregen. Het is dan zeer lastig om frontpassages e.d. van zeewind te onderscheiden.



3.5 Literatuur

Bakker AMR and Van den Hurk BJM (2011) Estimation of persistence and trends in geostrophic wind speed for the assessment of wind supply in North-west Europe, *Clim. Dyn.* DOI 10.1007/s00382-011-1248-1

Gordijn H et al. (2007) De toekomst van Schiphol, Rapport van het Ruimtelijk Planbureau, NAI Uitgevers, Rotterdam. ISBN 978-90-5662-534-4

Heathrow Airport Limited (HAL) (2011), Climate Change Adaptation Reporting Power Report,

<http://archive.defra.gov.uk/environment/climate/documents/adapt-reports/08aviation/heathrow-airport.pdf>

Van den Hurk et al (2006) WR 2006-01: KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands. Wetenschappelijk rapport WR 2006-01, Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, De Bilt.

Jacobs, A., N. Maat, J. van der Meulen en H. Roozenkrans (2011), Een inventarisatie van kritieke weerparameters die de operatie op luchthaven Schiphol beïnvloeden, www.kennisvoorklimaat.nl

Mikkelsen T (2009) Remote sensing of wind by SODARS. *International Sustainable Energy Review*. **3**: 12-14.

Oldenborgh, G. en A. van Ulden (2003), On the relationship between global warming, local warming in the Netherlands and changes in circulation in the 20th century

Tennekes, H. (1973), The logarithmic wind profile, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 30, 234-238

Terpstra, J.M. (1981) Zeewind langs de Hollandse kust, enkele verwachtingsmethoden, Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut wetenschappelijk rapport 81-3.

Uppala et al. (2005) The ERA-40 re-analysis, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 131, 2961-3012.

Vautard R, Cattiaux J, Yiou P, Thépaut JN and Ciais P (2010) Northern Hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness, *Nature Geoscience* 3 (11), 756-761, doi:10.1038/ngeo979.

Verkaik, J. W. (2000), Evaluation of Two Gustiness Models for Exposure Correction Calculations, *Journal of Applied Meteorology*, 39(9), 1613-1626

Wever N en G. Groen (2009) Improving potential wind for extreme wind statistics. Wetenschappelijk rapport WR2009-02, Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, De Bilt.

Wever N (2012) Quantifying trends in surface roughness and the effect on surface wind speed observations, *Journal of Geophysical Research*, 117, D11104, doi:10.1029/2011JD017118.

Wieringa, J. en P. Rijkoort (1983), *Windklimaat in Nederland*, Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut



4 Zicht en bewolking

4.1 Introductie

Mist en bewolking zijn, op wind na, de belangrijkste meteorologische factoren die de veiligheid, en daardoor de operationele capaciteit van de luchthaven beïnvloedt. Hoewel in de loop van de jaren door de verbetering van de instrumenten vermindering van zicht voor piloten en verkeerstoren minder belangrijk is geworden, zijn er nog steeds strenge regels aan verbonden. In de praktijk hebben die regels op twee manieren invloed op de operatie: ze beperken de set van beschikbare baancombinaties (vooral waar het gaat om niet-parallelle banen). Bij ernstig gehinderd zicht neemt ook de vereiste 'separatie', de afstand tussen binnenkomende toestellen, toe. Dat dit laatste een capaciteitsdaling met zich meebrengt, is duidelijk. In een vast tijdsbestek kunnen er minder toestellen worden toegelaten. De overlast die mist veroorzaakt voor taxiënde toestellen is verder ook niet bevorderlijk voor de doorstroming (in feite is de hinder voor het verkeer aan de grond tegenwoordig zelfs belangrijker, omdat dat nog niet is opgelost door verbeterde instrumenten). Het uitsluiten van baancombinaties, kan ertoe leiden dat toestellen een minder gunstige route moeten volgen met het oog op geluidsbelasting, wat op zijn beurt ook noodgedwongen resulteert in een reductie van het aantal vluchten. Dit effect is secundair en minder belangrijk dan de toename van de separatie.

Een verwant weerfenomeen, dat van invloed is op de veiligheid en capaciteit, is laaghangende bewolking. Ten eerste belemmert dit het zicht op de baan, vanuit een landend toestel. Een tweede probleem is dat de verkeerstoren boven het wolkendek uitsteekt en zo de verkeersleiders het overzicht op de banen verliezen.

De luchthavenregels bij zwaar gehinderd zicht staan vast in de Beperkt Zicht Operaties. Hiervoor zijn vier klassen van weersgesteldheid gedefinieerd, de zogeheten LVP fasen A t/m D, die ernstige hinder betekenen (zie Tabel 4.1). In de fasen B, C en D zijn beperkingen van vliegbewegingen van kracht. Van de fasen A en B kan in principe ook al sprake zijn, wanneer de wolkenbasis verlaagd is. Het zicht wordt voor deze vier klassen in Tabel 4.1 uitgedrukt in 'RVR' (Runway Visible Range), wat directer een maat is voor hoe de piloten de baan waarneemen, dan de gemeten MOR (Meteorological Optical Range, zie box). MOR en RVR verschillen vooral in het (schemer-)donker. RVR is dan door de baanverlichting tegen een donkere achtergrond aanzienlijk gunstiger dan MOR. In deze studie beperken we ons tot MOR. De wolkenbasis ('CLB') in ft correspondeert met de hoogte (in ft) van de onderste bewolkingslaag, waarvan de bedekking overeenkomt met 5 octa of meer. Onder 'Capacity' is te zien dat in het ernstigste geval het aantal vliegbewegingen per uur van 104 terugloopt naar 36.

Met de mogelijkheid van dergelijke capaciteitsreducties moet rekening worden gehouden bij het opstellen van de jaarplannen. Bij die plannen wordt uitgegaan van een klimatologie die is gebaseerd op alle voorhanden zijnde weersgegevens. Nu is de perceptie op Schiphol, dat in de laatste jaren slecht-zicht situaties minder vaak voorkomen dan vroeger. Dit doet de vraag rijzen of de gebruikte klimatologie nog wel representatief is voor deze tijd, of dat alleen recente data hiervoor gebruikt zou moeten worden.

Tabel 4.1: Officiële restricties aan de capaciteit onder omstandigheden met beperkt zicht of een verlaagde wolkenbasis (Bron: Wijngaard et al., 2008).

Visibility class	Visibility / RVR (m)		Cloud base (ft)	Capacity (movements per hour)	Flow restrictions
Good	$VIS \leq 5000$	and	$CLB \leq 1000$	68 amhi or 74 depart. max 104/108 movements	No
Marginal	$1500 \leq VIS \leq 5000$	or	$300 \leq CLB \leq 1000$	As above but with independent parallel runways	No
LVP2) phase A	$550 \leq RVR \leq 1500$	or	$200 \leq CLB \leq 300$	56 amhi or 52 depart. max 80 movements	In general no
LVP phase B	$350 \leq RVR \leq 500$	or	$CLB \leq 200$	44 amhi or 52 depart. max 74 movements	Yes
LVP phase C	$200 \leq RVR \leq 300$			30 amhi or 17 depart. max 47 movements	Yes
LVP phase D	$RVR \leq 200$			16 amhi or 20 depart. max 36 movements	Yes

Indien de kans op slecht zicht inderdaad aantoonbaar is afgenomen, is het wenselijk om de klimatologie op dit gebied aan te passen en deze af te zetten tegen de klimatologie van een eerdere periode.

Daarnaast lijkt het erop dat het optreden van (dichte) mist plaats- (en dus baan-) gebonden is. Vooral van de Polderbaan (18R/36L) bestaat het vermoeden dat de locatie mist-gevoeliger is.

Tenslotte is er de wens om, indien mogelijk, verder in de toekomst te kijken en een uitspraak te doen over de invloed van klimaatverandering. De tijdshorizon waaraan men daarbij moet denken, ligt ongeveer 20 jaar in de toekomst, in overeenstemming met de tijdschaal voor het operationeel plan. Dat is aanzienlijk dichterbij dan de tijdshorizonten gebruikt in de meeste klimaatscenario's.



Samengevat: de volgende onderzoeksvragen dienen beantwoord te worden:

1. Is het klimaat op Schiphol voor wat betreft zicht en bewolking aantoonbaar veranderd sinds het begin van de metingen in de jaren '70 en is er een reden om de oudste waarnemingen (met het oog op de planning) te negeren (en sinds wanneer) ?
2. Hoe zien mist-kansen er in het huidige klimaat eruit, ook in vergelijking met het verleden?
3. Zijn bepaalde Schiphol locaties structureel mist-gevoeliger dan andere?
4. Wat valt er te zeggen over de ontwikkeling van mist-kansen ongeveer 20 jaar in de toekomst ?

Runway Visible Range versus Meteorological Optical Range

In de meteorologie wordt 'MOR' (Meteorological Optical Range) gebruikt als maat voor het zicht. Deze maat is een zuivere eigenschap van de atmosfeer en is gedefiniëerd als de afstand waarover het licht van een unidirectionele licht-bron met 95% afneemt, de zogeheten extinctielengte. Als wordt aangenomen dat licht dat zich in één richting voortplant, per afgelegde afstand in gelijke mate vermindert (geabsorbeerd of verstrooid door het medium) met extinctiecoëfficiënt λ (in m^{-1}), dan is na x meter de intensiteit afgenomen met factor $\exp(-\lambda x)$. De bijbehorende MOR waarde is dan gelijk aan $\ln(20)/\lambda$. Dit zou ook de afstand zijn waarop het gemiddelde menselijk oog nog contrast kan onderscheiden.

In de luchtvaart wordt 'RVR' (Runway Visual Range) als maat gehanteerd. Hierin wordt ook rekening wordt gehouden met het waarnemen van de baanverlichting tegen de (donkere) achtergrond, dus sterker gebonden aan de praktijk van binnenkomende vliegtuigen. We beperkten ons in dit onderzoek tot MOR en beschouwen die als een ondergrens: bij daglicht zijn RVR en MOR nagenoeg gelijk, in schemer en duister kan het zicht zoals het ervaren door piloten aanzienlijk gunstiger zijn dan de MOR aangeeft.

Bewolgingsgraad en –hoogte

De bewolgingsgraden, uitgedrukt in achtste delen (octa's) van de hemel bedekt met wolken, is voor de luchtvaart onderverdeeld in de klassen CLR (clear sky, 0/8 = geen bewolking), FEW (1/8-2/8), SCT (scattered, 3/8 – 4/8), BKN (broken 5/8 – 7/8) en OVC (overcast 8/8, volledig wolkendek). De bewolgingshoogte (ceiling) die in deze context van toepassing is, is gedefinieerd als de hoogte van de onderste 'broken' of 'overcast' bewolkingslaag.

4.2 Methode en resultaten

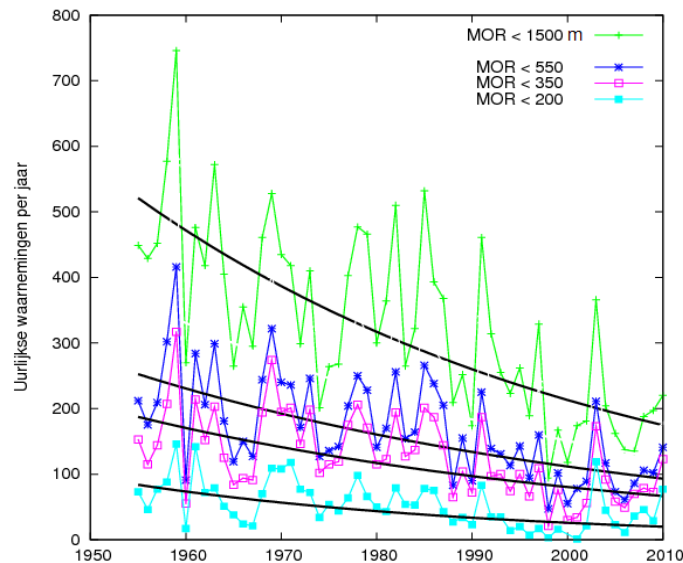
4.2.1 Waargenomen veranderingen

Is het klimaat op Schiphol voor wat betreft zicht en bewolking aantoonbaar veranderd sinds het begin van de metingen in de jaren '70 en is er een reden om de oudste waarnemingen (met het oog op de planning) te negeren (en zo ja, sinds wanneer) ?

Om deze vraag voor zicht te beantwoorden, is het aantal uurlijkse zichtwaarnemingen bepaald die gekozen drempelwaarden onderschrijden. Deze drempels corresponderen met de bovengrenzen van de LVP-klassen (behalve dat deze laatste betrekking hebben op RVR). Figuur 4.1 geeft van deze aantallen het verloop in de tijd weer. Hieruit blijkt een duidelijke daling. Als wordt aangenomen dat de relatieve afname over deze periode constant is, m.a.w. dat de frequentie exponentieel afneemt, geven de zwarte krommen het bijbehorende exponentiële verband.



Figuur 4.1: Aantal uren per jaar met MOR beneden de aangegeven drempels. De zwarte lijnen laten de trend zien en representeren een constante procentuele afname (exponentiële krommen).



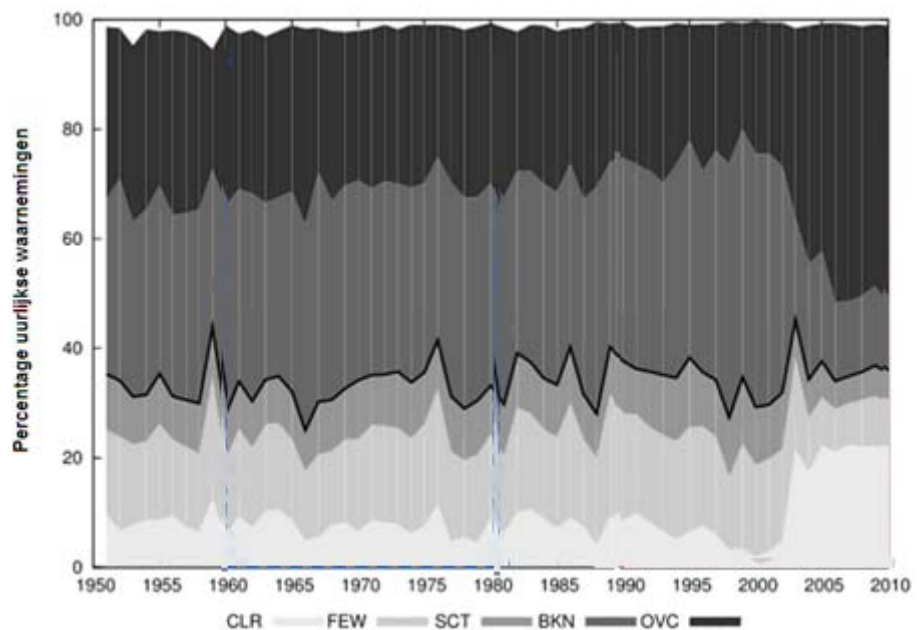
Voor alle drempels is deze afname ongeveer 2% per jaar. De jaarreeksen lijken zich op het oog anders te gedragen na de jaren '80, vooral voor de hoogste drempel. Homogeniteitstesten op deze jaarreeksen wijzen op een breuk in de buurt van 1986. Een dergelijke snelle verandering wordt ook vermeld door Vautard et al. (2009) (hoewel zij spreken van de laat jaren '80 en vroege jaren '90) en van Oldenborgh et al. (2010). In beide genoemde studies zijn zichtmetingen vergeleken voor een groot aantal locaties verspreid over Europa. Vautard et al. (2009) zien dat de afname van het aantal dagen met zicht minder dan 8 km het grootst is. Ruimtelijk gezien is deze afname sterk gecorreleerd met de afname in de uitstoot van zwaveldioxide. Daaruit kan geconcludeerd worden dat het terugdringen van de emissies eind jaren '80 en zodoende het verbeteren van de luchtkwaliteit de grootste bijdrage levert in de afname van slecht-zicht dagen. Van Oldenborgh et al. (2010) komen tot dezelfde conclusie, maar trekken de analyse van Vautard door naar lagere zichtdrempels (tot beneden 200 m). Behalve naar de invloed van de luchtkwaliteit, kijken zij naar de invloed van de circulatie en het landgebruik. De resultaten tonen (voor de Bilt) het begin van de neergaande trend in 1987 duidelijk aan, voor alle zichtdrempels. Voor de laagste zichtdrempel (dus dichte mist) is de correlatie met de emissie van zwaveldioxide lager dan voor de hogere zichtdrempels, maar nog altijd significant. De invloed van de circulatie ligt ingewikkelder, omdat deze van twee kanten werkt. De wind zorgt voor de juiste condities van mistvorming (aanvoer van vocht, koude of juist natte lucht, e.d.), maar beïnvloedt ook het transport van aerosolen. Voor de Bilt blijkt een anomale oostelijke stroming bevorderlijk te zijn voor mistvorming op dezelfde dag. De wind op zo'n dag zal, gegeven de klimatologische westelijke stroming, kalm zijn en de atmosfeer stabiel en onbewolkt door het nabijgelegen hogedrukgebied. Door de afkoeling ontstaat mist. Maar aangezien een dergelijke stroming ook minder schone lucht aanvoert, zijn het effect van luchtkwaliteit en het directe effect van de circulatie moeilijk te scheiden. Van Oldenborgh et al. (2010) concluderen echter dat de trend in zicht niet uit een circulatieverandering verklaard kan worden. Deze vertoont namelijk geen significante trend. Als laatste is niet uitgeslo-

ten dat de uitbreiding en bebouwing van het luchthaventerrein en de invloed van Amsterdam een kleine bijdrage leveren aan de zichtverbetering.

Op basis van de geringe meteorologische invloed en de rol van de luchtkwaliteit verwachten Van Oldenborgh et al. (2010) dat de directe invloed van het klimaat op de trend in zicht in de toekomst nóg kleiner zal zijn. Voor de jaar-op-jaar variaties is de circulatie wél belangrijk. Overigens laten deze Europa-brede studies zien dat het niet waarschijnlijk is dat de verandering van het zicht op Schiphol is veroorzaakt door wijzigingen in de meetpraktijk.

Voor wat betreft de bewolgingsgraad is er gekeken naar de jaar-op-jaar variaties van het optreden van de vijf bewolkingsklassen CLR, FEW, SCT, BKN en OVC (voor gevallen buiten deze klassen was de bovenlucht niet zichtbaar door te dichte mist en bewolgingsgraad dus ongedefinieerd). In Figuur 4.2 is het resultaat hiervan te zien.

*Figuur 4.2 Onderverdeling van uurlijkse waarnemingen per jaar in bewolkingsklassen
De zwarte, getrokken lijn markeert de 5/8 (BKN) grens.*



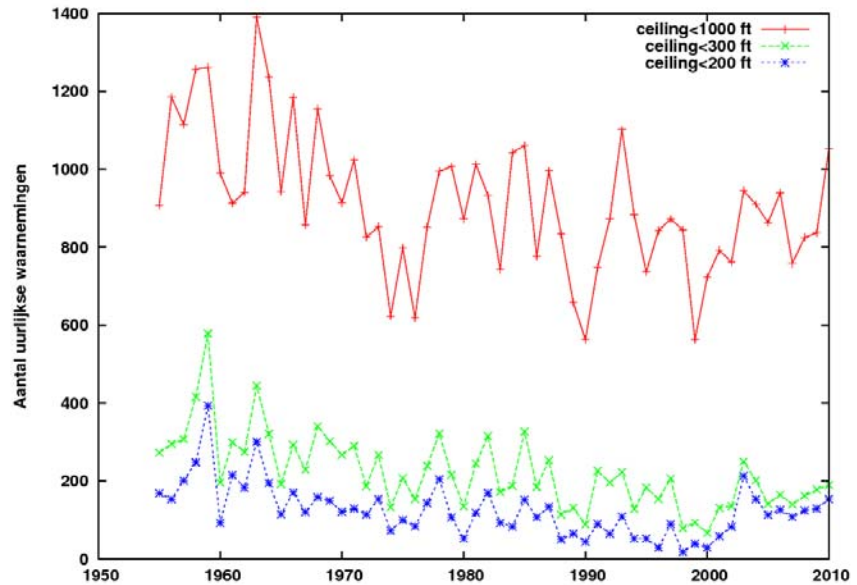
Wat opvalt, is dat vanaf 2002 het aandeel van de middenklassen sterk afgenomen is. Dit is waarschijnlijk veroorzaakt door de overgang van de menselijke waarnemer naar de ceilometer zoals eerder beschreven. Voor de luchtvaart is vooral de grens van 5/8 bewolking van belang in verband met de 'ceiling' (in de figuur aangegeven met de dikke zwarte lijn). Hierin zijn op het oog geen systematische verschillen te zien die boven de toevallige fluctuaties uitsteken. Ook de twee klimatologische perioden 1961-1980 en 1991-2010 laten geen duidelijk verschil zien. Figuur 4.8 laat een afnemende tendens zien van het aantal uren per jaar waarop de ceiling zich onder de kritieke hoogten van resp. 1000, 300 en 200 voet bevindt. Deze tendens lijkt op te houden na 2000. Gezien de boven



beschreven invloed van de overgang naar een andere meetpraktijk, is er mogelijk reden om de waarnemingen op dit punt te wantrouwen.

Figuur 4.3: Aantal uurlijkse waarnemingen per jaar met ceiling hoogte (5/8, BKN of meer) onder de kritieke drempel hoogten

73



Samengevat kan vraag 1 als volgt beantwoord worden

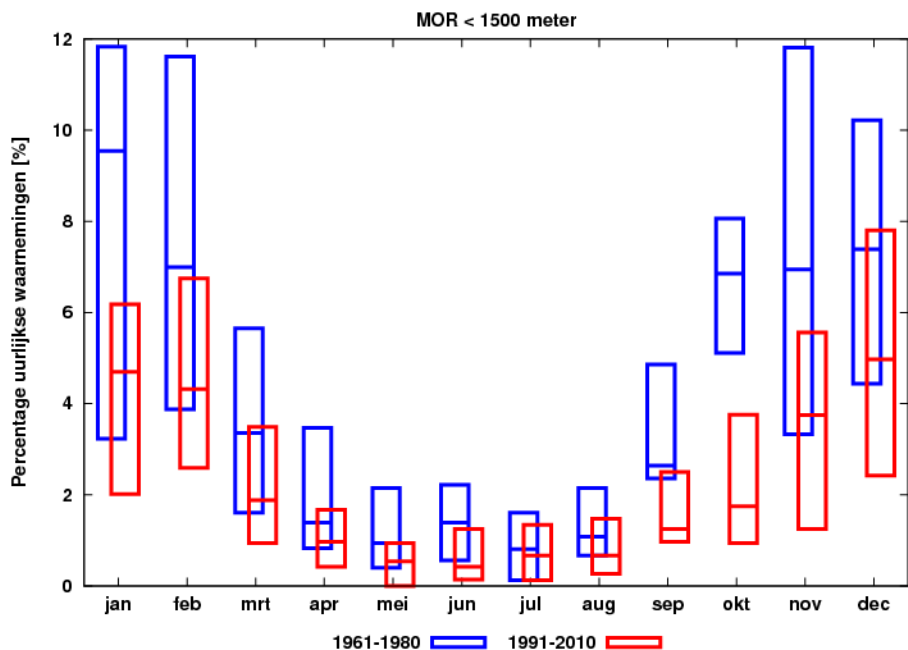
- De verandering in de frequentie van het optreden van slecht zicht, in de luchtvaart-definitie is duidelijk waarneembaar in de zichtgegevens voor Schiphol. Zichtwaarnemingen van voor de jaren '80 kunnen niet meer als representatief beschouwd worden voor het heden.
- Uitgaande van een constante relatieve afname, vermindert de frequentie van mistgevallen beneden de LVP-drempels met ongeveer 2% per jaar. Anderzijds suggereren de tijdreeksen van die frequenties een abrupte verandering halverwege de jaren '80, in overeenstemming met wat Van Oldenborgh (2010) et al. ook vinden voor andere locaties in Europa.
- Ook in de frequentie van een verlaagde ceiling, voor alle gedefinieerde kritische niveaus is er een afname te zien ongeveer tot na het jaar 2000. Vanaf 2002 worden bewolkingsgraad en hoogte gemeten in plaats van waargenomen, wat hier ook invloed zou kunnen hebben.

4.2.2 Mist-kansen in het huidige klimaat

Hoe zien mist-kansen er in het huidige klimaat eruit, ook in vergelijking met het verleden? Als we voor het opstellen van de huidige klimatologie een homogeen interval moeten kiezen ligt het voor de hand om deze na die breuk te laten beginnen. Er is voor gekozen om daarvoor 1991-2010 te nemen. De uitkomsten zijn vergeleken met die van een 20-jarige periode voor de breuk, namelijk 1961-1980.

Voor beide 20-jarige perioden is in elk jaar per maand het percentage uren met MOR<1500 meter (dus in één van de LVP-klassen) bepaald en vervolgens per kalendermaand geordend. Figuur 4.2 laat de resulterende 25-, 50-, en 75-percentielen zien (resp. onderste, middelste en bovenste streep van de balk). De verandering in de mediaan is het grootst in de maanden januari en november. In de laatste van die twee is de verandering ook groot ten opzichte van de jaar-op-jaar variaties. De verschillen tussen de jaren nemen over het hele jaar af, vooral in de maanden januari, februari en november. De 'slechtste' jaren (de top van de balkjes) veranderen het meest in januari, februari en november. De resultaten voor de andere zichtdrempels tonen een vergelijkbaar patroon. De jaarlijkse gang blijft zichtbaar, maar de kans op mist neemt in de periode 1991-2010 na de zomer minder snel toe dan het geval was in 1961-1980.

Figuur 4.4: Q25-Q75 interval van de fractie van het aantal uurlijkse waarnemingen per jaar met MOR<1500.

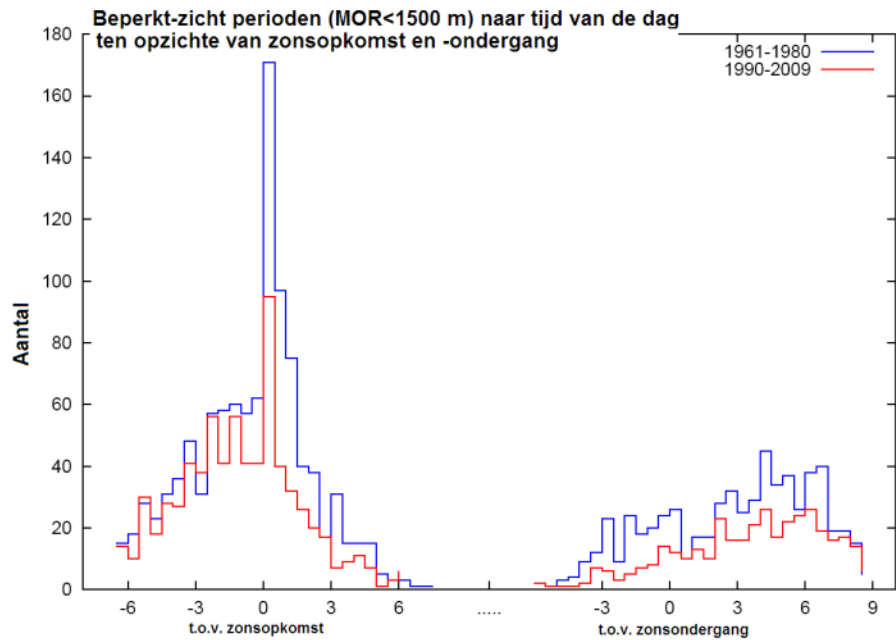


Figuur 4.4 geeft een beeld van de dagelijkse gang in beide tijdvakken voor wat betreft de begintijd waarop de mist ontstaat ten opzichte van de zonsopkomst (links) en ondergang (rechts). Het zicht verslechtert merkbaar rond zonsopgang, wanneer de temperatuur op z'n laagst is, en iets minder bij zonsondergang, wanneer de afkoeling inzet en de vochtigheid op z'n hoogst is. Dat zijn vermoedelijk gevallen van stralingsmist. Rond zonsopkomst zit ook de grootste absolute afname in mistfrequentie tussen beide tijdvakken.



Figuur 4.5: Aantal slecht-zicht perioden (MOR<1500 m, LVP klasse A of slechter) per uur van aanvang relatief ten opzichte van zonsopkomst en -ondergang.

75



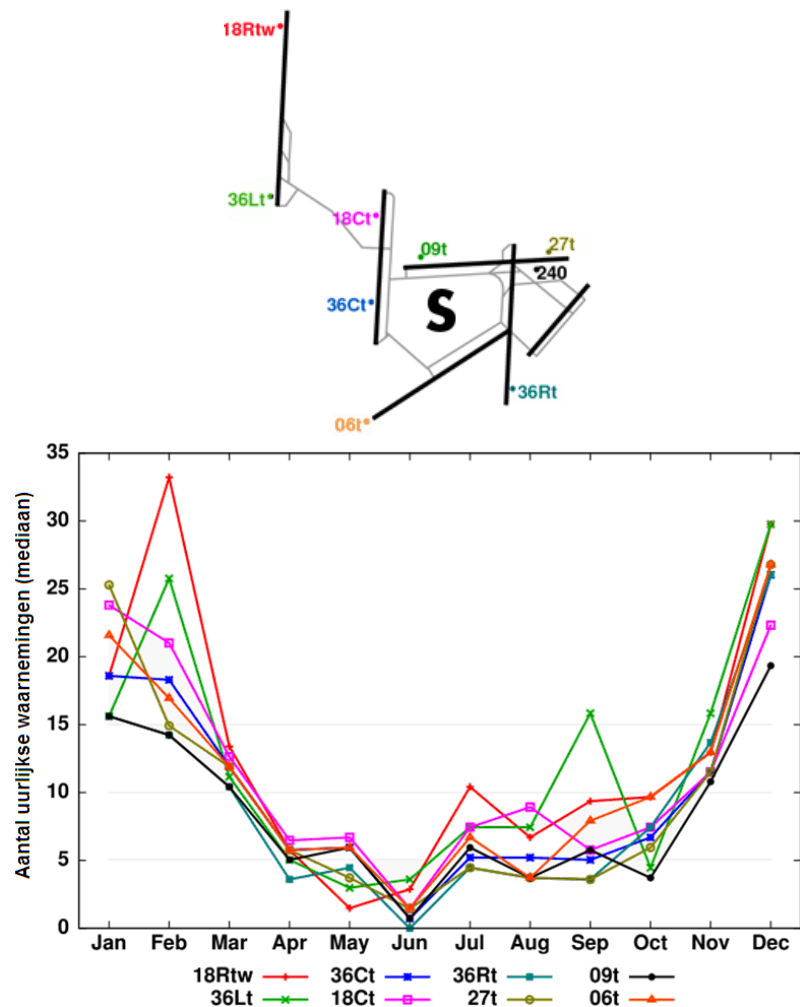
Samengevat kan vraag 2 als volgt beantwoord worden

- De grootste reductie in de mistkans wordt gevonden in de maanden januari, februari en november. Ook de spreiding tussen jaren neemt in die maanden sterk af.
- Over de dag gezien, is de absolute verandering het grootst rond zonsopkomst.

4.2.3 Plaatselijke mistvorming

Zijn bepaalde Schiphol locaties structureel gevoeliger voor mistvorming dan andere? Om deze vraag te beantwoorden, moeten zichtwaarnemingen gebruikt worden die afkomstig zijn van de sensoren langs de banen. Het gaat hier dus om automatische waarnemingen. Deze zijn vooral bedoeld als informatie voor de luchtverkeersleiding. Helaas gaan de gegevens die in dit project beschikbaar waren, niet verder terug in de tijd dan februari 2003. Vandaar dat 2004 hier als beginpunt is genomen en 2010 als eindpunt.

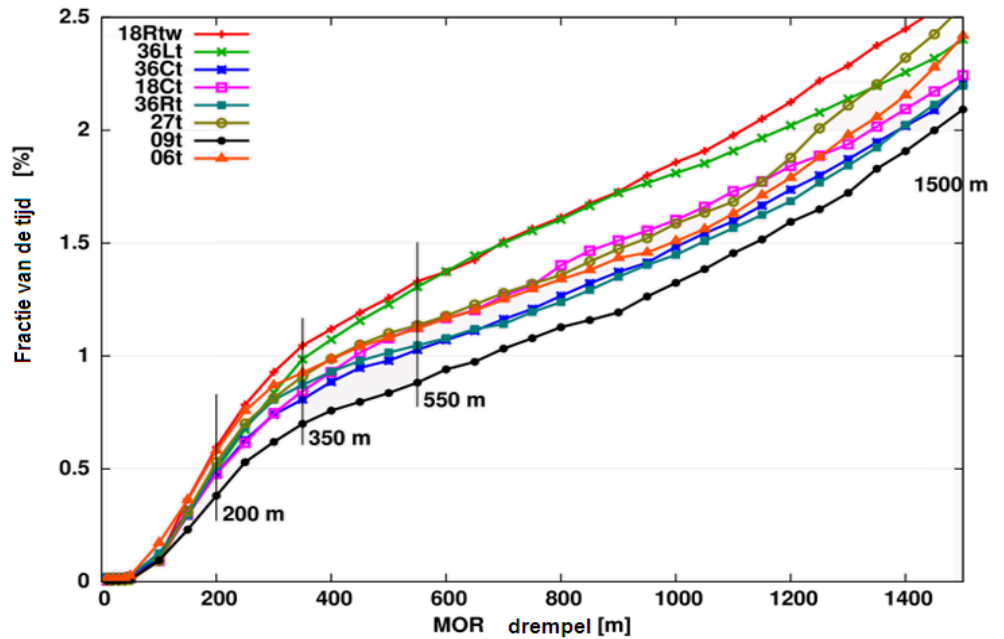
Figuur 4.6: Verschillen in de gemiddelde jaarlijkse gang van het aantal uren met slecht-zicht per kalender maand (<550 m) tussen locaties op het terrein van Schiphol voor de periode 2004-2009. Links een overzicht van het banenstelsel en de waarneemlocaties.



In Figuur 4.6 is te zien hoe de jaarlijkse gang van locatie tot locatie ('touch-down' posities, of het begin van de banen) kan verschillen. De metingen voor de verschillende locaties zijn pas volledig beschikbaar vanaf februari 2003. Het onderscheid tussen de locaties is iets duidelijker zichtbaar voor situaties met sterke beperkingen van het zicht (dichtere mist is kleinschaliger van karakter en vertoont grotere ruimtelijke verschillen, vandaar dat hier voor een drempel van 550 m is gekozen). De onderlinge verschillen voor een zichtdrempel van 550 m zijn vooral groot in de wintermaanden (dec-feb) en verder valt september op. De Polderbaan (noordkant 18Rtw in rood en zuidkant 36Lt in groen) wijkt enigszins af in februari, juli en september en is ook in december het vaakst in mist gehuld. De Polderbaan ligt het verst van het Schiphol-complex (in het kaartje in Figuur 4.6 aangeduid met een "S") en midden tussen akkerbouw. Mogelijk ligt het ook iets lager, dus het verschijnsel dat de mistveroorzakende koude lucht naar het laagste punt stroomt kan ook een rol spelen.



Figuur 4.7: Het percentage van de minuut-waarnemingen in de periode 2004-2009 beneden de zichtdrempel voor elke locatie op Schiphol uitgezet tegen de drempelwaarde.



Het onderscheid is duidelijker te zien in Figuur 4.7, waarin de kans van onderschrijden is uitgezet tegen de drempelwaarde (in zekere zin op te vatten als een cumulatieve kansverdeling). De Polderbaan (18Rtw, rood en 36Lt, groen) heeft vooral een hoger percentage met slecht zicht tussen drempels van 400 en 1200 meter. Het westelijk eind van de Buitenveldertbaan (09t) blijkt veel minder mistgevoelig. Een verklaring kan zijn, gezien de ligging van de Buitenveldertbaan 09, dat het nabijgelegen Schiphol-complex hier voor een lokaal "stadseffect" zorgt, waarbij extra opwarming door de bebouwing de vorming van mist verhindert of de mist eerder laat verdwijnen. Een mogelijk andere verklaring is dat de Zwanenburgbaan (18C/36C) dicht genoeg bij locatie 09t ligt om, als hij in bedrijf is, daar de mistvorming negatief te beïnvloeden. Vertikale menging veroorzaakt door passerende toestellen zorgt ervoor dat mist oplost. Zodoende zou er op locatie 09t minder vaak mist kunnen hangen, zelfs als de Buitenveldertbaan zelf niet in gebruik is. Uit het voorgaande kan men de conclusie trekken dat het interessant zou zijn om de mistkansen ruimtelijk te bekijken, conditioneel op het baangebruik, omdat mistvorming en baangebruik mogelijk afhankelijk zijn, en we vooral geïnteresseerd zijn in mist op de in gebruik zijnde baan.

Samengevat kan vraag 3 als volgt beantwoord worden

- Ruimtelijke verschillen in de frequentie van slecht zicht hangen af van de gebruikte zichtdrempel. Voor een zichtdrempel tussen 300 en 1200 meter onderscheidt baan 18R/36L zich duidelijk in negatieve zin van de andere banen, terwijl locatie 09t duidelijk minder mistgevoelig is.

4.2.4 Slecht-zicht klimatologie

Hoe is de lengte van slecht-zicht periodes veranderd in de periode 1991-2010 ten opzichte van 1961-1980? Uit de uurlijkse zichtwaarnemingen die ons ter beschikking staan, kan ook de statistiek van de duur van mistperiodes worden afgeleid. Hierbij moet worden opgemerkt dat deze uurlijkse waarnemingen momentopnamen zijn, die niet noodzakelijk representatief zijn voor het hele uur waarbinnen ze zijn waargenomen. Niettemin zullen we stilzwijgend aannemen dat opeenvolgende uren waarvoor slecht zicht is gerapporteerd, een aaneengesloten slecht-zicht periode representeren.

Als we het gemiddelde bepalen van opeenvolgende uren waarvoor zicht beneden de drempels van 550, 1500 en 5000 meter bepalen voor de tijdvakken 1961-1980 en 1991-2010 (over het hele jaar), dan krijgen we de onderstaande tabel:

	1961-1980	1991-2010	Afname
550 meter	3.77 uren	3.28 uren	13 %
1500 meter	4.16	3.65	12
5000 meter	7.00	5.49	22

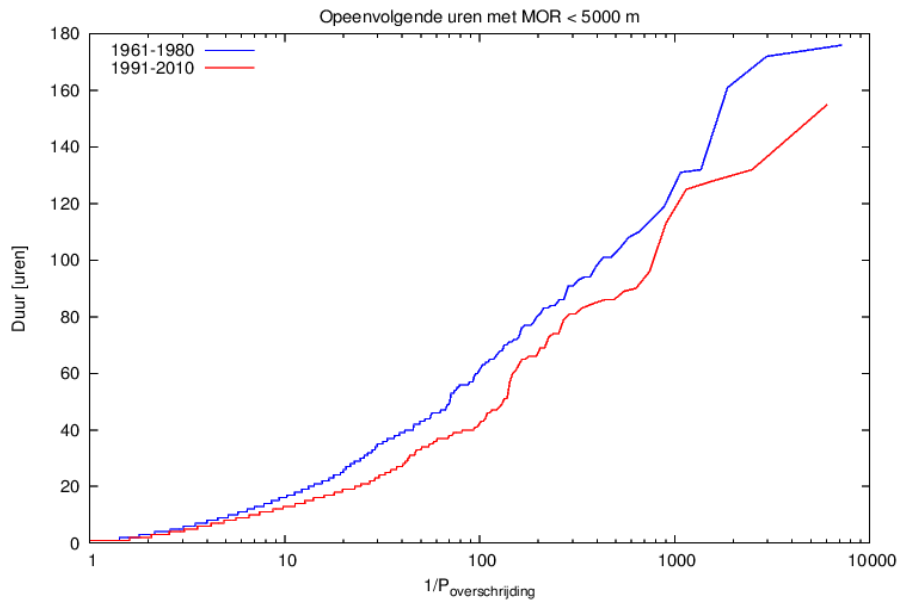
Voor alle zichtdrempels neemt de gemiddelde duur van een slecht-zicht periode af, zij het dat deze afname relatief iets sterker is voor 5000 meter (d.w.z. periodes die geheel in de categorie 'marginaal' of slechter vallen). Behalve naar het gemiddelde kan gekeken worden naar de statistiek van meer zeldzame (en dus langere) periodes met slecht zicht. Deze kunnen gepresenteerd worden in een exponentiële weergave, waarin horizontaal logaritmisch de inverse van de overschrijdingskans uit staat en vertikaal de duur van de periode. Twee voor-



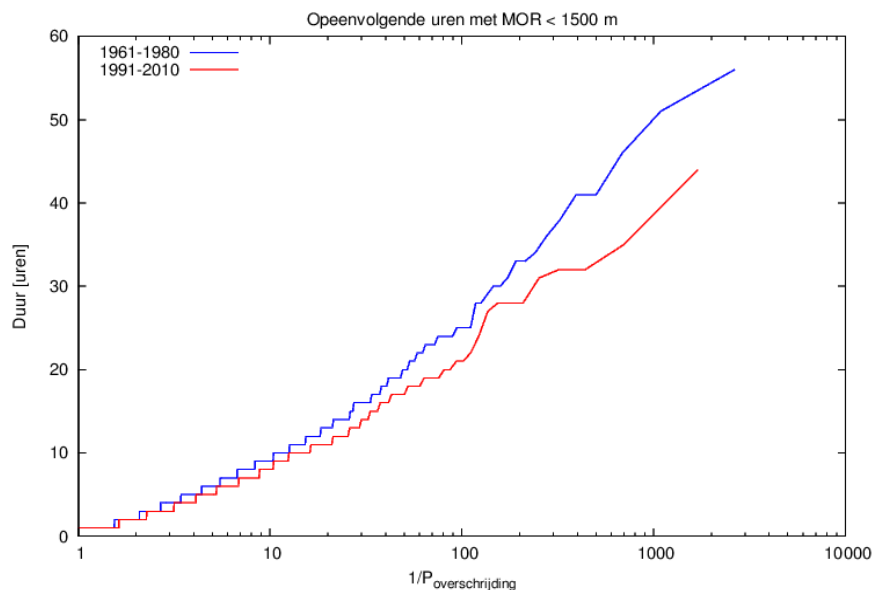
Figuur 4.8: Een exponentiële waarschijnlijkheidsplot van de duur van een aaneengesloten periode met MOR beneden de 5000 meter voor de tijdvakken 1961-1980 (blauw) en 1991-2010 (rood). De overschrijdingskans hier genoemd correspondeert met de fractie van het aantal mistperiodes in het desbetreffende tijdvak.

79

beelden hiervan zijn getoond in Figuur 4.6 en Figuur 4.7.



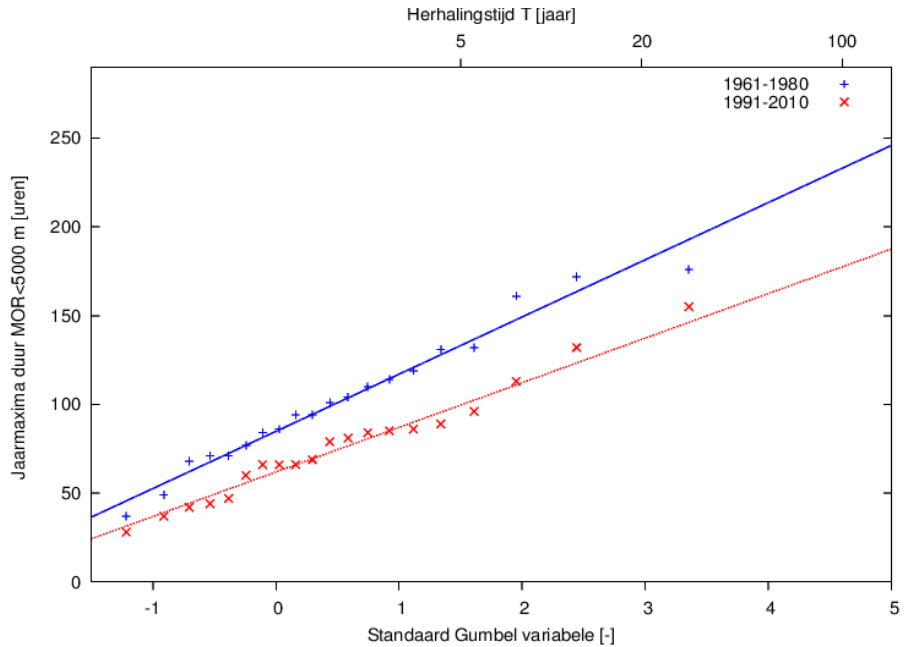
Figuur 4.9: Gelijk aan Figuur 4.8, maar nu voor de gevallen met MOR beneden de 1500 meter.



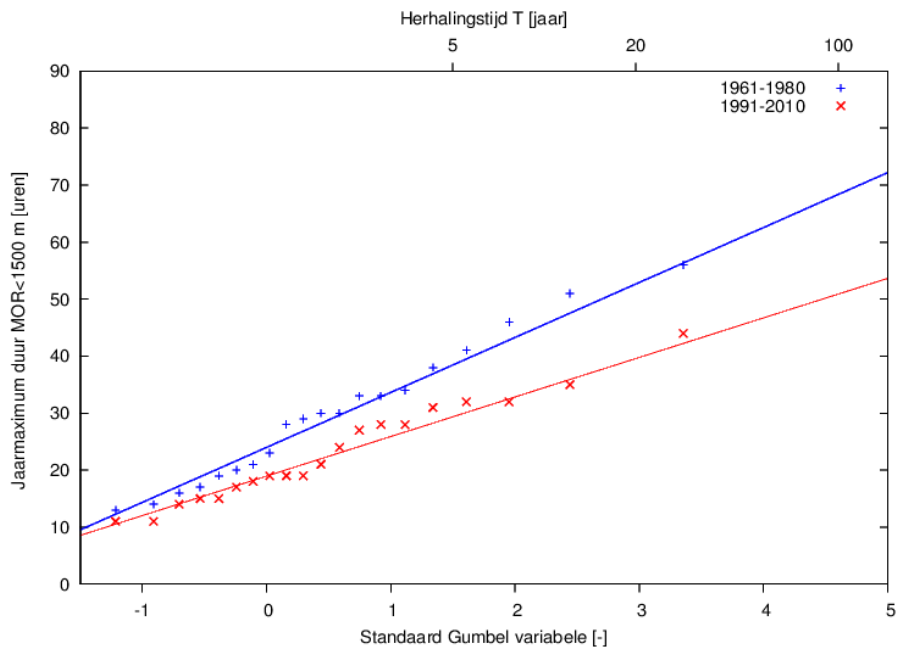
De overschrijdingskans van bijvoorbeeld één honderdste ($1/P=100$) betekent dat één op de honderd aangetroffen slecht-zicht periodes langer was dan de bijbehorende duur. Beide figuren geven aan dat verbeterend zicht ook betekent dat de fractie van mistperiodes van een gegeven (lange) duur in de tijd zijn afgenomen, zowel voor zichtdrempels van zowel 5000 meter als 1500 meter. Omdat het aantal gevallen ook van jaar tot jaar varieert, zijn deze figuren niet meteen te interpreteren in termen van herhalingscycli. Daarvoor kan naar de jaarmaxima gekeken worden in zogeheten Gumbelplots (zie annex ...voor een toelichting). Hierbij worden alleen de langste periodes voor elk jaar geselecte-

teerd, die dan in lengte worden gesorteerd. Dergelijke plots zijn te zien in figuren 4.10 en 4.11.

Figuur 4.10: Gumbelplot (met een gefitte Gumbelverdeling) van de jaarmaximale duur van een aaneengesloten periode met MOR beneden de 5000 meter voor de tijdvakken 1961-1980 (blauw) en 1991-2010 (rood).



Figuur 4.11: Gelijk aan Figuur 4.10, maar nu voor de gevallen met MOR beneden de 1500 meter.



De horizontale assen hebben een andere betekenis dan die in de exponentiële plots: ze zijn zó getransformeerd dat rechte lijnen in deze figuren een Gumbelverdeling representeren en de bovenste horizontale as toont de bijbehorende herhalingstijden in jaren. De getrokken lijnen geven de Gumbelverdelingen



weer die het best bij de data (punten) passen. Zoals te zien, kunnen deze lijnen worden doorgetrokken om een uitspraak te doen over gebeurtenissen met herhalings tijden buiten het bereik van de waarnemingen (d.i. 20 jaar). Eerlijkheid gebied te zeggen dat deze gebeurtenissen zijn omgeven met een onzekerheid (groter bij grotere herhalings tijden), waarop hier niet wordt ingegaan. Verder heeft de duur i.h.a. uiteraard een bovengrens, maar aangenomen wordt dat die weinig invloed heeft op het hier weergegeven bereik.

De gemiddelde jaarmaximale duur neemt af met 26% bij een MOR drempelwaarde van 5000 meter en met 23% bij 1500 meter. Dat laatste getal verschilt tamelijk veel van de afname van 12% voor de gemiddelde duur. De extreme duur van slecht-zicht periodes neemt in dit geval dus meer dan proportioneel af.

Samengevat kan vraag 4 als volgt beantwoord worden

- Hoewel het (althans binnen dit project) niet mogelijk was om een echt "mist-scenario" op te stellen, is er geen reden om een structurele toename in de frequentie van mist te verwachten. De neergaande trend zal vermoedelijk zwakker worden.
- Voor het opstellen van een echt scenario zullen de tot nu waargenomen veranderingen eerst verklaard moeten worden. Dit wordt nog gecompliceerder door alle niet-meteorologische factoren die een rol spelen bij mist. Diezelfde factoren bemoeilijken ook weer het opstellen van een realistisch scenario.

4.3 Referenties

Hove, R. ten en J.B. Wijngaard, 2008. *Improved low visibility and ceiling forecasts at Schiphol Airport*. **KNMI-publicatie:** KDC/2008/0089.

Oldenborgh, G.J. van, P. Yiou en R. Vautard, 2010. *On the roles of circulation and aerosols in the decline of mist and dense fog in Europe over the last 30 years*. *Atm. Chem. Phys.*, **10**, 4597-4609, doi:10.5194/acp-10-4597-2010.

Vautard, R., P. Yiou en G.J. van Oldenborgh, 2009. *The decline of fog, mist and haze in Europe during the last 30 years: a warming amplifier?* *Nature Geoscience*, **2**, 115-119, doi:10.1038/NGEO414.

Wijngaard, J.B., D.H.P. Vogelesang, J. van Bruggen en N. Maat, 2007. *Low visibility and ceiling forecasts at Schiphol; Part 1-Assessment of the current system*. **KNMI-publicatie:** 1/10/2007.

4.4 Verder lezen

Het volgende achtergrondrapport is voor dit project gemaakt, en bevat uitvoerigere informatie over de zicht- en bewolkingsklimatologie voor het huidige en toekomstige klimaat op Schiphol.

Leander, R.: Climatology of visibility and clouds at Schiphol airport, De Bilt, 2012, www.knmi.nl/samenw/kbs/doc/visibility.pdf



5 Neerslag

5.1 Introductie

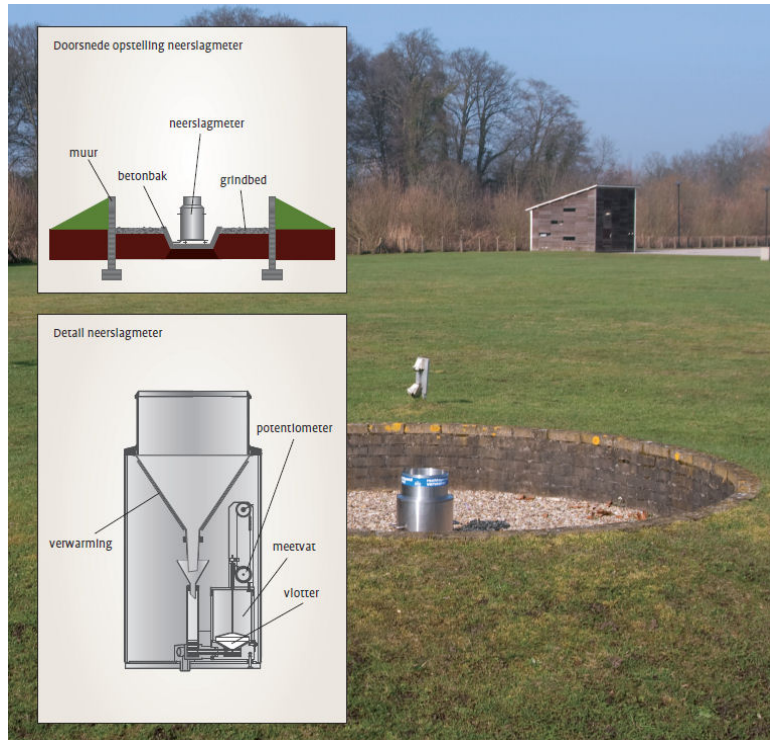
Extreme regenval, maar ook intense sneeuwval kan tot flinke vertragingen leiden in de luchtvaart op Schiphol. Bij extreme regen neemt bijvoorbeeld de remwerking van de baan af en nemen de starts en landingen meer tijd in beslag. Hagel kan vliegtuigvleugels beschadigen en daarmee de vliegveiligheid bedreigen. Bij sneeuwval moet tijd en menskracht ingeruimd worden voor het sneeuwvrij maken van de start- en landingsbanen en de vliegtuigen. Kortom, neerslag is van wezenlijke invloed op de operatie van de luchthaven. Kennis van de statistische eigenschappen van neerslag draagt bij in het waarborgen van de efficiency rondom de luchthaven.

In de onderstaande paragrafen worden enkele resultaten uit het onderzoek getoond. Uitgebreidere informatie is te vinden in de achtergrondrapporten (Jilderda, 2010; Groen, 2011).

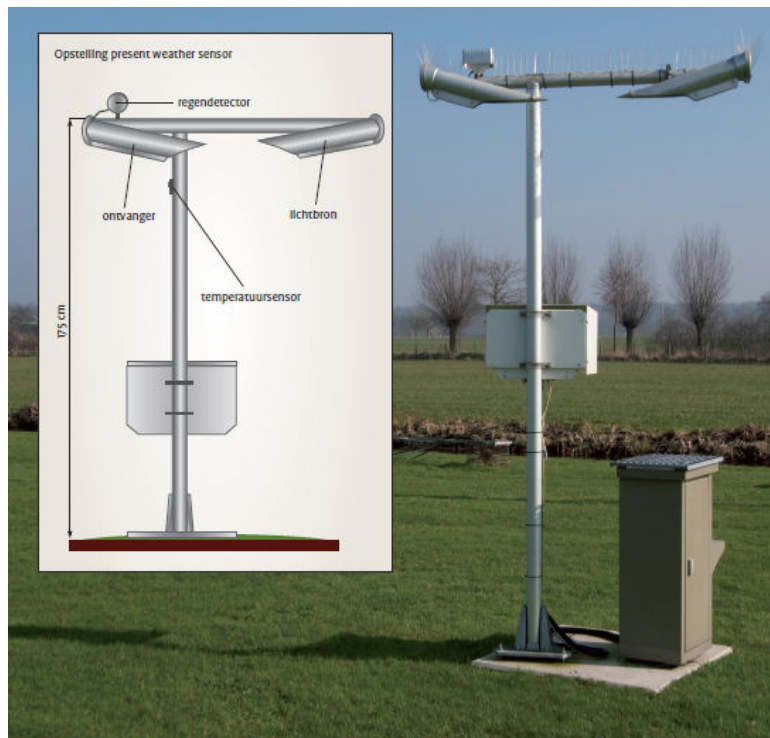
Het meten van neerslag

De neerslag op Schiphol wordt gemeten met een elektrische regenmeter. De regenmeter is in een Engelse opstelling (zie figuur) geplaatst om vangstvermindering door wind te minimaliseren. De neerslag wordt opgevangen in een ronde trechter met een doorsnede van 400 cm^2 , waarvan de bovenkant $0,40 \text{ cm}$ boven de grond staat. Een verwarmingselement in de trechter smelt eventuele vaste neerslag. Vanuit de trechter komt de vloeibare en vloeibaar gemaakte neerslag via een smal pijpje in het meetreservoir. De afsluiting van het meetreservoir door de trechter dient ter voorkoming van verdampingsverliezen. In het meetreservoir drijft een vlotter, die een variabele elektrische weerstand instelt. Op deze wijze kan door het meten van de weerstand geheel automatisch continue de stand van de vlotter bepaald worden. Het verschil tussen de vlotterstand aan het begin en het einde van een tijdvak is bepalend voor de gevallen hoeveelheid neerslag in dat tijdvak. Als na verloop van tijd het meetreservoir vol raakt, wordt deze in korte tijd geleegd door het openen van een klep onderin het meetreservoir. Het openstaan van deze klep is van invloed op de bepaling van de hoeveelheid neerslag.

Figuur 5.1a: Regenmeter



Figuur 5.1b: Present weather sensor





Aard van de neerslag

De aard van de neerslag (regen, sneeuw of ijsvorming) op Schiphol wordt bepaald met een Present Weather sensor (PW-sensor). Dit instrument (zie figuur) meet verschillende verschijnselen, zoals lichtverstrooiing door neerslagdeeltjes of mist, valsnelheid van neerslagdeeltjes en achtergrondhelderheid. De mate van lichtverstrooiing is verschillend voor mist, regen of sneeuw. Voor versterking van onderscheid kan de valsnelheid van de neerslag benut worden, waarvoor ook de temperatuur kan dienen. Omdat verschillende meetsignalen door het instrument verwerkt moeten worden, wordt hij tot de intelligente sensoren gerekend. Het instrument bepaalt naast de aard van de neerslag ook het zicht. De PW-sensor is eind 2002 op Schiphol ingezet. Tot deze tijd werd de aard van de neerslag vastgesteld door het menselijk oog. Voor het verrichten en verspreiden van waarnemingen maakte een waarnemer deel uit van het meteorologisch team, dat de klok rond aanwezig was op de luchthaven. Het was toen ook mogelijk om hagel van de overige vormen van neerslag te onderscheiden.

5.2 Ontstaan van neerslag

Door de beschijning van de zon verdampt er water uit oceanen, zeeën en meren. Deze waterdamp stijgt op en doordat de luchttemperatuur in de regel met de hoogte afneemt, zal de waterdamp uiteindelijk onderkoeld raken. Indien deze waterdamp in aanraking komt met de altijd aanwezig stof- of vloeibare deeltjes in de atmosfeer (condensatie- of vrieskernen), gaat de waterdamp afhankelijk van de temperatuur over in druppeltjes of ijskristallen. Een verzameling van deze druppeltjes en/of ijskristallen vormt een wolk. De wolkendruppeltjes en ijskristallen hebben de neiging om te vallen. De valsnelheid neemt toe met de grootte van de deeltjes. Vanwege de geringe afmetingen van de wolkendruppeltjes en ijskristallen is de valsnelheid te gering om de snelheid van de opgaande luchtbewegingen te overtreffen.

Grote druppels vallen sneller dan kleine en kunnen daardoor met elkaar samenvloeien. De druppels worden groter en bereiken daarmee een hogere valsnelheid. Als de weg door de wolk lang genoeg is (in de orde van 1 km of meer) en de concentratie van vloeibaar water voldoende groot, kan de druppel groot genoeg worden om als regendruppel door de wolkenbasis heen te vallen. Dit heet het coalescentieproces.

Voor het op gang komen van het coalescentieproces moet aan voorwaarden voldaan worden, die in onze omgeving niet zo vaak voorkomen. Het Findeisen-Bergeronproces speelt op gematigde breedten een voornamere rol bij het ontstaan van neerslag. Dit proces vindt plaats in gemengde wolken, waarin ijskristallen en onderkoeld water tegelijk voorkomen. Door de lagere waterdampspanning in de omgeving van de ijskristallen zal het onderkoelde water zich op de ijskristallen afzetten en bevriezen. De ijskristallen worden hierdoor groter en

zullen sneller gaan vallen, waardoor ze ook onderkoeld water en ander ijskristallen invangen. De zo gegroeide ijskristallen klonteren onderin de wolk bij een temperatuur van enkele graden beneden het vriespunt samen tot sneeuwvlokken, die voldoende snelheid ontwikkelen om uit de wolkenbasis te treden. Het Findeisen-Bergeronproces kan slechts plaatsvinden in wolken, die zich verticaal uitstrekken tot hoogten, waar de temperatuur tussen de -23 en 0 °C is.

Soorten neerslag

Sneeuw

Vrijwel alle neerslag op gematigde breedte begint als sneeuw. Wanneer de temperatuur beneden de wolk overal beneden het vriespunt ligt, bereikt de sneeuw als zodanig het aardoppervlak. Sneeuw bestaat uit vertakte ijskristallen in hexagonale vorm, die bij temperaturen boven -5 °C tot vlokken samenklonteren. Bij strenge vorst zijn de sneeuwvlokken klein (poeder-sneeuw).

Regen

Indien onder de wolk temperaturen voorkomen, die boven het vriespunt liggen, smelt de sneeuw tot regen. Ligt het vriespunt dicht boven het aardoppervlak, dan heeft de sneeuw te weinig tijd om te smelten en ontstaat natte sneeuw. Passeert eenmaal gevormde regen luchtlagen met temperaturen beneden het vriespunt, dan bevriest deze weer tot ijskristallen, ijsregen genaamd. Regendruppels hebben een diameter groter dan 0,5 mm. Bestaat de regen uit kleinere druppels, dan is er sprake van motregen.

IJzel

Indien regen een koude luchtlaag (beneden het vriespunt) vlak boven het aardoppervlak passeert, raakt hij onderkoeld. Zodra deze onderkoelde regen het aardoppervlak bereikt bevriest hij en vormt een ijslaag, die ijzel genoemd wordt. Gewone regen, die op een bevroren grond valt, wordt in de volksmond ook ijzel genoemd. In de vaktaal van meteorologen worden deze twee processen samengevat onder de term ijsvorming.

Hagel

Hagel treedt op in onweerswolken (Cumulonimbi). In deze wolken vinden heftige op- en neerwaartse bewegingen plaats, waardoor eenmaal gevormde regen gemakkelijk weer omhoog wordt gevoerd. In de hogere koude luchtlagen bevriest de regen en ontstaat hagel. Op een gegeven moment wordt de valsnelheid te groot en schiet de hagel door naar beneden. Vanwege de korte verblijftijd onder de wolk smelten hagelstenen amper voordat ze het aardoppervlak bereiken. Voor de heftige op- en neerwaartse bewegingen is een grote voorwaardelijke onstabiele in de atmosfeer noodzakelijk, die gemakkelijk bij hoge temperaturen ontstaat. Daarom is hagel vooral een verschijnsel van het warme jaargetijde. Hagelstenen hebben een doorsnede van 5 mm of meer. Soms groeien ze door tot afmetingen van 5 à 7 cm.



5.3 Huidig klimaat

Op Schiphol valt jaarlijks gemiddeld 931 mm neerslag (Hoofddorp, 1981-2010) met een totale duur van 649 uur, ongeacht de vorm. Buiten de zomer valt de neerslag meestal uit frontale systemen⁶ en wordt een groot deel van het land hiermee geconfronteerd. In de zomer valt de neerslag vaak erg plaatselijk tijdens (onweers-)buien. In frontale systemen is neerslag meestal langdurig, maar blijven de intensiteiten beperkt. Tijdens buien is de neerslag vaak lokaal en van korte duur, waarbij plaatselijk de intensiteit sterk kan oplopen. Deze karakterisering van de neerslag is goed zichtbaar in Tabel 5.1 en 5.2. De duur van de neerslag is in herfst en winter het langst. In de herfst valt ook de meeste neerslag. De neerslaghoeveelheid in de winter is nauwelijks minder dan in de zomer. Als de ondergrens slechts weinig van 0 mm verschilt, valt er gemiddeld op 241 dagen in het jaar neerslag (zie Tabel 5.1). Op 234 dagen valt er regen, op 25 sneeuw, op 22 hagel en op gemiddeld 7 dagen per jaar vindt ijsvorming (ijzel) plaats. De som van de aantallen dagen per vorm is hoger dan het aantal dagen met neerslag, omdat op een dag meerdere vormen van neerslag naast elkaar kunnen voorkomen. Uit de verdeling naar hoeveelheid in Tabel 5.1 blijkt dat de neerslag vaak in lage hoeveelheden (< 1 mm) valt. Hoge hoeveelheden (≥ 10 mm) treden gemiddeld op 27 dagen per jaar op.

Tabel 5.1: Enkele karakteristieken van de neerslag op Schiphol in de periode 1981-2010 (Sluijter et al., 2011).

	Neerslag	Regen	Sneeuw	Hagel	Ijsvorming
Jaargemiddelde hoeveelheid	931 mm				
Jaargemiddelde duur	649 uur				
Gemiddeld aantal dagen per jaar	241	234	25	22	7
$\geq 0,3$ mm	176				
≥ 1 mm	140				
≥ 10 mm	27				

Tabel 5.2: Verdeling van de neerslag op Schiphol in hoeveelheid en duur over de jaargetijden (1981-2010).

Jaargetijde	Hoeveelheid [mm]	Duur [uur]
Winter	224	194
Lente	176	145
Zomer	240	118
Herfst	292	189

⁶ De stroming van lucht verdeelt zich, gerekend van de evenaar naar de polen, in drie zones. Op de scheidslijnen tussen deze zones ontmoeten warme lucht vanaf de tropen en koude lucht afkomstig van de poolstreken elkaar. De meest noordelijke of zuidelijke scheidslijn wordt het polaire front genoemd. Het polaire front op het noordelijk halfrond is voor Nederland erg belangrijk. In het polaire front boven de Atlantische Oceaan ontstaan geregeld knikpunten, die vergezeld gaan van sterke luchtdrukdalingen. Op deze wijze ontstaan depressies, die met de overheersende westelijke wind naar het oosten gedreven worden. Deze depressies gaan gepaard met fronten: scheidingen van de verschillende luchtmassa's. Op deze fronten treedt door het botsen van de twee verschillende luchtsoorten vaak bewolking en neerslag op.

5.3.1 extreme neerslag

Ook tijdens perioden van hevige regenval moet het vliegverkeer op Schiphol zoveel mogelijk ongehinderd doorgang kunnen vinden. Hiervoor is het noodzakelijk dat neerslag vlot wordt afgevoerd naar plekken die geen hinder voor vliegverkeer en publiek opleveren. Met behulp van neerslagstatistiek en de afwateringseisen kan bepaald worden welke maatregelen nodig zijn om overlast ten gevolge van extreme neerslag tot aanvaardbare proporties terug te dringen.

GEV-verdeling

De GEV-verdeling wordt in een groot aantal landen gebruikt om de kansverdeling van neerslagextremen te beschrijven. Bij de GEV-verdeling geldt voor de neerslaghoeveelheid die gemiddeld eens in de T jaar wordt overschreden:

$$x(T) = \xi \left[1 + \frac{\gamma}{\kappa} (1 - T^{-\kappa}) \right] \text{ voor } \kappa \neq 0$$

De herhalingsstijd T heeft hier betrekking op de gemiddelde duur (in jaren) tussen twee opeenvolgende overschrijdingen van de waarde $x(T)$. Voor $\kappa = 0$ gaat de GEV-verdeling over in de Gumbelverdeling, waarvoor geldt:

$$x(T) = \xi (1 + \gamma \ln T)$$

De **locatieparameter** ξ geeft de neerslaghoeveelheid weer die gemiddeld een keer per jaar wordt overschreden, $\xi = x(1)$.

De **dispersiecoëfficiënt** γ beïnvloedt de verhouding tussen $x(T)$ en $x(1)$, hoe groter γ des te groter het relatieve verschil tussen $x(T)$ en $x(1)$ is.

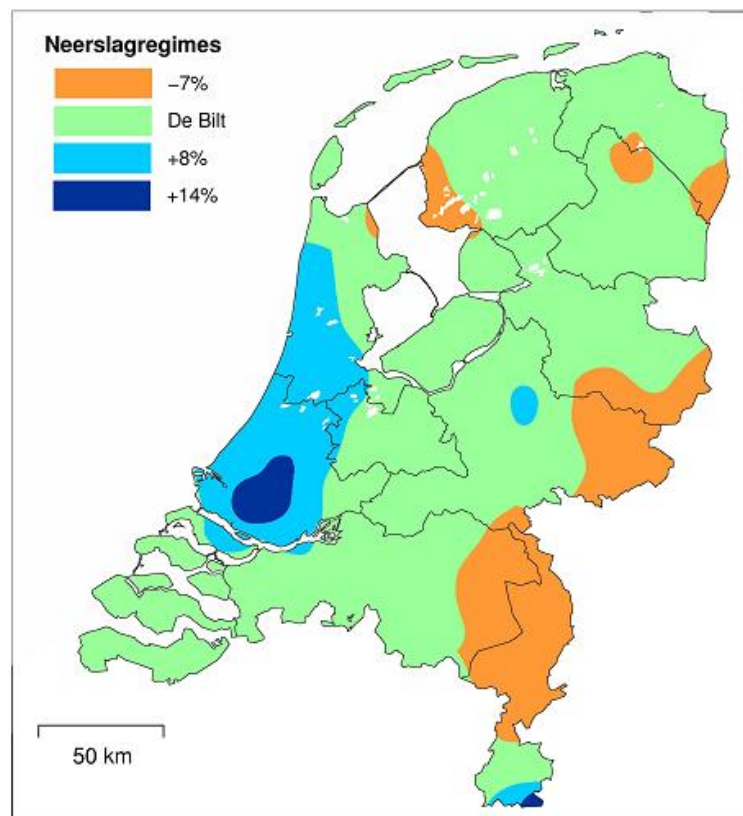
De **vormparameter** κ is van belang als men in uitzonderlijk hoge neerslaghoeveelheden geïnteresseerd is (gemiddeld eens in de 100 jaar of nog uitzonderlijker). Bij de extreme waarden statistiek van De Bilt is $\kappa < 0$ bij neerslagduren van een, twee en vier dagen, wat inhoudt dat uitzonderlijk hoge neerslaghoeveelheden vaker voorkomen dan men op grond van de Gumbelverdeling mag verwachten. Bij neerslagduren van acht en negen dagen geldt het tegengestelde.



De neerslaghoeveelheden horend bij de verschillende overschrijdingsfrequenties voor duren vanaf 4 uur zijn afgeleid uit uurlijkse neerslaggegevens van De Bilt uit het tijdvak 1906 – 2003 (Smits e.a., 2004). Deze statistiek is aangevuld met een statistiek voor duren van 5 tot 120 minuten op basis van pluviograafregistraties van De Bilt (Buishand en Wijngaard, 2007).

In onderzoek naar regionale verschillen in extreme neerslag is voor 141 locaties verspreid over geheel Nederland de kansverdeling voor duren van een tot tien dagen uit de dagelijkse aftappingen van de neerslag van de jaren 1951 t/m 2005 (Buishand e.a., 2009) vastgesteld. Op basis van deze analyse is Nederland opgedeeld in een viertal neerslagregimes (zie Figuur 5.2). Onderzoek op basis van radargegevens voor het tijdvak 1998 – 2008 (Overeem et.al., 2009) laat zien dat voor de uursommen de regionale verschillen minder uitgesproken zijn dan voor de dagsommen.

Figuur 5.2: Vier te onderscheiden neerslagregimes met elk een wigen extreme waarden statistiek (Buijshand, 2009).



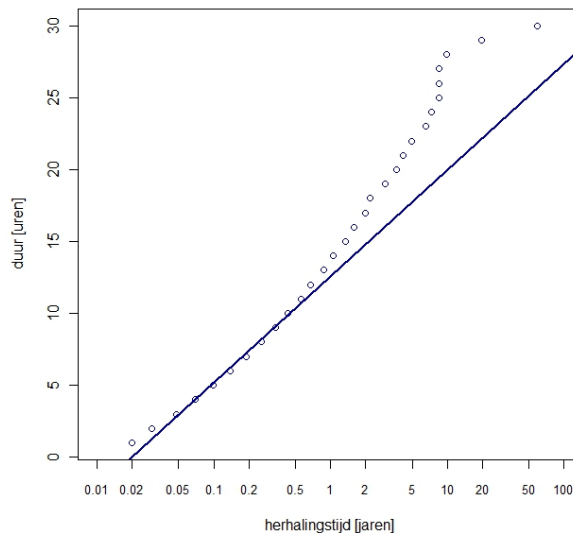
In Figuur 5.2 is te zien dat Schiphol in het op een na hoogste neerslagregime ligt. Dit betekent dat voor duren vanaf 24 uur de neerslaghoeveelheden die horen bij de verschillende herhalingstijden van De Bilt met 8% verhoogd moeten worden. Voor duren korter dan een etmaal is dit niet wenselijk. Deze zienswijze is op de extreme waarden statistiek van De Bilt toegepast om de extreme waarden statistiek geldend voor Schiphol te verkrijgen (zie Tabel 5.3). Uit de tabel blijkt dat een neerslaghoeveelheid van 3 mm in 15 minuten gemiddeld 10 keer per jaar wordt overschreden en dat een neerslaghoeveelheid van 59 mm in 6 uur gemiddeld eens per 100 jaar wordt overschreden.

Tabel 5.3: Neerslaghoeveelheden (mm) voor Schiphol voor het gehele jaar voor uren van 5 minuten tot 10 etmalen, die gemiddeld 10 x per jaar tot eens per honderd jaar worden overschreden gebaseerd op metingen van 1951-2010.

Overschrijdingsfrequentie	minuten				Uren					etmalen				
	5	15	30	60	2	4	6	8	12	1	2	4	7	10
10 x per jaar	–	3	4	5	7	9	11	12	13	16	21	–	–	–
5 x per jaar	–	4	6	7	10	12	14	15	17	23	28	–	–	–
2 x per jaar	4	6	8	10	13	16	19	20	23	30	38	49	63	73
1 x per jaar	5	9	11	14	17	21	23	24	27	36	44	56	71	86
1 x per 2 jaar	7	11	14	18	21	25	27	29	32	42	52	65	82	98
1 x per 5 jaar	9	15	19	23	26	31	34	36	40	51	63	77	95	113
1 x per 10 jaar	11	18	23	27	31	36	39	41	46	58	70	86	106	123
1 x per 20 jaar	12	21	27	32	36	41	45	47	52	66	79	96	116	134
1 x per 50 jaar	15	26	32	38	42	49	53	56	61	77	91	108	129	146
1 x per 100 jaar	17	29	37	43	48	55	59	62	68	85	99	118	137	154

5.3.2 sneeuw

Figuur 5.4: Overschrijdingsfrequentie uitgedrukt in een gemiddelde herhalingstijd voor de duur in uren van sneeuwval (verticale as) te Schiphol gebaseerd op metingen van 1951-2010. De aaneengesloten lijn geeft de theoretische overschrijdingsfrequentie weer die geschat is uit metingen (open cirkels).



Gemiddeld valt er op Schiphol op 25 dagen per jaar sneeuw. Tussen 1951 en 2010 viel in een sneeuwarm jaar op 5 dagen sneeuw en in een sneeuwrijk jaar op 56 dagen. Ook varieert de duur van de sneeuwval. In Figuur 5.4 is de overschrijdingsfrequentie van de aaneengesloten duur van de sneeuwval weergegeven. Uit de lijn in deze figuur valt te herleiden dat het gemiddeld eens per jaar in 13 opeenvolgende uurvakken sneeuwt. Het sneeuwt gemiddeld eens per 10 jaar 20 uur of langer aan een stuk.

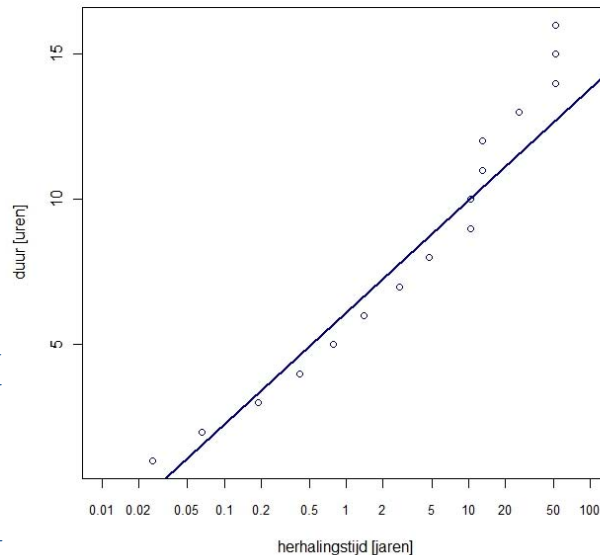


5.3.3 hagel

Figuur 5.5: Overschrijdingsfrequentie uitgedrukt in een gemiddelde herhalingsduur voor de duur in uren van de hagelval (verticale as) te Schiphol gebaseerd op metingen van 1951-2002. De aaneengesloten lijn geeft de theoretische over-

91

schrijdingsfrequentie weer die geschat is uit metingen (open cirkels). Niet alle uren, waaruit de grafiek is opgebouwd, bevatten metingen van hagelval. Het aantal overschrijdingen blijft voor deze uren daarom constant, wat zichtbaar is in het verticale verloop van de duur, gebaseerd op metingen. Dit verschijnsel treedt vooral in de staart van de verdeling op.



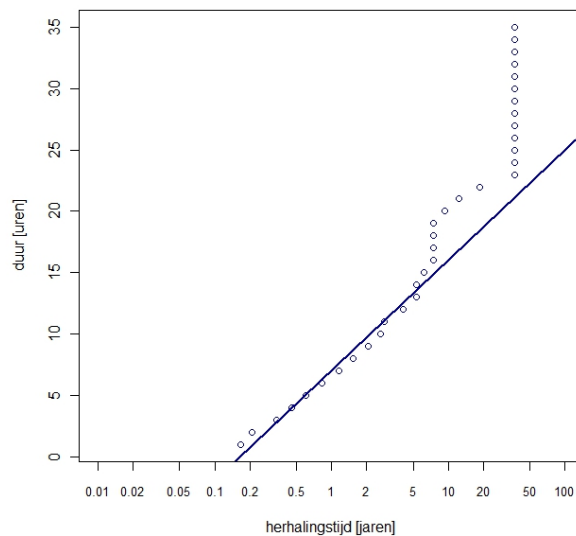
Gemiddeld valt er op Schiphol op 22 dagen per jaar hagel. In de jaren 1951 t/m 2002⁷ varieerde dit getal van 4 tot 42 dagen in een kalenderjaar. Ook de duur van hagel kan van bui tot bui sterk uiteen lopen. In Figuur 5.5 is de overschrijdingsfrequentie van de aaneengesloten duur van hagel weergegeven. Uit deze figuur valt te herleiden dat het gemiddeld eens per jaar in zes opeenvolgende uurvakken hagelt. Gemiddeld eens per tien jaar hagelt het in tien opeenvolgende uurvakken.

5.3.4 ijsvorming

Gemiddeld is er op Schiphol op 7 dagen per jaar sprake van ijsvorming. In de jaren 1951 t/m 2010 varieerde dit van maximaal 12 dagen per jaar tot jaren zonder enige vorm van ijsvorming. Ook varieert de duur van ijsvorming. In Figuur 5.6 is de overschrijdingsfrequentie van de aaneengesloten duur van ijsvorming weergegeven. Uit deze figuur valt te herleiden, dat er gemiddeld eens per jaar 7 uur of langer achter elkaar sprake van ijsvorming is. Gemiddeld eens per 10 jaar komt ijsvorming 16 uur of langer aan een stuk voor.

⁷ In 2002 is men gestopt met het registreren van hagel op Schiphol

Figuur 5.6: Overschrijdingsfrequentie uitgedrukt in een gemiddelde herhalingsjijd voor de duur in uren van ijsvorming (verticale as) te Schiphol gebaseerd op metingen van 1951-2010. De aangesloten lijn geeft de theoretische overschrijdingsfrequentie weer, die geschat is uit metingen (open cirkels). Niet alle uren, waaruit de grafiek is opgebouwd, bevatten metingen van ijsvorming. Het aantal overschrijdingen blijft voor deze uren daarom constant, wat zichtbaar is in het verticale verloop van de duur, gebaseerd op metingen. Dit verschijnsel treedt vooral in de staart van de verdeling op.



5.4 Toekomstig klimaat

De vier KNMI klimaatscenario's gaan tot 2050 uit van een wereldwijde temperatuurtoename van 1 °C (G en G+) tot 2 °C (W en W+). Daarnaast is voorzien in een mogelijke verandering in het luchtstromingspatroon rond Nederland in twee van de vier klimaatscenario's (G+ en W+).

De gevolgen van deze ontwikkelingen kunnen leiden tot een toename van de gemiddelde neerslag in de winter van 4% (G) tot 14% (W+) rond 2050 t.o.v. het klimaat rond 1990. Voor de zomer wordt uitgegaan van een ontwikkeling met een afname van 19% (W+) tot een toename van 6% (W) rond 2050 t.o.v. 1990. Mogelijke gevolgen voor de extreme neerslag te Schiphol zijn weergegeven in Tabel 5.4. De neerslaghoeveelheden voor 1 uur in deze tabel zijn onveranderd overgenomen uit de overeenkomstige tabel in Klein Tank et al. (2009), welke representatief is voor de Bilt. De andere getallen zijn ten opzichte van de genoemde tabel aangepast voor Schiphol door rekening te houden met de huidige regionale verschillen in de extreme neerslagstatistiek.

Tabel 5.4: Jaarstatistiek voor neerslagextremen (mm) in het huidige klimaat en het mogelijk toekomstige klimaat rond 2050 voor Schiphol.

neerslagperiode	1 uur					1 dag					10 dagen					
	herhalingsjijd	huidig	G	G+	W	W+	huidig	G	G+	W	W+	huidig	G	G+	W	W+
1 jaar		14	15	-	17	-	36	39	38	42	39	86	92	87	96	89
10 jaar		27	30	-	33	-	58	65	62	71	65	123	132	125	140	129
100 jaar		43	48	-	53	-	85	95	91	106	95	154	166	158	177	162

De gebruikte ruimtelijke resolutie in de klimaatmodellen voor de KNMI'06 scenario's is onvoldoende voor een realistische beschrijving van regionale verschil-



len in extreme neerslag voor de toekomst. Detailstudies maken het aannemelijk dat de regionale verschillen in extreme neerslag binnen Nederland, zoals zichtbaar in de waarnemingen, in de toekomst versterkt worden, vooral bij de G en W scenario's. De temperatuur van de Noordzee heeft een aantoonbaar effect op de neerslag in de kuststrook tot 30 km landinwaarts, waartoe ook Schiphol behoort. Dit zou kunnen betekenen, dat de toekomstprojecties in Tabel 5.4 aan de lage kant geschat zijn.

Niet alleen de neerslagintensiteit kan sterk toenemen bij hogere temperaturen. Ook aan buien gerelateerde fenomenen, zoals hagel, onweer, windstoten en –hozen, zullen waarschijnlijk toenemen in intensiteit en/of vaker optreden (Klein Tank e.a., 2009).

5.5 Conclusie

- Neerslag komt voor op 241 dagen in het jaar. De hoogste intensiteiten komen meestal in de zomer voor. De hogere temperaturen in een veranderend klimaat leiden tot meer vochtinhoud van de atmosfeer, waardoor (extreme) neerslagintensiteiten zullen toenemen.
- Voor duren langer dan 24 uur blijken de neerslaghoeveelheden te Schiphol 8% meer te bedragen dan die te De Bilt. Voor duren korter dan 24 uur zijn er geen regionale verschillen binnen Nederland aangetoond. In de toekomst zou de neerslag aan de kust meer kunnen toenemen dan in het binnenland.
- Sneeuw valt op gemiddeld 25 dagen per jaar, hagel op 22 dagen en ijsvorming treedt op gemiddeld 7 dagen op. De variatie van jaar tot jaar is echter zeer groot. Hagel zal waarschijnlijk in de toekomst vaker voorkomen.

5.6 Verder lezen

R. Jilderda: Extreme precipitation statistics for Amsterdam Airport Schiphol, 2011, www.knmi.nl/samenw/kbs/doc/Precip-extremes.pdf

G. Groen: Snow at Schiphol, presentatie KLM-kick off meeting, 2011, www.knmi.nl/samenw/kbs/doc/Snow_at_Schiphol_final.pdf.



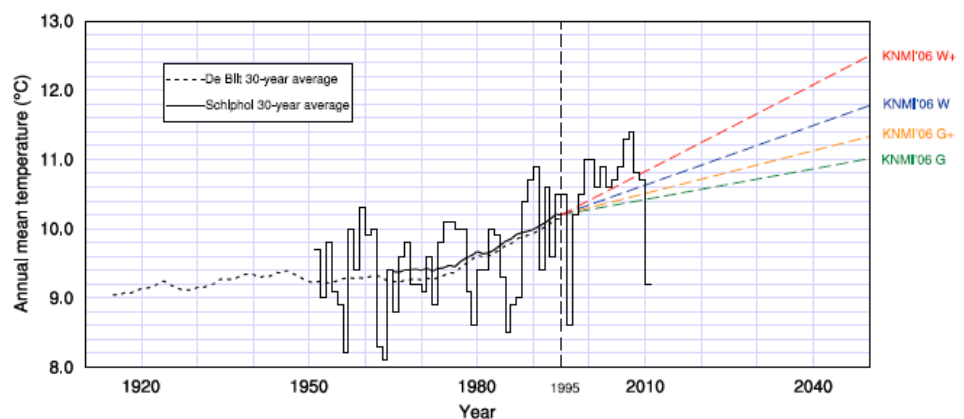
6 Temperatuur

6.1 Inleiding en verantwoording van de onderzoeksvraag

Hoewel de luchttemperatuur wellicht een wat minder belangrijke parameter is voor de vliegveiligheid dan wind, heeft zij invloed op allerlei aspecten van de bedrijvigheid op een luchthaven zoals Schiphol. Daarbij zullen vooral temperatuurextremen, zoals hittegolven of koude periodes (bv als vliegtuigen ijsvrij gehouden/gemaakt moeten worden) van belang zijn, maar een geleidelijke verandering van de gemiddelde temperatuur is ook van invloed op bedrijfsomstandigheden en -kosten. Een recent onderzoek dat het Amerikaanse “Airport Cooperative Research Program” uitvoerde (ACRP Synthesis 33, 2012) geeft een overzicht van tientallen onderzoeken naar potentiële gevolgen van klimaatopwarming voor de operaties, de infrastructuur en de bedrijfskosten van luchthavens.

95

Figuur 6.1: Gemeten jaargemiddelde temperatuur op Schiphol (springende lijn) 30 jaar gemiddelden van de Schiphol temperatuur en die in De Bilt en KNMI's klimaatscenario's tot 2050 (gekleurde lijnen). 1995 is het midden van de huidige klimatologische periode (1981 – 2010)



De temperatuur is op meerdere manieren van belang voor Schiphol. Zo is er bijvoorbeeld bij temperaturen onder het vriespunt een hoger risico op gladheid door sneeuw en ijzel en wordt het het sneeuw- en ijsvrij maken van vliegtuigen deel van de werkzaamheden. De buitentemperatuur bepaalt ook de noodzaak van het koelen of verwarmen van gebouwen en vliegtuigen en daarmee de energiekosten van de luchthaven.

Voor specifieke operaties zijn er grenswaarden van de temperatuur. Zo moet voor het asfalteren van de banen de temperatuur boven tien graden Celsius liggen.

De temperatuur van de bovenlucht en de opbouw van de temperatuur in de atmosfeer tot aan de tropopauze (ca. 10-11 km) is van belang voor de vliegoperaties. Dit laatste wordt echter besproken in het hoofdstuk over bovenlucht-klimatologie.

Omdat t.a.v. temperatuur vanuit Schiphol geen specifieke wensen waren is voor dit deelonderzoek in overleg met de stakeholder gekozen voor een brede aanpak:

1. Beschrijving van de huidige (1981 – 2010) temperatuur *klimatologie* van Schiphol.
2. Statistisch onderzoek naar *temperatuursextremen* in het huidige klimaat.
3. Beschrijving van *scenario's* voor het temperatuurklimaat van Schiphol in 2050.
4. Verandering van de statistiek van *temperatuursextremen bij opwarming* van het klimaat.

In 2012 voerde het KNMI een nieuwe definitie van het begrip '*gevoelstemperatuur*' in. Omdat die gevoelstemperatuur de werkomstandigheden van het grondpersoneel op Schiphol beïnvloed, werd door het KNMI aan het Syntheserapport een paragraaf toegevoegd met scenario's voor de gemiddelde dagelijkse minimum en maximum *gevoelstemperatuur* per kalendermaand in 2010 en 2050.

Samengevat: Het HSMS02 deelonderzoek naar de invloed van temperatuur op de veiligheid en operaties van Schiphol richt zich op de huidige temperatuurklimatologie en mogelijke veranderingen daarin rond 2050. Hierbij wordt speciaal gekeken naar de statistiek van temperatuursextremen en naar de gevoelstemperatuur.



Hoe en waar wordt temperatuur gemeten?

Tot 1990 werd de temperatuur gemeten met een kwikthermometer in een zogenaamde Stevensonhut. In deze hut werd de thermometer beschermd tegen in- en uitstraling en neerslag, maar de lucht kon wel door de hut stromen. Vanaf 1990 wordt de temperatuur gemeten door een platina weerstandselement in een schotelhut. Deze biedt dezelfde bescherming aan de thermometer maar is een stuk kleiner. De temperatuur wordt standaard op 1.5 meter hoogte gemeten. De minimumtemperatuur is de laagste temperatuur die tussen 00 uur en 24 uur UTC gemeten wordt, de maximumtemperatuur de hoogste. De gemiddelde temperatuur is het gemiddelde van de 24 uurlijkse gemiddelden.



Links: Stevensonhut, rechts: schotelhut

De rode cirkel op dit kaartje van Schiphol markeert de huidige meetlocatie





De tabellen hierboven geven het aantal dagen per jaar per maand aan met een temperatuur die onder of boven een bepaalde drempelwaarde ligt. Zo zijn er bijvoorbeeld in januari gemiddeld ruim 11 dagen met een minimumtemperatuur onder het vriespunt. In de tabel van de maximumtemperatuur is te zien dat er in januari ook gemiddeld drie dagen zijn met een maximumtemperatuur onder het vriespunt.

6.2.2 Extreme minimum en maximum temperaturen

Om inzicht te krijgen in het optreden van extreme minimum en maximum temperaturen in het huidige klimaat werden de temperatuurmetingen van 1981 – 2010 geanalyseerd. Van de opgetreden extreme waarden in die metingen werd aangenomen dat ze volgens de ‘Generalized Extreme Value’ functie (GEV, Coles 2001) verdeeld zijn. De vrije parameters van die functie kunnen vervolgens geschat worden door de GEV functie te ‘fitten’ aan de waargenomen extreme waarden. Hoewel de waarnemingen een periode van slechts 30 jaar omvatten, kan op die manier een schatting gemaakt worden van de temperatuur tijdens extreme gebeurtenissen die slechts eens per 50 jaar (of zelfs langer) optreden.

Tabel 6.2: Maandelijkse en jaarlijkse (Ann.) minimum- en maximumtemperaturen (°c) die eens in de zoveel jaar (RP) worden over of onderschreden gebaseerd op de periode 1981-2010.

RP (yr)	Minimum temperature (°C)												
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Ann.
2	-5.9	-5.4	-2.8	-1.0	2.6	5.7	8.7	8.4	5.9	1.5	-1.7	-5.0	-8.8
5	-9.5	-8.8	-5.0	-2.5	1.0	4.5	7.3	7.2	4.3	-0.7	-3.9	-7.8	-12.1
10	-11.9	-11.1	-6.5	-3.3	0.3	3.8	6.6	6.7	3.5	-1.8	-5.0	-9.7	-14.3
25	-15.0	-14.0	-8.4	-4.0	-0.5	3.2	5.9	6.1	2.8	-2.8	-6.0	-12.1	-17.2
50	-17.2	-16.1	-9.8	-4.4	-0.9	2.9	5.5	5.8	2.3	-3.5	-6.7	-13.8	-19.3

RP (yr)	Maximum temperature (°C)												
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Ann.
2	11.2	11.9	16.2	21.7	25.8	28.4	29.6	29.6	24.3	20.3	15.3	12.2	31.4
5	12.7	14.3	18.4	24.3	28.3	30.6	31.7	31.7	26.4	22.1	16.3	13.4	32.8
10	13.5	15.4	19.5	25.5	29.5	31.7	32.7	32.7	27.4	23.0	16.8	14.0	33.5
25	14.1	16.4	20.5	26.6	30.7	32.7	33.6	33.6	28.3	23.8	17.2	14.6	34.2
50	14.5	17.0	21.1	27.2	31.3	33.2	34.1	34.2	28.8	24.2	17.5	14.9	34.6

Een dag met een minimumtemperatuur van -15°C of kouder is een zeldzaamheid in Nederland. De tabel laat zien dat het in januari op Schiphol ééns in de 25 jaar optreedt. Er zijn elk jaar wel dagen met een maximum temperatuur van 30°C of hoger, maar in mei komen zulke temperaturen maar eens in de 20 jaar voor.

6.2.3 Gevoelstemperatuur

Bij windstil weer voelt de vrieskou 's winters minder koud aan dan wanneer het waait bij dezelfde temperatuur. Dat komt omdat de wind de warmte die we uitstralen 'meeneemt', waardoor we sneller en meer afkoelen. "Het koud hebben" wil niet zozeer zeggen dat de temperatuur laag is, maar dat we warmte verliezen. Omdat die extra warmte die we verliezen wanneer het waait voelbaar is voor mensen die buiten werken, zoals wegwerkers en bouwvakkers, geven weerbureaus tegenwoordig vaak informatie over 'windchill'. Dit effect

wordt uitgedrukt in de ‘gevoelstemperatuur’. Bij een gevoelstemperatuur onder -10°C kunnen na enkele uren verschijnselen van onderkoeling optreden. Gevoelstemperaturen onder de -15°C kunnen na een uur koudeletsel opleveren en onder de -20°C is na een half uur ook bij goed afdichtende winterkleding al een kleine kans op bevroeringsverschijnselen.

Bij het KNMI wordt in de winter de gevoelstemperatuur berekend met behulp van de JAG/TI-methode (Groen, 2009). Deze methode berekent de gevoelstemperatuur uitgaande van het warmteverlies van een lopende persoon (snelheid 4,8 km/uur), gekleed op de kou en met weinig of geen zon.

Tabel 6.3: gemiddeld aantal dagen per jaar waarop de gevoelstemperatuur ten minste een uur onder een bepaalde grenswaarde is (gebaseerd op de periode 1971-2000).

1971-2000	< -25	< -20	< -15	< -10	< -5	< 0	< +5
Schiphol	0.03	0.4	3	10	38	117	206
De Kooy	0.03	0.3	3	10	35	109	196
Eelde	0.03	0.7	4	14	47	137	217
De Bilt	0.03	0.3	3	9	31	102	190
Vlissingen	0.00	0.2	2	6	28	95	183
Beek	0.07	0.9	3	11	42	121	201

De tabel geeft het aantal dagen per jaar weer waarop de gevoelstemperatuur een of meerdere uren onder een bepaalde drempelwaarde komt voor verschillende stations in Nederland. Te zien is dat er op Schiphol gemiddeld 3 dagen voorkomen met een gevoelstemperatuur onder de -15°C en 10 dagen met een gevoelstemperatuur onder de -10°C .

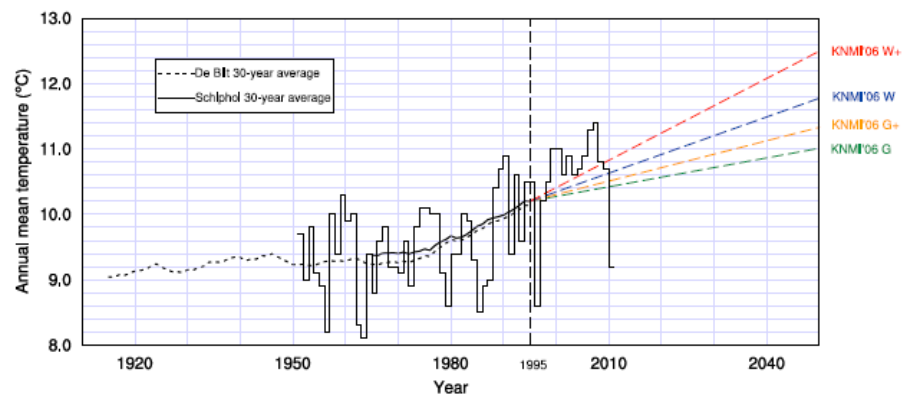
6.3 Toekomstig klimaat

6.3.1 Gemiddelde temperatuur

Het klimaat van Nederland is sinds het begin van de KNMI metingen zo’n anderhalve graad warmer geworden, ruwweg twee maal de wereldgemiddelde opwarming in die periode. Volgens klimaatonderzoekers (IPCC 2007) kan de mondiale opwarmende trend van de afgelopen vijftig jaar begrepen worden als het verhoogde broeikas effect van de extra broeikasgassen die de mensheid in de atmosfeer brengt en zal die opwarming doorzetten. Afhankelijk van de toekomstige uitstoot van broeikasgassen en van eventuele grootschalige veranderingen van landgebruik zal het wereldklimaat aan het eind van deze eeuw twee tot zes graden warmer zijn dan aan het begin van de 21^e eeuw.



Figuur 6. 3: Jaargemiddelde temperatuur op Schiphol, met het doorlopende gemiddelde over 30 jaar en de geprojecteerde klimaatverandering volgens de vier KNMI-06 klimaatscenario's. 1995: midden van klimaatperiode 1981-2010.



De figuur toont het verloop sinds 1950 van de jaargemiddelde temperatuur op Schiphol, met een lopend 30-jaargemiddelde. In de figuur is ook het lopend 30-jaargemiddelde temperatuur weergegeven voor De Bilt sinds 1916.

Er is over de tweede helft van de 20e eeuw een stijgende trend te zien in de jaargemiddelde temperatuur. Het grootste deel van deze stijging heeft plaatsgevonden na de jaren tachtig. De grootte van de recente opwarming is ruim 1°C vanaf 1951, zowel op Schiphol als in De Bilt (Sluijter et al., 2011). Het grootste deel van deze opwarming kan vermoedelijk worden verklaard door de menselijke invloed op het klimaat en het wordt verwacht dat de opwarming in de komende jaren doorzet (KNMI, 2009). De figuur toont ook de verandering in de gemiddelde temperatuur volgens de vier KNMI'06 scenario's. In deze scenario's wordt een jaargemiddelde temperatuurstijging in Nederland van 0.8 – 2.2°C verwacht in 2050 ten opzichte van de periode 1981-2010.

De KNMI'06 scenario's (KNMI 2006) zijn lineaire projecties van temperatuur en neerslag gebaseerd op een groot aantal modelprojecties. De vier scenario's geven informatie over de onzekerheden die samenhangen met de vraag hoeveel broeikasgassen er in de toekomst in de atmosfeer zullen komen en met de vraag of de luchtcirculatie boven Europa door de klimaatopwarming sterk zal veranderen (iets waar de beste klimaatmodellen over 'van mening verschillen'). De 4 KNMI scenario's omspannen gezamenlijk ruwweg 80% van de verschillende mogelijkheden die door de modelprojecties worden geschetst.

De *conclusie* is dat (ook) in Schiphol de opwarming van het mondiale klimaat merkbaar is (bv *alle* jaren tussen 1998 en 2010 waren warmer dan zelfs de aller warmste jaren uit de periode 1951 – 1985) en dat deze opwarming waarschijnlijk door zal zetten. Omdat de dagelijkse temperatuur variaties en de maand op maand variaties een grote range van temperaturen omvatten (zo'n 15 graden Celsius, zie fig 6.2) valt de gemiddelde opwarming van 1 graad niet onmiddellijk op.

6.3.2 Minimum- en maximumtemperatuur

Om bij de lineaire KNMI'06 projecties plausibele dagelijkse temperaturen te bepalen werd een transformatiemethode ontwikkeld gebaseerd op o.a. uitkomsten van regionale klimaatmodellering. Daarmee wordt de tijdserie van waargenomen dagtemperaturen op Schiphol omgezet naar een serie dagtemperaturen die consistent zijn met een van de scenario's. De bijbehorende maximum en minimum temperaturen werden vervolgens uitgerekend door voor elke dag het verschil met de gemiddelde dagtemperatuur in het huidige klimaat op te tellen bij de getransformeerde dagtemperatuur. Er wordt dus aangenomen dat er geen verandering in de klimatologische *range* van dagelijkse temperaturen zal zijn:

Tabel 6.4: Gemiddelde dagelijkse minimum en maximumtemperatuur per maand op Schiphol rond 2010 en rond 2050 volgens de KNMI '06 scenario's, vergeleken met de waarnemingen van 1981-2010 (dwz rond 1995).

	Daily min. temp. (°C)					Daily max. temp. (°C)				
	1981-2010	2010				1981-2010	2010			
		G	G+	W	W+		G	G+	W	W+
Jan.	0.8	1.0	1.0	1.2	1.3	5.8	6.0	6.0	6.2	6.3
Feb.	0.5	0.7	0.8	1.0	1.1	6.3	6.5	6.6	6.8	6.9
Mar.	2.6	2.8	2.9	3.1	3.2	9.6	9.8	9.9	10.1	10.2
Apr.	4.6	4.8	4.9	5.1	5.3	13.5	13.7	13.8	13.9	14.1
May	8.2	8.4	8.5	8.6	8.8	17.4	17.6	17.8	17.9	18.1
Jun.	10.8	11.0	11.1	11.2	11.5	19.7	19.9	20.1	20.2	20.4
Jul.	13.0	13.2	13.3	13.4	13.7	22.0	22.3	22.4	22.5	22.8
Aug.	12.8	13.0	13.2	13.3	13.6	22.1	22.3	22.4	22.5	22.8
Sep.	10.6	10.8	11.0	11.0	11.3	18.8	19.0	19.2	19.2	19.5
Oct.	7.5	7.7	7.8	7.9	8.1	14.5	14.7	14.8	15.0	15.2
Nov.	4.2	4.4	4.5	4.6	4.8	9.7	9.9	10.0	10.2	10.4
Dec.	1.5	1.7	1.8	1.9	2.1	6.3	6.6	6.6	6.8	6.9

	Daily min. temp. (°C)					Daily max. temp. (°C)				
	1981-2010	2050				1981-2010	2050			
		G	G+	W	W+		G	G+	W	W+
Jan.	0.8	1.6	1.8	2.4	2.9	5.8	6.6	6.8	7.4	7.9
Feb.	0.5	1.4	1.6	2.2	2.7	6.3	7.2	7.4	8.0	8.5
Mar.	2.6	3.5	3.7	4.3	4.8	9.6	10.4	10.7	11.3	11.8
Apr.	4.6	5.5	5.8	6.3	7.0	13.5	14.3	14.6	15.1	15.8
May	8.2	9.0	9.4	9.9	10.7	17.4	18.3	18.7	19.1	19.9
Jun.	10.8	11.6	12.1	12.4	13.4	19.7	20.6	21.0	21.4	22.3
Jul.	13.0	13.8	14.3	14.6	15.7	22.0	22.9	23.4	23.7	24.7
Aug.	12.8	13.7	14.2	14.5	15.6	22.1	22.9	23.4	23.7	24.8
Sep.	10.6	11.4	11.9	12.3	13.3	18.8	19.6	20.1	20.5	21.5
Oct.	7.5	8.3	8.7	9.1	9.9	14.5	15.3	15.7	16.2	17.0
Nov.	4.2	5.0	5.3	5.9	6.5	9.7	10.6	10.9	11.4	12.0
Dec.	1.5	2.3	2.5	3.1	3.6	6.3	7.2	7.4	8.0	8.5

De KNMI'06 scenario's lopen vanaf 1995, het midden van de klimatologische periode 1981 – 2010. In de bovenste twee tabellen, van de minimum en maximum temperatuur voor 2010, is te zien dat er in de verschillende scenario's sinds 1995 al een substantiële opwarming zou zijn gerealiseerd van 0,5 graden in de winter tot 0,7 graden in de zomer. In 2050 zou die opwarming al 0,8 resp. 2,7 graden zijn.

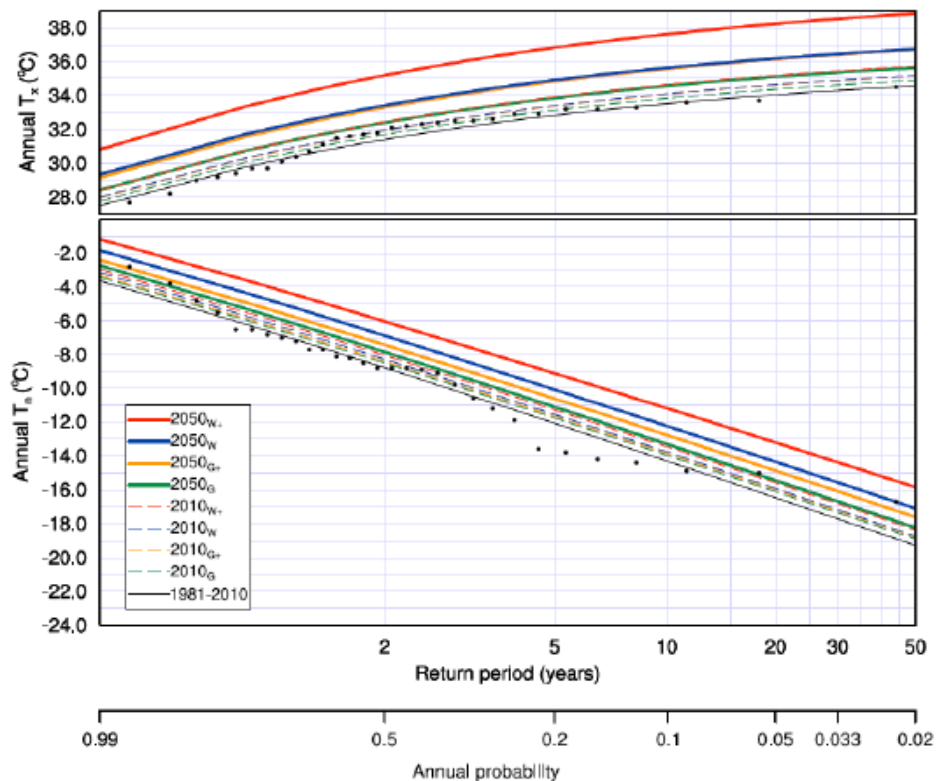


6.3.3 Extreme minimum en maximumtemperaturen

Om een beeld te krijgen van mogelijke extreme temperaturen op Schiphol in een toekomstig opgewarmd klimaat is dezelfde methode gehanteerd als voor de extremen in het huidige klimaat, met behulp van het 'fitten' van een GEV distributie aan de 'waargenomen' minimum en maximum temperaturen. In onderstaande weergave worden het optreden van extreme gebeurtenissen in zowel het huidige klimaat als in mogelijke toekomstige klimaten en de samenhang daartussen samengevat:

103

Figuur 6.4: Herhalingsstijden (return period) van jaarlijkse minimum- en maximumtemperaturen gebaseerd op GEVverdelingen gefit aan observaties van 1981-2010 (zwarte stippen), en observaties getransformeerd naar de vier KNMI'06 scenario's rond 2010 en 2050.



In het bovenste deel van de grafiek zien we een flinke toename van de kans op extreem warme dagen op Schiphol in elk van de scenario's. Een dag met een maximum temperatuur van 34°C komt in het huidige klimaat gemiddeld slechts eens in de vijftig jaar voor. In het G scenario in 2050 is de kans op een dergelijke warme dag al 0,1, terwijl onder het W+ scenario die maximum temperatuur van 34°C rond 2050 bijna elk jaar wel een keer gehaald wordt! Tegelijk zien we in het onderste plaatje een forse afname van de kans op extreem lage minimum temperaturen onder verschillende scenario's.

Hieronder wordt een alternatieve presentatie van deze onderzoeksresultaten gegeven in de vorm van een tabel met het aantal dagen per jaar dat een bepaalde grens wordt over- (temperatuurmaxima) of onderschreden (temperatuur minima) in het huidige klimaat en onder de vier scenario's:

Tabel 6.5: Gemiddeld aantal dagen per jaar waarop aan bepaalde grenswaarden/criteria voor minimum- en maximumtemperatuur wordt voldaan voor de periode 1981-2010 en voor de periode rond 2010 en rond 2050 volgens de vier KNMI'06 klimaatscenario's.

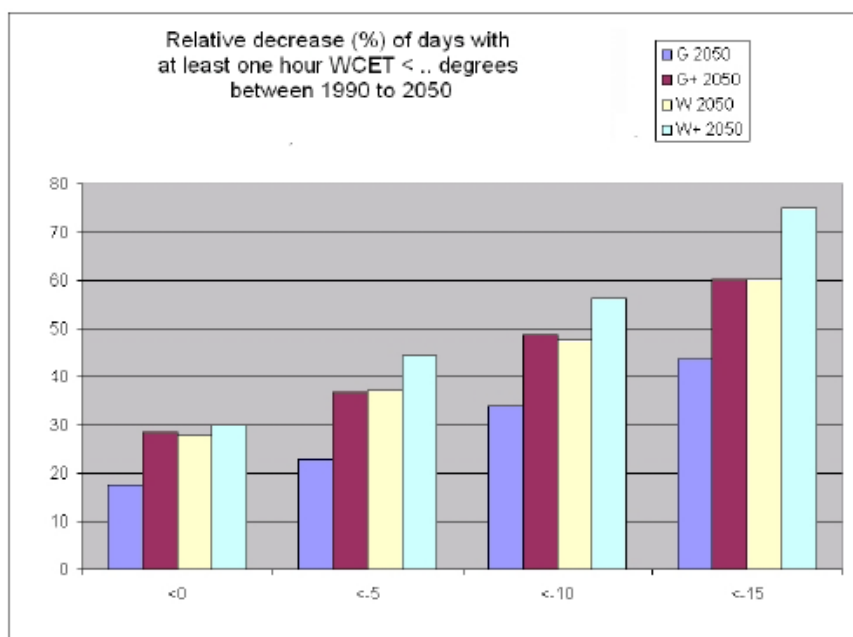
Minimum temperature									
	1981-2010	2010				2050			
		G	G+	W	W+	G	G+	W	W+
< 10°C	254.1	249.7	247.5	244.5	240.1	236.0	228.3	218.7	203.8
< 5°C	141.8	137.3	136.2	133.3	129.8	124.9	118.8	106.7	97.0
< 0°C	47.9	45.9	44.7	40.7	39.7	35.9	32.8	27.2	21.8
< -5°C	9.5	8.8	8.4	8.1	7.4	7.1	6.4	5.0	3.7
< -10°C	1.7	1.5	1.5	1.4	1.3	1.2	0.9	0.6	0.4
< -15°C	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	-	-

Maximum temperature									
	1981-2010	2010				2050			
		G	G+	W	W+	G	G+	W	W+
< 0°C	7.6	6.9	6.6	6.0	5.6	4.9	4.1	3.1	2.1
≥ 10°C	248.3	252.7	254.4	257.8	260.6	266.0	270.2	281.9	291.2
≥ 15°C	164.8	167.4	168.9	171.7	173.8	177.3	182.2	190.2	198.4
≥ 20°C	74.9	77.9	80.8	82.7	87.2	90.2	98.2	106.5	121.2
≥ 25°C	20.3	21.5	23.0	23.5	25.6	26.0	30.3	32.2	42.9
≥ 30°C	2.4	2.9	3.3	3.3	4.1	4.2	6.1	6.8	11.4
≥ 35°C	-	-	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.2	0.3	1.4

6.3.4 Gevoelstemperatuur

Figuur 6.5, hieronder, laat de relatieve afname van het aantal dagen met een gevoelstemperatuur onder de 0, -5, -10 and -15°C zien rond 2050 in vergelijking met rond 1990 (aangenomen dat de wind niet verandert). De grootste afname is er onder het W+ scenario, de kleinste onder het G scenario. Dat de procentuele afname van de laagste gevoelstemperaturen groter is dan van wat hogere gevoelstemperaturen komt omdat onder alle KNMI scenario's de extreme temperaturen (iets) harder stijgen dan de gemiddelde temperatuur. Dit leidt tot een grotere procentuele afname van dagen met een zeer lage gevoelstemperatuur in vergelijking met dagen met een minder lage gevoelstemperatuur.

Figuur 6.5: Relatieve afname van aantal dagen per jaar met een gevoelstemperatuur onder de 0, -5, -10, en -15°C voor Eelde, De Bilt, De Kooij, Vlissingen en Beek voor de vier KNMI'06 scenario's tussen 1990 en 2050.





6.4 Conclusies

Voor de luchthaven Schiphol zijn de belangrijkste veranderingen in de gemiddelde, minimum- en maximum- en gevoelstemperatuur volgens de KNMI scenario's:

- De toename van de jaargemiddelde temperatuur in Nederland rond 2050 is naar verwachting tussen de 0.8 – 2.2°C ten opzichte van de periode 1981-2010.
- Het gemiddeld aantal dagen per jaar dat de minimumtemperatuur onder het vriespunt komt neemt rond 2010 met ongeveer 2 (G) tot 8 (W+) dagen af in vergelijking met de normaalperiode 1981-2010. Rond 2050 zijn dit er 12 tot 16.
- Het aantal dagen dat de maximumtemperatuur boven de 25°C komt is rond 2010 toegenomen met 1-5 dagen, rond 2050 met 6-22 dagen ten opzichte van de periode 1981-2010.
- de minimumtemperaturen rond 2010 en rond 2050 zijn lager onder het G+ scenario dan onder het W scenario. De circulatieverandering heeft dus een kleiner effect op de minimumtemperatuur dan het verschil van 1°C in mondiale opwarming tussen de G en W scenario's.
- Dagen met lage gevoelstemperaturen zullen duidelijk afnemen rond 2050. Bijvoorbeeld het gemiddeld aantal dagen waarop de gevoelstemperatuur ten minste een uur lang onder de nul graden is neemt af van 117 dagen (1971-2000) tot 63 (W+) - 92 (G) dagen rond 2050.

6.5 Verder lezen

De volgende achtergrondrapporten zijn voor dit project gemaakt, en bevatten uitvoerigere informatie over de temperatuurklimatologie voor het huidige en toekomstige klimaat op Schiphol.

Wolters, D. en Beersma, J., Temperature climatology for Schiphol (the Netherlands), for present-day and climate scenario's in 2050, KNMI Technical Report TR-320, De Bilt, 2012.

Groen, 2009. Wind chill equivalent temperature (WCET), Climatology and scenarios for Schiphol Airport. www.knmi.nl/samenw/kbs/doc/WCET-Schiphol.pdf



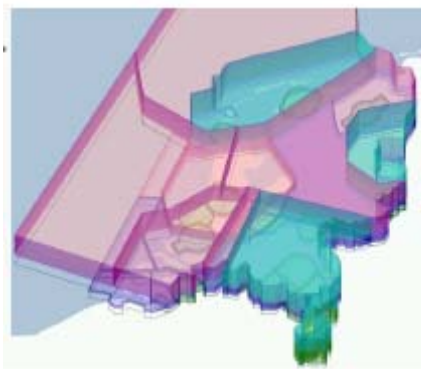
7 Bovenlucht

7.1 Introductie

De luchtverkeersleiding Nederland (LVNL) is – naast Dutchmil voor het militaire luchtruim en Maastricht Upper Area Control (afdeling van EUROCONTROL) voor het luchtruim boven FL245⁸ – verantwoordelijk voor het leveren van luchtverkeersdienstverlening binnen de Amsterdam Flight Information Region (FIR). De Amsterdam FIR bestrijkt het hele luchtruim boven Nederland en een deel van de Noordzee.

107

Figuur 7.1: De Amsterdam FIR



De luchtverkeersleiding heeft aangegeven behoefte te hebben aan een beschrijving van de klimatologie van de bovenlucht, met name van de windrichting en –snelheid, temperatuur en vochtigheid. Deze klimatologie is beschreven in twee deelrapporten. Het eerste deelrapport beschrijft de klimatologie van 850 tot 150 hPa (ca. 1,5 – 13,5 km hoogte) , (Wolters en Groen, 2010), het tweede de klimatologie onder 850 hPa (Groen en Wolters, 2010). De hoogte tussen 150 en 850 hPa betreft grofweg dat deel van de atmosfeer tussen de grenslaag en de tropopauze. Hier is de invloed van het landoppervlak nog maar minimaal. De klimatologie onder 850 hPa beschrijft de processen in de onderste laag van de atmosfeer, de grenslaag, waar de invloed van het landoppervlak relatief groot is.

Omdat waarnemingen op grotere hoogte van wind, temperatuur en vochtigheid schaars zijn, is in dit rapport gebruik gemaakt van een zogenaamde heranalyse. Hierin worden waarnemingen en modelberekeningen gecombineerd om één consistent en volledig beeld te krijgen van de gehele atmosfeer.

De klimatologie van de bovenlucht boven het Amsterdam FIR is gebaseerd op een analyse ERA-interim data (zie kader) van 1989 tot en met 2008 en op

⁸ Flight Level 245: vlieghoogte van 24.500 voet, ongeveer 8 km.

meetgegevens zoals bijvoorbeeld die van de 200 meter hoge meetmast te Cabauw.

Om te controleren of de ERA-interim voor het gebied rondom Schiphol goede resultaten geeft is een vergelijking gemaakt met ballonsonderingen in De Bilt. Voor wind en temperatuur is een goede overeenkomst gevonden. De afwijkingen van relatieve vochtigheid zijn kleiner dan 10 procentpunt tot een hoogte van 500 hPa. Daarboven zijn de afwijkingen in de relatieve vochtigheid groter, maar is de absolute vochtigheid door de lage temperatuur laag. Een uitgebreide vergelijking tussen de heranalyse data en de waarnemingen is beschreven in de deelrapporten.

Hieronder vindt u enkele voorbeelden en illustraties overgenomen uit de deelrapporten. Voor een meer uitgebreide klimatologie wordt naar deze rapporten verwezen.

ERA-interim

ERA-interim is een heranalyse van het weer aan de hand van meteorologische metingen. Hierbij wordt gebruik gemaakt van één consistent analyseschema op basis van een numeriek weermodel. Dit model doet een reconstructie van de toestand van de complete atmosfeer, op basis van alle voorhanden zijnde meteorologische waarnemingen. Omdat de data op een eenduidige en consistente manier worden geanalyseerd zijn de ERA-interim reeksen in veel gevallen bruikbaar voor klimaatstudies. Tevens kunnen heranalyses gebruikt worden voor locaties waar weinig waarnemingen zijn, bijvoorbeeld in de bovenlucht. ERA-Interim is een heranalyse van de periode 1989-2008.

Figuur 7.2: De KNMI-meetmast in Cabauw



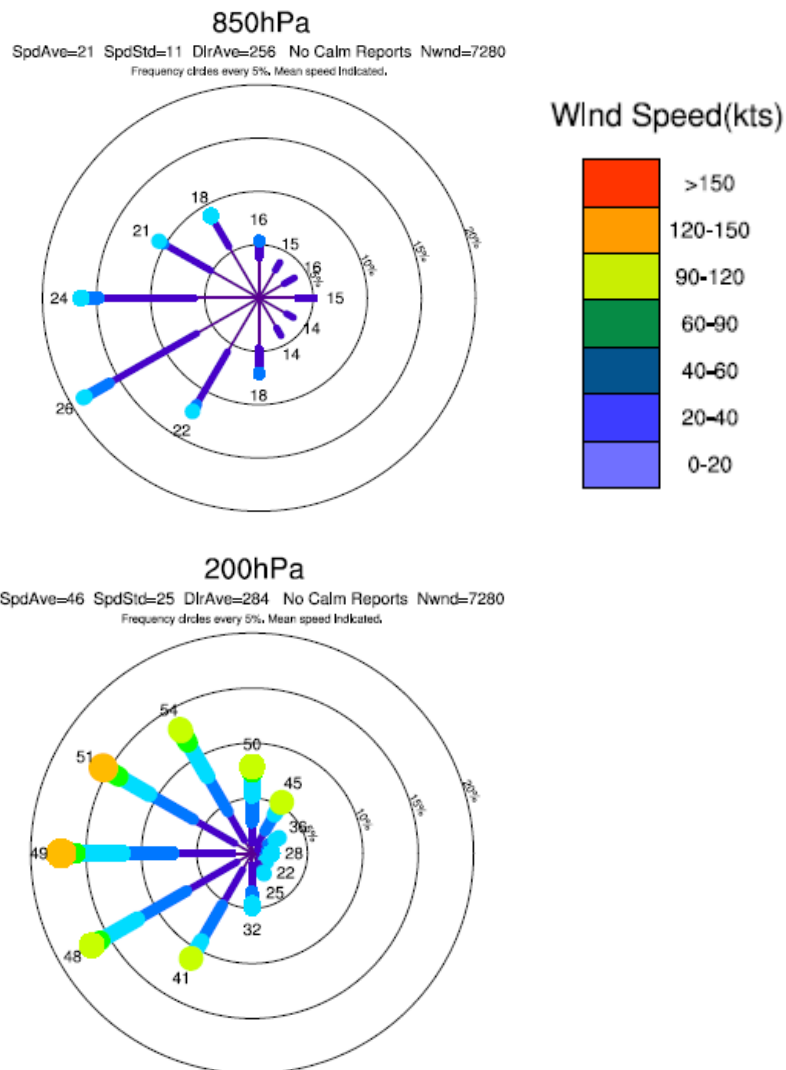


7.2 Verticale profielen van wind, temperatuur en luchtvochtigheid

Het gebruik van het banenstelsel wordt voor een belangrijk deel bepaald door de windroos, waarin voor één locatie de frequentieverdeling van de windsnelheid en de windrichting wordt weergegeven. Voor planningsdoeleinden wordt door Schiphol een lange reeks met uurlijkse waarnemingen gebruikt.

Figuur 7.3 geeft een voorbeeld van een windroos met de gemiddelde windsnelheden en -richtingen op 200 en 850hPa in de herfst (september tot en met november). Deze windrozen zijn gemaakt voor alle vluchthoogtes, voor alle seizoenen en voor de vier locaties in de uithoeken van het Amsterdam FIR. Tevens zijn er verticale profielen van de windsnelheid voor alle locaties te vinden in de deelrapporten.

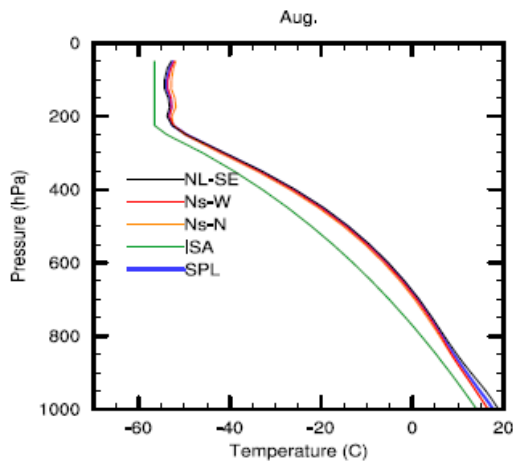
109



Figuur 7.3: Klimatologische windrozen voor de herfst (september tot en met november) voor 850 en 200 hPa. SpdAve= gemiddelde windsnelheid (knopen), SpdStd= standaarddeviatie van de windsnelheid, DirAve= gemiddelde windrichting (graden), Nwnd=aantal waarnemingen. De gekleurde balken geven de verdeling van de windsnelheden per windrichtingssector van 30 graden. Het getal naast de balk geeft de gemiddelde windsnelheid voor die windrichtingssector.

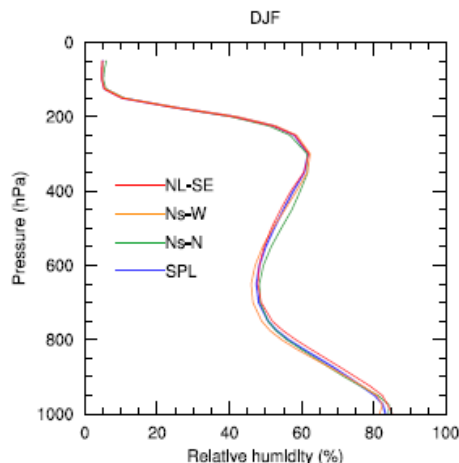
De windroos in figuur 7.3 is gebaseerd op de ERA-interim heranalyse, en laat de voor Nederland kenmerkende verdeling van de wind zien. In het najaar komt de wind overwegend uit het zuidwesten en de windsterkte neemt toe met de hoogte. Ook ruimt de wind met de hoogte (de windrichting draait met de klok mee). Over het algemeen geldt in heel Nederland voor alle seizoenen dat de wind meest uit west of zuidwestelijke richting waait. In de lente en zomer zijn de windsnelheden lager dan in de herfst en winter (het “stormseizoen”).

Figuur 7.4 Gemiddelde temperatuurprofielen voor de maand augustus. NL-SE: Nederland Zuidoost (51.0N 07.0E), Ns-W: Noordzee-west (52.5N 02.0E), Ns-N: Noordzee Noord (54.0N 07.0E), ISA: Internationale Standaardatmosfeer, SPL: Schiphol.



Figuur 7.4 toont klimatologisch gemiddelde verticale temperatuurprofielen voor de maand augustus. De verticale profielen voor de vier uithoeken van het FIR laten een afname van de temperatuur met de hoogte zien in de zomer (juni, juli, augustus) van gemiddeld +17°C (+/- 7) aan het aardoppervlak tot -55°C (+/- 9°C) op het 200 hPa niveau (ca. 12 km). In de winter is de afname van +4°C (+/- 6°C) nabij het aardoppervlak tot -61°C (+/- 10°C) nabij 200 hPa.

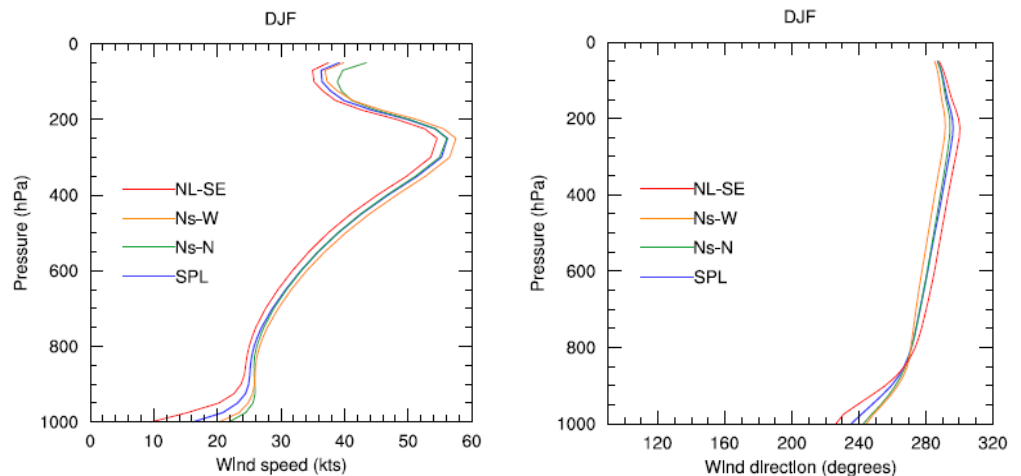
Figuur 7.5 : Idem als Figuur 7.4 maar dan voor de gemiddelde luchtvochtigheid in de wintermaanden (december, januari, februari).



De relatieve vochtigheid is in de zomer nabij het aardoppervlak gemiddeld ongeveer 75% rond middernacht met een variatie van ongeveer 10% gedurende de dag. In de winter (zie figuur 7.5) is de relatieve vochtigheid gemiddeld ongeveer 84% met weinig dagelijkse variatie. In de hoogte neemt de relatieve vochtigheid af naar ongeveer 45% op 600-700 hPa (3-4 km) en daarna weer toe tot ongeveer 65% bij de tropopauze.



Figuur 7.6 geeft de gemiddelde verticale profielen van windsnelheid en -richting voor de wintermaanden, voor de verschillende hoekpunten van de FIR. De windsnelheid is gemiddeld het laagst aan het aardoppervlak en neemt toe met de hoogte tot aan de tropopauze. De windrichting is gemiddeld zuidwest aan het aardoppervlak en ruimt met de hoogte.



Bij het opstijgen en het landen is de over het algemeen sterke verandering van de wind met de hoogte nabij het aardoppervlak van belang. In het deelrapport is daarom een groot aantal verticale profielen weergegeven voor de laag tussen het aardoppervlak en 850 hPa

7.3 Ruimtelijke verschillen

Vanwege verschillende aanvliegeroutes is het van belang te onderzoeken of er grote ruimtelijke verschillen zijn in de klimatologie van de bovenlucht. Binnen het Amsterdam FIR hebben de verticale profielen voor windsnelheid, temperatuur en luchtvochtigheid gemiddeld een gradiënt van noord/noordwest naar zuid/zuidoost: Het is gemiddeld warmer in het zuidoosten dan in het noordwesten (behalve in de winter op het 850 hPa niveau), de relatieve luchtvochtigheid onder de 600 hPa is lager in het noord/noordwesten en de gemiddelde windsnelheid neemt toe naar het noord/noordwesten. De gemiddelde windrichting op de verschillende niveaus (200 tot 850 hPa) varieert nauwelijks binnen het FIR.

7.4 Afwijkingen van de ICAO standaardatmosfeer

De ICAO (International Civil Aviation Organisation) heeft speciaal voor de luchtvaart een standaardatmosfeer gedefinieerd voor een hoogte tot 32 kilometer, de ISA (international standard atmosphere). Hierbij hebben de druk, temperatuur en luchtvochtigheid een vaste grootte afhankelijk van de hoogte boven het aardoppervlak.

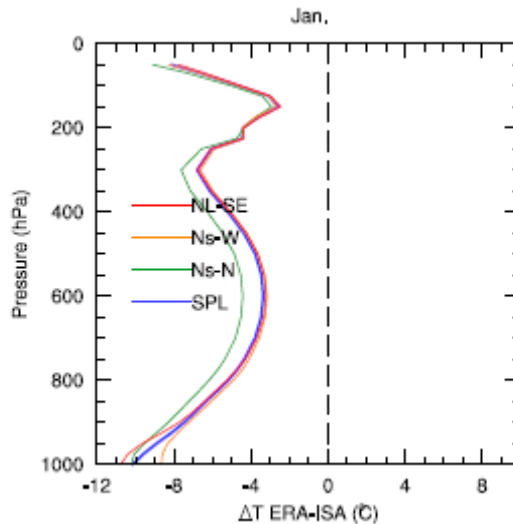
Voor LVNL is het belangrijk om de verschillen tussen de standaardatmosfeer en de werkelijke atmosfeer te weten voor hun planning van vliegbewegingen. Conventionele vluchtmanagementsystemen (FMS) baseren het verticale profiel tot aan de tropopauze alleen op de afwijking van de oppervlaktetemperatuur. Dit kan leiden tot onverwachte snelheden van vliegtuigen tijdens de vlucht en

daarmee tot moeilijkheden voor de planning door de luchtverkeersleiding. In de toekomst zal dit systeem vervangen worden door een systeem dat naar de actuele atmosfeer kijkt op alle hoogtes, maar dit zal nog tot 2030 duren.

Het rapport van de bovenlucht (zowel deel 1 als deel 2) geeft een overzicht van de afwijkingen van de klimatologie van de temperatuur van het Amsterdam FIR t.o.v. de ICAO standaardatmosfeer. Hiervoor zijn voor de vier uithoeken van het FIR (Noordzee Noord, Noordzee West, Nederland Centraal en Nederland Zuidoost) de gemiddelde verticale profielen per kalendermaand in de periode 1989-2008 (ERA-Interim) vergeleken met de verticale profielen volgens ICAO. Voor de gemiddelde profielen in de maand januari is deze vergelijking weergegeven in figuur 7.6, overgenomen uit deelrapport 1.

Figuur 7.6 geeft een voorbeeld van zo'n vergelijking voor de temperatuur in de maand januari. In deze figuur is het verschil aangegeven tussen de twee profielen: $T_{\text{ERA-Interim}} - T_{\text{International Standard Atmosphere}}$.

Figuur 7.7: Vergelijking van de temperatuurprofielen van de uithoeken van het FIR met het temperatuurprofiel van ICAO voor de maand januari. NL-SE=Nederland Zuidoost, Ns-W en Ns-N resp. Noordzee-West en Noord, SPL= Schiphol.



Het verschil in temperatuur nabij het aardoppervlak tussen de klimatologie van Schiphol en de ICAO standaardatmosfeer varieert tussen -10.2°C in januari tot $+3.7^{\circ}\text{C}$ in augustus. Halverwege de troposfeer, tussen 600 en 500 hPa, varieert het verschil tussen $+7.6^{\circ}\text{C}$ in augustus en -4.7°C in de winter. Op het tropopauzeniveau varieert het verschil tussen de $+2.6^{\circ}\text{C}$ in de zomer en -7.4°C in de winter. De ISA standaardtemperatuur bij de tropopauze is -56.5°C .

7.5 Klimatologie en trends in de tropopauzehoogte en temperatuur

De gemiddelde maandelijkse hoogte van de tropopauze is ongeveer 239 hPa, variërend tussen 250 hPa in april tot 215 hPa in september. De standaarddeviatie ligt tussen de 34 en 45 hPa. In de standaardatmosfeer is de tropopauze constant gedefinieerd op 225 hPa. De werkelijke tropopauze wijkt dus gemiddeld



af tussen de +25 hPa (ca. 2500 voet/ 850 meter) in april en -10 hPa (ca. 1000 voet/ 300 meter) in september.

De temperatuur van de tropopauze ligt rond de -58 ± 4 °C en varieert van jaar tot jaar met ongeveer 2 °C.

Een trend in de tropopauze en in de jetstream is niet waargenomen in de afgelopen 15-20 jaar in de reanalysis of in de waarnemingen boven Nederland Centraal.

7.6 Klimatologie van inversies

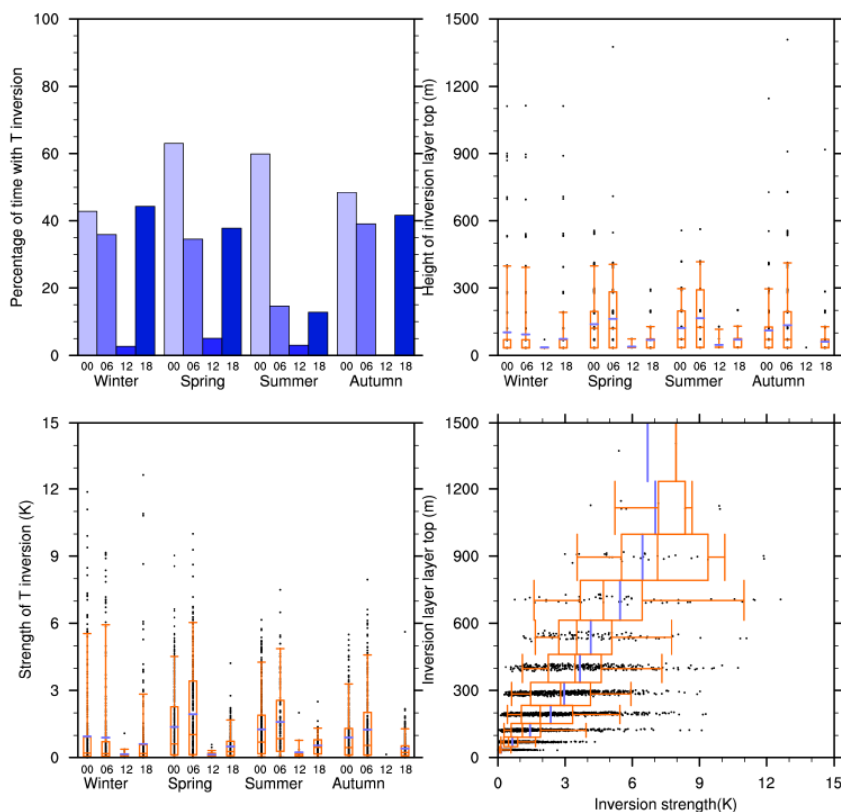
113

Voor een piloot is het belangrijk te weten of er inversies voorkomen nabij het aardoppervlak. Een inversie komt voor als de temperatuur toeneemt met de hoogte in plaats van afneemt. Bij het toenemen van de temperatuur wordt de lucht ijler en zal een vliegtuig dus meer vermogen moeten leveren om op te kunnen stijgen.

In deel 2 van de bovenluchtrapporten is onderzoek gedaan naar de klimatologie van inversies nabij het aardoppervlak en inversies die niet aan het aardoppervlak beginnen maar pas op een hoger niveau, en een top onder de 1500 meter hebben.

De resultaten zijn gebaseerd op 20 jaar (1989-2009) ERA-interim analyse. Uit vergelijking met de metingen van de meetmast Cabauw blijkt dat het model het voorkomen van inversies lijkt te onderschatten met gemiddeld 8%, variërend van een onderschatting van 38% in het voorjaar tot een overschatting van 35% in de zomer. De getallen uit deze studie kunnen dus niet kwantitatief gebruikt worden, maar kunnen wel gebruikt worden om een kwalitatieve inschatting te maken van de verschillen tussen de seizoenen.

Figuur 7.8 geeft een overzicht van de frequentie van voorkomen (linksboven), de gemiddelde hoogte (rechtsboven), de gemiddelde sterkte (linksonder) en de sterkte van de inversie versus de hoogte (rechtsboven). De boxplots geven het 5, 25, 50, 75 en 95% percentiel, de blauwe lijn is het gemiddelde.



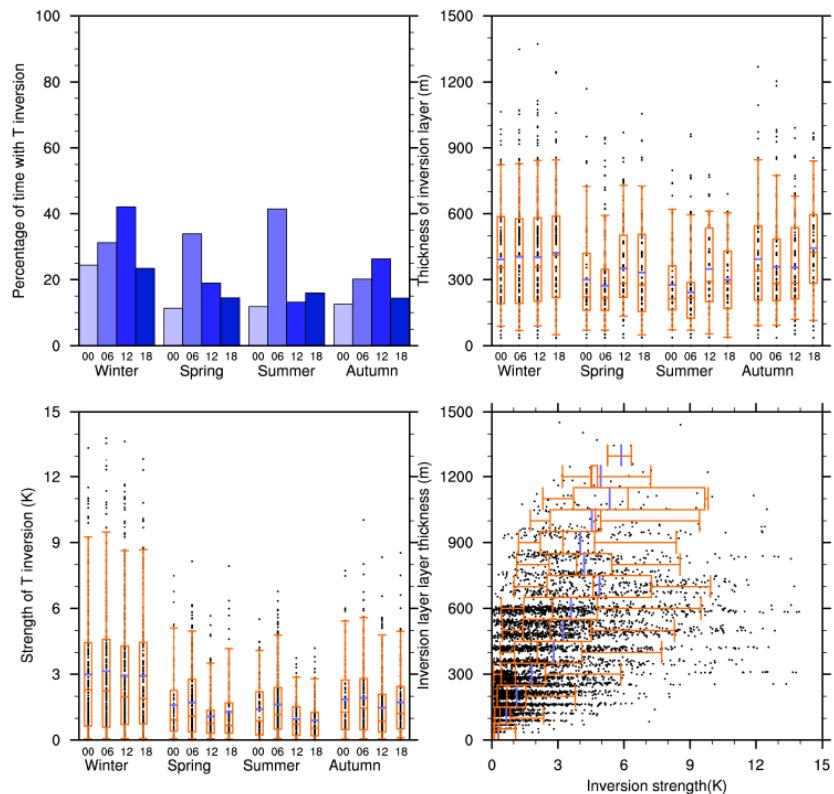
Te zien is dat de meeste oppervlakte-inversies plaatsvinden in de nacht. De jaarlijkse gang in de daglengte is terug te zien in de verschillen van de frequenties om 6 en 18 UTC. De hoogte van de inversies ligt gemiddeld onder 170 meter en neemt toe tijdens de nacht. In extreme gevallen bereiken inversies soms een hoogte van 700-1500 meter.

De sterkte van de inversie is in de meeste gevallen niet meer dan 2°C, maar in sommige extreme gevallen bedraagt het verschil tussen de onder- en de bovenkant van de inversie van meer dan 10°C (in de luchtvaart aangeduid als een *marked temperature inversion*). Inversies met een hogere top zijn over het algemeen ook sterker.



Figuur 7.9 geeft dezelfde informatie als Figuur 11.6 maar nu voor de inversies die niet aan het aardoppervlak beginnen maar hoger. .

115



Inversies op enige afstand boven het aardoppervlak komen gemiddeld 22% van de tijd voor, de gemiddelde dikte is 350 meter en de gemiddelde sterkte 2°C. De meeste inversies komen voor in de winter. In de winter komen de meeste inversies voor om 12UTC, terwijl deze in de lente en in het voorjaar vooral rond 6 UTC voorkomen.

7.7 Toekomstig klimaat

Over de toekomstige klimatologie van de bovenlucht is weinig bekend en is in de deelrapporten ook niets vermeld. Verder onderzoek is hier ook niet naar gedaan omdat de LVNL aangaf voldoende te hebben aan een beschrijving van het huidige klimaat.

7.8 Conclusies

De belangrijkste bevindingen van de twee deelrapporten zijn:

- Over het algemeen geldt in heel Nederland voor alle seizoenen dat de wind meest uit west of zuidwestelijke richting waait. In de lente en zomer zijn de windsnelheden lager dan in de herfst en winter (het "stormseizoen"). De windsnelheden nemen toe met de hoogte, de windrichting ruimt met de hoogte.

- De verticale profielen voor De Bilt laten een afname van de temperatuur met de hoogte zien in de zomer van gemiddeld +17°C (+/- 7) aan het aardoppervlak tot -55°C (+/- 9°C) op het 200 hPa niveau (ca. 12 km). In de winter is de afname van +4°C (+/- 6°C) nabij het aardoppervlak tot -61°C (+/- 10°C) nabij 200 hPa.
- De relatieve vochtigheid is in de zomer nabij het aardoppervlak gemiddeld ongeveer 75% rond middernacht met een variatie van ongeveer 10% gedurende de dag. In de winter is de relatieve vochtigheid gemiddeld ongeveer 84% met weinig dagelijkse variatie. In de hoogte neemt de relatieve vochtigheid af naar ongeveer 45% op 600-700 hPa (3-4 km) en daarna weer toe tot ongeveer 65% bij de tropopauze.
- Ruimtelijke verschillen binnen het Amsterdam FIR in de verticale profielen hebben voor windsnelheid, temperatuur en luchtvochtigheid een gradiënt van noord/noordwest naar zuid/zuidoost met de laagste temperaturen, lagere relatieve vochtigheden en hogere windsnelheden in het noord/noordwesten).
- De gemiddelde maandelijkse hoogte van de tropopauze is ongeveer 239 hPa, variërend tussen 250 hPa in april tot 215 hPa in september. De standaarddeviatie ligt tussen de 34 en 45 hPa.
- De meeste inversies vinden plaats in de nacht en in de winter. De sterkte van de inversie is in de meeste gevallen niet meer dan 2°C

7.9 Verder lezen

De volgende achtergrondrapporten zijn voor dit project gemaakt, en bevatten uitvoerigere informatie over de bovenluchtklimatologie rond Schiphol.

Wolters, D. en Groen, G.: Upper air climatology of Amsterdam FIR, using ERA-Interim 1989-2008 Part 1, KNMI WR 2011-02 part 1/2, De Bilt, 2011.

Groen, G. en Wolters, D.: Upper air climatology of Amsterdam FIR, using ERA-Interim 1989-2008 Part 2, KNMI WR 2011-02 part 2/2, De Bilt, 2011.



8 Conclusies en aanbevelingen

8.1 Algemeen

Algemene conclusies t.a.v. het onderwerp “Schiphol klimaatbestendig” die naar voren kwamen in KvK project HSMSO2 luiden:

- Schiphol is goed ingespeeld op het *huidige klimaat*, zowel wat betreft infrastructuur als wat betreft procedures en protocollen rond de operaties. De meteorologische dienstverlening aan Schiphol wordt gedaan door het KNMI en de geschiedenis daarvan laat zien dat er voortdurend overleg wordt gevoerd en dat relevant onderzoek wordt gedaan dat leidt tot voortschrijdend inzicht.
- *Klimaatverandering* zal zeker invloed hebben op de ontwikkeling en bedrijfsvoering van Schiphol, maar het is slechts één van de factoren, naast b.v. socio-economische (het reizigersaanbod hangt bijv. sterk samen met economische factoren), technologische en politieke factoren (toenemende bebouwing, veranderende (geluids-)normen etc.). Mede door die vele invloeden is de praktische ‘planning horizon’ voor Schiphol (en andere grote luchthavens) niet langer dan zo’n tien jaar. Gezien de grote onzekerheden in de klimaatprojecties op de termijn van tientallen jaren en op een ruimteschaal als van Nederland en de toch betrekkelijk kleine veranderingen die op die termijn te verwachten zouden zijn zullen geen concrete risico’s of adaptatiemogelijkheden uitgewerkt kunnen worden.
- De KNMI *klimaatscenario’s* die voor Nederland zijn ontwikkeld kunnen natuurlijk ook voor Schiphol toegepast worden. In elk KNMI’06 scenario komen een aantal dezelfde kenmerken van de klimaatverandering in Nederland en omgeving naar voren: De opwarming zet door, hierdoor komen zachte winters en warme zomers vaker voor. De winters worden gemiddeld natter en ook de extreme neerslaghoeveelheden nemen toe. De hevigheid van extreme regenbuien in de zomer neemt toe, maar het aantal zomerse regendagen wordt juist minder. De berekende veranderingen in het windklimaat zijn klein ten opzichte van de natuurlijke grilligheid en zeespiegel blijft stijgen.

8.2 Uit de deelstudies

8.2.1 conclusies

Wind:

- De gemiddelde potentiële windsnelheid ontdaan van de natuurlijke variatie in de geostrofische wind laat twee scenario's zien: geen verandering of een afnemende trend van 0.8% per decade als gevolg van de toegenomen regionale ruwheid. Op basis daarvan blijven dwars- en rugwindfrequenties gelijk of nemen ze in vergelijking tot het windklimaat van rond 1969 af. Dwarswindfrequenties nemen in het afnemende wind scenario voor 2018 met 11-16% af (afhankelijk van de baan). De afname in de mediaan rugwindfrequentie is 7-10 %. De verschillen tussen 2011 en 2018 zijn niet significant ten opzichte van de nauwkeurigheid van de gebruikte methode. De procentuele afnamen gelden dus zowel voor 1 jaar vooruit (operationele planning) als voor 5-10 jaar vooruit (geluidsbelasting MER).
- De jaar op jaar variatie van de dwars- en rugwindfrequenties in 2018 is 3 keer hoger dan de afname van de mediaan frequenties tussen 1969 en 2018 als gevolg van een afnemende trend in de windsnelheid
- De uitkomsten van verschillende numerieke mondiale klimaatmodellen geven geen eenduidig beeld van wat er met de windsnelheid gaat gebeuren: een lichte afname, een lichte toename en geen verandering komen allemaal voor. Bovendien houden deze modellen geen rekening met veranderingen in ruwheid
- Van de geverifieerde windwaarnemingen zijn alleen de metingen in de periode 1971-1995 geschikt om dwars- en rugwindfrequenties te berekenen op de verschillende banen op Schiphol omdat de precisie van de gearchiveerde windsnelheden in 1996 veranderd is van hele knopen in hele m/s. De prognose van het baangebruik zoals op dit moment gedaan wordt bij de operationele jaarplanning en geluidsbelastingprognose zou verbeterd kunnen worden door naar andere windwaarnemingen te kijken dan de uurlijkse waarnemingen van de periode 1971 tot heden. De precisie van de windsnelheden na 1996 kan verbeterd worden door de hogere precisie 1 minuut waarnemingen te valideren en naar uurlijkse waarden te aggregeren.

Zicht:

- Slecht-zicht condities (op Schiphol, maar ook elders in Nederland) zijn afgenomen in frequentie. Over de hele periode 1955-2010 met gemiddeld 2% per jaar voor de verschillende drempelwaarden.
- Er lijkt een breuk te zijn opgetreden in de jaren '80 die overigens niet is verklaard. Gegevens van voor de jaren '80 zijn met name



door de veranderde trend niet meer representatief voor de huidige situatie.

- Het verschil in mistgevoeligheid tussen de jaren voor en na de jaren 80' is vooral duidelijk in de wintermaanden (december-februari) en in de herfstmaanden september en oktober, in de ochtend, net na zonsopkomst.
- Ruimtelijk gezien over verschillende meetlocaties op schiphol vallen vooral de metingen aan de Polderbaan (slechter zicht) en de Kaagbaan (beter zicht) op. Deze metingen hebben alleen betrekking op het tijdvak 2004/2010, te kort om van een klimatologisch verschil te kunnen spreken.
- De frequentie bewolgingsgraden in de klassen 'broken' en 'overcast' lijkt niet onderhevig aan een trend. Wel moet er rekening worden gehouden met een overgang tussen handmatige en automatische waarnemingen rond 2002. Dit is terug te zien in de frequentie van de 'ceiling' beneden de kritieke grenzen. Voor de grenzen 1000 voet, 300 voet en 200 voet is deze tussen 1951 en 2002 duidelijk afgenomen.
- Toekomstige veranderingen van het zicht zijn sterk afhankelijk van de ontwikkeling van de luchtkwaliteit en mogelijk ook de lokale ontwikkeling op het Schipholterrein. Het is daarom moeilijk een kwantitatieve uitspraak te doen over de toekomstige ontwikkelingen. Afgaande op Van Oldenborgh et al. (2010) ligt een verslechtering van de luchtkwaliteit en een toename van aerosolconcentraties (en daarmee een structurele verslechtering van het zicht) niet voor de hand. Dat is echter moeilijk te kwantificeren, zeker niet voor één individuele locatie.

Neerslag:

- Neerslag komt voor op 241 dagen in het jaar. De hoogste intensiteiten komen meestal in de zomer voor. De hogere temperaturen in een veranderend klimaat leiden tot meer vochtinhoud van de atmosfeer, waardoor (extreme) neerslagintensiteiten zullen toenemen.
- Voor duren langer dan 24 uur blijken de neerslaghoeveelheden te Schiphol 8% meer te bedragen dan die te De Bilt. Voor duren korter dan 24 uur zijn er geen regionale verschillen binnen Nederland aangetoond. In de toekomst zou de neerslag aan de kust meer kunnen toenemen dan in het binnenland.
- Sneeuw valt op gemiddeld 25 dagen per jaar, hagel op 22 dagen en ijsvorming treedt op gemiddeld 7 dagen op. De variatie van jaar tot jaar is echter zeer groot. Hagel zal waarschijnlijk in de toekomst vaker voorkomen.

Temperatuur:

- De toename van de jaargemiddelde temperatuur in Nederland rond 2050 is naar verwachting tussen de 0.8 – 2.2°C ten opzichte van de periode 1981-2010.
- Het gemiddeld aantal dagen per jaar dat de minimumtemperatuur onder het vriespunt komt neemt rond 2010 met ongeveer 2 (G) tot

8 (W+) dagen af in vergelijking met de normaalperiode 1981-2010. Rond 2050 zijn dit er 12 tot 16.

- Het aantal dagen dat de maximumtemperatuur boven de 25°C komt is rond 2010 toegenomen met 1-5 dagen, rond 2050 met 6-22 dagen ten opzichte van de periode 1981-2010.
- de minimumtemperaturen rond 2010 en rond 2050 zijn lager onder het G+ scenario dan onder het W scenario. De circulatieverandering heeft dus een kleiner effect op de minimumtemperatuur dan het verschil van 1°C in mondiale opwarming tussen de G en W scenario's.
- Dagen met lage gevoelstemperaturen zullen duidelijk afnemen rond 2050. Bijvoorbeeld het gemiddeld aantal dagen waarop de gevoelstemperatuur ten minste een uur lang onder de nul graden is neemt af van 117 dagen (1971-2000) tot 63 (W+) - 92 (G) dagen rond 2050.

Bovenlucht:

- Over het algemeen geldt in heel Nederland voor alle seizoenen dat de wind meest uit west of zuidwestelijke richting waait. In de lente en zomer zijn de windsnelheden lager dan in de herfst en winter (het "stormseizoen"). De windsnelheden nemen toe met de hoogte, de windrichting ruimt met de hoogte.
- De verticale profielen voor De Bilt laten een afname van de temperatuur met de hoogte zien in de zomer van gemiddeld +17°C (+/- 7) aan het aardoppervlak tot -55°C (+/- 9°C) op het 200 hPa niveau (ca. 12 km). In de winter is de afname van +4°C (+/- 6°C) nabij het aardoppervlak tot -61°C (+/- 10°C) nabij 200 hPa.
- De relatieve vochtigheid is in de zomer nabij het aardoppervlak gemiddeld ongeveer 75% rond middernacht met een variatie van ongeveer 10% gedurende de dag. In de winter is de relatieve vochtigheid gemiddeld ongeveer 84% met weinig dagelijkse variatie. In de hoogte neemt de relatieve vochtigheid af naar ongeveer 45% op 600-700 hPa (3-4 km) en daarna weer toe tot ongeveer 65% bij de tropopauze.
- Ruimtelijke verschillen binnen het Amsterdam FIR in de verticale profielen hebben voor windsnelheid, temperatuur en luchtvochtigheid een gradiënt van noord/noordwest naar zuid/zuidoost met de laagste temperaturen, lagere relatieve vochtigheden en hogere windsnelheden in het noord/noordwesten).
- De gemiddelde maandelijkse hoogte van de tropopauze is ongeveer 239 hPa, variërend tussen 250 hPa in april tot 215 hPa in september. De standaarddeviatie ligt tussen de 34 en 45 hPa.
- De meeste inversies vinden plaats in de nacht en in de winter. De sterkte van de inversie is in de meeste gevallen niet meer dan 2°C



8.2.2 aanbevelingen

Gedragsadviezen van de GGD (RIVM) uit 2009 geven de mogelijke effecten van winterkou op de gezondheid weer, variërend van een milde invloed als de gevoelstemperatuur net onder 0 ligt, tot een hele sterke invloed, als de gevoelstemperatuur extreme lag is en de lichaamstemperatuur afkoelt naar 35 graden (hypothermia). Verdere ontwikkeling van gedragsadviezen met betrekking tot windchill wordt verwacht.

De jaarlijkse capaciteitsplanning voor Schiphol voor 1 jaar vooruit is gebaseerd op de ruwe uurlijkse wind metingen van 1975 tot heden. Een meer recente periode zou beter zijn omdat er een trend in die windsnelheidsmetingen zit. In het licht hiervan adviseren we om de methode om de capaciteit een jaar vooraf te plannen samen met het KNMI te reviewen.

KNMI moet de wind snelheid en de metingen van wind vlagen in de klimatologische database opslaan met een resolutie van 0,1 m/s in plaats van de 1 m/s die nu gebruikt wordt.

In dit onderzoek is de jaar-op-jaar variabiliteit van de jaarlijks gemiddelde windsnelheid op schiphol en de trends daarin bestudeerd. De gevolgen van jaar-tot-jaar variaties in de windrichting en de mogelijkheden voor lange termijn trends werden niet onderzocht, maar dat is wel aan te bevelen.

Gedetailleerde informatie over de invloed van oppervlakteruwheid op wind in de luchtlagen nabij de grond is (nog) niet volledig meegenomen in de informatie van de heranalyse experimenten. Daarvoor zou meer onderzoek nodig zijn.

8.3 Lessons learned: Kenniscocreatie door onderzoekers en maatschappelijke actoren

In de hotspot-projecten van KvK wordt samen met de belanghebbenden aan onderwerpen gewerkt die moeten bijdragen aan adaptatie aan klimaatverandering, zo ook in dit project voor Schiphol samen met LVNL en AAAS. Dat het *huidige klimaat* en het weer de operaties op Schiphol sterk beïnvloedt is genoegzaam bekend. Het KNMI verzorgt, als een van haar basistaken, de meteorologische begeleiding van de operaties op Schiphol. KNMI gegevens over het klimaat van nu worden al gebruikt voor de sustainability berekeningen van AAS (zie paragrafen 1.5 en 2.3).

Hoewel experts van het KNMI al voor allerlei projecten samen hebben gewerkt met mensen van Schiphol, m.n. op het gebied van weer en beschrijvingen van het huidige klimaat, hadden zowel de klimaatexperts van het KNMI als de belanghebbenden van Schiphol weinig ervaring met projecten waar het gaat over klimaatverandering. Over het algemeen waren niet dezelfde mensen van het

KNMI bij dit project betrokken, die ook ervaring hadden in eerdere projecten met Schiphol (afgezien van 1 persoon die m.n. bij de eerste fase van het project betrokken was en veel ervaring had met weersverwachtingen voor Schiphol). Door verschillen in taalgebruik, het niet expliciet uitspreken van aannames, gebrek aan kennis over elkaars “praktijk”, was de communicatie lang niet altijd makkelijk. Hoewel er intensieve interactie tussen KNMI, AAS en LVNL heeft plaatsgevonden om onderzoeksvragen, het verloop van het onderzoek en tussentijdse onderzoeksresultaten te bespreken (zie paragraaf 1.3) om deze problemen deels te overkomen, zijn de gevolgen van deze “afstand” tussen de betrokkenen in het project waarschijnlijk onvoldoende onderkend.

Figuur 8.1. Type probleem (bovenste figuur; naar Hirschmüller, 1993) en gerelateerde strategieën om deze problemen op te lossen (uit Boer et al., 2011).

	Agreement and values and objectives	Disagreement and values and objectives
Certainty and agreement on knowledge	Structured	Semi-structured
Uncertainty and disagreement on knowledge	Semi-structured	Un-structured

Beliefs about cause/effect relations	Preferences regarding possible outcomes	
	Certain	Uncertain
Certain	Causation and outcome preferences are certain, data are voluminous <i>Computational strategy</i>	Uncertain due to <ul style="list-style-type: none"> • opposing preferences • external constraints <i>Compromise strategy</i>
Uncertain	Uncertain due to <ul style="list-style-type: none"> • incomplete knowledge • inherent uncertainty • competition with rival decision-makers <i>Judgmental strategy</i>	Uncertain due to <ul style="list-style-type: none"> • a combination of reasons from the upper right cell and the lower left cell <i>Inspirational strategy</i>

In veel van de voorgaande projecten was de onderzoeksvraag duidelijk bij het begin van het onderzoek en konden de onderzoekers aan de slag en uiteindelijk de resultaten aan de betrokkenen van Schiphol presenteren (zie figuur 8.1: situatie waarbij het gaat om een “gestructureerd probleem” waarbij de “computational strategy” geschikt is). In dit project was het formuleren van de onderzoeksvragen echter als onderdeel van het project opgenomen. In de aanloopfase zijn er een serie gesprekken geweest, om de algemene vragen behorende bij een KvK onderzoek, uit te diepen en specifiek te maken voor Hotspot Schiphol Mainport. Desondanks is het onderzoek op een vrij algemene vraagstelling uitgekomen. De precieze onderzoeksvragen lagen dus niet vanaf het begin vast. In de eerste fase van het project ging het om het formuleren van onderzoeksvra-



gen m.b.t. het huidige klimaat (deze informatie wordt o.a. gebruikt voor het plannen van de capaciteit voor het komende jaar en voor het plannen van onderhoud; ook relevant als referentie voor klimaatverandering). Het formuleren van de onderzoeksvragen voor deze eerste fase verliep nog wel vrij redelijk, aangezien dit ook informatie is die concreet door Schiphol gebruikt kan worden. Wel was het regelmatig moeilijk om de vragen van Schiphol met de beschikbare informatie te beantwoorden, o.a. door de gewenste hoge ruimtelijke en temporele resolutie. In de tweede fase van het project over het toekomstige klimaat verliep de vraagarticulatie echter veel moeizamer. Hiervoor zijn de volgende (waarschijnlijke) oorzaken aan te wijzen:

- Het uitgangspunt van het project was: "Schiphol Mainport is zeer kwetsbaar voor klimaatverandering." en "Klimaatverandering, met als gevolg veranderende weersomstandigheden, treft Schiphol in de dagelijkse operatie, maar is tevens een bepalende factor voor mogelijkheden voor toekomstige uitbreiding. Om haar concurrentiepositie als mainport te behouden zal Schiphol moeten anticiperen op weer- en klimaatveranderingen." Tijdens het project bleek echter dat deze notie van grote kwetsbaarheid voor klimaatverandering door veel betrokkenen niet gedeeld wordt. Zo merkte één van de geïnterviewden op Schiphol op: "OK, dan heeft Schiphol over een aantal jaren misschien het klimaat dat nu in Bordeaux heerst, dat is toch geen schrikbeeld waar we ons nu al druk om moeten maken?" (zie ook Box 8.1).
- Voor Schiphol zijn andere zaken dan klimaatverandering op de relatief korte termijn (5-10 jaar vooruit) veel belangrijker, bijv. sociaal-economische ontwikkelingen die het aantal reizigers bepalen of gebiedsontwikkelingen. Dit betekent dat er minder is nagedacht over onderzoeksvragen m.b.t. klimaatverandering en Schiphol en dat er minder interesse is in dergelijke onderzoeksvragen (een onderwerp waar kennis over klimaatverandering mogelijk wel relevant zou zijn, is bij de aanleg van een nieuwe baan: evt. veranderingen in windrichting zijn daarbij interessant).
- Bij het huidige klimaat was het regelmatig al moeilijk om de onderzoeksvragen te beantwoorden door de gewenste ruimtelijke en temporele resolutie, maar voor de toekomst is de beschikbare informatie nog veel grover en er spelen nog meer en ook andere typen onzekerheden.

Bovenstaande betekent dat het in de tweede fase eigenlijk om een ander type probleemstelling ging dan in de eerste fase, nl. een ongestructureerd probleem (zie figuur 8.1) en hierbij past ook een andere aanpak van het project. Dit is tijdens het project niet voldoende gerealiseerd en dit heeft de voortgang van het project bemoeilijkt, de interactie tussen de betrokkenen, maar ook de verslaglegging (m.n. aandacht voor de resultaten van onderzoeken, en niet of nauwelijks voor het proces en het elkaar beter leren begrijpen).

BOX 8.1

Onderzoeken naar de klimaatgevoeligheid van andere luchthavens geven een soortgelijke relativering van de urgentie van het klimaatprobleem voor luchthavens: Zo concludeert het “Climate change adaptation reporting power report”⁹ dat de resultaten van een groot onderzoek naar de klimaatgevoeligheid van de Londense luchthaven Heathrow samenvat:

- Heathrow heeft uitvoerige procedures en alternatieve mogelijkheden om met risico’s in verband met klimaat om te gaan en in grote lijnen worden die voldoende geacht om op korte termijn (2020) met gevolgen van klimaatverandering om te gaan.
- Het is op dit moment niet doenlijk om een gedetailleerde analyse van mogelijke ontwikkelingen voorbij 2050 te maken. Deze tijdschaal valt buiten de typische plancyclus van luchthavens en op die tijdschaal zijn de klimaatprojecties erg onzeker.

In “Factors affecting the frequency and severity of airport weather delays and the implications of climate change for future delays” (Pejovic et al. 2007) wordt geprobeerd om de kosten van weergeerelateerde ‘delays’ in de toekomst te schatten voor verschillende IPCC toekomstscenario’s. Zij vinden dat bij de geprojecteerde klimaatveranderingen voor Heathrow de kans op vertragingen in de winter tot 7% groter zou kunnen worden. In de zomermaanden zouden vertragingen 12 – 15% *minder frequent* kunnen worden. Omdat er tot 2050 nog vele andere veranderingen zullen optreden, zoals toename of afname van het vliegverkeer, omdat er grote onzekerheden zitten in de klimaatprojecties voor 2050 en omdat bv niet is meegerekend of en hoe vraag en aanbod in de verschillende IPCC scenario’s zullen verschillen (wat ook tientallen procenten zou kunnen betekenen) kunnen die uitgerekende effecten alleen als indicatie gezien worden.

Binnen het programma “Kennis voor Klimaat” is er veel aandacht voor het beschikbaar en bruikbaar maken van wetenschappelijke klimaatkennis voor de praktijk. Met die achtergrond zijn ook de hotspots opgericht, en binnen de projecten voor deze hotspots wordt samenwerking tussen wetenschap en praktijk gestimuleerd.

Succesvolle “coproductie” levert nieuwe wetenschappelijke kennis op die op maat gemaakt is voor een specifieke praktijk of beleidscontext en die aansluit bij actuele problemen. Besselaar et al. (2012) geven echter aan dat er geen

9

<http://archive.defra.gov.uk/environment/climate/documents/adapt-reports/08aviation/heathrow-airport.pdf>



vaststaande mechanismen zijn om kennisproductie te organiseren en om te waarborgen dat coproductie projecten uiteindelijk leiden tot bruikbare kennis.

Hegger et al., (2012a) noemen de volgende succes factoren voor “joint knowledge production”:

- 1 Actoren: zijn alle relevante actoren betrokken?
- 2 Discussie over probleemstelling: de kans dat de gezamenlijke productie succesvol verloopt wordt versterkt in gevallen waarin de deelnemende partijen uitgebreid beraadslagen over de aard en de benaming van het beleidsprobleem (“ un-, badly, moderately or well-structured problems”) en de aard van de uitkomst (ideeën, probleemstelling, begrippen, argumenten, of oplossingen)
- 3 Perspectieven: Zijn de verschillende zienswijzen/perspectieven van de betrokken stakeholders herkend/erkend en meegenomen? Betrokkenen kunnen ook verschillende inzichten hebben in wat nuttige en relevante informatie is/uitkomsten van het onderzoek zijn (“salience”).
- 4 Regels/verdeling van verantwoordelijkheden. Zijn de betrokkenen bij het project zich bewust van de rollen die ze spelen en wat men van de ander kan verwachten? (“pure scientist, honest boker, sciene arbiter, issue advocate”)
- 5 Beloningsstructuur : co-productie-projecten zitten meestal op de grens van twee werelden. Die twee werelden stellen eisen of gaan uit van bepaalde aannames die knelpunten kunnen vormen voor succesvol verloop van het project/goede samenwerking. organisaties kunnen o.a. verschillen in de mate van waardering voor verschillende typen werk en resultaten
- 6 Beschikbare middelen: Tijd, geld, boundary objects, organisatievorm, competenties. De echte inspanning die nodig is voor projecten op de grenzen van de wetenschap en praktijk wordt vaak onderschat, omdat alleen de expliciete dimensie van kennis in aanmerking wordt genomen. De betrokkenen hebben tijd samen nodig om wederzijds vertrouwen op te bouwen, meer informatie over de context van elkaar werk the leren kennen, etc.

Hieronder een korte analyse van de bovenstaande punten voor dit project:

- 1 Actoren: relevante organisaties waren betrokken bij het project, maar het is de vraag of van beide kanten de meest geschikte personen betrokken waren. Vanuit het KNMI zou het beter zijn geweest dat er iemand betrokken was geweest die meer ervaring had in dit type projec-

ten, vanuit AAS en LVNL dat er iemand betrokken was geweest die al met het klimaat het klimaatveranderings perspectief vertrouwd was. Het gebrek aan continuïteit van beide zijden in de aanspreekpersonen heeft ook een rol gespeeld.

- 2 Discussie over probleemstelling: zoals hierboven eerder beschreven was m.n. in de tweede fase van het onderzoek een andere aanpak gewenst geweest (Figuur 8.1). Zo'n "inspirational strategy" vraagt ook een wat andere inzet van de betrokken partijen: meer aandacht voor het proces, meer inzet op uitwisseling van perspectieven, aannames over en weer duidelijk maken, een actievere inzet van beide kanten om met elkaar in gesprek te blijven (ook als het een tijdje stroever verloopt), etc.
- 3 Perspectieven: zoals hierboven aangegeven is tijdens het project waarschijnlijk niet voldoende onderkend dat klimaatverandering niet echt een belangrijk issue is voor Schiphol.
- 4 Regels/verdeling van verantwoordelijkheden: hierbij zijn voor ons gevoel niet echt problemen opgetreden (afgezien van wat onder 2 wordt genoemd). Bij de afronding van het project was er wel onduidelijkheid over de vorm van het syntheserapport: vanuit AAS en LVNL wilde men vooral een makkelijk leesbaar niet al te dik rapport (de geïnteresseerden konden de achtergrondrapporten bekijken), maar vanuit KvK was het belangrijker om in het syntheserapport zelf veel nadrukkelijker wetenschappelijke resultaten te laten zien, het proces binnen het project te beschrijven, etc.
- 5 Beloningsstructuur: een van de dingen die impliciet speelden was dat de tijd die ging zitten in de interactie met de gebruikers vaak niet gezien werd als "nuttig besteedde tijd", waardoor de onderzoekers het gevoel hadden dat men te weinig tijd voor het "echte werk" had. In de klimaatwetenschappen zoals bedreven op het KNMI is het niet echt gebruikelijk om rapporten/artikelen te schrijven over het proces van interactie met stakeholders. Men is gewend om het over "concrete" zaken te hebben (explicit knowledge).
- 6 Beschikbare middelen: zie o.a. onder 5

Uit het bovenstaande is af te leiden dat allerlei factoren die belangrijk zijn voor een goed verloop van een project als dit, niet optimaal waren.



8.3.1 Te leren lessen

Besselaar et al. (2012) concludeert dat de geobserveerde knelpunten in de analyses van Kennis voor Klimaat en KLIMZUG suggereren dat deze te wijten zijn aan de verwachtingen en dynamiek van de werkomgeving van sommige deelnemers. Zij concluderen daarom dat er veel te winnen is voor klimaatprogramma's bij een zorgvuldige selectie en begeleiding van deelnemers.

Bij het schrijven en beoordelen van projectplannen moet al gekeken worden of de bovenstaande "succesfactoren" voldoende zijn meegenomen in de projectplannen.

Zo niet of in het geval van "ongestructureerde" problemen, dan moet er extra aandacht besteed worden aan hoe het project/process wordt vorm gegeven, en er moet dan aan beide kanten veel worden gedaan aan "verwachtingenmanagement" m.b.t. het verloop van het project en de resultaten.

Hegger et al. (2012b) geven ook een aantal "lessen" voor coproductieprojecten/projecten waar samengewerkt wordt tussen onderzoekers en mensen uit de praktijk, die we voorzien hebben van commentaar vanuit het perspectief van het KNMI HSMS02 team:

- *"Bruggenbouwers" met ervaring in beide werelden zijn nodig op cruciale posities.*
Hegger et al (2012b) geven echter niet aan wat die cruciale posities zijn. Ons inziens hoeft dat niet perse de projectleider te zijn. Bruggenbouwers kunnen ons inziens ook die mensen zijn die inzicht hebben in de processen die kunnen spelen bij dit soort projecten en die de mogelijkheid hebben dit bij te sturen (dit soort bruggenbouwers zou ons inziens juist vaak als projectleider moeten worden ingezet)
- *Co-production lijkt alleen mogelijk als de betrokkenen enige basiskennis en ervaring hebben met elkaars "taal".*
Enige basiskennis en ervaring is uiteraard handig, maar de belangrijkste voorwaarde is ons inziens toch dat men openstaat voor elkaars inzichten en meningen en ook de tijd neemt en krijgt om elkaar te leren kennen: samenwerken kost nu eenmaal tijd die ook als nuttig gewaardeerd moet worden.
- *Gezamenlijke kennis productie heeft een grote mate van "task uncertainty and unpredictability" in zich, en dit kan maar tot op zekere hoogte gestuurd worden.*
Voor onderzoekers is het niet vreemd dat er onzekerheid is over wat er uit het werk als resultaat komt en dat men tijdens het onderzoek soms zijn aanpak moet aanpassen. Beta-onderzoekers zijn echter vaak niet gewend aan veel aandacht en tijd voor het proces, de omgang met de belanghebbenden. Daar zitten voor hen de onzekerheden. Voor de be-

langhebbenden kan het lastig zijn om met onzekerheid over de bruikbaarheid van het uiteindelijke onderzoek om te gaan. De onzekerheden liggen dus voor de verschillende betrokkenen op verschillende aspecten.

- *Het is belangrijk dat er een gezamenlijk commitment is, in die zin dat de betrokkenen tevreden zijn met het kennis-productie-proces.* Ik zou commitment ook vertalen in de wil om er gezamenlijk iets van te maken, te zoeken naar alternatieven als het niet mogelijk is om te bereiken wat de gebruikers graag willen, en dat men doorgaat ook als loopt het contact onderling soms stroef.
- *Positieve correlatie tussen de criteria voor “credibility, salience and legitimacy”.*
Het verband tussen credibility (geloofwaardigheid) en legitimacy (ong. “zijn de juiste/legitieme personen betrokken?”) lijkt logisch, maar er is ons inziens niet automatisch een verband met salience (ong. “bruikbaarheid voor het probleem/relevantie”). Wel is het te verwachten dat als gebruikers denken bij de juiste en betrouwbare partij te zijn met hun kennisvraag, dat ze meer tijd besteden aan het duidelijk maken van hun behoefte en dat daardoor de kans op bruikbare informatie groter wordt. Dit hangt uiteraard ook erg af van de houding van de kennispartij.

8.4 Referenties:

Besselaar, van den P., W. Boon, E. Horlings, S. de Jong, W. van Vierssen, T. Wardenaar, 2012. *Comparative Monitoring of Knowledge for Climate Project SSA01 – Mid-term report*, KfC.

Boer, J. de, A. Wardekker, J. van der Sluijs & R. Kolkman, 2011. *Frames in climate change communication and decision-making* (IC10) – Synthesis. Klimaat voor Ruimte project IC10. KvR 015/11

“Climate change adaptation reporting power report”, Heathrow Airport Limited: <http://archive.defra.gov.uk/environment/climate/documents/adapt-reports/08aviation/heathrow-airport.pdf>

Hegger, D.L.T., Lamers, M, Zeijl-Rozema, A. van & Dieperink, C. 2012a. *Conceptualising joint knowledge production in regional climate change adaptation projects: success conditions and levers for action*. Environmental Science & Policy, 18(2012), 52-65.

Hegger, D.L.T., Zeijl-Rozema, A. van & Dieperink, C., 2012b. *Towards successful joint knowledge production for global change and sustainability: lessons from six Dutch adaptation projects (e-chapter)*. In A.E.J. Wals & P. Blaze Corcoran



(Eds.), *Learning for sustainability - in times of accelerating change* (Chapter 9) (pp. 149-166). Wageningen: Wageningen Academic Publisher.

Pejovic, T., Williams, V.A., Noland, R.B. and Toumi, R., 2009: "*Factors affecting the frequency and severity of airport weather delays and the implications of climate change for future delays*", *Journal of the Transportation Research Board* No. 2139, pp97-106

Thompson, J. D. (2003). *Organizations in action: Social science bases of administrative theory*. New Brunswick, N.J.: Transaction Publishers.



Annex I Leden projectteam en reviewers

Project team

Tabel 12.1 leden projectteam HSMS02.

131

Name	Institute
Groen, Geert	<i>KNMI</i>
Grootel van, Hans	<i>AAS</i>
Homan, Carine	<i>KNMI</i>
Jilderda, Rudmer	<i>KNMI</i>
Leander, Robert	<i>KNMI</i>
Smit, Lonneke	<i>LVNL</i>
Steppek, Andrew	<i>KNMI</i>
Wever, Nander	<i>KNMI</i>
Ine Wijnant	<i>KNMI</i>
Dirk Wolters	<i>KNMI</i>

Anderen die bij hebben gedragen aan de review van het eindrapport of de achtergrondrapportages:

Jules Beersma, Adri Buishand, Alexander Bakker, Rob Sluijter, Janette Bessembinder.



Bijlage I: Langjarige gemiddelden Schiphol, tijdvak 1981-2010

133

240	Temperatuur(°C)			Relatieve vochtigheid %	Neerslag			Verdamping	Globale Straling	Zonneschijn		Lucht druk	Pot. wind	Gem. wind	Wind-vector	Wind						
	gemiddeld	gemiddeld minimum	gemiddeld maximum		gemiddeld	12.00 UUT	duur in uren			in % van de tijd	som in mm					som in mm	som in J/cm2	in uren	in % langste mogelijke duur	in hPa	in m/s	in m/s	in m/s	richting in graden	>4 Bft	>5 Bft	>6 Bft	>7 Bft	>8 Bft
jan	3.4	0.8	5.8	88	86	69.8	9	66.6	8.6	7267	63.2	25	1016.3	6.4	6.3	2.8	223	25	17	10	4	1
feb	3.5	0.5	6.3	86	80	53.8	8	50.6	15.7	12867	87.5	31	1016.5	6.0	5.9	1.7	230	22	14	7	3	1
mrt	6.1	2.6	9.6	83	75	60.9	8	60.6	35.5	26700	126.3	34	1014.9	5.9	5.7	2.0	244	25	16	8	3	0
apr	9.1	4.6	13.5	78	65	41.3	6	40.9	62.2	42889	182.7	44	1014.3	5.2	5.0	0.5	295	24	13	4	0	0
mei	12.9	8.2	17.4	76	64	42.7	6	55.6	91.4	56968	221.9	45	1015.4	5.0	4.8	0.6	312	24	12	2	0	0
jun	15.4	10.8	19.7	78	67	42.8	6	66.0	96.5	57283	205.7	41	1016.2	4.7	4.4	1.6	280	22	9	2	0	0
jul	17.6	13.0	22.0	79	68	37.5	5	76.5	100.4	57049	217.0	43	1015.9	4.5	4.4	1.6	266	22	9	2	0	0
aug	17.5	12.8	22.1	80	66	37.4	5	85.9	83.8	47699	197.0	43	1015.4	4.4	4.2	1.4	260	21	9	2	0	0
sep	14.7	10.6	18.8	83	72	53.0	7	82.4	50.8	30686	139.4	37	1015.7	4.6	4.4	1.3	237	21	10	3	1	0
okt	11.0	7.5	14.5	86	78	63.8	9	89.6	27.8	18526	109.1	33	1014.3	5.3	5.1	2.0	205	23	13	5	1	0
nov	7.1	4.2	9.7	89	84	71.8	10	87.2	10.9	8147	61.7	23	1013.8	5.4	5.3	2.2	209	22	14	5	1	0
dec	4.0	1.5	6.4	90	87	70.0	9	76.3	6.4	5301	50.5	21	1015.1	5.8	5.6	2.1	217	23	15	7	2	0
winter	3.7	1.0	6.2	88	84	194.3	9	195.4	30.8	25442	201.6	26	1016.0	6.1	5.9	2.2	223	70	47	24	10	2
lente	9.4	5.2	13.5	79	68	144.9	7	157.1	189.2	126556	530.9	42	1014.9	5.4	5.2	0.9	265	73	40	14	4	1
zomer	16.8	12.2	21.3	79	67	117.9	5	228.5	280.2	161788	619.8	43	1015.8	4.5	4.3	1.5	269	66	27	5	1	0
herfst	10.9	7.4	14.4	86	78	188.6	9	259.1	89.5	57368	310.1	32	1014.6	5.1	4.9	1.8	214	66	36	13	3	0
jaar	10.2	6.4	13.8	83	74	648.6	7	838.2	591.0	371768	1662.0	37	1015.3	5.3	5.1	1.5	237	275	151	56	17	3

240	Aantal dagen met:										Neerslag					Zonneschijn					
	Temperatuur					Weersverschijnselen					Neerslag					Zonneschijn					
	maximum		minimum			10 cm					Neerslag					Zonneschijn					
	≥ 30 °C	≥ 25 °C	≥ 20 °C	≥ 15 °C	< 0 °C	< 0 °C	mist *	regen	hinsouw *	hagel *	onweer *	ijsoorming *	droog	> 0 mm	≥ 0.1 mm	1 mm	≥ 10 mm	zonloos	≤ 20 %	≥ 80 %	
jan	.	.	.	.	3	12	4	1	14	8	20	6	3	9	22	18	12	1	10	18	2
feb	.	.	.	.	0	2	11	3	13	7	17	6	2	9	19	15	10	1	6	13	3
mrt	.	.	0	3	0	7	1	0	10	6	20	4	3	11	20	16	11	1	5	13	3
apr	.	0	3	10	.	2	.	.	6	4	17	2	3	13	17	13	9	1	2	9	5
mei	0	2	8	21	.	0	.	.	2	4	18	0	1	13	18	13	10	2	2	9	6
jun	0	3	13	27	.	.	.	.	0	4	18	.	0	12	18	14	10	2	1	8	4
jul	1	7	20	31	.	.	.	.	.	5	18	.	0	13	18	14	10	3	1	8	4
aug	1	6	21	31	.	.	.	.	.	7	19	.	0	12	19	14	10	3	1	7	3
sep	.	1	9	28	.	.	.	.	0	8	20	.	0	10	20	16	12	3	2	10	3
okt	.	0	1	14	.	1	.	.	2	7	21	0	2	10	21	17	13	3	5	13	3
nov	.	.	.	1	0	4	0	.	7	7	23	3	4	7	23	19	13	2	8	17	2
dec	.	.	.	.	2	11	2	0	14	7	21	5	3	8	23	18	13	2	12	20	2
winter	.	.	.	0	7	34	8	2	40	21	59	17	9	26	64	50	35	4	29	51	7
lente	0	3	11	33	0	9	1	0	18	14	55	6	7	36	56	43	29	4	9	30	14
zomer	2	17	54	89	.	.	.	.	0	16	56	.	1	36	56	42	30	7	3	24	11
herfst	.	1	10	43	0	5	0	.	8	22	64	3	6	27	64	52	37	8	16	41	7
jaar	2	20	75	165	8	48	9	2	67	74	234	26	22	125	240	187	132	24	56	147	40



Literatuurverwijzingen

ACRP, "Airport Climate Adaptation and Resilience", Airport Cooperative Research Programme, Synthesis 33, 2012

Bakker, A.M.R. and B.J.J.M. Van den Hurk, *Estimation of persistence and trends in geostrophic wind speed for the assessment of wind supply in Northwest Europe*, Clim. Dyn., 2011, doi:10.1007/s00382-011-1248-1.

Bakker, A. & J. Bessembinder, 2012. *Time series transformation tool: description of the program to generate time series consistent with the KNMI'06 climate scenario's*. Technical Report: TR-326, KNMI, De Bilt.

Besselaar, van den P., W. Boon, E. Horlings, S. de Jong, W. van Vierssen, T. Wardenaar, 2012. *Comparative Monitoring of Knowledge for Climate Project SSA01 – Mid-term report*, KfC.

Boer, J. de, A. Wardekker, J. van der Sluijs & R. Kolkman, 2011. *Frames in climate change communication and decision-making (IC10) – Synthesis*. Klimaat voor Ruimte project IC10. KvR 015/11

Boers, R., H. Klein Baltink, H.J. Hemink, F.C. Bosveld en M. Moerman, *Ground-based observations and modeling of the visibility and radar reflectivity in a radiation fog layer*. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2013, **30**, 288-300, doi:10.1175/JTECH-D-12-00081.1.

Brauer, C., 2007. *Relatie tussen extreme neerslag en atmosferische circulatie*. KNMI stage rapport, De Bilt.

Buishand, T.A. en Wijngaard J.B., 2007. *Statistiek van extreme neerslag voor korte neerslagduren*. DE Bilt, KNMI Technical report TR-295, KNMI, De Bilt.

Buishand, T.A., R. Jilderda and J.B. Wijngaard, 2009. *Regionale verschillen in extreme neerslag*. Scientific Report WR 2009-01, KNMI, De Bilt.

Gordijn H et al. (2007) *De toekomst van Schiphol, Rapport van het Ruimtelijk Planbureau*, NAi Uitgevers, Rotterdam. ISBN 978-90-5662-534-4

Groen, G (2009): *_Wind chill equivalente temperatuur (WCET) KNMI-implementatie JAG/TI-methode voor de gevoelstemperatuur in de winter_*, TR-309, KNMI, De Bilt

Heathrow Airport Limited (HAL) (2011), *Climate Change Adaptation Reporting Power Report*,
<http://archive.defra.gov.uk/environment/climate/documents/adapt-reports/08aviation/heathrow-airport.pdf>

Hegger, D.L.T., Lamers, M, Zeijl-Rozema, A. van & Dieperink, C. 2012a. *Conceptualising joint knowledge production in regional climate change adaptation projects: success conditions and levers for action*. Environmental Science & Policy, 18(2012), 52-65.

Hegger, D.L.T., Zeijl-Rozema, A. van & Dieperink, C., 2012b. *Towards successful joint knowledge production for global change and sustainability: lessons from six Dutch adaptation projects (e-chapter)*. In A.E.J. Wals & P. Blaze Corcoran (Eds.), *Learning for sustainability - in times of accelerating change* (Chapter 9) (pp. 149-166). Wageningen: Wageningen Academic Publisher.

Hove, R. ten en J.B. Wijngaard, *Improved low visibility and ceiling forecasts at Schiphol Airport*. **KNMI-publicatie**: KDC/2008/0089.

Hurk, B. van den, e.a., 2006. *KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands*. Scientific Report WR 2006-01, KNMI, De Bilt.

Jacobs, A., N. Maat, J. van der Meulen en H. Roozenkrans (2011), *Een inventarisatie van kritieke weerparameters die de operatie op luchthaven Schiphol beïnvloeden*, www.kennisvoorklimaat.nl

Klein Tank, A.M.G. en G. Lenderink (red.), 2009. *Klimaatverandering in Nederland; Aanvullingen op de KNMI'06 scenario's*. KNMI, De Bilt.

Mikkelsen T (2009) Remote sensing of wind by SODARS. *International Sustainable Energy Review*. **3**: 12-14.

Oldenborgh, van G. en A. van Ulden (2003), *On the relationship between global warming, local warming in the Netherlands and changes in circulation in the 20th century* KNMI, De Bilt

Oldenborgh, van G.J. P. Yiou and R. Vautard, 2010. *On the roles of circulation and aerosols in the decline of most and dense fog in Europe over the last 30 years*. Atmos. Chem. Phys., **10**, 4597-4609, doi: 10.5194/acp-10-4597-2010.

Overeem, A., Buishand, T.A. and Holleman, I., 2009. *Extreme rainfall analysis and estimation of depth-duration-frequency curves using weather radar*. Water Resources Research, **45**, W10424

Pejovic, T., Williams, V.A., Noland, R.B. and Toumi, R., 2009: *"Factors affecting the frequency and severity of airport weather delays and the implications of*



climate change for future delays", Journal of the Transportation Research Board No. 2139, pp97-106

Sluijter, R., e.a., 2011. *De Bosatlas van het klimaat*, Noordhoff Uitgevers, Groningen / KNMI, De Bilt.

Smits, I., Wijngaard J.B., Versteeg R.P. en Kok M., 2004. *Statistiek van extreme neerslag in Nederland*. Rapport 2004-26, STOWA, Utrecht.

Tennekes, H. (1973), *The logarithmic wind profile*, Journal of the Atmospheric Sciences, 30, 234-238

Terpstra, J.M. (1981) *Zeewind langs de Hollandse kust, enkele verwachtingsmethoden*, Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut wetenschappelijk rapport 81-3.

Thompson, J. D. (2003). *Organizations in action: Social science bases of administrative theory*. New Brunswick, N.J.: Transaction Publishers.

Uppala et al. (2005) *The ERA-40 re-analysis*, Q. J. R. Meteorol. Soc., 131, 2961-3012.

Vautard, R., P. Yiou and G.J. van Oldenborgh, 2009. *Decline of fog, mist and haze in Europe over the past 30 years*. Nature Geoscience, 2, 115-119, doi: 10.1038/NGEO414.

Vautard, R., J. Cattiaux, P. Yiou, et al., 2010: *Northern Hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness*. Nature Geoscience, 3(17), doi: 10.1038/NGEO979.

Verkaik, J. W. (2000), *Evaluation of Two Gustiness Models for Exposure Correction Calculations*, Journal of Applied Meteorology, 39(9), 1613-1626

Wever, N. 2012. *Quantifying trends in surface roughness and the effect on surface wind speed observations*, Journal of Geophysical Research, doi:10.1029/2011JD017118

Wever, N. & G. Groen, 2009. *Improving potential wind for extreme wind statistics*, KNMI WR 2009-02, KNMI, De Bilt.

Wieringa, J. en P. Rijkoort (1983), *Windklimaat in Nederland*, Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut

Wijngaard, J.B., D.H.P. Vogelesang, J. van Bruggen en N. Maat, *Low visibility and ceiling forecasts at Schiphol; Part 1-Assessment of the current system*. **KNMI-publicatie**: 1/10/2007.



Ontwikkelen van wetenschappelijke en toegepaste kennis voor een
klimaatbestendige inrichting van Nederland en het creëren van een
duurzame kennisinfrastructuur voor het omgaan met klimaatverandering

Contactinformatie

Programmabureau Kennis voor Klimaat

Secretariaat:

p/a Universiteit Utrecht

Postbus 85337

3508 AH Utrecht

T +31 88 335 7881

E office@kennisvoorklimaat.nl

Communicatie:

p/a Alterra, Wageningen UR

Postbus 47

6700 AA Wageningen

T +31 317 48 6540

E info@kennisvoorklimaat.nl

www.kennisvoorklimaat.nl

