

# Meteorologische evaluatie van de zichtmetingen langs de A16

H.R.A. Wessels

Technische rapporten; TR-157

---

De Bilt 1993

Technische rapporten; TR-157

Postbus 201  
3730 AE De Bilt  
Wilhelminalaan 10  
Telefoon 030-206 911  
Telefax 030-210 407

UDC: 551.508.92  
551.591.1/.2  
614.86 (492)

ISSN: 0169-1708

ISBN: 90-369-2044-2

© KNMI, De Bilt. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en / of openbaar gemaakt worden door middel van druk, fotocopie, microfilm, of op welke wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijk toestemming van het KNMI.

PROEFPROJECT MISTDETECTIE A16 BREDA

PROJECTGROEP EVALUATIE EPM-A16

Rapportage door KNMI:

METEOROLOGISCHE EVALUATIE VAN DE ZICHTMETINGEN 1991-1992.

VOORWOORD.

Het project 'Mistdetectie/Verkeerssignalering rijksweg 16' is uitgevoerd onder verantwoordelijkheid van de Rijkswaterstaat Directie Noord-Brabant naar aanleiding van enige verkeersongevallen in dichte mist nabij Breda. Het project werd gecoördineerd door een begeleidingsgroep waarin ook de Dienst Verkeerskunde van de RWS vertegenwoordigd was.

De bijdrage van het KNMI aan het proefproject bestaat uit advisering, met name over plaatsing van sensoren en instrumentatie, opbouw en onderhoud van de apparatuur, validatie en beheer van de verkregen zichtmetingen en tenslotte uit een evaluatie van de meteorologische aspecten van deze metingen.

De evaluatie van de proef met mistdetectie vindt plaats door een evaluatiegroep met deelnemers van: de RWS directie Noord-Brabant, de Dienst Verkeerskunde van de RWS, het Instituut voor Zintuigfysiologie TNO en het KNMI.

Hierbij wordt het verslag gepresenteerd van het onderdeel 'meteorologische evaluatie' van de KNMI bijdrage. Omdat 20 zichtmeters over een beperkt gebied beschikbaar waren kon informatie verzameld worden over het gedrag van mist op kleine afstand- en tijdschaal, over het optreden van mist in relatie tot landschapskenmerken en over de beste wijze van detectie van mist ten behoeve van een systeem voor verkeerssignalering.

Ter informatie is een bijlage toegevoegd over het begrip 'zicht' met diverse rekenvoorbeelden die relevant zijn voor het wegverkeer.

Aan de KNMI bijdrage voor dit proefproject is meegewerkt door drs. J.A.M. van den Ancker en drs. D. Blaauboer (adviezen), ing. A.W. Donker (coördinatie), P.A.T. van Es (instrumentatie), M. van Berchum (datacontrole en databeheer) en ir. H.R.A. Wessels (onderzoek en rapportage). Over het onderwerp van bijlage A werden nuttige discussies gevoerd met Dr. P. Stammes. Bij het onderzoek is ook gebruik gemaakt van zichtmetingen door de Koninklijke Luchtmacht te Gilze-Rijen, die ter beschikking kwamen door medewerking van Kap. G. de Mooij.

# Meteorologische evaluatie van de zichtmetingen langs de A16.

## INHOUD

1	INLEIDING . . . . .	1
2	MIST . . . . .	1
	1. Ontstaan van mist . . . . .	1
	2. Topografische invloeden . . . . .	2
3	MEETGEGEVENS . . . . .	2
	1. Instrumentatie . . . . .	2
	2. Beschikbaarheid . . . . .	5
	3. Representativiteit . . . . .	5
4	CRITERIA VOOR MISTGEOELIGHEID . . . . .	7
	1. Mistfrequentie . . . . .	7
	2. Horizontale zichtverschillen . . . . .	9
	3. Tijdsvariaties . . . . .	13
	4. Eerste mist . . . . .	15
5	INVLOED VAN DE SENSORLOKATIE . . . . .	16
	1. Algemeen . . . . .	16
	2. Effect van de meethoogte . . . . .	16
	3. Invloed van obstakels in de omgeving . . . . .	17
	4. Invloed van de weg . . . . .	17
6	ANALYSE MISTGEOELIGHEID . . . . .	19
	1. Voorstudie . . . . .	19
	2. Vergelijking van de voorstudie met metingen . . . . .	19
	3. Correlatie met landschapskenmerken . . . . .	20
	4. Experiment met andere predictoren . . . . .	20
	5. Mogelijke verbeteringen van de methode . . . . .	21
7	EFFECT VAN DE ZICHTMETINGEN OP DE GETOONDE SIGNALLEN . . . . .	22
	1. De signalering . . . . .	22
	2. Bijdrage van de sensoren tot de signalering . . . . .	23
	3. Signalering met een gereduceerd meetnet . . . . .	23
8	CONCLUSIES . . . . .	24
	1. De zichtmetingen . . . . .	24
	2. Plaatsing van sensoren . . . . .	25
	REFERENTIES . . . . .	26
	BIJLAGE A	
	HET BEGRIP 'ZICHT' BIJ WEGVERKEER IN DICHT MIST . . . . .	27
	a. CONTRASTZICHT BIJ DIRECT OF INDIRECT ZONLICHT . . . . .	27
	b. CONTRASTZICHT BIJ NACHT MET BEHULP VAN KOPLAMPEN . . . . .	30
	c. HET WAARNEMEN VAN LICHTEN, OVERDAG EN 'S NACHTS . . . . .	33
	d. CONCLUSIES . . . . .	33
	LITERATUUR BIJLAGE A . . . . .	34
	BIJLAGE B	
	VERKLARENDE WOORDENLIJST . . . . .	35

# METEOROLOGISCHE EVALUATIE VAN DE ZICHTMETINGEN LANGS DE A16.

## 1. INLEIDING.

De transportsector is erg gevoelig voor het verschijnsel mist. De laatste jaren heeft RWS diverse initiatieven ontplooid om de veiligheid van het wegverkeer tijdens mist te bevorderen. Langs de A16 bij Breda zijn eind 1991 twintig zichtmeters geplaatst, waarmee de aanwezigheid van mist aan weggebruikers gesignaleerd wordt.

Dit betreft een proefproject, dat in de eerste plaats moet uitwijzen of een dergelijke signalering een gunstig effect heeft. Daartoe vindt een verkeerstechnische evaluatie plaats. Als die tot een positieve conclusie leidt, kan tot bredere toepassing besloten worden.

Het tweede doel van het proefproject is om van de technische uitvoering en de meteorologische evaluatie zoveel mogelijk te leren ten behoeve van eventuele vervolprojecten. Met name is de vraag relevant hoeveel sensoren nodig zijn voor een doeltreffende waarschuwing en waar die sensoren dan geplaatst moeten worden. Dit rapport behandelt daarom vooral hoe de dichtheid van mist kan variëren naar tijd en plaats. Hoewel de technische evaluatie apart wordt gerapporteerd wordt ook hier ingegaan op het effect van defecte sensoren op de signalering.

Omdat bij gegeven mistdichtheid het 'zicht' sterk zal afhangen van omstandigheden als beschikbare zichtobjecten en belichting, wordt in Bijlage A ingegaan op het definiëren en berekenen van 'zicht'.

In dit rapport kan als maatstaf voor 'zicht' worden gelezen: het meteorologisch dagzicht, berustend op het overdag waarnemen van grote donkere voorwerpen met de horizonlucht als achtergrond.

## 2. MIST.

### 2.1. Ontstaan van mist.

Het verschijnsel mist treedt op als de waterdamp in de lucht oververzadigd wordt en condenseert in de vorm van kleine zwevende druppeltjes, die het zicht aanmerkelijk kunnen reduceren. Bij heel koud weer kan mist ook uit ijskristalletjes bestaan.

Mist wordt meestal onderscheiden naar ontstaanswijze. In Nederland is het belangrijkste mechanisme de afkoeling nabij de grond ten gevolge van nachtelijke uitstraling. Soms helpt ook verdamping mee de lucht te verzadigen, bijvoorbeeld boven watervlakken of smeltende sneeuw. De invloed van de ondergrond is overigens niet steeds eenduidig: zo kan zowel boven warm als koud water mistvorming bevorderd worden.

Het ontstaan van mist door stralingsafkoeling is gecompliceerd. In eerste instantie koelt niet de lucht af maar de grond en vooral de vegetatie. Die afkoeling wordt gecompenseerd door onttrekking van warmte aan de lucht zowel als aan de bodem en bovendien door afzetting van dauw. Een complicatie is, dat condensatie in de vorm van mist slechts een neveneffect is van dit afkoelingsproces. Bij condensatie in de vorm van dauw gaan veel grotere hoeveelheden waterdamp in vloeibaar water over. De onderlinge verdeling tussen mist en dauw hangt nog op een subtiele manier van de windsnelheid af. Het eerste ontstaan van stralingsmist wordt dan ook maar gedeeltelijk begrepen. Berekeningen of simulaties zijn dus moeilijk en voorspellingen zijn meestal op statistische relaties gebaseerd.

Is de stralingsmist voldoende dik geworden, dan wordt de stralingsafkoeling van de mistdruppeltjes sterker dan die van de grond. Hierdoor wordt de verticale

menging van de mistlaag bevordert en gaat de mist zich met de stroming meebewegen. Mistvelden kunnen dan over 10-tallen km verplaatst worden. Deze zogenaamde advectiemist leent zich beter voor voorspellingen, bijvoorbeeld omtrent het tijdstip van oplossen door zonnestraling. Het oplossen begint meestal bij de grond, waarbij de mist dus in lage wolken overgaat. Dergelijke wolken zijn van het type 'stratus'. Eigenlijk is dan nog steeds sprake van stralingsmist, omdat afkoeling door straling -maar nu aan de bovenzijde van de mistlaag- het mechanisme is, waardoor de mist in stand blijft.

In dit rapport zullen we een fenomenologisch onderscheid maken tussen twee categorieën mist: 'stralingsmist' noemen we het optreden van mistbanken, waarbij de heldere hemel of hogere wolken zichtbaar blijven. Het zicht bij de grond kan dan zeer lage waarden bereiken. De term 'advectiemist' gebruiken we als de bovenlucht boven de mist niet meer te zien is. Er is dan meestal sprake van uitgebreide, min of meer homogene mistvelden, waarin het zicht doorgaans beter is dan in stralingsmist. De laatste categorie omvat ook het optreden van een gesloten bedekking met lage stratus- of stratocumuluswolken.

## 2.2 Topografische invloeden.

Twee voorwaarden voor de vorming van stralingsmist dicht bij de grond zijn, dat de lucht daar voldoende vochtig is en bovendien kan afkoelen.

De beschikbaarheid van vocht hangt af van bodemeigenschappen, de recente voorgeschiedenis wat betreft bijvoorbeeld regenval en de mate waarin vegetatie vocht vasthoudt.

Ook de afkoeling hangt af van de bodem en de vegetatie. Deze factor is waarschijnlijk minder belangrijk dan de vorige: immers de temperatuur daalt 's nachts het sterkst boven zandgrond, zonder dat dit met meer stralingsmist gepaard hoeft te gaan.

Een derde vereiste voor mistvorming is een zekere mate van turbulentie: het mag niet windstil zijn, maar ook teveel wind verhindert mistvorming. Het resultaat van beide voorwaarden is dat mist zich vaak op open plekken in een coulisselandschap vormt.

Uiteraard zijn deze topografische factoren sterk gecorreleerd en ze staan vaak in verband met de terreinhoogte. De laagste terreinen zijn het natst en zijn vaak met gras bedekt. Bossen vinden we bij voorkeur op hoger gelegen zandgronden.

Ook horizontale veranderingen in terreinhoogte kunnen een rol spelen. Op terreinhellingen van 3 % of meer kan de dichtheidsstroming van lucht al een rol spelen; de koude (zwaardere) lucht verzamelt zich dan boven de laagste terreingedeelten. Uiteraard werkt dit het beste als het (bijna) windstil is.

Over de invloed van hoogteligging en begroeiing op minimumtemperaturen is vrij veel gepubliceerd. Over het effect op mistvorming is minder bekend, maar gezien de bevordering van afkoeling en menging is er reden om aan te nemen dat kleinschalige terreingradiënten en hun oriëntatie belangrijk zijn.

Een heel ander terreineffect treedt op als heuvels tot in de lage wolken reiken. De mistfrequentie neemt bij heuvels boven ca. 500 m met de hoogte toe, hoewel dat dan niet meer over stralingsmist en niet meer over het Nederlandse landschap gaat.

## 3. MEETGEGEVENS.

### 3.1. Instrumentatie.

Langs de A16 staan 20 mistsensoren opgesteld op de locaties die in Fig.1 zijn aangegeven. De sensoren worden in die figuur en de rest van dit rapport vermeld met hun hectometeraanduiding, bijvoorbeeld 544W en 546E, waarbij W en E de westelijke respectievelijk oostelijke rijbaan aangeven.

Het gebruikte instrument is een zogenaamde 'PWS' (present weather sensor). Deze bepaalt per minuut de mate waarin mistdruppels licht zijwaarts verstrooien,

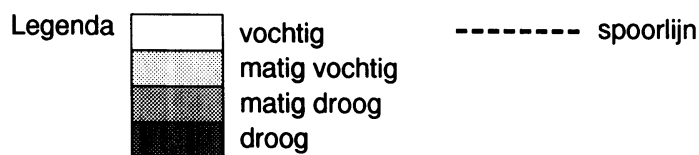
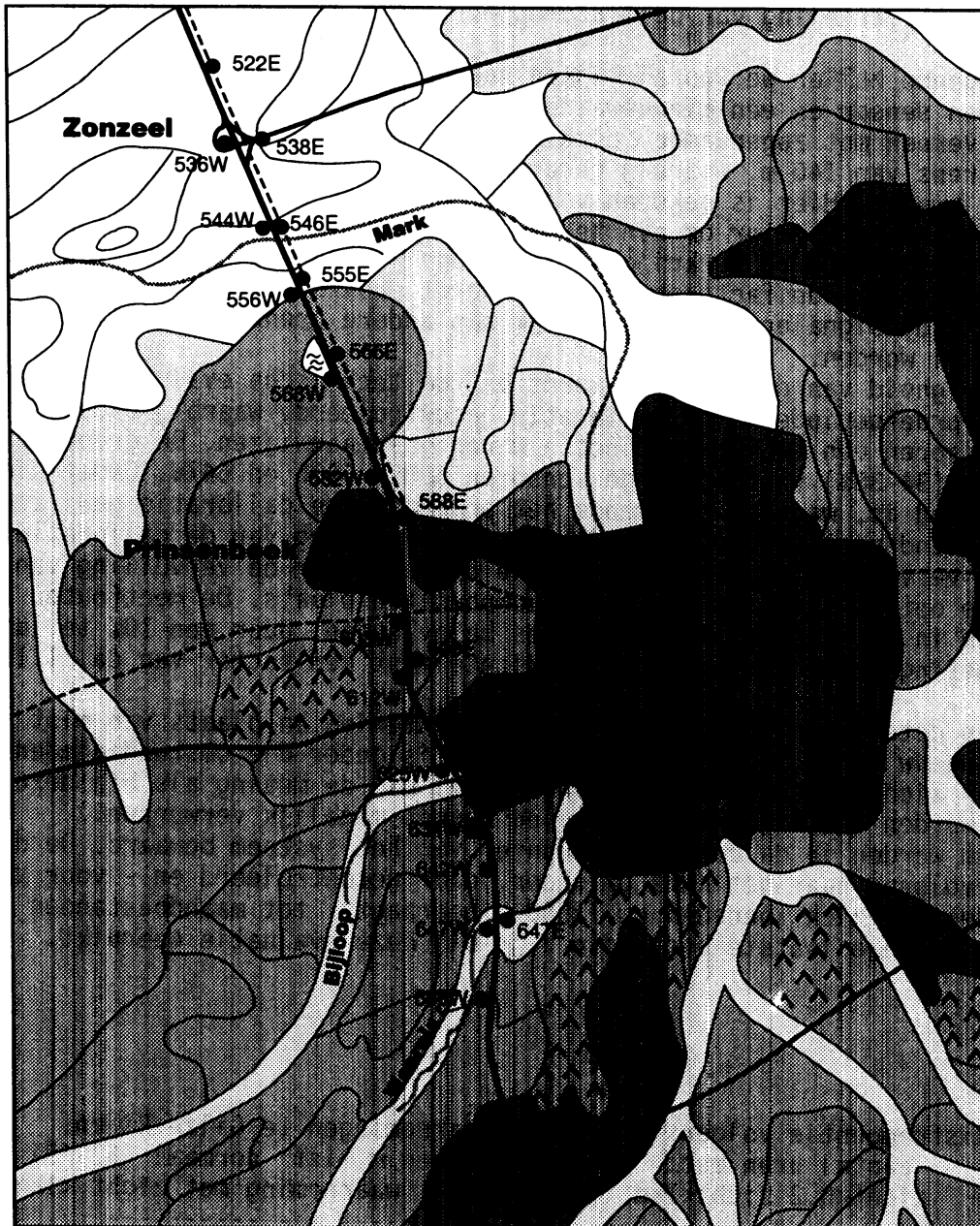


Fig.1 Opstelling van de sensoren langs de A16 bij Breda. Het landelijk gebied buiten de stad is ingedeeld volgens een vereenvoudigde versie van de bodemkaart als indicatie van de vochtigheid van de bodem. Dit wordt nader toegelicht in 6.4. Van noord naar zuid passeert de A16 achtereenvolgens de rivier- of beekdalen van de Mark, de Bijloop en de Weerij. Bij die punten staan dan ook sensoren. Een aantal van de oostelijke sensoren bevindt zich tussen de weg en een spoorbaan. De sensoren 536W, 538E en 634W liggen in verbindingslussen, de laatste twee met - althans 's winters- open water. De sensoren 555E, 582W, 588E, 603W en 634W bevinden zich nabij of tussen groepen bomen.

hetgeen met een ruwe benadering wordt vertaald in de extinctiecoëfficiënt (zie Bijlage A). Die benadering is ruw omdat geen rekening wordt gehouden met de actuele grootteverdeling van de mistdruppels, maar met een gemiddelde verdeling.

In het volgende zullen we vooral kijken naar die tijdvakken, waarbinnen voor minstens één sensor en één minuutwaarde de extinctie boven  $15 \text{ km}^{-1}$  kwam. Dit komt dan overeen met zogenaamde 'dichte mist' met 200 m dagzicht, d.w.z. iets boven de grens van 140 m, waarbij gedurende de beschouwde periode de signalen in gebruik kwamen. Hier is gekozen voor het presenteren van resultaten voor de afgeronde waarde 200 meter om aan te sluiten bij andere publicaties en om een groot gegevensbestand te verkrijgen, zodat opslitsing ten behoeve van het onderzoek van bepaalde factoren mogelijk wordt. Bovendien is het zeer wel denkbaar dat de signalering uiteindelijk aan andere grenzen dan 140 en 70 m gekoppeld zal worden.

De nauwkeurigheid van de metingen wordt bij de technische evaluatie behandeld. Kort na de proefperiode is de calibratie gecontroleerd, waarbij bleek dat sommige sensoren een te lage extinctie waren gaan aanwijzen. De grootste afwijkingen (34-38%) vertoonden de sensoren 588E, 608E en 647W. Omdat niet precies bekend is, wanneer gedurende het proefjaar de calibratie gewijzigd is, kan het bestand niet gecorrigeerd worden. De wijziging van de calibratie is een gevolg van vervuiling van een deel van de optiek. Voor de vervuiling van de rest van de optiek vindt automatische compensatie plaats. De meetfouten kunnen de getallen in dit rapport nog enigszins beïnvloeden: door een 10% te lage extinctiemeting worden de percentages dichte mist een factor van ca. 1.15 te laag.

De sensoren detecteren ook of de zichtverslechtering in plaats van mist door regen of sneeuw wordt veroorzaakt. Overigens is onder die omstandigheden de kans op een zicht beneden 200 m gering. Zowel bij de meting als bij deze evaluatie worden die bijzondere gevallen zoveel mogelijk verworpen.

De metingen worden in de centrale computer van het systeem bewaard. De data worden vervolgens naar het KNMI gezonden, daar gecontroleerd en - voor zover het periodes met zicht beneden ca. 1500 m bedraagt - tot maandbestanden samengevoegd. Deze laatste bestanden zijn bij deze evaluatie gebruikt.

Tabel 1. Misfrequentie volgens uurlijkse waarnemingen te Gilze-Rijen.

maand	aantal uren met:		aantal dagen m.mist (minstens 1 waarneming met zicht <1km)	normaal '61-'91
	zicht < 0.2	zicht < 1km		
nov. '91	48	71	10	9
dec.	20	25	5	10
jan. '92	68	150	11	9
feb.	18	47	11	8
mrt.	1	3	2	8
apr.	1	4	3	5
mei	0	2	3	5
jun.	5	16	8	5
jul.	5	12	4	4
aug.	2	7	5	7
sep.	0	2	2	10
okt.	32	51	8	11
nov.	7	12	6	9
dec.	12	36	6	10
jaar 1992	151	339	69	91



### 3.2. Beschikbaarheid.

De metingen waren beschikbaar vanaf 15 nov. 1991, maar vertonen tot 30 november veel hiaten. Ook in dec. 1991 en jan. 1992 was het systeem op 1 dag tijdelijk niet beschikbaar. Ernstige storingen traden op tussen aug. 1992 en dec. 1992: minstens op 3 dagen per maand en in september en oktober 16 resp. 13 dagen. In de eerste helft van juni was de zuidelijke helft van het systeem buiten bedrijf. Van meer belang dan de totale uitvaltijd van ca. 10% is de vraag of daarbij mistperiodes werden overgeslagen. Dit kan bij benadering worden gecontroleerd met de uurlijkse waarnemingen van het vliegveld Gilze-Rijen, dat op ca. 13 km ten oosten van het meettraject ligt (Tabel 1.). Gezien de lage mistfrequentie in september en oktober 1992 is het aantal ontbrekende misturen veel minder dan 10%. Toch werd zo wel op ca. 5 à 10 dagen een alarm gemist. De totale uitvaltijd is bij een waarschuwingssysteem een beperkte maatstaf voor de kwaliteit. Bij kortdurende mistbanken wint de waarschuwing aan betekenis vergeleken met situaties met langdurige mist. Mistbanken duren kort, maar treden ongeveer een op de drie nachten wel ergens in Nederland op. De kans, dat er ten onrechte niet gewaarschuwd werd, was dus in de proefperiode vrij groot. Hoe vaak, is niet precies bekend, omdat mist te Gilze-Rijen niet hoeft samen te vallen met mist langs de A16. Op zichzelf zeggen deze resultaten nog niets over de lange-termijn betrouwbaarheid van het systeem. Het betrof immers een proefperiode en de technische evaluatie kan tot verbeteringen bijdragen.

### 3.3. Representativiteit.

Tabel 1 leert ons ook dat de mistfrequentie in de proefperiode iets lager was dan het klimatologisch gemiddelde. Dit geldt vooral voor het aantal mistdagen; het aantal misturen van 339 was maar weinig lager dan de normale waarde van 370. De kans op mist met zicht <200 m, gebaseerd op uurlijkse waarnemingen was 1.7%, hetgeen ongeveer normaal is, vooral als we bedenken dat de jaarlijkse mistfrequentie op één locatie kan spreiden tussen 1.0% en 3.0%.

Gezien het ontbreken van metingen op enige mistdagen en de lage mistfrequentie in de laatste maanden van 1992 is besloten de waarnemingen van 1991 toe te voegen en de resultaten dan bij benadering als representatief voor een gemiddeld jaar te beschouwen.

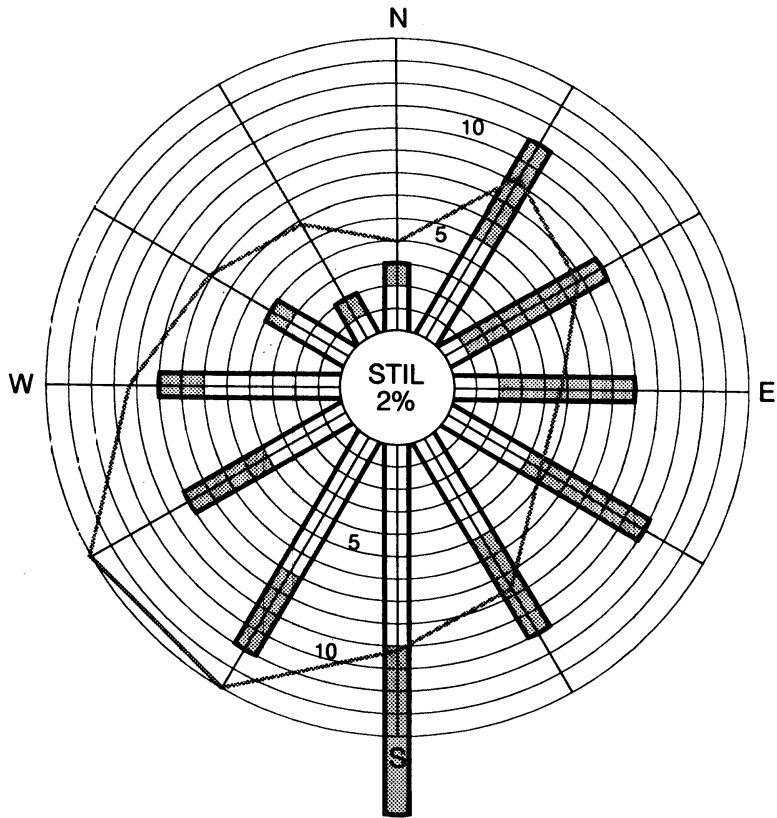
De waarnemingen van Gilze-Rijen zijn ook geïnspecteerd wat betreft het onderscheid tussen stralingsmist en advectiemist. In de maanden maart t/m september traden vrijwel uitsluitend mistbanken op, terwijl in december 1991 en januari 1992 advectiemist sterk overheerste. In de overige maanden waren de misturen ongeveer gelijk over beide typen verdeeld.

De dagelijkse gang van de mistfrequentie (Tabel 2) was in zoverre abnormaal, dat het ongebruikelijk vaak voorkwam dat (advectie-)mist overdag niet of nauwelijks oploste. Dit verschijnsel zag men onder meer op 11 en 25 januari, 31 oktober en 8 december. De relevantie van Tabel 2 voor het wegverkeer kan nog worden vergroot door de dagelijkse gang van de mistfrequentie te vermenigvuldigen met de dagelijkse gang van de verkeersintensiteit, teneinde de dagelijkse gang van het 'mistgevaar' te verkrijgen. Daarvoor kan beter een langere steekproef gebruikt worden.

De verdeling der windrichtingen in het beschouwde jaar was ongeveer normaal met een voorkeur voor de sector van zuid t/m west en een zwakker maximum met noordoostenwind. In de mistperiodes krimpt de voorkeurswindrichting naar de zuidsector en is met name de sector tussen noordwest en noord ondervertegenwoordigd. Zie hiervoor Fig.2.

Ook het type mist hangt enigszins van de windrichting af. Bij oostelijke tot noordoostelijke wind overheerst advectiemist, terwijl mistgevallen in de sector west tot noord vooral aan stralingsmist moet worden toegeschreven (Fig.2). Een en ander is in goede overeenstemming met andere analyses (Stalenhoef, 1980), zodat ook wat dit betreft de proefperiode als representatief voor het mistklimaat rond Breda beschouwd kan worden.

Fig.2.  
 Procentuele verdeling van de windrichtingen tijdens mist met zicht <1000 m te Gilze-Rijen gedurende de proefperiode. Onderscheiden zijn stralingsmist (blank) en advectiemist (grijs). De getrokken lijn geeft de langjarig gemiddelde verdeling van de windrichting voor alle situaties, dus ook zonder mist.



Tabel 2. Percentage visueel waargenomen mist in het proef'jaar' als functie van tijd van de dag en van het seizoen. Uurlijkse zichtwaarden <200 m te Gilze-Rijen. Omdat dit meestal maar ca. 30 dagen per jaar betref, komen alleen de afgeronde percentages, 3, 7 etc. voor. Ter vergelijking is met lijnen (3, 7 en 10%) aangegeven wat de vergelijkbare getallen over een langere periode (1949-1961) waren (NN, 1965). De scheiding dag/nacht is met sterretjes gemarkeerd.

	12	15	18	21	0	3	6	9	
J	.	.	.	.	.	.	.	.	.
A	.	.	.	.	.	.	.	.	.
S	.	.	.	.	.	.	.	.	.
O	7	3	.	.	.	.	.	.	.
N	3	3	3	3	7	7	*7	10	10
D	3	3	3	3	3	*2	.	.	.
J	7	7	3	7	10	*13	7	10	3
F	.	.	.	.	.	.	.	.	.
M	.	.	.	.	.	.	.	.	.
A	.	.	.	.	.	.	.	.	.
M	.	.	.	.	.	.	.	.	.
J	.	.	.	.	.	.	.	.	.

#### 4. CRITERIA VOOR MISTGEVOELIGHEID.

Voor het wegverkeer zijn vooral zichten onder 200 m van belang, zodat we ons hier beperken tot uitsluitend deze 'dichte mist'.

De veiligheid van het wegverkeer wordt niet alleen bedreigd door het slechte zicht, maar vooral door plotselinge zichtverslechtingen (naar plaats of tijd) die optreden tijdens stralingsmist en bij het binnenvallen van advectiemist.

##### 4.1.Mistfrequentie.

Meestal wordt de fractie van de tijd met zicht beneden bijv. 200 m gebruikt om de ernst van misthinder aan te geven. De mistfrequentie en haar afhankelijkheid van het seizoen en het uur van de dag zijn voor de meteorologische stations vrij goed bekend.

De Klimaatatlas van Nederland (KNMI, 1972) geeft wat betreft de jaren 1955-1965 getallen variërend tussen 0.8% voor den Helder en 2.2% voor Zuid-Limburg. Dicht bij de kust verhindert de wind vaak de vorming van stralingsmist. Op vliegveld Zuid-Limburg zal dankzij de hoge ligging vaker stratus de grond bereiken. De meeste andere stations hebben frequenties tussen 1.1 en 1.7%. Voor Gilze-Rijen vond men 1.7%. Voor andere periodes zijn de getallen vergelijkbaar, zij het dat sinds ongeveer 1980 op de civiele luchthavens lagere cijfers gerapporteerd worden, vermoedelijk ten gevolge van de relocatie van de waarnemer in hoogbouw, waar hij over mistbanken heen kijkt en in advectiemist niet profiteert van het betere zicht nabij de grond. Ook kan een rol spelen dat het instrumenteel gemeten baanzicht meer en meer gebruikt wordt als vervanging voor het visueel waargenomen meteorologisch zicht.

Dat de gemeten horizontale verschillen in het optreden van dichte mist gering blijken, komt gedeeltelijk doordat meteorologische stations bij voorkeur in landelijke gebieden en daarenboven meestal tussen weilanden zijn gevestigd. Uit ervaring weet men, dat de mistfrequentie in steden en in bossen duidelijk lager is dan boven weilanden, akkers of plassen. Met andere woorden: de verschillen op schalen van 0.1 à 10 km zijn vaak belangrijker dan de gemiddelde landelijke verschillen. Dit blijkt bijvoorbeeld uit een vergelijking van Schiphol met Nieuwkoop en Waveramstel, speciale stations in de onmiddellijke omgeving (Cannemeijer en Stalenhoef, 1977). Op die stations blijkt de mistkans twee keer groter dan op de luchthaven zelf. Bij dit onderzoek waren de misturen onderverdeeld in stralings- en advectieve mist. De extra bijdrage op deze polderstations blijkt vooral uit stralingsmist te bestaan, die dan op de luchthaven slechts 34 % van de gevallen uitmaakt, maar in de polder 62 %. Een verdere bevestiging van de terreïnvloed vond Stalenhoef (1980) uit het vergelijken van windrichtingsfrequenties bij slecht zicht over gegevens van het jaar 1974. Er blijkt een voorkeur voor mistaanvoer uit vochtige gebieden, zoals ook al opviel bij een onderzoek te Leeuwarden (Buma, 1960a).

Ook langs de A16 werd in het proefjaar geconstateerd dat dichte mist dicht bij de stad (ruwweg kilometer 58-60 en 62-63) minder voorkomt dan langs de rest van het traject (zie Fig 3, waarin sommige getallen tot ca. 20% te laag kunnen zijn gezien de genoemde meetfouten). De frequentie kan bij de stad voor deze zichtdrempel van 200 m zelfs drie keer lager zijn dan op het meest 'landelijke' station 538E. We zullen in het volgende zien dat ook de meer directe omgeving van de sensor van invloed is op het optreden van mist, zodat de mistfrequentie óp de weg nog lager geweest kan zijn. Ter vergelijking met Tabel 2 is in Tabel 3 de dagelijkse en jaarlijkse gang voor 3 mistsensoren getoond.

Tabel 3.

Percentage van de tijd met dichte mist in het proefjaar als functie van tijd van de dag (horizontaal) en van het seizoen (verticaal). De scheiding dag/nacht is door sterretjes gemarkeerd. De percentages zijn verkregen uit de minuutwaarnemingen waarvoor de extinctie > 15 /km was. De drie tabellen gelden respectievelijk voor de sensoren 538E, 588E en 647E, dus respectievelijk in het noorden, bij de stad en in het zuiden.

	12	15	18	21	0	3	6	9 UT	
J	.	.	.	.	.	.	.	.	*
A	.	.	.	.	.	.	.	.	*
S	.	.	.	.	.	.	.	.	.
O	.	.	.	.	.	.	.	.	.
N	3	3	3	3	3	3	2	1	2
D	3	3	3	3	3	3	3	2	2
J	10	7	7	8	10	11	15	13	12
F	.	.	.	.	.	.	.	.	.
M	.	.	.	.	.	.	.	.	.
A	.	.	.	.	.	.	.	.	.
M	.	.	.	.	.	.	.	.	.
J	.	.	.	.	.	.	.	.	.
(maand)	.	.	.	.	.	.	.	.	.

	12	15	18	21	0	3	6	9 UT	
J	.	.	.	.	.	.	.	.	*
A	.	.	.	.	.	.	.	.	*
S	.	0	.	.	.	.	.	.	.
O	.	.	.	.	.	.	.	.	.
N	.	.	.	.	.	.	.	.	.
D	0	1	0	3	2	*2	.	.	.
J	2	0	1	4	7	*5	5	6	2
F	.	.	.	.	.	.	.	.	.
M	.	.	.	.	.	.	.	.	.
A	.	.	.	.	.	.	.	.	.
M	.	.	.	.	.	.	.	.	.
J	.	.	.	.	.	.	.	.	.
(maand)	.	.	.	.	.	.	.	.	.

	12	15	18	21	0	3	6	9 UT	
J	.	.	.	.	.	.	.	.	*
A	.	.	.	.	.	.	.	.	*
S	.	.	.	.	.	.	.	.	.
O	2	1	2	1	3	7	5	*5	5
N	3	1	.	1	.	0	*0	1	4
D	3	3	3	3	3	*3	2	2	1
J	.	2	3	6	5	*5	4	5	4
F	.	.	.	.	.	.	.	.	.
M	.	.	.	.	.	.	.	.	.
A	.	.	.	.	.	.	.	.	.
M	.	.	.	.	.	.	.	.	.
J	.	.	.	.	.	.	.	.	.
(maand)	.	.	.	.	.	.	.	.	.

	522	538	546	555	566		588		608			647		
E:	*15	*22	*17	*11	*12		* 7		*11			*15		
		536	543	556	568	582		603	612	625	634	642	647	659
W:		*15	*18	*15	* 9	* 8		* 7	*12	*11	*13	* 9	*10	*13

Fig. 3. Sensornummers (boven) en promille van de tijd met zicht < 200 m

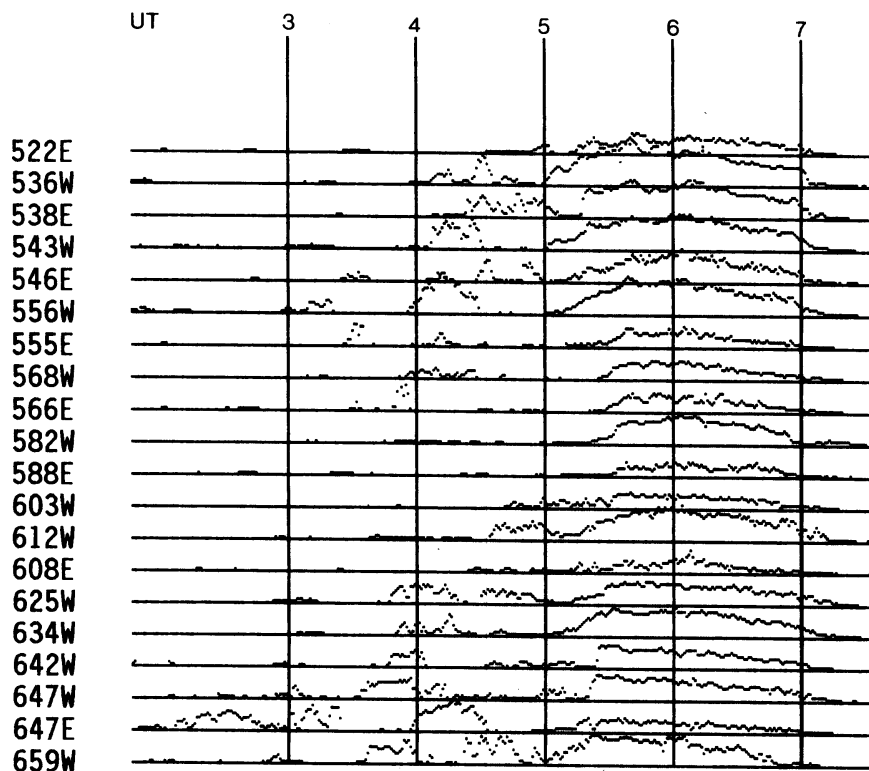


Fig.4. Verloop van mistdichtheid met de tijd op alle stations op 1 april 1992.

#### 4.2. Horizontale zichtverschillen.

Het optreden van grote horizontale verschillen in zicht - gemeten op één tijdstip - hangt nauw samen met de in 2. geschetste ontstaansgeschiedenis van mist. Spreken we van 2 naburige locaties (a en b) dan is het verschil groot als a in een mistbank zit en b niet of omgekeerd. Bij mistbanken kan zo'n situatie urenlang aanhouden omdat de horizontale verdeling van de dichtheid immers in sterke mate wordt bepaald door de lokale topografische kenmerken. Bij advectiemist zullen a en b ongeveer hetzelfde zicht hebben, afgezien van het korte tijdvak dat het mistveld het ene station al wel, maar het andere net niet bereikt had. Naarmate de afstand tussen a en b toeneemt zullen de verschillen toenemen, hoewel dit minder duidelijk is in gevallen dat vergelijkbare terreinomstandigheden op twee ver uiteen gelegen locaties aanleiding geven tot een haast synchrone ontwikkeling van stralingsmist. Een typisch voorbeeld van de ontwikkeling van mist langs de A16 wordt getoond in Fig. 4. Eerst treden er verspreide mistbanken op in het landelijk gebied, zowel ten noorden als ten zuiden van de stad. Na ca. 5 uur U.T. (= 7 uur

zomertijd) zit het hele traject in de mist, die - onder invloed van de zon - overal ongeveer gelijktijdig oplost.

Om het systematisch verschil in optreden van mist op twee locaties uit te drukken kan men de correlatie tussen lange tijdreeksen van zichtmetingen op beide stations berekenen. We zijn echter geïnteresseerd in die korte fragmenten van de tijdreeksen waarin dichte mist is opgetreden. Een lange periode met goed zicht over het hele land zou dan tot een te optimistische correlatie leiden. Is de kans op mist op locaties a en b respectievelijk  $P_a$  en  $P_b$  en de kans op gelijktijdig optreden  $P_{ab}$ , dan zijn alle 4 mogelijkheden als volgt te tabelleren:

		mist op b:		
		ja	neen	
mist: op a:	ja	$P_{ab}$	$P_a - P_{ab}$	$P_a$ $1 - P_a$
	neen	$P_b - P_{ab}$	$1 - P_a - P_b + P_{ab}$	
		$P_b$	$1 - P_b$	1

Hieruit zijn diverse maatstaven van coïncidentie af te leiden: als we a benutten om de situatie op b te beschrijven, dan hebben we te maken met een detectiewaarschijnlijkheid  $P_{ab}/P_b$  en een vals-alarm-fractie  $1 - P_{ab}/P_a$ . De laatste is groot als  $P_a > P_b$ . Een geschikte maat voor het onderling verband van twee stations is de correlatie coëfficiënt R voor een signaal met slechts twee mogelijke waarden, in dit geval: mist/geen mist (Woodcock, 1976):

$$R = \frac{P_{ab} - P_a * P_b}{\sqrt{(P_a * P_b * (1 - P_a) * (1 - P_b))}} \quad (1)$$

Deze coëfficiënt kan tussen 1 en -1 variëren:  $R=1$  voor identieke verdelingen met absolute associatie ( $P_{ab}=P_a=P_b$ ),  $R=0$  voor onafhankelijkheid ( $P_{ab}=P_a*P_b$ ) en  $R=-1$  voor tegengestelde signalen ( $P_{ab}=0$ ,  $P_a+P_b=1$ ). Bij gelijke  $P_a$  en  $P_b$  benadert R de detectiewaarschijnlijkheid  $P_{ab}/P_b$ . Hoewel verwisselen van a en b tot dezelfde R leidt, verdient voor veilige mistwaarschuwing het station met de hoogste mistfrequentie de voorkeur.

In de literatuur vindt men soms waarden van de horizontale correlatie. Een voorbeeld is gepubliceerd voor het Hanscom Air Force Base Mesonetnetwork (Atkinson, 1978) voor een afstand van 10 km: de correlatie in advectiemist was 0.87 (beter dan in regen en sneeuw) en in stralingsmist slechts 0.40. Een dergelijk verschil hebben we in het begin van deze paragraaf ook aannemelijk gemaakt. We mogen voorts verwachten, dat de correlatie zal afnemen als een lagere zichtdrempel beschouwd wordt. Omdat bij stralingsmist het zicht doorgaans slechter is, zullen die situaties dan relatief meer bijdragen, zodat de correlatie afneemt. In landelijke gebieden wordt ongeveer 50% van de misturen door stralingsmist veroorzaakt, terwijl dit type in steden vrijwel niet voorkomt. We mogen dus in landelijke gebieden een lagere correlatie verwachten, hoewel in en bij steden de correlatie verlaagd kan worden als de mistdichtheid door bebouwing e.d. lokaal verstoord wordt.

Uiteraard zal de horizontale correlatie in de nacht- en ochtenduren met veel stralingsmist slechter zijn, maar dat effect is van ondergeschikt belang bij de opzet van een waarschuwingssysteem.

Ook als de instrumenten naast elkaar staan is  $R=1$  vrijwel onmogelijk, omdat er altijd wel kleine locale verschillen en/of meetfouten bestaan.

Practische gegevens over de horizontale correlatie van zicht zijn ook van belang in de luchtvaart bij het beoordelen van de geschiktheid van een ander vliegveld als uitwijkhaven. Behalve wat betreft zichtgrenzen kunnen waarnemingen ook nog verschillen aangaande de tijdstippen of -vakken waarop ze betrekking hebben: waarnemingen op een vaste tijd (variërend van uurlijks tot elke minuut) of bijvoorbeeld uurvakken waarin het zicht (desnoods korte tijd) onder de drempel daalde. Over de jaren 1955-1970 zijn (ongepubliceerde) uurlijkse data van Valkenburg-ZH en Schiphol beschikbaar. Voor 200 m zicht volgt  $P_a=1.7\%$ ,  $P_b=1.25\%$  en  $P_{ab}=0.65\%$ . Uit het bovenstaande volgt dan voor deze

stations met een onderlinge afstand van 26 km een waarde  $R=0.44$ . Voor 400 en 100 m zicht volgt analoog respectievelijk  $R=0.52$  en  $R=0.31$ , waarmee het effect van de zichtdrempelkeuze goed geïllustreerd wordt.

Voor verdere gegevens van gecombineerde zichtkansen kan worden verwezen naar KNMI (1976), Weingärtner (1989), Stalenhoef (1980), Hemink (1987). Slechts de laatstgenoemde geeft gegevens voor korte tijden en afstanden, namelijk 3 min. waarden van transmissometers op Schiphol die 3.5 à 4.5 km van elkaar staan. Voor een limiet van 125m runway visual range (zie bijlage B), d.w.z. ca. 50 m zicht kan men waarden van  $R$  vinden tussen 0.48 en 0.54.

Bij het lopende project zijn ook de onderlinge correlaties over het proefjaar bepaald. Daarbij zijn uitsluitend die perioden gebruikt, dat alle 20 sensoren in werking waren, hetgeen overeenkomt met ca. 90% van het totale databestand. Voor 50 m zicht waren de resultaten doorgaans gelijk of iets gunstiger dan bij het laatstgenoemde voorbeeld (max. 0.75 tussen 522E en 566E), behalve als een der stations vlak bij de bebouwing lag, met name 588E, 603W en 634W.

Omdat we hier vooral in iets grotere zichten geïnteresseerd zijn, worden nu de correlaties voor een zicht slechter dan 200 m nader beschouwd. Door de grotere frequentie van optreden is dan ook de representativiteit van de resultaten groter.

E:	*76	*100	*86	*66	*70		*58		*72			*62		
W:		*84	*87	*81	*67	*64		*56	*69	*63	*71	*57	*58	*67

Fig.5. Correlatie van station 538E met de overige stations (200 m drempel).

Een voorbeeld van de horizontale verdeling van de correlatie ten opzichte van het station met de hoogste mistfrequentie (538E) is in Fig.5 geschetst. Zoals verwacht neemt de correlatie af met toenemende afstand, behoudens een herstel als we ten zuiden van de stad weer in vergelijkbare terrein komen. Het - eveneens in een verbindingslus gelegen - station 634W aan de andere kant van de stad komt nog boven de 70%. Dit geldt nog sterker als we ons van de weg verwijderen: station Gilze-Rijen ligt 12 km ten oosten van sensor 634W. Over het eerste gedeelte van het proefjaar (t/m april) zijn curvaksen met 200m zicht vergeleken met sensor 538E en blijkt de correlatie zelfs 82%. De mistfrequentie was te Gilze-Rijen een weinig groter dan bij de genoemde sensor.

In Fig.3 bleek al een opvallend verschil in mistfrequentie tussen sensoren aan weerszijden van de weg. De onderlinge correlatie tussen een aantal paren van naast- of tegenovergelegen sensoren wordt in Fig.6 geïllustreerd.

Op 6 plaatsen zijn de sensoren ongeveer tegenover elkaar geplaatst, zodat de onderlinge afstand maximaal enkele honderden meters bedraagt in tegenstelling tot sensoren aan dezelfde kant van de weg, die zich meestal een km of meer van elkaar bevinden.

E:	* 76	* 86	* 74	* 82	* 70		* 73			* 64		*			
		84	81	68	72				74			70			
W:		* 86	* 85	* 77	* 82		* 75		* 71	* 75	* 80	* 76	* 83	* 81	*

Fig.6. Correlatie(%) tussen sensorparen voor optreden van zichten < 200 m.

Toch blijkt dan de correlatie met de sensor aan de overkant meestal slechter dan met minstens een van de burens aan dezelfde zijde. De enige uitzondering vormt 608E, waar de burens ver weg aan de ander zijde van een stadswijk liggen. In 5.4 zullen deze verschillen nog in relatie tot topografische en meteorologische factoren worden beschouwd.

Bij hoge correlaties wordt het aantrekkelijk om te overwegen sensoren uit te sparen. We zien in Fig.7 dat de metingen van enkele sensoren ook voor het benedenstroomse wegvak ongeveer geldig blijven. Bij 4 gevallen (van de 14 paren

met onderlinge afstand onder 1700 m) zou dan minder dan 10% gemist worden, maar dan moet men wel 20-38% valse alarms voor lief nemen.

E: <<	*95	*78	*56	*88	*53		*85	*70			*	<<	
	38	6	3	22	21		47	38					
W: >>	*	80*	91*	97*	85*		85*	83*	81*	73*	92*	78*	70*>>
		8	20	38	20		20	33	29	13	38	12	7

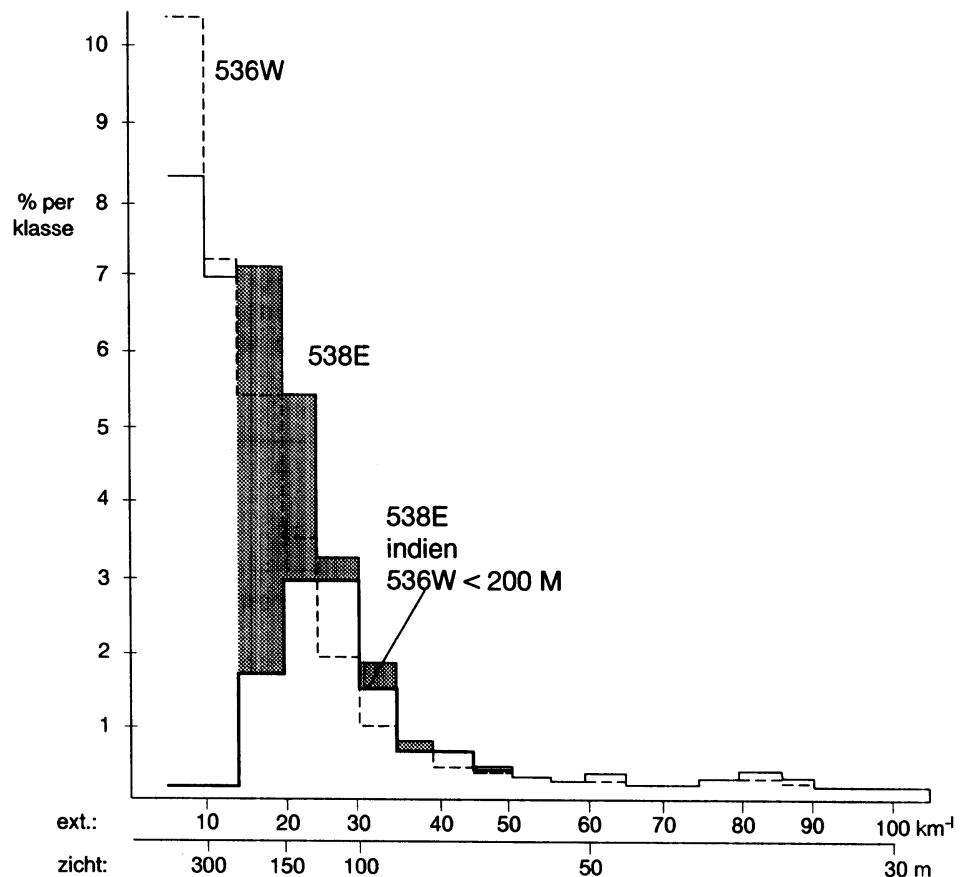
Fig.7. Detectiewaarschijnlijkheid (% boven) en vals-alarm percentage (onder) bij vervanging door de vorige sensor in dezelfde rijrichting.

Ter vergelijking blijkt uit Fig.8 dat het weglaten van thans tegenoverliggende sensoren met de laagste gemiddelde mistfrequentie slechts in een geval goede resultaten biedt en juist in dat geval is de onderlinge afstand ruim 400 m. Sensor 538E ligt vrij ver van de A16 af en is - mede daardoor- de sensor met de hoogste mistfrequentie. Mist bij die sensor omvat vrijwel alle gevallen dat mist bij 522E of 536W optreedt, maar 538E kan die sensoren alleen vervangen ten koste van zo'n 30% valse alarms. Of dit echte valse alarms zijn, staat uiteraard te bezien, omdat dan tussen de genoemde sensoren ook wel mist op de weg aanwezig zou kunnen zijn. In 7.3 gaan we verder in op het aspect van de onderlinge vervangbaarheid ten behoeve van de signalering.

E:	*	*	#	#	*		*			#		*	
		98	82	86	77					78		82	
		28	20	45	32					29		40	
W:		#	*	*	#	*	*	*	*	*	*	#	*

Fig.8. Als Fig.7, maar hier met vervangen van de sensor # door de tegenoverliggende sensor \*.

Fig. 9  
Frequentieverdeling van de extinctie (per klasse 5/km) voor twee sensoren. de dikke lijn geeft de conditionele verdeling voor 538E als 536W in de mist zit. Het kleine gebied onder de dikke lijn voor een zicht > 200 m betreft gemiste gevallen (538E geen mist, 536W wel). Het gearceerde gebied geeft de gevallen met vals alarm (538E (wel mist, 536W niet).





Overigens zijn deze getallen op een exacte drempel van 200 m gebaseerd, zodat een 'misser' kan betekenen dat een zicht van 195 m net niet wordt aangegeven en een vals alarm kan optreden bij een werkelijk zicht van 205 m. Een voorbeeld met twee sensoren in Fig.9 kan verduidelijken hoe groot de fouten bij vervanging van 536W door 538E zijn: als 536W onder 200 m wijst en er is sprake van vals alarm, dan zit 538E in de meerderheid van de gevallen nog boven de 150 m. Slechts in weinig gevallen is 536W boven 200 m en 538E onder 100 m.

#### 4.3. Tijdsvariatiës.

Zichtfluctuaties zijn al vaker bestudeerd, omdat ze van operationeel belang zijn voor de luchtvaart. Men wil bijvoorbeeld weten hoe vaak het baanzicht gerapporteerd moet worden om toch vooral een plotselinge verslechtering tijdig aan de piloot te kunnen melden. Daarom is vrij veel bekend over het statistisch gedrag van slecht-zichtvariatiës (Stalenhoef 1972, 1986a, 1986b).

Bij het onderhavige project worden de zichten elke minuut gerapporteerd. Dit lijkt vrij snel, maar het is ook ongeveer de tijd die de automobilist gebruikt om de afstand tussen 2 sensoren te overbruggen. Af en toe komt het voor dat de voorste grens van een mistveld in 1 minuut een afstand van wel 300 m aflegt. In Fig.10 worden de relatieve variatiës van de extinctie geïllustreerd.

E:	*26	* <u>19</u>	*24	*30	*27	*28	*28			*32			
W:		* <u>18</u>	*20	*23	*20	*21	*24	*26	*20	* <u>16</u>	*23	*32	*28

Fig.10. Standaarddeviatie(%) van de zichtveranderingen tussen de vorige minuut en de huidige waarneming. De getallen zijn genormaliseerd op het heersende zicht. Alleen die gevallen zijn beschouwd waarbij het actuele dagzicht tussen 150 en 200m ligt. Waarden voor sensoren op meer dan 15 m van de weg zijn onderstreept.

In advectieve mist zijn de fluctuaties iets kleiner dan in stralingsmist. Bij sensor 538E vinden we voor die twee groepen 16%, respectievelijk 20%. Overigens is bij zulke dichte mist het aantal minuten met advectieve mist minder dan 30% van het totaal. Veel duidelijker dan het verschil in type mist is blijkbaar het effect van de nabijheid van de weg: In Fig. 10 zijn de 'ongestoorde' sensoren onderstreept: blijkbaar zijn voor dat drietal de fluctuaties zo'n 30% lager dan voor de overige sensoren. Interessant is nog de waarden van Fig.10 te vergelijken met andere publicaties. Stalenhoef (1972) en Smith (1978) geven ongeveer 2 keer lagere waarden. Hun metingen berusten echter niet op puntmetingen maar op metingen met transmissometers die de gemiddelde extinctie over een traject van minstens 100 m bepalen.

Wat betreft signalering is ook de vraag interessant, hoe vaak de mistgrenzen (thans 140 en 70m) worden overschreden. Fig. 11 en 12 geven hierover informatie. Overigens is het aantal overschrijdingen van de klassegrens in omgekeerde richting (zichtverslechtering) ongeveer even groot. Dit wordt dus hier niet gepresenteerd, evenals het zeer kleine aantal gevallen dat het zicht in 1 minuut van de klasse >140m in de klasse <70m terecht komt: gemiddeld 1.4 keer per sensor tegen totaal 1.0 keer in omgekeerde richting.

E:	*22	*17	*16	*36	*12	*29	*16			*28			
	58	74	98	112	131	114	113			101			
W:		*13	*19	*20	*17	*23	*58	*10	*37	*16	*24	*22	*22
		80	87	80	105	107	87	107	105	76	103	131	117

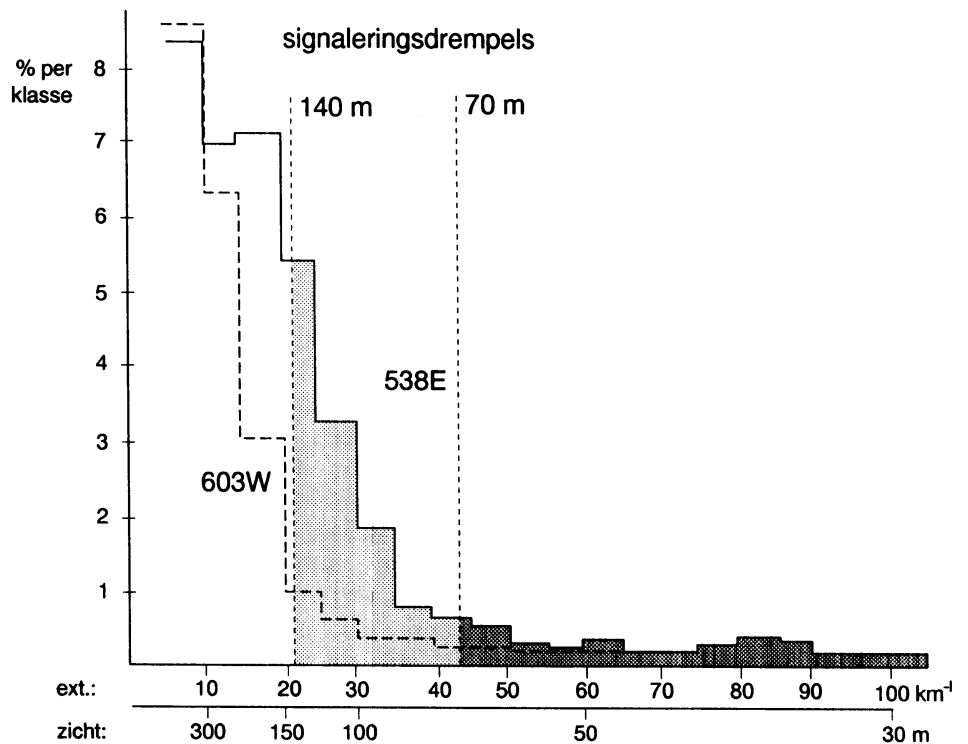
Fig.11 Kans (pro mille) dat een zicht tussen 140 en 70 meter de volgende minuut zal verslechteren tot <70m (boven), resp. verbeteren tot >140 m (onder).

E:	*45	*44	*30	*44	*19		*50		*36			*74		
W:		*24	*40	*46	*25	*42		*120	*27	*100	*56	*65	*66	*59

Fig.12 De kans (pro mille) dat een zicht in de klasse <70 m de volgende minuut zal verbeteren tot de klasse 140-70m.

In Fig.11 en 12 lijken de verschillen tussen de sensoren groot, maar het gaat daarbij om verschillen tussen kleine kansen. De restgroep waarvoor geldt dat het zicht in dezelfde klasse blijft, omvat ca. 90% van de gevallen. De verschillen tussen de sensoren hangen vooral af van de individuele verdelingsfuncties van de extinctiewaarden (Fig. 13). Sensor 602W bijvoorbeeld komt maar zelden (1%) onder de 70m en nooit onder de 50m en zal die klasse <70m dus ook weer vrij vaak (12% kans) verlaten. Sensoren als 538E en 566E komen ruim 1% van de tijd onder de 50m. Bij relatieve zichtfluctuaties met standaarddeviaties in de orde van 20% is hun verblijf in de <70m klasse dan ook meer persistent. Fysisch gezien betekenen de getallen van Fig.11 en 12 dus 'minder dan die uit Fig.10, maar ze zeggen wel meer over de 'onrust' die de sensoren kunnen bijdragen aan de signalering.

Fig.13  
Frequentieverdeling van de extincties van twee sensoren per klasse van 5 /km. 538E heeft de hoogste mistfrequentie en 603W de laagste.



#### 4.4. Eerste mist.

Van groot belang voor de signalering is de tijdige detectie van de eerste mist nadat kortere of langere tijd het zicht langs het hele traject boven de drempel was. Men zou verwachten dat sensoren met hoge mistfrequentie eerder in de mist komen, terwijl bij advectieve mist de bovenwindse sensoren het eerste aanspreken. Blijkens Fig.14 klopt dit maar gedeeltelijk. Kennelijk komt het vaak voor dat één sensor maar even onder de drempel komt.

E:	*47	*77	*34	*30	*19		*5		*11				*199	
	28	36	23	20	8		3		8				142	
W:		*17	*14	*37	*2	*8		*1	*9	*15	*10	*13	*63	*41
		9	11	31	2	4		1	5	8	3	9	42	27

Fig.14 Aantal malen dat een sensor bij een nieuwe mistperiode als eerste onder 200 m zicht kwam. Bij de bovenste getallen betekent 'nieuwe mistperiode' dat de vorige minuut alle sensoren boven de drempel aanwezen. Bij de onderste getallen moet aan deze eis gedurende 3 minuten voldaan zijn.

Als we de definitie van een nieuwe mistperiode aanscherpen door te eisen dat in plaats van 1 minuut al resp. 2 en 3 minuten nergens mist voorkwam, dan daalt het aantal gevallen van 652 via 491 tot 422. Beperken we ons nu tot de laatste keuze dan betreft dat 247 gevallen met de eerste mist ten zuiden van de stad met ruim de helft het eerst op sensor 647E. Voor de 175 gevallen met eerste mist ten noorden van de stad is de voorkeur verdeeld over een vijftal sensoren. Dat de oostelijke sensoren daarbij oververtegenwoordigd zijn hangt uiteraard samen met de voorkeur voor met name advectiemist uit de noordoost sector (zie Fig.2.).

Uiteraard zijn de sensoren die het meest onder 200 m komen ook in Fig. 14 met hogere getallen vertegenwoordigd. Maar ook als omringende sensoren ten gevolge van bijvoorbeeld obstakels of meetfouten een te lage extinctie aanwijzen, kan een sensor hoog scoren. Dit soort effecten komt in het vervolg aan de orde. In verband met de afperking van mistperiodes is ook de duur van mistperiodes van belang. Fig.15 en 16 geven hierover informatie. Een hoge mistfrequentie als bij sensor 538E gaat kennelijk samen met een langere duur van de mistperiodes.

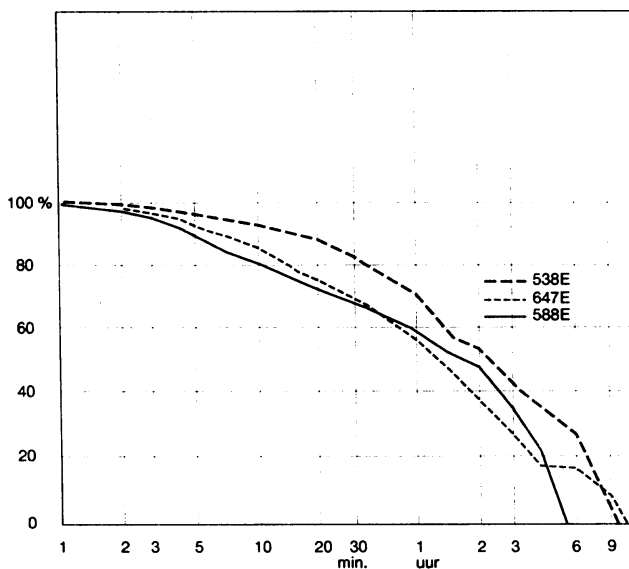


Fig.15 Fractie van de totale mistduur die wordt bijgedragen door mistperiodes langer dan aangegeven.

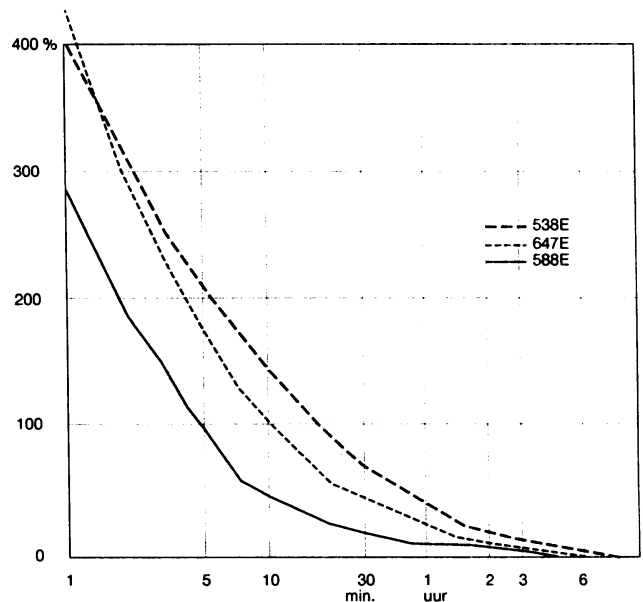


Fig.16 Aantal mistperiodes met zicht < 200 m, per sensor, langer dan de aangegeven tijd.

## 5. INVLOED VAN DE SENSORLOKATIE

### 5.1. Algemeen.

Verschillen tussen de sensoren ontstaan door eventuele meetfouten en door werkelijke verschillen in mist. De laatste ontstaan niet alleen door de verschillende terreingesteldheid in de omgeving (varierend van weilanden tot de buitenwijk van een stad), maar ook door locale effecten op de sensor. In de vorige paragraaf zagen we al dat de zichtfluctuaties dicht bij de weg toenemen. Het ligt voor de hand dat ook het gemiddelde zicht door de weg verstoord wordt. Ook kunnen we verwachten dat locale obstakels een rol spelen. Van belang is verder dat de sensoren niet alle op dezelfde hoogte boven het terrein meten. Zie daarvoor Fig.17. Het is moeilijk vast te stellen welk deel van de verschillen in mistfrequentie uit 4.1 aan dit soort verstoringen is toe te schrijven.

Op zichzelf is het niet erg, dat een sensor op 8 m. van de weg minder mist aangeeft dan een sensor op 40 m afstand. De metingen zijn immers voor signalering bedoeld. Anderzijds is het voor toekomstige keuzes van sensorlocaties van belang de grootte van dit effect te kennen. Bovendien is het gewenst ongestoorde sensoren te gebruiken om de mistgevoeligheid van de omgeving vast te stellen, zoals in 6.1 -6.5 beoogd wordt.

Omdat effecten op allerlei schalen optreden, is het onderscheid tussen 'locale' invloed en 'terrein'-invloed eigenlijk niet scherp te maken. Bij 'locaal' zullen we hier aan afstanden tot ca. 50 m denken.

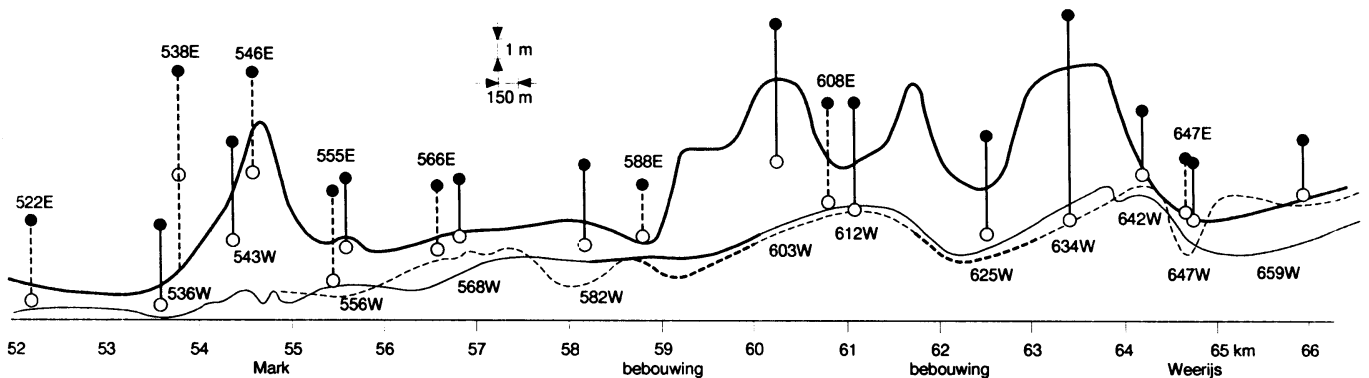


Fig.17 Profiel langs een gedeelte van de A16 met verticaal uitgezet de hoogte van het wegdek (dikke lijn) en de hoogte van het lokale maaiveld: westzijde getrokken, oostzijde gestreept. De sensorpalen zijn aangegeven tussen meethoogte en voetpunt. De meeste sensoren bevinden zich op een afstand tussen 6 en 10 meter van de rand van de weg. Uitzonderingen zijn: 588E (11 m), 536W (40 m) en 634W (50m). Sensor 538E bevindt zich op 250m van de A16 langs de A59. Voor andere aspecten van de sensorlocatie zie Fig.1.

### 5.2. Effect van de meethoogte.

Bij de opstelling van de sensoren is gestreefd steeds op 2 m boven het wegdek ter plaatse te meten (Fig.17). Omdat de weg vrijwel overal hoger ligt dan het lokale maaiveld, betekent dit dat de hoogte van de sensoren boven het maaiveld varieert tussen 2.3 en 8.9 m. De vorming en het transport van mist vindt echter ten opzichte van het maaiveld plaats. In stralingsmist neemt de mistfrequentie af met toenemende hoogte. Advectieve mist is op grotere hoogte iets dichter, zodat boven ca. 20 m de mistfrequentie merkbaar toeneemt, maar dit effect is klein als het hoogteverschil tot 6 m beperkt blijft. Metingen op verschillende hoogte heeft het KNMI onder meer te De Bilt en Cabauw verricht. Ongepubliceerde metingen te De Bilt over 4 winterhalfjaren 1965-1969 gaven op 2 m en 8 m resp.

een frequentie van 2.10 en 1.73 % voor het optreden van een zicht beneden 200 m. Mistfrequenties op 8 m moeten dus met een factor 1.2 vermenigvuldigd worden om die op 2 m te krijgen. De nauwkeurige correctie hangt echter af van de relatieve frequentie van stralingsmist. Met het zomerhalfjaar erbij kan de correctie wel 1.3 bedragen, maar dicht bij een stad, waar relatief minder stralingsmist voorkomt, zal de correctie ca. 1.1 zijn. Van de sensoren rond de A16 komen vooral 634W en 603W (resp. 8.9 en 6 m hoogte) voor zo'n correctie in aanmerking.

### 5.3. Invloed van obstakels in de omgeving.

Een aantal sensoren, zoals vermeld bij Fig.1, is omgeven door bomen of struiken met een seizoensafhankelijk bladerdek. Bij 536W is de begroeiing tijdens de proefperiode toegenomen. Ten zuiden van 546E staat als onderdeel van de bewegwijzering een groot bord.

Het ontstaan van mist gebeurt vaak eerder op open plekken tussen bomen vanwege de zwakkere wind ter plekke. Dit is echter een klein effect dat sterk samenhangt met andere omgevingsfactoren als het verloop van de terreinhoogte. Indien mist echter geadvecteerd wordt kunnen takken en bladeren druppeltjes invangen en zo de mist minder dicht maken. Dit verschijnsel wordt soms toegepast voor mistbestrijding en kan dus kwantitatief belangrijk zijn. De grootte is echter moeilijk aan te geven.

Van invangen van druppeltjes door een groot bord is minder sprake, omdat de druppeltjes bij een massief obstakel de stroomlijnen van de lucht kunnen blijven volgen en zich maar weinig op zo'n obstakel afzetten.

Grote effecten zijn wel te verwachten van geluidsschermen, omdat die de stroming van lucht over de weg sterk kunnen veranderen. Bij dit A16 project stonden die niet voldoende dicht bij de sensoren om dienaangaande conclusies te kunnen trekken.

### 5.4. Invloed van de weg.

Stralingsmistbanken die de weg opdrijven, lossen meestal op door de turbulentie en de warmte, die het verkeer veroorzaakt. Ook als de omringende weilanden al geheel met mistbanken bedekt zijn, blijft soms boven de weg nog enige tijd een mistvrije 'tunnel' gehandhaafd: stralingsmist lijkt gemakkelijker 'over' de weg te komen dan er op.

Ook als er sprake is van advectieve mist heeft de weg en het verkeer nog effect op de mistdichtheid. Dank zij het feit dat op een aantal locaties sensoren aan weerszijden van de A16 zijn aangebracht is het mogelijk verschillen in mistdichtheid als functie van de windrichting te onderzoeken. Het beste vergelijkingspunt is bij de kruising met de Weerijds (km 64.7), waar beiderzijds sensoren op 8 m van de weg staan en in de omgeving geen storende obstakels voorkomen. Ook het paar 555E, 556W lijkt redelijk symmetrisch. Het paar 566E, 568W ligt weinig vrij ten opzichte van bomen en struiken en bij de andere 3 'paren' liggen de sensoren nogal ver uiteen.

De signalen van alle genoemde paren zijn vergeleken als functie van de windrichting te Gilze-Rijen. Met name bij zwakke wind kan de windrichting op het betreffende punt langs de A16 heel anders zijn, zodat alleen gevallen met minstens 0.8 m/s in de vergelijking betrokken zijn. Vanwege de onzekere windrichting is de classificatie in 4 sectoren van 90 grad. uitgevoerd: twee langs de weg en twee daar ongeveer loodrecht op.

De resultaten van de twee eerstgenoemde paren voor gevallen dat beide sensoren in de mist zaten, zijn getoond in Fig.18 a-d. Bij oostenwind blijkt 647E ca. 30% hoger te wijzen dan 647W. Bij westelijke wind wijst 555E 40% minder dan 556W. Ook de verdeling van de extinctieverschillen bij wind langs de weg en bij zwakke wind vertoont pieken (Fig.a,c) die met het genoemde effect overeenstemmen: in individuele gevallen konden we de richting van de wind niet met zekerheid uit die van Gilze-Rijen afleiden, maar in de statistiek blijken de effecten van oostelijke resp. westelijke wind toch aanwezig.

Dat 555E bij oostenwind gemiddeld dezelfde extinctie geeft als de benedenwindse sensor (Fig. 18 b) kan te maken hebben met een spoorlijn en begroeiing juist bovenwinds van 555E. Overigens is het verschil tussen de west en oost-kromme met meer betrouwbaarheid te meten dan de exacte ligging van beide krommen omdat na afloop van het proefjaar bleek dat de calibratie van diverse sensoren verlopen was: 555E en 647W bleken te laag te wijzen, hetgeen de positie van de krommen in Fig. 18 b en d. kan verklaren.

De niet getoonde sensorparen tonen dezelfde effecten: de bovenwindse sensor is relatief 30% hoger, maar bij oostenwind ligt 608E benedenwinds van kassen e.d. Sensor 566E wordt bij westenwind bevorderd t.o.v. 568W door een meertje aan de overkant van de weg, dat juist ten noorden van 568W ligt.

De extincties van de sensoren aan de benedenwindse kant van de weg blijken dus met ruim 30% te worden onderschat vergeleken met die op ongestoord terrein. Met name aan sensoren dicht bij de weg moet dus een hogere frequentie worden toegekend om de metingen te gebruiken voor een evaluatie van de mistgevoeligheid van het terrein. Het is overigens twijfelachtig of zo'n correctie goed uitvoerbaar is.

Rekening houdend met het feit dat de sensor in ca. 50% van de mistsituaties benedenwinds staat en rekening houdend met de mistfrequentie als functie van de extinctiedrempel (bijv. Fig.13) zouden de frequenties van de meeste sensoren met ca. 15% verhoogd kunnen worden. Dit zal niet gelden voor 536W, 538E en 634W die zich meer dan 40 m van de weg bevinden. Ook in 4.3 was al gebleken dat de signalen van die sensoren minder gestoord waren.

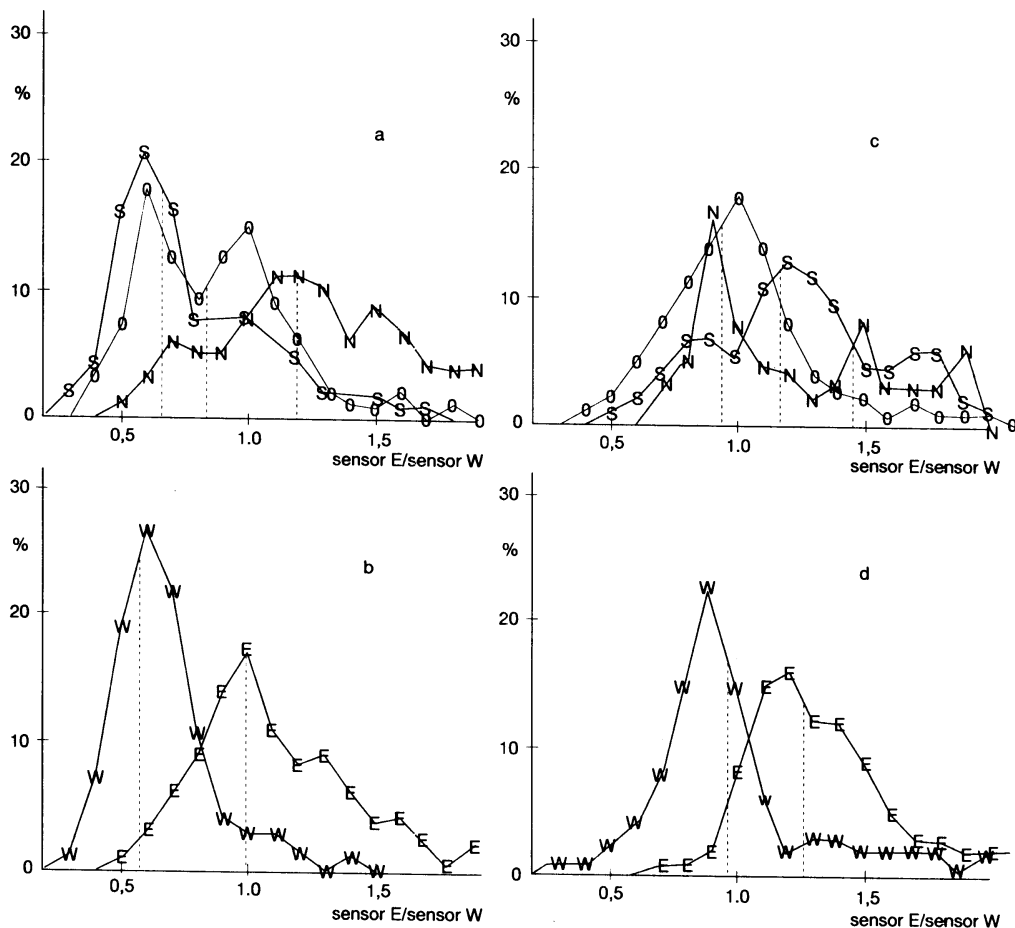


Fig.18 Verdeling van de verhouding (op de horizontale as) van de gelijktijdig gemeten extinctie op aan weerszijden van de weg gelegen sensoren: a en b voor 555E/556W, c en d voor 647E/647W. De onderste grafieken voor twee 90 graden windrichtingsectoren dwars op de weg en de bovenste voor twee sectoren langs de weg en voor zwakke wind. De windrichting is ontleend aan uurlijkse waarnemingen te Gilze-Rijen.

## 6. ANALYSE MISTGEVOELIGHEID

### 6.1. Voorstudie.

Om over de locatie van de sensoren langs A16 te kunnen adviseren hebben D.Blaauboer en A.Donker (1991) de methode van L.Musk (1988, 1991) en J.C.Dixon (1989) toegepast.

De oorspronkelijke classificatie is voor het engelse landschap ontwikkeld en gevalideerd. Een mistgevoelighedsindex I is gebaseerd op 4 predictoren:

d= de nabijheid van water,

t= de terreingradient in relatie tot dalen van koude lucht,

s= de relatieve weghoogte (t.o.v. het terrein),

e= de afstand van steden of bossen, de nabijheid van industrie.

Elke predictor kon een waarde 0-4 krijgen en een combinatie met gewichtsfactoren (10, 10, 2, 3) gaf dan een mistgevoelighedsindex 0-100.

Musk geeft een aantal voorbeelden van de uitkomsten van zijn index. Voor een ca. 50 km lang deel van de M6 in Engeland (tussen de zuidelijke uitlopers van de Pennines en de vallei van de Mersey) varieert de index tussen 1.2 en 51, waarbij punten met een index boven 20 als zeer mistgevoelig worden geclassificeerd. Blijkbaar wordt soms voor bijna alle predictoren 0 ingevuld als een geringe mistbevorderende invloed verwacht wordt. Dixon probeerde ook de mistfrequentie kwantitatief te voorspellen. Hij bereikte met andere gewichtsfactoren (10, 5, 0, 5) een correlatie van 0.75 met stationsmetingen van dichte mist. Geen van beide auteurs vermeldt overigens de exacte criteria volgens welke de genoemde predictoren hun waarde 0-4 krijgen.

Blaauboer c.s. volgden zo goed mogelijk de oorspronkelijke classificatie van Musk en vonden voor het onderhavige tracé van de A16 indices tussen 41 en 85. Een groot deel van de sensoren kon worden geplaatst nabij locaties met een hoge index. Nu er metingen beschikbaar zijn, kan een en ander kwantitatief getoetst worden. Dit is van belang voor vervolgstudies op het gebied van mistgevoeligheid.

### 6.2. Vergelijking van de voorstudie met metingen.

De bij de voorstudie gebruikte predictoren en de daaruit berekende index zijn voor de 20 sensorlocaties in Tabel 4 opgesomd.

Het kleinste kwadraten-verband tussen mistfrequentie en de index I verloopt volgens

$$\text{promille mist} = 6.45 + 0.1003 * I, \quad \text{correlatie } 0.37 \quad (2)$$

Tabel 4. Per sensor (de voorlaatste is 647W): de 4 predictoren van 6.1, de mistindex I van Musk, de mistfrequentie van Fig.3 en de afwijkingen van de metingen t.o.v. de vergelijkingen (2) en (4).

station	522	536	538	544	546	555	556	566	568	582	588	603	608	611	625	634	642	647	647	659
d	3	3	3.5	4	4	3	2.5	4	4	2.5	1.5	1.5	1.5	1.5	3	1.5	1.5	4	4	1.5
t	2.5	2	2	2.5	3	2	1.5	2	2	2	2	2	2	2	3	2	1.5	3.5	3.5	2
s	2	2	2	2	1.5	2	2	2	2	2	2	1	2.5	3	2.5	1	1.5	2	2	2.5
e	1.5	1.5	1.5	1.5	2	2.5	3	2	2	2.5	2.5	2.5	2.5	3	3	2.5	2.5	2	2	2
I	64	58	64	74	79	62	53	70	70	56	46	44	48	50	74	44	41	85	85	46
prom.	15	15	22	18	17	11	15	12	9	8	7	7	11	12	11	13	9	15	10	13
afw.(2)	+2	+3	+9	+4	+3	-2	+3	-1	-4	-4	-4	-4	0	+1	-3	+2	-2	0	-5	+2
afw.(4)	+1	-1	+6	+2	+1	-5	-1	+2	-1	-2	-3	-3	+1	+2	-2	+3	-1	+2	-3	+3

De afwijking van de waarnemingen t.o.v. deze relatie zijn in de voorlaatste rij van Tabel 4 aangegeven. De verschillen zijn groot, maar we moeten bedenken dat bij de voorstudie het voorspellen van onderlinge verschillen vooropstond en niet het voorspellen van de mistfrequentie.

Het bereik van de index, van 41 bij de stad tot 85 bij de Weerijds, is overigens kleiner dan door Musk bedoeld zal zijn. In Nederland kan de mistfrequentie nabij plassen e.d. best hoger zijn dan bij de laatstgenoemde locatie. Voor toekomstige landelijke toepassing verdient het aanbeveling een (objectieve) classificatie toe te passen met wat lagere inschaling van de predictoren dan bij de A16 gebruikt is.

Voorts lijkt het verstandig de predictor s voor de wegligging niet altijd mee te nemen, omdat het de bedoeling is de index ook voor de planning van nieuwe wegen te gebruiken. Bovendien kan de optimale combinatie van de overige predictoren het beste aan ongestoorde sensorgegevens getoetst worden.

### 6.3. Correlatie van mistfrequentie met landschapkenmerken.

Schatting van het verband tussen de mistfrequentie en de afzonderlijke predictoren (van Tabel 4) met behulp van multiple lineaire regressie leidt tot een vergelijking die in dit speciale geval (1992 langs de A16) een beter resultaat geeft, namelijk

$$\text{promille mist} = 16.95 + 0.90 d - 0.62 t + 1.19 s - 3.54 e, \quad \text{correlatie } 0.60 \quad (3)$$

waarmee 35% van de variantie verklaard wordt. Met uitsluitend factor e wordt al 30% verklaard en daarna scoort d het beste. De verhouding van de gewichtsfactoren wijkt zeer sterk af van die bij de mistindex. Dat dit bij factor e het geval is valt te verklaren uit een ten opzichte van Musk afwijkende interpretatie. In elk geval blijkt uit de hoge waarde van deze coëfficiënt dat nabij de stad minder mist voorkomt. Ook de bijdrage van t tot de mistkans is negatief. Dit kan er op wijzen dat het zich verzamelen van koude lucht maar een kleine rol speelt of dat de daarbij relevante kenmerken in het landschap moeilijk bij een inspectierit te herkennen zijn. Ook is het mogelijk dat de invloed van t door die van d gemaskeerd wordt. Uit vergelijking van de kans op verrassing door de eerste mist (4.4, cijfers Fig. 14) met de genoemde factoren blijkt namelijk t juist de beste predictor. Overigens wordt ook dan niet meer dan 64 % van de variantie verklaard.

De resultaten met de tot hier gebruikte predictoren zijn tamelijk slecht; alleen de afstand tot de stad heeft een duidelijk effect. Bovendien vinden we grote verschillen tussen locaties die met de gekozen predictoren volstrekt vergelijkbaar zijn, zoals bijvoorbeeld tussen 647E en 647W. Dit negatieve resultaat kan vele oorzaken hebben, die wel in paragraaf 5 werden genoemd, maar hier niet zijn meegenomen: meetfouten, locale storings, storings door de weg, invloed van het bovenwindse terrein.

### 6.4. Experiment met gewijzigde predictoren.

Onderzocht is, of er naast de sterke invloed van de afstand tot stedelijke bebouwing, nog andere terreinvloeden zijn te vinden.

Allereerst is eventuele komvorming (factor t) in het terrein langs de weg objectief geclassificeerd d.m.v. de tweede afgeleide van de terreinhoogte. Evenals in 6.3. werd een zwak verband met een negatieve gewichtsfactor gevonden. Dit lijkt in tegenspraak met het fysisch model, zodat kennelijk andere factoren overheersen. Dit neemt niet weg dat deze factor in meer geaccidenteerd terrein wel belangrijk kan zijn.

De nabijheid van water (factor d) is moeilijk te objectiveren. Bij de voorstudie werd de invloed van een beek misschien overschat en die van een weiland onderschat. De invloed van open water kan bovendien van het seizoen afhangen, omdat de watertemperatuur minder en langzamer varieert dan de luchttemperatuur. Voor de objectieve classificatie van een terrein komt een



viertal factoren in aanmerking:

- hoogteligging,
- grondwaterstand, eventueel hoogste of laagste stand,
- bodemsoort, met name in relatie tot het vermogen vocht vast te houden; zowel van belang voor de verdamping als voor het warmtegeleidingsvermogen.
- landgebruik, zoals akkerbouw, weiland, bos, bebouwing.

Het zal duidelijk zijn, dat er een sterk verband tussen deze classificaties is, zowel door de geologische ontstaansgeschiedenis als door menselijk handelen.

Van de vier vermelde factoren bleek de bodemsoort verreweg het beste te discrimineren. Voor de classificatie werd gebruik gemaakt van een indeling in 4 klassen voor toenemende vochtigheid van de grond: van 0 voor droog zand of stedelijke bebouwing tot 3 voor klei en veen. Deze classificatie (Wessels, 1983) was oorspronkelijk ontworpen om voorkeursgebieden voor thermiek (zweefvliegen) en buienvorming te localiseren. De classificatie voor de omgeving van Breda is in Fig. 1 aangegeven. Het is mogelijk in andere regio's aan deze classificatie nog een categorie 4 voor meer uitgebreid open water toe te voegen. Voor locaties nabij de grens van twee gebieden kan een tussenwaarde worden ingevuld, bijvoorbeeld 1.5.

Regressie met de aldus objectief gedefinieerde predictor bodemvocht geeft als resultaat

$$\text{promille mist} = 6.97 + 2.99 d \quad \text{corr. } 0.72. \quad (4)$$

Hieraan kon met andere predictoren weinig worden toegevoegd. Met name is gekeken naar het effect van de weghoogte (ten opzichte van het terrein). Als deze predictor alleen gebruikt wordt is de score slecht: de correlatie (0.12) is zo goed als afwezig. Een en ander is begrijpelijk: de sensoren staan (terecht) met voorkeur bij lage plaatsen van de weg. Bovendien ligt de weg dicht bij de stad gemiddeld hoger, omdat daar meer ongelijkvloerse kruisingen nodig zijn.

De resultaten van (4) zijn in de onderste rij van Tabel 4 vermeld. Een aantal moeilijk te quantificeren factoren kan misschien de meest opvallende afwijkingen verklaren: 538E en 634E bevinden zich binnen verbindingsslussen met open water en zijn relatief mistig. Dicht ten zuidoosten van 555E bevinden zich veel bomen; 588E en 603W zijn omringd door bomen. De laatste 3 sensoren scores lager dan verwacht. Een verklaring voor de verschillen bij de meest zuidelijke sensoren 647W en 659W is niet aan dit soort overwegingen te ontleen. De lage meetwaarde bij 647W is minstens gedeeltelijk te verklaren door het verlopen van de calibratie van die sensor. Omdat geen exacte correcties bekend zijn, zijn tenslotte de regressies (2) tot (4) met geschatte correcties nagerekend. De coëfficiënten in die vergelijkingen worden dan gewijzigd, maar de correlaties en de daarop gebaseerde conclusies blijven vrijwel gelijk.

#### 6.5. Mogelijke verbeteringen van de methode.

De gekozen criteria moeten objectief gedefinieerd worden. Indien mogelijk moet het aantal predictoren verminderd worden, met name als ze onderling sterk gecorreleerd zijn. Bij de nu gebruikte 'fog potential index' zijn de 4 gewichtsfactoren gepubliceerd, maar niet de classificatiemethode. Om de methode ook geschikt te maken voor andere vragenstellers moet er onderscheid gemaakt kunnen worden tussen de mistgevoeligheid in het 'ongestoorde' veld en het uiteindelijke resultaat op de verkeersweg (merk op dat de weg vaak hoger ligt dan lage terreingedeelten).

De in de voorgaande paragraaf gebruikte objectieve parameter voor het bodemvocht lijkt een goede kandidaat als predictor, maar moet wel in andere regio's van het land getoetst worden. Overigens was al eerder gebleken dat de op die manier verkregen landelijke kaart goed vergeleken kon worden met de verdeling van de bodemtemperatuur in een heldere nacht als te zien was op een infrarood satellietfoto (Floor, 1989).

Er zijn soms grote verschillen tussen de mistfrequenties aan weerszijden van de weg. Soms is de mistgevoeligheid aan beide zijden verschillend en zorgt de weg voor afscherming van bovenwindse invloeden, zodat de verschillen ook echt in de jaartotalen doorwerken. Het verdient dus aanbeveling de analyse voor het landschap aan beide kanten afzonderlijk uit te voeren. Zo blijkt ook duidelijker aan welke zijde de sensor het beste geplaatst kan worden. Een alternatief is, bij de schatting van de predictoren richtingsectoren te onderscheiden en dan het eindresultaat te berekenen door weging met de windrichtingsverdeling tijdens mist (Fig. 2). Hierbij is het bezwaar, dat die verdeling met de tijd en de plaats kan veranderen en niet overal in het land op voorhand bekend is.

## 7. EFFECT VAN DE ZICHTMETINGEN OP DE GETOONDE SIGNALLEN.

### 7.1. De signalering.

Het verkeer wordt gewaarschuwd via 37 beelden op portalen, 19 op de oostelijke, 18 op de westelijke rijbaan. Fig.19 geeft voor elke portaalhelft welke sensoren gebruikt worden. Omdat er bijna twee keer zoveel signalen als sensoren zijn, bedienen de meeste sensoren meerdere signalen. Waar nodig worden ook signalen op de andere rijbaan verzorgd.

Per signaal is de toegewezen sensor met de hoogste actuele extinctie maatgevend en wordt een eventuele defecte sensor door de eerstvolgende in de rijrichting vervangen. Het verloop van de getoonde adviessnelheden (80 of 60 km/h) wordt tenslotte afgevlakt: 60 wordt nog voorafgegaan door 80 en een beperkt traject tussen twee mistbanken wordt 'opgevuld'. Deze procedure is in het verslagjaar getest en kan uiteraard nog software-matig worden aangepast. Het bestand dat nu beschikbaar is, kan overigens gebruikt worden om signalerings-algorithmen te wijzigen, te testen en te vergelijken.

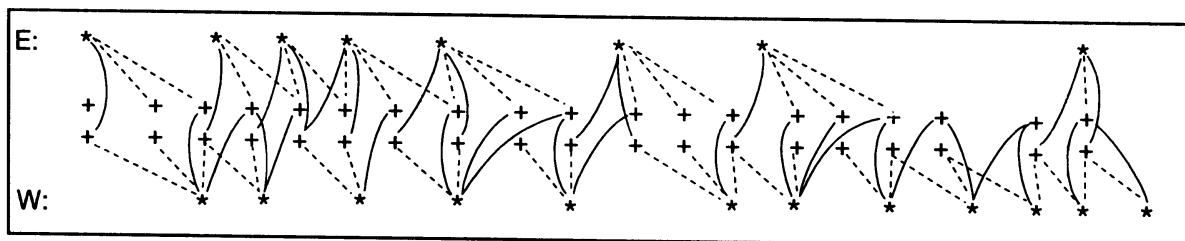


Fig.19 Toewijzing van de sensoren (\*) aan de signalen (+) op de portalen. Als het signaal boven de andere rijbaan hangt is een dikke lijn getekend.

Met de beschikbare zichtmetingen is het in 1992 gebruikte signaleringsproces gesimuleerd teneinde het effect van de metingen op de uiteindelijke signalering te kunnen vaststellen. De totale tijd met mistsignalering in de proefperiode van ruim een jaar bedroeg 188 uren. Ca. 34% van die signalen had op de zwaarste waarschuwing (60 km/h) betrekking. Het aantal uren per signaalbeeld is in Tabel 5 gegeven. De getallen weerspiegelen ongeveer het verloop van de frequentie van mist met zicht onder 140 m langs het traject. We zien weer de lagere mistfrequentie nabij de stad en de - waarschijnlijk overdreven - invloed die de op afstand staande sensor 538E op de portalen nabij de aftakking van de A59 heeft. Die portalen deden in 68% van de genoemde 188 uren mee met de signalering.

Tabel 5. Afgerond aantal uren per portaal met signalering <80 km/h. De getallen zijn gerangschikt volgens het rijbaanschema van Fig. 19.

E: --	71	93	127	132	113	99	94	70	68	52	53	56	77	77	85	75	74	109
W: 93	93	127	115	118	97	67	67	46	49	50	49	77	65	60	66	69	96	109

Gedurende een groot deel van de mistperioden blijven de signalen eenzelfde snelheidsaanwijzing geven. Het signaal wordt vooral bepaald door diegene van de aansturende sensors, die de hoogste extinctie meet. Het signaal zal van minuut tot minuut kunnen wijzigen, als die sensor rond de drempel fluctueert. Het totaal aantal keren dat ergens langs de weg een signaal wijzigde bedroeg 5508. In de helft van de gevallen (2740) gebeurde dat al na 1 minuut. In 345 gevallen bleef de signalering meer dan 5 minuten stabiel, in 117 gevallen meer dan 10 minuten en in 16 gevallen zelfs meer dan een half uur.

### 7.2. Bijdrage van de sensoren tot de signalering.

De bijdrage van elke sensor tot de totale signaleringstijd volgt maar gedeeltelijk uit de mistfrequentie bij die sensoren. De invloed van een sensor kan worden verminderd door de nabijheid van een sensor met (systematisch) hogere extinctie. Dit onderwerp is al uitvoerig in 4.4 behandeld. Hier zullen we slechts letten op de bijdrage van elke sensor tot signaalwisselingen. Zie daarvoor Fig.20. Slechts 37% van de signaalwisselingen wordt door één sensor veroorzaakt. In 44% van de gevallen bepaalden twee sensoren simultaan de signaalwisseling en in 13% zelfs 3 sensoren. De resterende 6% kon aan 4 of meer sensoren worden toegeschreven.

Blijkbaar is het meetinterval van 1 minuut nog zo lang dat ook bij nabijgelegen sensoren 'simultaan' een verbetering/verslechtering van het zicht doorwerkt. Het merendeel van de hier besproken signaalwisselingen betreft variaties tijdens mist; slechts een kleine fractie betreft het binnenvallen van de eerste mist van een mistperiode.

E:	*	*	*	*	*	*	*						*
	352	416	339	212	278		161	235					399
	353	431	335	196	269		165	250					401
W:		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
		280	305	284	122	141	95	298	186	200	110	202	341
		265	319	297	112	133	98	290	178	207	119	200	355

Fig.20 Aantal malen dat een signaalwisseling samenviel met een passeren van de drempel 140 of 70 m bij de betrokken sensor. Per sensor heeft het bovenste getal betrekking op zichtverslechtering, het onderste op zichtverbetering.

### 7.3. Signalering met een gereduceerd meetnet.

Defecte sensoren worden vervangen door benedenstrooms geplaatste sensoren. Hierdoor wordt alle mistinformatie zo goed mogelijk gebruikt ten koste van een zekere overwaarschuwing. Deze methode werkt niet als ook alle benedenstroomse sensoren defect zijn; dan dient een deel van de signalering buiten werking gesteld te worden.

Ook al worden defecte sensoren zo goed mogelijk vervangen, toch heeft elke sensor een unieke bijdrage in die gevallen dat ze in de mist zit, maar de naaste burens niet. In paragraaf 4.4 werd dit aspect bij het optreden van 'eerste mist' al belicht.

Door simulatie met het gegevensbestand kan worden nagegaan wat de onvervangbare bijdrage van elke geplaatste sensor is. Geheel nauwkeurig is deze methode niet, omdat in de uitgangssituatie de sensor soms ook al afwezig was. De afwezigheid van een sensor leidt tot een reductie van de signalen op de nabijgelegen portalen. De sterkste reductie is in Fig.21 aangegeven. Bovendien is de reductie van de totale signaleringstijd (dus ten opzichte van 188 uur) van het systeem aangegeven.

E:	*	*	*	*	*	*	*						*	
	100	19	18	8	28		22		19				36	
	1.8	4.1	2.1	0.8	0.2		0.1		0.6				7.6	
W:		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
		23	8	29	4	13		11	48	15	22	5	3	23
		0.3	0.7	1.8	0	0.1		0.0	0.4	0.3	0.3	0.2	0.9	2.6

Fig.21 Per sensor is aangegeven, boven: de reductie (%) die weglaten zou veroorzaken op de signaleringstijd (80 km/h of minder) van het meest benadeelde portaal, en onder: de procentuele reductie van de totale signaleringstijd van het gehele systeem.

De score van elke sensor hangt af van de mistfrequentie, de aanwezigheid van vervangende sensoren en ook nog van de signaaltoewijzing-algorithmen. Uiteraard kan de laatste sensor langs een rijbaan nooit vervangen worden door een volgende, zodat de signalering op het desbetreffende portaal in 100% van de gevallen met een defect uitvalt indien dat portaal alleen door die sensor wordt bediend. Voor het overige lopen de getallen zeer sterk uiteen; sommige sensoren geven gemiddeld meer informatie dan anderen. We kunnen deze getallen ook met Fig. 5 vergelijken; daar werd de sensor echter vervangen door de vorige sensor in dezelfde rijrichting en niet door de volgende zoals bij de operationeel gebruikte procedure. In elk geval toont Fig.21 kandidaten voor opheffing, bijvoorbeeld 568W en 642W of 647W. In het laatste geval mag er uiteraard maar een worden weggelaten, waarbij weglating van 647W gezien de frequente detectie van het begin van een mistperiode minder gewenst is.

## 8. CONCLUSIES

### 8.1. De zichtmetingen.

- Ondanks de geringe ervaring met een dergelijk detectiesysteem waren de metingen in het eerste jaar beschikbaar voor 90% van de totale tijd en voor 95% van de tijdsduur van dichte mist. Op ca. 7 dagen met dichte mist was het systeem buiten werking (3.2).
- Hoewel lichten 's nachts op grotere afstand worden waargenomen dan overdag is 's nachts de wegmartering juist moeilijker te zien. Het verdient daarom de voorkeur de omrekening van extinctie naar meteorologisch dagzicht ook 's nachts te gebruiken bij het schakelen van de signalen (Bijlage A). De voorkeur voor deze procedure geldt nog sterker op trajecten met openbare wegverlichting.
- Gedurende de onderzochte proefperiode van 13 maanden waren de mistfrequentie en de windrichtingsverdeling tijdens mist ongeveer representatief voor het klimaat ter plaatse (3.3). Mist overdag kwam wat vaker voor dan normaal (Tabel 2).
- Dichte mist komt in het open landschap ca. 3 x vaker voor dan nabij de stad (4.1). Voor het eerste optreden van mist zijn de verschillen nog veel groter (4.4).
- De weg heeft grote invloed op het gedrag van mist. De zichtfluctuaties worden groter (4.3) en het zicht aan de benedenwindse zijde is gemiddeld 30% beter (5.4).
- Er is veel informatie verkregen over de horizontale correlatie tussen de sensoren in relatie tot het landschap en de nabijheid van de weg (4.2). Wat betreft de individuele sensoren is gelet op hun waarschuwingseffect (4.4), hun bijdrage tot signaalwisselingen (4.3, 7.2) en de mogelijkheid sensoren weg te laten (4.2 en 7.3).

- g De metingen bevestigen maar gedeeltelijk de resultaten met de Engelse mistindex. Er zijn aanwijzingen dat een beperkter aantal predictoren voldoende is, bijvoorbeeld bodemvocht en afstand tot bebouwing en bebossing. De metingen werden echter teveel gestoord door storingen van de weg en andere kunstwerken om definitieve conclusies te bereiken (6).

## 8.2. Plaatsing van sensoren.

- a Op grond van aspecten van verkeersveiligheid moet een afweging gemaakt worden tussen enerzijds een zekere detectie van alle mist en anderzijds een voor de weggebruiker acceptabel aantal gevallen dat 'ten onrechte' gesignaleerd wordt. Met gegevens uit dit rapport kunnen dergelijke beslissingen getalsmatig onderbouwd worden (4.1-4 en 7.3).
- b Bij het huidige systeem wordt vaak een vals alarm gegeven vanwege sensoren aan de overzijde van de weg terwijl onderschrijden van de zichtdrempel op de eigen weghelft geenszins zeker is. Overigens is dit niet geheel te vermijden als men aan de veilige kant wil blijven.
- c De sensoren waren i.h.a. goed geplaatst. Belangrijke meetlocaties vinden we in elk geval nabij relatief lage punten van het wegdek (Fig.17) en dan bij voorkeur aan beide zijden van de weg. Voorts blijken sommige hooggelegen delen van de weg een hoge mistfrequentie te hebben, indien dat samengaat met een relatief natte kom in het landschap veroorzaakt door verbindingslussen.
- d Het verdient overweging de sensoren verder van de weg te plaatsen, bijvoorbeeld op ca. 200 m afstand. Ten eerste neemt de kans op detectie toe. Bij sensoren op het talud blijft het mogelijk dat mist tussen de sensoren de weg bereikt en niet wordt gemeten. Ten tweede vermindert de kans op te late signalering in gevaarlijke situaties met geadvecteerde mistvelden. Ten derde leiden de minder variabele sensorgegevens tot een rustiger signaalbeeld. Tenslotte zijn er minder sensoren nodig en is het eenvoudiger om meteorologisch geschikte locaties te vinden. Weliswaar zal dan in een beperkt aantal situaties het zicht op de weg langdurig beter zijn dan in de aangrenzende weilanden, maar bij de voorgestelde afstand van 200 m zal de weggebruiker met eigen ogen zien dat het gevaar nabij is, hetgeen de acceptatie bevordert.
- e De locatie van sensoren op hoge palen vergroot het risico dat mist onder de sensor de weg opstroomt. De luchtstroming dicht bij de grond verloopt niet horizontaal maar evenwijdig aan het aardoppervlak of het talud. Bij grotere afstand tot de weg kan de sensor steeds op uniforme hoogte boven de grond worden geplaatst, bijvoorbeeld op 2 m.
- f Op locaties met sensoren aan beide zijden van de weg kan de nauwkeurigheid van de signalering worden vergroot door informatie over de windrichting te gebruiken. Indien namelijk alleen mist voorkomt bij de benedenwindse sensor, zal in het algemeen de weg vrij van mist zijn. Uiteraard moet de windrichting dan ter plaatse gemeten worden.

## REFERENTIES

- Braak, C., 1939. Het klimaat van Nederland, H, Mist. KNMI Publ.102, Med. en Verh. Nr. 42.
- Buma, T.J., 1960. Fog at Leeuwarden, the Netherlands. Meteorol.Mag., 89, 161
- Tonkelaar, J.F. den, 1960. De afneming van de frequentie van de stralingsmist in Schiphol gedurende het tijdvak 1 jan 1949 t/m 31 dec 1959. Suggesties voor een mogelijke oorzaak. KNMI Verslagen, V-87.
- NN., 1965. Supplement op klimatologie-standaard-diktaat voor de opleiding tot officier meteorologie. Koninklijke Luchtmacht.
- Stalenhoef, A.H.C., 1972. Visibility variations at Schiphol-Airport. Amsterdam. Pure and applied geophysics, 98, 213-226.
- KNMI, 1976. Tables with data of aerodromes, 1955-1970. Climatological data of Netherlands stations. KNMMI Publ.150 -9.
- Cannemeijer, F., and A.H.C.Stalenhoef, 1977. Occurrence and advection of fog at Amsterdam Airport (Schiphol). KNMI Wetenschappelijke Rapporten, WR 77-12.
- Smith, S.G., 1978. Variability with time of poor visibility beside a motorway, Meteorol.Mag., 107, 289-304.
- Stalenhoef, A.H.C., 1980. Vergelijking van zichtmetingen in mist op Nederlandse weerstations. KNMI Verslagen, V-361.
- Wessels, H.R.A., 1983. A soil moisture map of the Netherlands for studies of atmospheric convection. KNMI Memorandum FM-83-28 [unpubl. manuscr.].
- Stalenhoef, A.H.C., 1986. De duur en de kans op het aanhouden van slecht zicht op Schiphol. KNMI Memo FM-86-12 [unpubl. manuscr.]
- Stalenhoef, A.H.C., 1986. Aantal en duur van RVR-runs voor RVR-waarden minder dan 225 m. KNMI Technische Rapporten, TR-85.
- Hemink, J., 1987. Dense fog at EHAM; the change and duration of RVR-values lower or equal to 200m. Flugmet 87, Linz. KNMI De Bilt.
- Woodcock, F., 1976. The evaluation of yes/no forecasts for scientific and administrative purposes. Monthly Weather Review, 104, 1209-1214.
- Atkinson, G., 1978. The importance of weather observations. Aerospace Science Review, nr.78-1, 2-7.
- Musk, L.F., 1988. The assessment of local fog climatology for new motorway and major road schemes. Proc. of the Int.Conf. on Meteorology and Road Safety. Florence, November 1988.
- Dixon, J.C., 1989. Current techniques for assessing (indirectly) the localized incidence of fog on roads. Meteorol.Mag., 118, 99-104. (met dezelfde titel werd een wat uitvoeriger beschrijving gepresenteerd op de conferentie te Florence in november 1988.)
- Floor, C., 1989. Weerfoto als bodemkaart. Zenit 16, 28-29
- Weingärtner, H., 1989. Untersuchung der räumlichen Korrelation von Sicht und Ceiling in Mitteleuropa. Meteorol.Rdsch. 41, 97-103.
- Blaauboer, D. en A.W.Donker, 1991. Voorlopige onderzoekresultaten en lokatieplan mistsensoren. A16 mist-proefproject RWS/KNMI. KNMI De Bilt.
- L.F.Musk, 1991. The Fog Hazard. In: Highway Meteorology, Eds. A.H.Perry, L.J.Symons. London, pp. 91-123.

## Bijlage A

### HET BEGRIIP 'ZICHT' BIJ WEGVERKEER IN DICHTER MIST.

Metingen van de dichtheid van mist resulteren doorgaans in waarden van de extinctiecoëfficiënt  $b$ , gedefinieerd als de relatieve uitdoving van de lichtstroom  $\phi$  in een evenwijdige lichtbundel over een korte afstand  $dx$ .

$$b = -\frac{1}{\phi} \frac{d\phi}{dx} \quad (\text{m}^{-1}) . \quad (\text{A1})$$

De weggebruiker ervaart als zicht: de verste afstand waarop hij in de rijrichting voorwerpen of lichten kan waarnemen. Dit hangt dus niet alleen van de extinctie af, maar ook van de aard van die voorwerpen of lichten en bovendien van de omgevingsverlichting.

De situatie bij het wegverkeer is anders dan in de luchtvaart waar de gestandaardiseerde definitie van 'baanzicht' is gebaseerd op het zien van de steeds aanwezige baanverlichting onder de heersende omstandigheden. Evenals in de luchtvaart zal ook bij wegverkeer het begrip 'zicht' op veiligheidseisen moeten berusten. Voor een betrouwbare orientatie bij het wegverkeer is doorgaans meer nodig dan het waarnemen van de koplampen van naderende voertuigen.

In dit kader wordt een drietal situaties nader onderzocht:

- zien van voertuigen of wegmakering met behulp van de heersende verlichting, d.w.z. daglicht of straatverlichting,
- zien van voertuigen of wegmakering met de verlichting van het eigen voertuig,
- het zien van de verlichting van andere voertuigen, zowel overdag als 's nachts.

De gevallen a. t/m c. worden in de volgende paragrafen behandeld.

Uiteraard verschilt het 'zicht' in deze situaties, ook al blijft de dichtheid van de mist hetzelfde.

Bij de behandeling zal zoveel mogelijk worden aangesloten bij het standaardwerk van Middleton (1952). Het zien met behulp van koplampen sluit nauw aan bij een publicatie van Chesterman en Stiles (1948). Omdat hun numerieke berekeningen een andere waarnemingsconfiguratie betroffen, zijn hier berekeningen voor het wegverkeer toegevoegd.

#### a. CONTRASTZICHT BIJ DIRECT OF INDIRECT ZONLICHT.

Het contrast van voorwerpen ten opzichte van hun achtergrond wordt gedefinieerd als

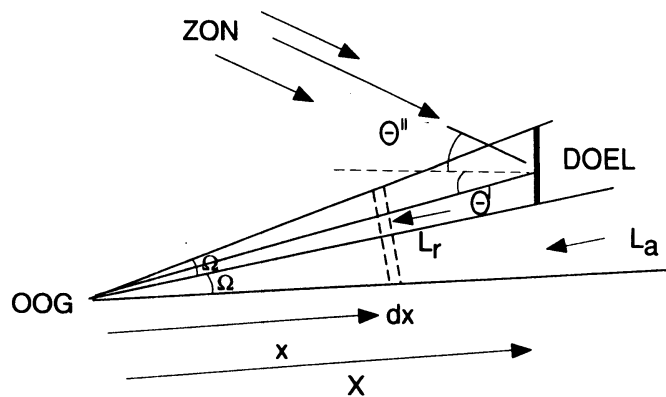
$$C = \frac{L_r - L_a}{L_a} \quad (\text{A2})$$

waar  $L_r$  en  $L_a$  de luminanties zijn ( $\text{lm}/\text{m}^2/\text{sr}$ ), die het oog bereiken van het voorwerp zelf, resp. van zijn omgeving. Aldus gedefinieerd kan  $C$  waarden tussen  $-1$  (zwart voorwerp) en  $\infty$  (donkere achtergrond) aannemen.

Voor het berekenen van  $L_r$  beschouwen we een kegel met top bij het oog, die juist het voorwerp omvat (Zie Fig.A.1). Het voorwerp wordt gezien onder een ruimtehoek van  $\Omega$  sr. Het berekenen van de achtergrond geschiedt in een naast het voorwerp gelegen gelijkvormige kegel.

Verondersteld wordt, dat de binnenkomende verlichtingssterkte  $E_0$   $\text{lm}/\text{m}^2$  (bijvoorbeeld door direct en/of diffuus zonlicht) langs de genoemde kegels qua richting en grootte niet verandert. In het volgende willen we willekeurige oriëntaties van doel en belichting toelaten. De waarnemingsrichting maakt een hoek  $\theta'$  met de normaal op het doel en verder is de hoek  $\theta''$  tussen die normaal en de invalrichting van het licht van belang. Beide hoeken samen bepalen dan de hoek  $\theta$  tussen de richting van de lichtbron en de kijkrichting naar het voorwerp.

Fig.A.1. Bovenaanzicht van situatie met laagstaande zon



Het doel op afstand  $X$  heeft een oppervlak  $\Omega X^2 / \cos\theta'$  en ontvangt dus een lichtstroom

$$\Phi = E_0 \cos\theta'' \Omega X^2 / \cos\theta' \quad \text{lm} \quad (\text{A3})$$

Het doel heeft een reflectiefactor  $r$ . Voor het onderhavige probleem zijn diffuus reflecterende doelen het meest belangrijk. Rekening houdend met de wet van Lambert, wordt dan in de richting van het oog verstrooid een lichtintensiteit

$$I_r = E_0 \cos\theta'' \Omega X^2 r / \pi \quad \text{lm/sr} \quad (\text{A4})$$

Een oppervlak van  $1 \text{ m}^2$  ter plaatse van de waarnemer omvat een ruimtehoek van  $1/X^2 \text{ sr}$  en ontvangt dus een lichtstroom  $I_r/X^2 \text{ lm}$  hetgeen leidt tot een verlichtingssterkte  $I_r/X^2 \text{ lm/m}^2$ . Om de luminantie te krijgen moet worden gedeeld door de ruimtehoek  $\Omega \text{ sr}$  waaruit dit licht de waarnemer bereikt. Tot zover betreft dit de maximale luminantie: mist met extinctiecoëfficiënt  $b \text{ m}^{-1}$  verzwakt het resultaat nog met een factor  $\exp(-b \cdot X)$ . De uiteindelijke bijdrage van het doel tot  $L_r$  is dan

$$L_r' = E_0 \cos\theta'' \exp(-b \cdot X) r / \pi \quad \text{lm/m}^2/\text{sr} \quad (\text{A5})$$

Indien er geen mist is, hangt het contrast van het voorwerp dus voornamelijk af van de waarde van  $r$  in vergelijking met de reflectie uit de omgeving.

$L_r$  omvat behalve de bijdrage (A5) ook verstrooid licht uit de genoemde kegel. De berekening hiervan begint met het licht ontvangen in een schijfje met dikte  $dx$  op afstand  $x$ . De hoeveelheid verstrooid licht in dit schijfje bedraagt

$$d\phi = E_0 \Omega x^2 s dx \quad \text{lm} \quad (\text{A6})$$

waar  $s \text{ (m}^{-1}\text{)}$  de verstrooiingscoëfficiënt is (in mist ongeveer gelijk aan  $b$ ). De verstrooiing naar het oog volgt door rekening te houden met de hoekafhankelijkheid van het verstrooide licht. Het achterwaarts verstrooide licht is immers zwakker dan het voorwaarts verstrooide licht. Dit effect wordt beschreven met een genormaliseerde fase-functie  $F(\theta)$ , waarbij  $\theta$  de hoek is tussen zon en waarnemer als gezien vanuit het voorwerp. We vinden analoog aan (A4)

$$dI = E_0 \Omega x^2 s dx F(\theta) / (4\pi) \quad \text{lm/sr} \quad (\text{A7})$$

De -door mist verzwakte- bijdrage op het oog volgt als bij (A5) uit



$$dL_a = E_0 * \exp(-b*x) * s * dx * F(\theta) / (4\pi) \quad \text{lm/m}^2/\text{sr}, \quad (\text{A8})$$

hetgeen geïntegreerd moet worden tussen 0 en X. De luminantie van de achtergrond volgt door integreren van (A8) tussen 0 en  $\infty$ . De gevonden luminanties kunnen nu als volgt in (A2) worden opgenomen

$$C = (L_r' - \int_X^\infty dL_a) / \int_0^\infty dL_a \quad (\text{A9})$$

Na introductie van (A5) en na integreren van (A8) volgt

$$C = \left( \frac{4r \cos\theta''}{(s/b) * F(\theta)} - 1 \right) * \exp(-b*X) \quad , \quad (\text{A10})$$

waarbij in mist s/b ongeveer 1 bedraagt. Uit metingen aan mistdruppels blijkt volgens Chesterman en Stiles (zie Middleton, p.142) dat voor  $|\theta| < 60$  deg een goede benadering wordt verkregen met  $F(\theta) = 0.5 * \cos\theta$ . Voor een door de zon beschenen voorwerp dat zich loodrecht op de waarneemrichting bevindt, dus met  $\theta = \theta''$ , geldt dan met een ruime marge van  $\theta$ :

$$\text{ofwel} \quad \begin{aligned} C &= (8r - 1) * \exp(-b*X) && \text{als } \theta' = 0 && (\text{A10a}) \\ X &= \ln((8r - 1)/C) / b && && (\text{A10b}) \end{aligned}$$

Het 'zicht' is die waarde van X waarvoor het contrast gedaald is tot een nog juist waarneembaar drempelcontrast C. Op grond van vele experimenten neemt men voor de absolute waarde van het drempelcontrast  $|C| = 0.05$ , d.w.z. -0.05 voor relatief donkere en +0.05 voor relatief lichte voorwerpen. Een genormaliseerde waarde van het zicht is  $X_0$ , het 'meteorologisch dagzicht' (lichttreikwijdte), dat betrekking heeft op een donker voorwerp met lichte achtergrond, dus  $r=0$  en drempelcontrast -0.05. Uit (A10b) volgt dan

$$X_0 = 3.0/b \quad \text{m}. \quad (\text{A11})$$

Bij deze afleiding zijn nog wel enige kanttekeningen te maken (zie Gordon 1979, Horvath 1981). Een rol kan spelen, dat de verlichting langs het zichtpad niet homogeen is. Ook is de schijnbare afmeting van het object van invloed op het drempelcontrast. Bij zichten van minder dan 300 m, die voor het wegverkeer relevant zijn, zullen deze beide effecten in de praktijk nauwelijks een rol spelen. Een negatieve invloed is bij wegverkeer wel, dat de beschikbare waarneemtijd erg kort kan zijn en dat autoruiten vaak vervuild zijn. De gegeven afleiding gold voor loodrecht bekeken voorwerpen tot ca.  $\theta'' = \pi/3$ , omdat de luminantie van het voorwerp en de bijdrage van het strooilicht in gelijke mate met  $\theta''$  verminderen. Voor  $\theta'' > \pi/2$  staat de zon uiteraard achter het doel en wordt het voorwerp schijnbaar donker, hetgeen overeenkomt met  $r=0$ , zodat dan het meteorologisch dagzicht  $X_0$  relevant is.

Tenslotte kan (A11) met (A10b) gecombineerd worden tot

$$X/X_0 = 1 + (\ln(|8r - 1|)) / 3.0 \quad . \quad (\text{A12})$$

Dit verloop van  $X/X_0$  als functie van r is in Fig.A2 geïllustreerd.

In de verkeerspraktijk gaat het om voorwerpen met  $r < 0.5$ . Dat een voorwerp met  $r = 0.125$  zo slecht zichtbaar is, komt niet zozeer door de mist als wel door het verschijnsel camouflage. Zonder mist herkennen we een met de omgeving weinig contrasterend voorwerp wat beter door de vorm, door mogelijke details en door de kleur.

De reflectiefactor r moet uiteraard gedefinieerd worden voor de spectrale verdeling van het zichtbare licht. Overigens speelt in mist nabij de verste zichtafstand de kleur van het voorwerp geen rol, omdat dan zoveel 'wit' licht

wordt bijgemengd, dat kleuren onherkenbaar worden. Dit was al door Middleton berekend en werd door metingen (Wessels, 1965) bevestigd.

Een beperking in het voorgaande betrof de aanname van een loodrecht bekeken voorwerp, dus  $\theta' = 0$ . Voorts is met direct invallend zonlicht gerekend. Als de bijdrage van diffuus zonlicht toeneemt zijn de hoeken  $\theta$  en  $\theta''$  minder duidelijk gedefinieerd. Dan vermindert de relatieve bijdrage van de rechtstreekse straling, die in (A10) in afhankelijkheid van  $\cos\theta''$  is vertegenwoordigd. Bij geheel bewolkt weer kan dan ook  $\theta'' = 0$  worden genomen.

In het voorgaande is geen rekening met via de grond gereflecteerd zonlicht, dat de luminanties van een niet-zwart voorwerp en van de achtergrond kan beïnvloeden; soms zelfs in ongelijke mate. Dit speelt nauwelijks een rol als het meeste licht rechtstreeks van de zon komt, maar tijdens mist is het meestal betrokken en is de invallende straling diffuus. Bij bewolkte lucht hangt de luminantie van voorwerpen (zowel het waar te nemen voorwerp als objecten die de zicht-achtergrond bepalen) niet alleen af van de  $r$  van het voorwerp maar ook van de gemiddelde reflectiecoëfficiënt  $r'$  van het aardoppervlak in de omgeving. Middleton (p.107) vermeldt dat bij betrokken weer de luminantie  $L_h$  bij de horizon drie keer lager is dan in het zenit, en dat bij een verticaal voorwerp met reflectie  $r$  de luminantie (nog onverzwakt door mist) volgt uit

$$L_r/L_h = r/2*(1+r') + 2.0*r/3*(2/\pi+r'). \quad (A13)$$

Boven een 'zwart' aardoppervlak wijkt  $L_r/L_h$  maar weinig van  $r$  af, maar als  $r'$  toeneemt wordt een voorwerp schijnbaar 'witter' dan  $r$ . Het zicht  $X$  volgt dan analoog aan (A12) uit de reductie van het oorspronkelijke contrast ( $L_r/L_h - 1$ ) door de mist tot de drempelwaarde 0.05:

$$X/X_0 = 1 + (\ln(|L_r/L_h - 1|)) / 3. \quad (A14)$$

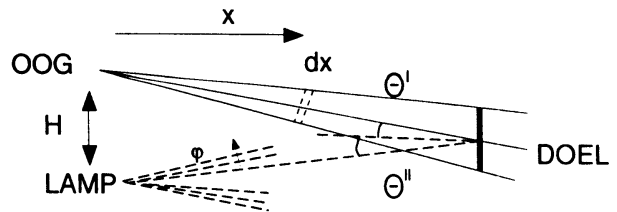
Enkele resultaten van deze formule zijn in Fig.A2 uitgezet, waarbij aangetekend kan worden dat in de praktijk  $r' < 0.3$  en  $r < 0.5$  zal zijn. Als voorbeeld noemen we een lichte auto bij bewolkt weer boven grond met  $r' = 0.3$  (bijvoorbeeld grasland). Dan volgt  $L_r/L_h = 0.64$ , dus zo'n voorwerp lijkt iets donkerder dan de (onbelemmerde!) horizon. Het zicht is dan  $0.66*X_0$ . Voor dezelfde auto in zonlicht volgde  $1.35*X_0$  (ook Fig.A2), maar dat komt bij mist minder vaak voor.

De hier gegeven theorie gaat er van uit, dat de mist zelf als achtergrond fungeert, hetgeen in de praktijk wil zeggen dat de achtergrond tot op 1.5 à 2 keer de zichtafstand vrij is van obstakels. In de verkeerssituatie kan het echter voorkomen, dat hieraan niet voldaan is, zodat van afstanden verder dan  $X$  minder strooilicht ontvangen wordt. De aard van de achtergrond speelt wel een rol;  $L_a$  zal bijvoorbeeld bij een zonbeschenen helder gekleurd geluidsscherm groter zijn dan bij een donkere bosrand. De vermindering van het contrast met  $\exp(-b*X)$  blijft gelden, zodat in deze situatie (A14) met  $L_a$  in plaats van  $L_h$  een goede benadering vormt (vergelijk Middleton, p.123). Voor deze situatie zijn moeilijk voorbeelden te geven omdat het contrast volgens (A1) bepalend is. Als zonder mist een voorwerp weinig contrasteert, zal in mist het 'zicht' klein worden.

## b. CONTRASTZICHT BIJ NACHT MET BEHULP VAN KOPLAMPEN.

De situatie voor deze berekening is in Fig.A3 geschetst. We gaan uit van de vereenvoudiging, dat het voorwerp zich op de as van de lichtbundel bevindt en dat de lamp zich op dezelfde afstand  $X$  van het doel bevindt als de waarnemer. De hoekafhankelijkheid van de lichtverdeling wordt benaderd met  $\exp(-(\phi/\phi_0)^2)$ . Voor auto's geldt ongeveer dat  $\phi_0 = 0.1$  à  $0.2$  rad. De afstand  $H$  van oog tot bundelas zal daarbij tussen (bijna) 0 en 3 m. kunnen bedragen.

Fig.A.3. Verticale doorsnede van de situatie bij het zien met behulp van een lichtbundel.



De belichting is in zoverre anders dan bij de zon, dat nu de verlichtingssterkte op afstand  $x$  wordt verzwakt door zowel bundeldivergentie als door tussenliggende mist. Vergeleken met (A2) moet dus door  $X^2$  worden gedeeld en moet de extinctie in mist worden verrekend. Langs de bundelas van een lamp met een lichtsterkte  $I_0$  lm/sr valt op het doel een lichtstroom

$$\Phi = I_0 \cos \theta'' \exp(-b \cdot X) \cdot \Omega / \cos \theta' \quad \text{lm.} \quad (\text{A15})$$

De bijdrage van het doel tot  $L_r$  wordt dan (vergelijk A5)

$$L_r' = I_0 \cos \theta'' \exp(-2 \cdot b \cdot X) / X^2 \cdot r / \pi \quad \text{lm/m}^2/\text{sr}, \quad (\text{A16})$$

waarbij de factor 2 in de exponent volgt uit de omstandigheid dat het licht zowel tussen lamp en doel als tussen doel en waarnemer wordt verzwakt. Ook de berekening van het strooilicht verloopt analoog aan de vorige paragraaf. Voor de bijdrage van een schijfje  $dx$  vinden we analoog aan (A6) t/m (A8)

$$dL_a = I_0 \cos \theta'' \exp(-2bx) \exp(-(\phi/\phi_0)^2) \cdot s \cdot dx / x^2 \cdot F(\theta) / (4\pi) \quad \text{lm/m}^2/\text{sr}, \quad (\text{A17})$$

zodat vooral de omgeving van het doel aan het strooilicht bijdraagt, tenzij  $\phi=0$ . Dit betekent voorts dat eventuele inhomogeniteiten in mist een sterkere rol spelen dan bij daglicht. Vergelijking (A17) moet numeriek geïntegreerd worden vanwege de term  $x^2$  in de integrand. Omdat  $H \ll X$  kunnen we  $\theta' + \theta'' = 0$  nemen, zodat bij ongeveer loodrecht bekeken voorwerpen  $\theta'' = 0$  en  $F(\theta) = 0.5$  volstaat. Bovendien schatten we  $\phi = H/x - H/X$ .

Bij het uitvoeren der integratie bleken de uitkomsten te schalen met de verhouding  $H/\phi_0$ . Dit was ook al door Chesterman en Stiles opgemerkt (loc.cit., p.91). Bij de huidige berekeningen bleek bij voorwerpen met positief contrast, dus  $r > \text{ca. } 0.1$ , dat de resultaten goed schaalden met een dimensieloze configuratieparameter  $H/(X_0 \cdot \phi_0)$ . Typische uitkomsten worden getoond in Fig.A4, waarbij het zicht vergeleken is met het meteorologisch dagzicht  $X_0 = 3.0/b$ . Voor voorwerpen met  $r=0$  komen de resultaten in de buurt van die voor  $r=0.1$ , terwijl rond  $r=0.01$  zeer lage zichten mogelijk zijn door het eerder genoemde effect van camouflage.

Als praktijkvoorbeeld kunnen we een automobilist op  $H=1$  m van de bundelas plaatsen en  $\phi_0=0.1$  rad nemen. Bij een dagzicht van 200 m wordt de configuratieparameter  $H/(X_0 \cdot \theta_0) = 0.05$ , zodat we bij  $r=1$  een zicht van  $0.5 \cdot 200 = 100$  m kunnen aflezen. Bij grotere  $H$  en smallere lichtbundels verbetert dus het zicht; dit wijst op een gunstig effect van laag geplaatste 'mistlampen'. In het genoemde voorbeeld volgt bij wijzigen van  $X_0$  in 100 m een grotere waarde van de configuratieparameter en een zicht van 62 m. Bij gevaarlijke mist wordt dit effect dus relatief gunstiger.

Overigens moet worden bedacht, dat voorwerpen met  $r=1$  niet altijd beschikbaar zijn. Met name op een natte weg zijn de witte strepen maar moeilijk zichtbaar. Bewegwijzering met behulp van materialen met spiegelreflectie is daarentegen beter te zien dan uit deze theorie volgt.

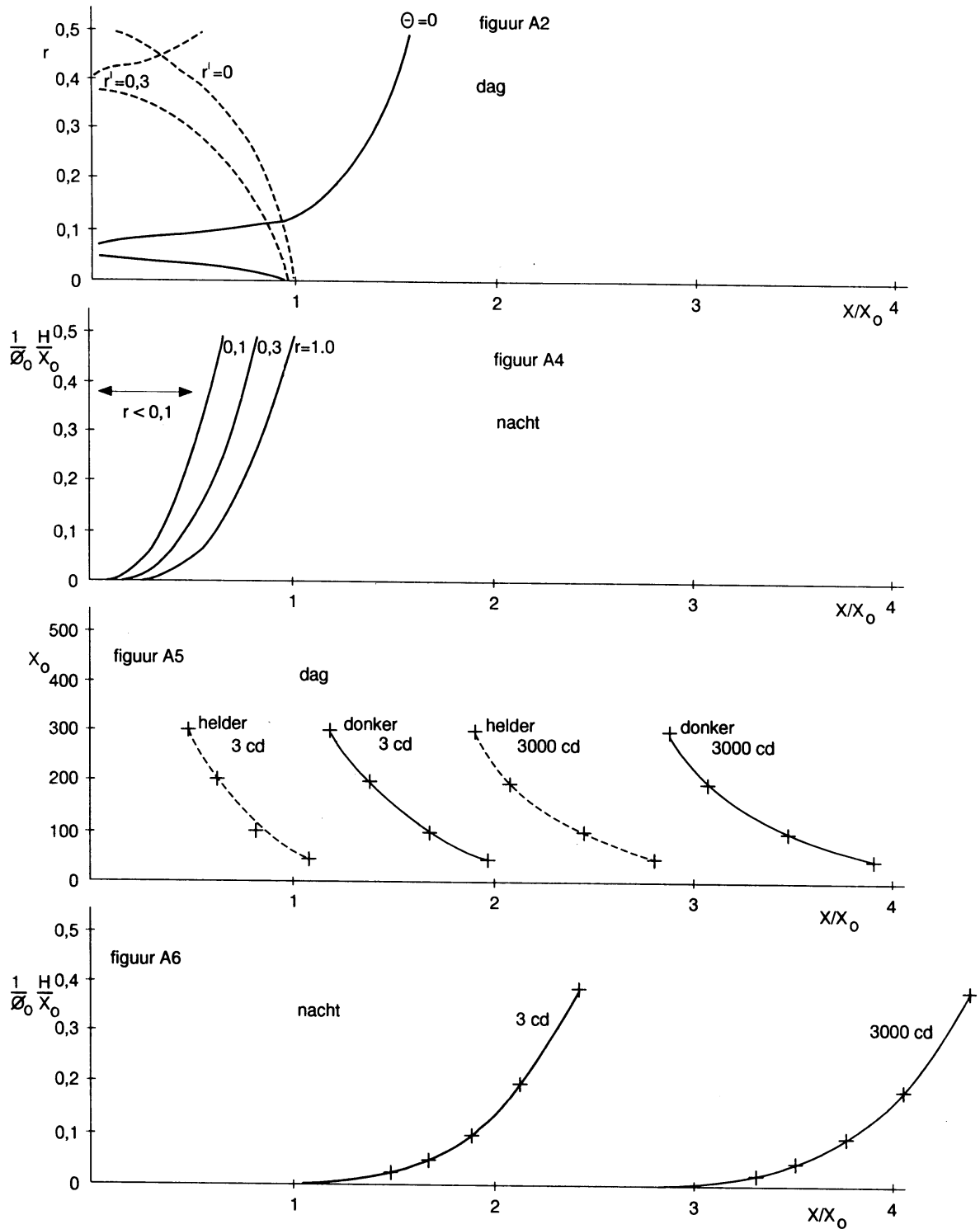


Fig.A.2. Zichtberekening van voorwerpen bij daglicht afhankelijk van de reflectiefactor  $r$  van het voorwerp. De kromme  $\Theta=0$  geeft de situatie met zonbeschenen voorwerpen, de andere krommen beschrijven de situatie bij bewolkte lucht voor twee waarden van de reflectiefactor  $r'$  van het aardoppervlak.

Fig.A.4. Relatieve vermindering van het contrastzicht bij verlichting met koplampen.

Fig.A.5. De zichtafstand van typische voor- en achterlichten op een donkere, resp. heldere dag (10 resp. 1000  $\text{cd}/\text{m}^2$ ).

Fig.A.6. De zichtafstand van typische voor- en achterlichten 's nachts in de lichtbundel van de auto van de waarnemer, rekening houdend met een configuratieparameter  $H/\phi_0/X_0$ .

### c. HET WAARNEMEN VAN LICHTEN, OVERDAG EN 'S NACHTS.

In het voorgaande ging het uitsluitend om relatieve luminantieverschillen, zodat de waarden van  $E_0$  resp.  $I_0$  geen rol speelden, zolang ze groot genoeg waren om de waarneming van contrasten mogelijk te maken. Bij het zien van lampen speelt de drempelgevoeligheid van het oog een rol. Die hangt vooral af van de achtergrondhelderheid  $L_a$ . In het vervolg is gebruik gemaakt van een numerieke afschatting uit een door Middleton (p.97) gepresenteerde grafiek van de drempelilluminantie

$$E_d(L_a) = 10^{-7} * L_a^{0.8} \quad \text{lm/m}^2. \quad (A18)$$

De zichtlengte volgt door gelijkstellen van deze drempel aan de door mist en afstand verzwakte illuminantie ten gevolge van het waargenomen licht met lichtsterkte  $I_1$  lm/sr, dus:

$$E_d(L_a) = I_1 * \exp(-b*x) / x^2 \quad (A19)$$

Ook als  $E_d$  constant was geweest, zou deze vergelijking door iteratie moeten worden opgelost. In het onderhavige geval kan  $L_a$  gevonden worden door integratie van (A8) resp. (A17) tussen 0 en  $\infty$ . Omdat (A19) berust op een achtergrondilluminantie komend uit een vrij groot gezichtsveld, is het denkbaar dat de terugstrooiing van koplampen 's nachts een wat lagere  $E_d$  toelaat dan volgens (A18). Dit verschil wordt hier verwaarloosd.

Het presenteren van typische uitkomsten is in dit geval moeilijker dan in de vorige paragrafen vanwege de grote variaties in verlichtingssterkte  $E_0$  overdag. Ook hebben we in het verkeer te maken met zowel koplampen als met de wel 1000 keer lichtzwakkere achterlichten.

Bij de voorbeelden wordt voor koplampen een intensiteit van 3000 cd ( $\text{cd} = \text{lm/sr}$ ) en voor achterlichten 3 cd aangenomen. Bij de berekening is aangenomen dat de koplampen van het naderende voertuig overeenstemmen met die van de waarnemer. In Fig.A5 worden enige voorbeelden voor het lampenzicht overdag gegeven. Het meest opvallend is de grote spreiding. Ook is interessant dat men op heldere dagen met mist de contouren van het voertuig (zie Fig.A2) vaak beter waarneemt dan achterlichten van 3 cd.

Bij waarnemingen gedurende de nacht (zonder de beschouwde voertuigverlichting is  $L_a$  dan bijvoorbeeld  $10^{-4} \text{ lm/m}^2/\text{sr}$ ) heeft de parameter  $H/(\phi_0 * X_0)$  weer een belangrijke invloed op de achtergrondhelderheid en dus op het lampenzicht. Dit blijkt uit de voorbeelden van Fig.A6. Overigens wijken de waarden maar weinig af van die voor een donkere dag in Fig.A5.

### d. CONCLUSIES.

Voor de meeste zichtaspecten bij het wegverkeer kunnen berekeningen gemaakt worden. De resultaten blijken sterk af te hangen van het object en eventuele natuurlijke of kunstmatige verlichting.

Vergeleken met het meteorologisch dagzicht voor een goed contrasterend onverlicht voorwerp kan het zicht 's nachts variëren tussen ca. 50% voor (niet spiegel-reflecterende) wegmarkering tot 170 resp. 340% voor typische achterlichten resp. koplampen.

Bij helder daglicht is de spreiding minder: 50%-150% voor een voertuig afhankelijkheid van de helderheid van de autokleur, 80% voor een achterlicht en 250% voor een koplamp.

Zowel 's nachts als overdag zit het meteorologisch dagzicht (100%) dus binnen het bereik van de mogelijkheden. Gebruik van dit meteorologisch dagzicht als maatgevend voor het wegverkeer kan soms tot (onveilige) overschatting leiden, maar is meestal verantwoord. Gezien de matige zichtbaarheid van de wegmarkering is het ongewenst om een apart gunstiger nachtzicht te definiëren.

Bij de voorlichting aan weggebruikers verdient het aanbeveling speciale aandacht te schenken aan de grote spreiding (een factor 7), die optreedt tussen de nachtelijke zichtbaarheid van relevante objecten.

#### LITERATUUR BIJLAGE A.

- W.D.Chesterman, W.S.Stiles, 1948. The visibility of targets in a naval searchlight beam. Illum.Eng.Soc., London, presented 1947
- J.I.Gordon, 1979. Daytime visibility, a conceptual review. Air Force Geophysics Laboratory, Report AFGL-TR-79-0257, Hanscom AFB.
- W.E.Knowles Middleton, 1952. Vision through the atmosphere. Toronto, 250 pp.
- H.R.A.Wessels, 1969. Onderzoek naar de zichtbaarheid van diverse kleuren in mist. Verkeerstechniek, 20, 613-616.
- H.Horvath, 1981. Atmospheric visibility. Atmospheric Environment, 15, 1785-1796.

## Bijlage B

### VERKLARENDE WOORDENLIJST

Gebruikte begrippen op het gebied van meteorologie en optica, waarbij tussen haakjes is aangegeven de paragraaf (of bijlage A) van eerste vermelding.

- Mist (1) Zeer kleine waterdruppeltjes die in de lucht zweven en het zicht aan het aardoppervlak beperken. Bij 'dichte mist' (3.1) bedraagt het zicht minder dan 200m.
- Stralingsmist/ mistbanken (2.1) Mist met grootste dichtheid bij de grond. De bovenlucht (zon, maan, blauwe lucht, hogere wolken) blijft voor een waarnemer op de grond zichtbaar.
- Advectiemist/ mistvelden (2.1) Mist waar men opwaarts vanaf de grond niet meer door kan kijken. Het zicht neemt naar boven meestal verder af. Dergelijke mist wordt doorgaans merkbaar door de wind verplaatst.
- Dauw (3.1) Afzetting op voorwerpen van waterdruppels, ontstaan door rechtstreekse condensatie van waterdamp uit de omringende lucht.
- Stratuswolken (2.1) Grijs egale wolkenlaag, waarvan de onderzijde zich hoogstens op enkele honderden meters van het aardoppervlak bevindt.
- Stratocumuluswolken (2.1) Als stratus, maar met minder egale aanblik; er is duidelijk een schollenstructuur zichtbaar. Deze wolken bevinden zich doorgaans in de onderste kilometer van de atmosfeer.
- Dichtheidsstroming (2.2). Koude lucht is zwaarder dan warme lucht. Lucht, die afgekoeld is door bijvoorbeeld contact met koude grond, zal dus geneigd zijn naar lagere terreingedeelten te stromen.
- Stralingsafkoeling van de grond (2.1). Alle voorwerpen verliezen warmte door uitstraling, maar warme voorwerpen het meest. Als dus een voorwerp zich in een koudere omgeving bevindt verliest het meer warmte dan het terug ontvangt: het koelt af door uitstraling. Nachtelijke uitstraling werkt in heldere nachten: het aardoppervlak is immers warmer dan de atmosfeer en het heelal buiten de atmosfeer en koelt dus af. Hetzelfde mechanisme werkt voor de druppeltjes van een mistlaag, met name bij de top van advectiemist.
- Zicht (1) Grootste afstand waarop overdag een groot zwart voorwerp tegen de hemel aan de horizon nog kan worden herkend. Bij het 'meteorologisch (dag)zicht' wordt dit gekoppeld aan een helderheidscontrast (A) van 5%, waarbij de meeste mensen nog juist een voorwerp kunnen herkennen.
- Lampenzicht (A) Grootste afstand waarop een licht bij bepaalde omstandigheden nog kan worden herkend. Bij het 'meteorologisch nachtzicht' worden lampen van 25 cd bedoeld. Bij het 'baanzicht' (4.1; =runway visual range, 4.2) in het luchtverkeer gaat het om de verlichtingssterkte in de richting van de landende piloot van de werkelijk opgestelde landingslichten.
- Extinctie (A) De uitdoving van een lichtbundel over een zekere afstand. De 'extinctiecoëfficiënt' wordt als de relatieve uitdoving per meter afstand gedefinieerd. Het mechanisme waarmee in licht uit de bundel verdwijnt omvat reflectie en richtingverandering (= 'verstrooiing', 3.1) aan druppeltjes en in mindere mate absorptie van licht in druppeltjes.
- Transmissometer (4.3) Instrument waarmee de uitdoving van een lichtbundel over een zeker traject (tussen een lichtbron en een detector) gemeten wordt, en waarmee dus de extinctiecoëfficiënt kan worden bepaald.
- Lichtstroom (A) In de vorm van zichtbaar licht ontvangen of uitgezonden stralingsvermogen. De eenheid is lm=lumen, terwijl het

- totale stralingsvermogen in  $W$ =Watt wordt uitgedrukt.
- Verlichtingssterkte (A) op een oppervlak. De lichtstroom gedeeld door de grootte van dat oppervlak. De eenheid is  $lm/m^2$ .
- Lichtintensiteit (A) Lichtstroom die binnen een bepaalde ruimtehoek wordt uitgezonden. Deze grootte is van belang omdat de uitgezonden of ontvangen lichtstroom vaak van de richting afhangt. Eenheid  $lm/sr$ . Die ruimtehoek is bijvoorbeeld een kegel vanaf de lichtbron; de eenheid van ruimtehoek is  $sr$ =steradiaal, waarbij 1  $sr$  betrekking heeft op een oppervlak van 1  $m^2$  op 1 m afstand.
- Luminantie (A) Lichtintensiteit per oppervlakte-eenheid. Het doet er daarbij niet toe of dat oppervlak deel uitmaakt van de bron of van de ontvanger en of dat oppervlak materieel is dan wel ergens in de ruimte gedefinieerd wordt. De eenheid is  $lm/sr/m^2$ .
- Directe resp. diffuse verlichting (A) Licht dat overwegend wel resp. niet uit de richting van een bepaalde lichtbron komt. Licht van een schijnwerper is direct, van de bewolkte hemel diffuus.
- Reflectie (A) Terugkaatsing van licht door een voorwerp. Doorgaans is reflectie diffuus, d.w.z. het gereflecteerde licht heeft geen voorkeursrichting, ook al had het opvallende licht dat wel. Is er wel een voorkeursrichting dan spreekt men van spiegelreflectie.
- Reflectiefactor (A) Verhouding tussen teruggekaatste en ontvangen lichtstroom.