

# het voorspellen van trekroutes van sprinkhanenzwermen met hulp van trajectoriënmodellen

een oriëntatie-studie

J.H. de Boer\* en J. Reiff

\*stagiaire landbouwuniversiteit Wageningen  
vakgroep Entomologie

technische rapporten TR-99

## ABSTRACT

The purpose of this study was to investigate the possibilities of Desert Locust swarm movement prediction with trajectories. The trajectories were calculated with a computer model, which was developed at K.N.M.I. (Royal Netherlands Meteorological Institute, De Bilt, The Netherlands). This model calculates trajectories with the use of analysed or forecast wind fields from the E.C.M.W.F.-model (European Centre for Medium range Weather Forecasting in Reading, U.K.). All trajectories that were used for swarm movement predictions, were calculated from wind fields within the boundary layer, from ground-level up to 850 mbar.

From this research the following conclusions were drawn:

- (1) With the use of this trajectory model it is possible to make adequate backtracks of Desert Locust swarms to locate their origin, or to make a forecast up to 2 or 3 days ahead to estimate their destination.  
The trajectories are to be used as additional information next to other (meteorological) information that influences swarm behaviour, such as temperature, cloud cover and vegetation.
- (2) In most cases it will be advisable to adapt the trajectory model in such a way that the trajectories will give a better simulation of the behaviour of Desert Locust swarms. One adaptation of the trajectory model, which was tested in this research: A trajectory was calculated only during the daytime, while during the nighttime, when swarms usually have settled down, the swarm displacement was set equal to zero.

## SAMENVATTING

Dit onderzoek heeft als doel na te gaan of sprinkhanenzwermen getraceerd kunnen worden met behulp van trajectoriën. De trajectoriën worden berekend door een computermodel, dat op het K.N.M.I. ontwikkeld werd. Dit trajectoriën model gebruikt voor de berekeningen geanalyseerde of voorspelde windvelden van het ECMWF model (European Centre for Medium Range Weather Forecast te Reading, U.K.). Het trajectoriën model gebruikte voor zwerm tracersingen alleen windvelden binnen de grenslaag, vanaf het grondniveau tot en met het 850 mbar niveau.

De volgende conclusies zijn uit dit onderzoek naar voren gekomen:

- (1) Het is mogelijk sprinkhanenzwermen te traceren met behulp van dit trajectoriën model, zowel om de oorsprong van de zwerm te achterhalen, als om de bestemming van de zwerm te voorspellen tot 2 à 3 dagen vooruit. De trajectoriën dienen als aanvullende informatie naast overige (meteorologische) informatie, die het zwermgedrag beïnvloeden, zoals temperatuur, bewolking, vegetatie en dergelijke.
- (2) In een aantal gevallen is het wenselijk om het trajectoriën model aan te passen, zodat de trajectoriën het gedrag van sprinkhanenzwermen beter benaderen. Een voor dit onderzoek geteste aanpassing van het trajectoriën model: Eén trajectorie werd alleen overdag berekend, terwijl 's nachts, wanneer de sprinkhanen meestal neergestreken zijn, de verplaatsing van de zwerm op nul werd gesteld.

## INHOUDSOPGAVE

	pagina
Abstract	IV
Samenvatting	V
Inhoudsopgave	VI
Tabellen overzicht	VII
Figuren overzicht	VIII
 Hoofdstuk	
I	1
INLEIDING	
II	4
OMSTANDIGHEDEN DIE ZWERMGEDRAG BEINVLOEDEN	
2.1 Wanneer gaan sprinkhanen zwermen	4
2.2 Invloed van meteorologische parameters (T, RV, en bewolgingsgraad) op het zwermgedrag	5
2.3 Invloed van wind op het zwermgedrag	7
2.4 Invloed van verticale luchtbewegingen op het zwermgedrag	9
2.5 Samenvatting: Zwermvorming onderdrukkend	11
2.6 Samenvatting: Zwermvorming stimulerend	11
III	12
HOE WORDEN SPRINKHANENPLAGEN VOORSPELD	
3.1 Inleiding	12
3.2 Het voorspellen van gregarisatie	12
3.3 Het voorspellen van typisch zwermgedrag	13
3.4 Het voorspellen van de trekroute van zwermen	13
IV	15
RESULTATEN EN DISKUSSIE	
4.1 Inleiding	15
4.2 Tracering van zwermen over de Rode Zee in juli 1986	15
4.3 Bepaling van de oorsprong van een "upsurge"	17
4.4 Discussie	18
V	21
CONCLUSIES	
 Appendix	
A	23
HET ECMWF MODEL	
B	24
HET TRAJECTORIEN MODEL	
Tabellen	26
Figuren	30
Referenties	50

## TABELLEN OVERZICHT

	pagina
1.1 Levenscyclus van de woestijnsprinkhaan in een schematische weergave.	26
1.2 Weergave van de processen, die leiden tot een "upsurge" van sprinkhanen, in een diagram.	27
1.3 De verschillen in uiterlijk, morfologie, en gedrag tussen de solitaire en de gregaire fase van de woestijnsprinkhaan.	28
1.4 Algemeen overzicht van het dagelijkse gedrag van een nog niet geslachtsrijpe sprinkhanenzwerm.	29

## FIGUREN OVERZICHT

	pagina
1.1 Recessie- en invasiegebied van de woestijnsprinkhaan.	30
2.1 Temperatuurbalans van een vliegende sprinkhaan.	30
2.2 Schematische variatie van de temperatuur met de hoogte in onbewolkt subtropisch weer voor dag en nacht.	31
2.3 Gemiddelde profielen van lucht- en bodemtemperatuur dicht bij het grondoppervlak.	31
2.4 Schematische dagelijkse variaties in lucht- en bodemtemperatuur bij onbewolkt weer.	31
2.5 Vluchtactiviteit in relatie met luchttemperatuur.	32
2.6 Temperatuur en luchtvochtigheid combinaties in relatie met vluchtactiviteit van zwermen.	32
2.7 Verplaatsingssnelheid en -richting van individuele zwermen t.o.v de wind.	33
2.8 Verplaatsingssnelheid van individuele zwermen t.o.v. de windsnelheid.	33
2.9 Oriëntaties van groepjes sprinkhanen aan de flanken en in het centrum van een zwerm.	34
2.10 Schematische distributie van sprinkhanen in een laagvliegende zwerm.	34
2.11 Oriëntaties van individuele sprinkhanen in een passerende zwerm van onderaf gezien.	35
2.12 Relatie tussen zwerm snelheid, windsnelheid en maximum hoogte van de vlucht (naar Draper).	35
2.13 Gegeneralizeerde luchttemperatuur-profielen in de grenslaag op verschillende tijdstippen van de dag.	36
2.14 Schematische weergave van de structuur van de grenslaag met daarin de aangroei van de menglaag.	36
2.15 Het windsnelheids-profiel nabij het oppervlak onder invloed van (a) terreinruwheid en (b) stabiliteit.	37
2.16 (a) Schematische weergave van de ontwikkeling van thermals.(b)Schematisch overzicht van de onstabiele grenslaag met convectieve pluimen ("thermals").	38

2.17	De hoogte van een cumuliforme zwerm in relatie tot de luchttemperatuur.	38
2.18	Schematische weergave van laagvliegende (stratiforme) en hoogvliegende (cumuliforme) zwermen.	39
2.19	De gemiddelde maandelijkse variatie in de ligging van de Inter Tropische Convergence Zone boven Afrika.	40
4.1	Achterwaartse trajectorie vanaf 1648N/4048E (30/06/'86, 12.00 GMT) berekend op geanalyseerde windvelden (1000 mbar niveau).	41
4.2	Voorwaartse trajectorie vanaf 1648N/4048E (30/06/'86, 12.00 GMT) berekend op geanalyseerde windvelden (1000 mbar niveau).	42
4.3	Achterwaartse trajectoriën vanaf 1225N/4529E (01/07/'86, 10.00 GMT) berekend op geanalyseerde windvelden (1000 mbar en 925 mbar niveaus).	43
4.4	Voorwaartse trajectoriën vanaf 1225N/4529E (01/07/'86, 10.00 GMT) berekend op geanalyseerde windvelden (1000 mbar en 925 mbar niveaus).	44
4.5	Voorwaartse trajectoriën vanaf 1648N/4048E (30/06/'86, 12.00 GMT) berekend op voorspelde windvelden (1000 mbar niveau).	45
4.6	Voorwaartse trajectoriën vanaf 1225N/4529E (01/07/'86, 10.00 GMT) berekend op geanalyseerde en voorspelde windvelden (1000 mbar niveaus).	46
4.7	Achterwaartse trajectoriën vanaf 2535N/6636E (29/07/'83, 14.00 GMT) berekend op geanalyseerde windvelden (1000 mbar en 925 mbar niveaus).	47
4.8	Achterwaartse trajectoriën vanaf 2535N/6636E (29/07/'83, 14.00 GMT) berekend op geanalyseerde windvelden (925 mbar niveau, alleen overdag).	48
A.1	Voorspellingstermijn in dagen waarbij de vector wind op 850 mbar een correlatie van 0.7 bereikt (ECMWF).	49





## HOOFDSTUK 1

### Inleiding

De meteorologie en de klimatologie zijn de laatste jaren belangrijker geworden in de strijd tegen insecten, die schadelijk zijn in de landbouw. Dit geldt vooral voor de ontwikkeling en de verspreiding van deze plaaginsecten.

Veel insectensoorten kunnen zich, dankzij hun enorme reproductievermogen in snelle tijd tot een plaatselijke plaag ontwikkelen. Bij enkele soorten vormen deze plaaginsecten zwermen, die uit hun oorspronkelijke habitat migreren, en honderden kilometers verder nog zware oogstverliezen kunnen veroorzaken. Zwermen, sommige van enorme omvang, kunnen zeer grote afstanden afleggen onder invloed van de luchtstromingen in de grenslaag van de atmosfeer.

Explosieve reproductie gevolgd door migratie is in het algemeen sterk gekoppeld aan meteorologische omstandigheden. Voorspellingsschema's, die gebruik maken van uitgebreide meteorologische informatie, zijn zeer waardevol gebleken bij de uitvoering van bestrijdingscampagnes van dergelijke plagen.

Het bekendste voorbeeld is waarschijnlijk de internationale bestrijdingscampagnes tegen de woestijnsprinkhaan. Deze bestrijdingscampagne is anno 1986 en 1987 weer veelvuldig in het nieuws geweest, maar de basis werd gelegd vlak na de Tweede Wereld Oorlog. In het beginstadium van deze campagne werd een gedetailleerde studie, voor het kritieke (sprinkhanen) jaar 1954-1955, uitgevoerd. Het principiële doel van deze studie was het vinden van significante relaties tussen aspecten van de synoptische meteorologie en de vermeerdering en verspreiding van de sprinkhanen (Rainey '63).

Neerslag bleek essentiël te zijn voor de vermeerdering van de woestijnsprinkhaan. Ten eerste is bodemvocht noodzakelijk voor de ontwikkeling van de eieren. Ten tweede dient de groene vegetatie, die zich ten gevolge van de neerslag ontwikkelt, als voedsel voor de enkele weken later uitkomende vleugellose nymphen, ook wel "hoppers" genoemd.

De woestijnsprinkhaan komt in zijn natuurlijke habitat of recessiegebied (zie fig 1.1) voor in twee kenmerkende 'fases', de solitaire fase en de gregaire fase. Het onderscheid tussen deze twee fases wordt duidelijk gemarkeerd door verschillen in gedrag, in uiterlijk (kleur en vorm), en in metabolisme. In de solitaire fase, waarbij de dichtheid van de sprinkhanen laag is, vormt de woestijnsprinkhaan geen bedreiging. De overgang van solitaire fase naar gregaire fase gebeurt in het nymphale stadium gedurende gunstige ecologische omstandigheden ten gevolge van een aantal opeenvolgende periodes van wijdverspreide en hevige regens.

Onder die omstandigheden kan gedurende enkele generaties een succesvolle vermeerdering plaatsvinden. Hierdoor neemt het aantal en de dichtheid van de sprinkhanen explosief toe. Grote dichtheidsvermeerdering induceert de ontwikkeling van groepsgedrag (gregarisatie). De verandering van solitaire fase naar gregaire fase kan een tot enkele generaties duren. Eén generatie komt in 2 tot 6 maanden (afhankelijk van de temperatuur) tot ontwikkeling. De gregaire hoppers trekken in "marching bands" op zoek naar voedsel. Na de voltooiing van hun ontwikkeling gaan de volwassen sprinkhanen zwermen. Deze zwermen kunnen het invasiegebied intrekken (fig 1.1), waar zich de meeste landbouwgebieden bevinden.

Een belangrijke ontdekking tijdens de eerder genoemde studie was, dat windvelden onderin de grenslaag de bepalende factor waren voor de grootschalige trekroutes en verspreiding van zwermen. De zwermen bleken zich in het algemeen te verplaatsen richting zones met convergentie onderin de grenslaag (een 'lage druk' gebied). Deze 'lage druk' gebieden geven tevens een vergrote kans op neerslag.

Zo'n type verband, waarbij in eerste instantie ongericht gedrag (nl. het gaan zwermen) automatisch leidt tot het bewegen naar gebieden met de beste kans op overleven (in dit geval op gebieden met neerslag), komt in de natuur veel vaker voor. Neerslag maakt in het woestijngebied een zeer snelle ontwikkeling van groene eenjarige planten mogelijk, die als voedsel voor de zwerm kan dienen en maakt succesvol broeden mogelijk. Tegen de tijd dat de hoppers enkele weken later uitkomen is er weer nieuwe vegetatie ontwikkeld, omdat de uitwerpselen van de zwerm een uitstekende bemesting zijn op de nog vochtige woestijngrond.

Het resultaat van het onderzoek aan deze koppeling van meteorologie en levenscyclus van de woestijnsprinkhaan heeft geleid tot de oprichting van een "Anti Locust control organisation". Als onderdeel hiervan, gaven meteorologen richtlijnen over de uur tot uur-, dag tot dag-, en seizoensverplaatsingen van zwermen. Bestrijding van de zwermen met besproeiingen vanuit vliegtuigen konden zo efficiënter worden uitgevoerd.

De hierop volgende studies gaven een beter inzicht in de invloed van het klimaat op de periodieke "upsurges" en "recessies", die kenmerkend zijn voor een woestijnsprinkhanenplaag (Pedgley '79). Periodes met wijdverspreide en hevige regens in gewoonlijk droge gebieden geven de aanzet tot een "upsurge". Sommige windpatronen kunnen verspreide groepen en zwermen bij elkaar drijven tot zwermen van enorme omvang (meer dan een miljard individuen). In dat geval ontstaan er uit meerdere "upsurges" een plaag met een desastreuze omvang (zie tabel 1.2). Andere windpatronen houden de verspreide groepen en zwermen juist gescheiden of drijven ze uiteen, zodat de dreiging van een plaag sterk afneemt.

Een aanéénsluitende wijdverbreide periode van droogte geeft aanleiding tot sterke uitdunning van de populaties van sprinkhanen, die zich terugtrekken in het recessiegebied. De volgende generatie sprinkhanen verschijnen weer in solitaire fase. Men noemt deze toestand "recessie" (Bourke '86).

De volgende stap vooruit in de contrôle van de sprinkhanen plagen wordt het gebruik van meteorologische satellieten voor neerslag schattingen, en voor regen- en stofstormen. In de nabije toekomst komt daarbij het automatisch surveilleren van broedplaatsen, op grond van een vegetatie-index, waarvoor de NOAA-satelliet boven dit gebied gegevens levert.

Omdat zwermen van de woestijnsprinkhaan zich met de wind mee verplaatsen, is het in principe mogelijk om meteorologische modellen, die luchtstromingen simuleren, te gebruiken om de trekroutes te analyseren of te voorspellen. Dit is het onderwerp van deze studie. Het trajectoriën model, dat voor dit onderzoek gebruikt werd, bepaalt op verschillende hoogtes in de atmosfeer (in dit geval in de grenslaag) de baan van de luchtdeeltjes. Eenvoudig gezegd kan dit model bijvoorbeeld berekenen, waar een losgelaten ballon enkele dagen later zal aankomen, en welke baan de ballon onderweg afgelegd heeft. Het model kan ook gebruikt worden om windpatronen in het hele recessiegebied te voorspellen. Dit trajectoriën model werd ontwikkeld op het K.N.M.I. in De Bilt.

**Het doel van deze studie is te onderzoeken of het trajectoriën model geschikt is voor het op korte termijn voorspellen van de trekroutes van sprinkhanenzwermen.**

Mocht dit zo zijn, dan valt er in de toekomst aan het volgende 'waarschuwingssysteem' te denken:

- (1) Met behulp van Meteosat gegevens (voor neerslag), NOAA gegevens (voor de vegetatie-index) wordt in de diverse recessiegebieden van de woestijnsprinkhaan bijgehouden of de omstandigheden gunstig zijn voor zwermvorming.
- (2) Zijn de omstandigheden gunstig dan kunnen er maatregelen genomen worden ter bestrijding, en kunnen er tegelijkertijd trajectoriën berekend worden om een schatting te krijgen, waar deze zwermen naar toe zouden kunnen gaan, mocht de bestrijding te laat plaatsvinden of geen succes hebben.

## HOOFDSTUK 2

### OMSTANDIGHEDEN DIE ZWERMGEDRAG BEINVLOEDEN

#### 2.1 Wanneer gaan sprinkhanen zwermen?

Jonge volwassen sprinkhanen kunnen pas lange afstanden vliegen na de zogenaamde "fledgling" periode van ca. 10 dagen. Tijdens deze periode ontwikkelen de vliegspieren van gregaire sprinkhanen zich volledig. Alléén de volwassen sprinkhanen kunnen vliegen.

Er zijn 5 indelingen te maken in het vlieggedrag van sprinkhanen (Casimir en Bament '74):

1. Geen vluchtactiviteit in een gebied gedurende een bepaalde dag cq. nacht ("roosting").
2. Beperkte lokale vluchten gedurende korte periodes van de dag cq. nacht ("fledging").
3. Langere vluchten gedurende enkele uren van de dag cq. nacht.
4. Wijdverspreide vluchtactiviteiten, die niet in een significante verplaatsing resulteren (overdag en 's nachts).
5. Massale vlucht (zwerm), die migratie uit een gebied tot gevolg heeft (meestal overdag).

Categorieen 2, 3, en 4 behoren bij een typisch vluchtgedrag, dat gecombineerd wordt met parings- en ovipositiegedrag van zowel solitaire als gregaire sprinkhanen. Categorie 3 kan ook het migratie gedrag van geslachtsrijpe solitaire wijfjes naar nieuwe recessiegebieden inhouden. Er wordt dan alléén 's nachts bij lage windsnelheden gevlogen in kleine groepen. De vlieghoogte is meestal gering en de afgelegde afstanden liggen in dat geval rond de tientallen kilometers per nacht. Categorie 5 komt alleen voor bij gregaire sprinkhanen.

In het verdere verloop van dit hoofdstuk wordt alleen categorie 5 behandeld.

Het zwermgedrag van geslachtsrijpe zwermen en nog niet geslachtsrijpe zwermen is verschillend. De nog niet geslachtsrijpe sprinkhanen zwermen eerder en vaker dan de geslachtsrijpe sprinkhanen. Ook is de gemiddelde vliegduur langer en daarom de afgelegde afstand groter. Wanneer de gregaire sprinkhanen vlak na de "flegling" periode gaan zwermen, zijn er minder beperkingen door meteorologische omstandigheden dan bij zwermen van reeds geslachtsrijpe sprinkhanen.

Deze meteorologische omstandigheden worden gekenmerkt door combinaties van parameters zoals temperatuur, luchtvochtigheid, windsnelheid, bewolking, en neerslag. Maar ook buoyancy, grootschalige convergentie, en storingen in easterly waves hebben invloed op zwermen. Deze worden afzonderlijk behandeld in de volgende paragrafen. De meteorologische omstandigheden, die zwermvorming belemmeren of bevorderen, zijn samengevat in paragraaf 2.5 resp. 2.6.

Worden jonge sprinkhanen belemmerd in langdurige vluchten door ongunstige weersomstandigheden, dan worden deze minder actief naar mate ze ouder worden. Alleen zéér markante veranderingen in het weertype kunnen deze impasse nog doorbreken. Een voorbeeld van een markante weersomslag is een storing in een "easterly wave" gepaard gaand met onweer (een veel voorkomende veroorzaking van neerslag in de subtropen), of een front-passage (bijv. Inter Tropische Front, en bij passage van de Inter Tropische Convergentie Zone). Extreem droog weer gecombineerd met voedselschaarste, gedurende meer dan 3 weken geeft een dermate grote stress bij fledglings, dat deze hierna niet meer in staat zijn tot langdurige vluchten of geslachtsrijping (Casimir en Bament '74).

Een omslag in het weertype, waarbij de temperatuur een paar graden daalt en er voldoende neerslag valt voor de ontwikkeling van groene vegetatie, is een aanzet tot de geslachtsrijping van alle sprinkhanen. Dit proces duurt ongeveer 14 dagen. Geslachtsrijping kan tot hoogstens 6 maanden na de imaginale vervelling uitgesteld worden. Geslachtsrijpe gregaire sprinkhanen zwermen niet tijdens de ovipositie. Deze duurt enkele weken, waarin 2 (max. 3) keer een eipakket met ca. 80 eieren afgezet wordt. Dit eipakket wordt in een schuimcocon, 10 tot 15 cm. diep in het vochtige woestijnzand geboord. Er worden alleen eieren afgezet in vochtige grond, omdat de semi-droge eieren hun gewicht aan water op moeten nemen om tot ontwikkeling te kunnen komen. Daarom is de geslachts-afrijping gesynchroniseerd met neerslag. Komen reeds geslachtsrijpe zwermen in een periode van aanhoudende droogte dan worden de in de ovariën aanwezige eieren geresorbeerd, waardoor de geslachts-onrijpe status weer wordt verkregen (Chapman '83).

## 2.2 Invloed van weerelementen (T, RV, en bewolkingsgraad) op het zwermgedrag.

Zwermen, waarin continu gevlogen wordt gedurende een lange tijd, komen alleen voor bij bepaalde combinaties van luchttemperatuur, relatieve luchtvochtigheid (RV), windsnelheid en bewolkingsgraad.

### Temperatuur:

Insecten bepalen de temperatuur van de omgeving met behulp van sensoren in het uitwendige chitineskelet (voornamelijk in de antennae en de poten). De skelettemperatuur wordt bepaald door de combinatie van (directe) zonnestraling, luchttemperatuur, luchtvochtigheid en windsnelheid. Het is daarom waarschijnlijk dat een optimale combinatie van deze 4 factoren van grote invloed is op het zwermgedrag.

Bij actieve vlucht is de lichaamstemperatuur van een groot insect ongeveer 8 °C hoger dan de skelettemperatuur, omdat een verhoogde metabolisatie extra warmteontwikkeling met zich meebrengt.

Bij direct zonlicht is de lichaamstemperatuur, tengevolge van de instraling op het skelet, circa 10 °C hoger dan de luchttemperatuur op vlieghoogte (zie fig 2.1).

De vliegsparieren kunnen alleen soepel bewegen bij lichaamstemperaturen boven 30 °C. Anderzijds verloopt de metabolisatie ongunstig bij lichaamstemperaturen boven de 40 °C. De lethale lichaamstemperatuur is 50 °C. Er kan dus bij direct zonlicht alleen langdurig actief gevlogen worden in een luchttemperatuur traject van 20 tot 30 °C (op vlieghoogte). Bij bewolking of 's nachts kan er actief gevlogen worden bij luchttemperaturen tussen de 22 en 32 °C (op vlieghoogte).

De temperatuur neemt af met de hoogte in de onderste laag van de atmosfeer ('grenslaag'), zodat de gemeten luchttemperatuur op 1.5 m. (standaard) geen indicatie geeft over het al of niet belemmerend zijn van een te hoge temperatuur voor zwermgedrag. De sprinkhanen stijgen tot een hoogte met een gunstige luchttemperatuur (zie figuur 2.2).

Indien de bodemtemperatuur hoger wordt dan 50 °C en er zijn tevens weinig schaduwplaatsen, bijvoorbeeld wanneer er weinig vegetatie is, dan worden er kleine zwermen gevormd. De temperatuurtoename dicht bij het grondoppervlak kan erg groot zijn, zoals blijkt uit fig. 2.3 en 2.4.

Figuur 2.5 geeft een overzicht van de luchttemperaturen, waarbij zwermen gesignaleerd zijn. Hierbij is echter geen onderscheid gemaakt tussen zwermen in actieve vlucht en zwermen in zweefvlucht (zie ook par. 2.4). In zweefvlucht kan de maximum luchttemperatuur hoger zijn, omdat er minder metabolisatiewarmte geproduceerd wordt, zodat de lichaamstemperatuur ongeveer gelijk is aan de skelettemperatuur. De buoyancyfactor (zie par 2.4) bepaalt of er in zweefvlucht gevlogen kan worden, en daarvoor is een minimum luchttemperatuur van ongeveer 26 °C aan de grond nodig. Meer dan 90% van alle vluchten die gesignaleerd zijn vonden plaats in een temperatuurtraject lopend van 26 tot 36 °C op vlieghoogte (zie ook fig. 2.5).

#### Luchtvochtigheid:

Luchtvochtigheid heeft invloed op de verdamping van transpiratievocht ("evaporative cooling" in fig 2.1), en tevens op de ademhalings efficiëntie, omdat droge lucht beter wordt getransporteerd in de tracheeën van het ademhalingsorgaan van insecten. Bij lage windsnelheden wordt de verdamping onderdrukt en bij hoge windsnelheden versterkt. In het relatieve luchtvochtigheids-traject van 17% tot 77% kan actief gevlogen worden.

## Temperatuur én luchtvochtigheid:

De combinaties van luchttemperatuur en luchtvochtigheid, waarbij zwermen gesignaleerd zijn worden weergegeven in figuur 2.6. De driehoeken geven de extreme combinaties voor respectievelijk niet geslachtsrijpe (----) en geslachtsrijpe (- - -) zwermen weer.

Is de combinatie temperatuur-luchtvochtigheid overdag ongunstig dan worden er pas na zonsondergang zwermen gevormd. Deze nachtvluchten van zwermen worden slechts bij hoge uitzondering gesignaleerd, maar vormen een belangrijk onderdeel van migraties over grote woestijnvlaktes.

## Bewolking:

Het is veelvuldig waargenomen dat zwermen neerstreken, als er een wolk voor de zon schoof. Bij een volledig bedekte hemel worden er toch zwermen waargenomen. Hierbij gelden dezelfde regels als bij de nachtvluchten van zwermen. De voorkeur gaat uit naar onbewolkte dagen, tenzij de combinatie temperatuur-luchtvochtigheid ongunstig is. Dan worden er gewacht met zwermen tot er bewolking optreedt of tot zonsondergang.

## 2.3 Invloed van wind op zwermgedrag

Bij lage windsnelheden (minder dan 8 km per uur op 10 m hoogte) wordt er actief gevlogen in zwermformaties. Windsnelheden tussen de 8 en 12 km per uur zijn belemmerend voor het opstijgen van een zwerm, maar bevorderen niet het neerstrijken. De grootste windsnelheid op zwermhoogte, die ooit waargenomen werd, was 41 km per uur.

Krachtige windstoten of vlagerigheid van de wind onderdrukken het opstijgen en bevorderen het neerstrijken van een zwerm sterk. Bij kalme periodes tussen windstoten in stijgen groepjes sprinkhanen op, zodat de zwermen uitgerekt worden. Aan het eind van de dag convergeren dergelijke zwermen weer tot een geheel.

Sprinkhanen stijgen op tegen de wind in. Op deze manier verkrijgen zij een sterke 'lift' omhoog.

De kruissnelheid van een woestijnsprinkhaan in actieve vlucht ("flapping flight") is 10 tot 15 km per uur (2.7-4.0 m/s). Deze snelheid kan uren volgehouden worden in noodsituaties, zoals boven open water, maar wordt onder normale omstandigheden 1 tot 2 uur aangehouden.

De zwerm in zijn geheel vliegt met de wind mee.  $10^\circ$  Afwijking van de windrichting is waargenomen, maar dit komt ongeveer overeen met de fout in de schatting van de windrichting vanaf de grond. Zie ook figuur 2.7, waarbij de hoogvliegende zwermen (met  $^\circ$  gemerkt) door de lichte windshear (draaiing van de windrichting met de hoogte) een afwijking naar rechts vertonen ten opzichte van de 10 meter windrichting.

Tevens blijkt uit figuur 2.7 dat de gemiddelde relatieve zwerm-snelheid bij hoge zwermen groter is dan die van laag vliegende zwermen (Respectievelijk 95% en 35% van de windsnelheid op 10 meter) Dit is ondermeer te verklaren door het gevolg van het toenemen van de windsnelheid met de hoogte in de menglaag (Rainey WMO '63).

Uit figuur 2.7 blijkt dat geen zwerm (n=49) de theoretisch mogelijke snelheid van 15 km per uur ten opzichte van de windsnelheid haalde. De gemiddelde zwerm-snelheid onafhankelijk van de windsnelheid bedroeg 5.8 km per uur (1.6 m/s). De zwermen die bij windsnelheden boven de 21 km per uur (10 meter wind) vlogen bleven vlak boven het aardoppervlak. De kernhoogte van deze zwermen was lager dan 3 meter. Dergelijke extreem laag vliegende zwermen werden ook waargenomen bij vlaggerige wind met (harde) windstoten (Rainey WMO '63).

De zwerm-snelheid blijkt altijd significant lager te zijn dan de windsnelheid, terwijl de kruissnelheid van individuele sprinkhanen toch aanzienlijk is (zie fig 2.8). Dit kan worden verklaard door het verschil in oriëntatie van groepjes sprinkhanen binnen een zwerm. De sprinkhanen aan de rand van de zwerm vliegen naar de kern van de zwerm, terwijl sprinkhanen in de kern in groepjes met variabele richtingen vliegen (zie fig 2.9). Een klein percentage vliegt precies in de windrichting.

Onderuit het voorste gedeelte van een laag vliegende zwermen strijken groepjes sprinkhanen neer om te eten en te rusten. Ze sluiten aan het eind van de zwerm weer aan (zie fig 2.10). Een laag vliegende zwerm heeft een achterwaarts rollende beweging, zoals de rupsband van een tank. Bij laag vliegende zwermen kan het aantal neergestreken individuen de helft van het totaal aantal bedragen. Vanuit hoog vliegende zwermen strijken praktisch geen insecten neer, zodat de zwerm-snelheid relatief hoog is ten opzichte van lage zwermen.

Wanneer er weinig vegetatie is, zoals bijvoorbeeld ten noorden van 20° N.B. wordt ook voor laag vliegende zwermen (dan alleen bij hoge windsnelheden voorkomend) de windsnelheid als verplaatsings snelheid van de zwerm aangehouden.

Voor laag vliegende zwermen ten zuiden van 20° N.B. heeft Draper een formule voor de zwerm-snelheid ten opzichte van de windsnelheid bepaald:

$$\text{formule 1. } D=0.9071*W-0.0199*W^2+0.0049*H-3.7373$$

Waarbij D de zwermverplaatsing ten opzichte van de grond [km./uur], W de windsnelheid [km./uur], en H de maximum vlieghoogte [m.] voorsteld. Deze relatie kan voorgesteld worden op een drie-dimensionaal assstelsel. Zie hiervoor figuur 2.11 (D.L.Forecasting Manual volume 1).

Bij hoog vliegende zwermen of bij hogere windsnelheden is het percentage in de windrichting vliegende en zwevende sprinkhanen groter.

Voor een continue 'vrije vlucht' is behalve een minimum windsnelheid van 9 km per uur ook de aanwezigheid van voldoende stijgende warme luchtbelllen ("thermiek") noodzakelijk (zie ook par 2.4).



## 2.4 Invloed van verticale luchtbewegingen op zwermgedrag.

Een sprinkhanenzwerm vliegt altijd in de grenslaag van de atmosfeer. Een grenslaag is een relatief dunne laag (tot 200 à 2000 m hoogte direct boven het aardoppervlak), waarin de "turbulentie" overheerst.

's Nachts zal er door uitstraling van het aardoppervlak een dunnere grenslaag zijn (tot 50 à 200 m hoogte), waarin vaak een temperatuur toename met de hoogte heerst. De top van deze grenslaag wordt 'nachtelijke inversie' genoemd. Na zonsopkomst wordt het aardoppervlak verwarmd door instraling van de zon. Door het opstijgen van warme luchtbellens neemt de werveling van de wind ("turbulentie") toe. Hierdoor wordt de lucht aan het oppervlak gemengd met de luchtlaag boven de inversie, en ontstaat binnen enkele uren een zogenoemde menglaag, die 500 tot 2000 meter dik kan zijn. In de namiddag neemt de groei van de menglaag af om uiteindelijk de grootste dikte te bereiken rond zonsondergang. Daarna neemt de dikte van de menglaag snel af (zie fig 2.12 en 2.13).

In de menglaag blijven, tengevolge van de menging door de turbulentie, de potentiële temperatuur en de hoeveelheid vocht ongeveer constant met de hoogte. De werkelijke temperatuur zal door adiabatische uitzetting van de lucht op grotere hoogte (de druk neemt immers af) met circa 1 °C per 100 meter afnemen, zoals reeds te zien was in fig.2.2.

De windsnelheid neemt nabij het aardoppervlak logaritmisch toe met de hoogte. De sterkte van de toename is afhankelijk van de terreinruwheid en de stabiliteit van de luchtsoort (zie fig 2.15). Op grotere hoogte in de menglaag zal de windsnelheid in het algemeen overdag minder sterk met de hoogte toenemen. In een sterk "onstabiele" opbouw van de menglaag zal de toename van de windsnelheid met de hoogte kleiner zijn dan in een "stabiele" grenslaag.

Ook de dikte van de menglaag is afhankelijk van de stabiliteit van de atmosfeer. Is de droog adiabatische temperatuur afname (DALR) met de hoogte meer dan 1 °C per 100 meter dan wordt de menglaag "onstabiel" genoemd. [(DALR) = 1 °C/100 m.: "neutraal", en (DALR) < 1 °C/100 m.: "stabiel"]. De menglaag wordt het dikst bij sterk stijgende bewegingen ("buoyancy" genoemd).

Gunstige omstandigheden voor sterke buoyancy zijn: een zeer onstabiele opbouw van de menglaag, gecombineerd met een 'hoog' staande zon en weinig bewolking. Bij buoyancy stijgt de lucht plaatselijk en daalt enkele meters verder weer. Deze stijgende 'bellen' kunnen elkaar invangen en 'zuilen' vormen (deze worden "thermals" genoemd, zie fig 2.16). In de Tropen, waar de zon altijd in zenith staat, zal de buoyancy rond het middaguur meestal al erg sterk zijn.

Daarnaast spelen ook grootschalige verticale bewegingen een rol; in een 'lage druk' gebied overheersen de stijgende bewegingen van de luchtdeeltjes, waardoor de opbouw van de atmosfeer daar meestal onstabiel is.

In deze stijgende bewegingen bij buoyancy (of in mindere mate bij grootschalige convectie) kunnen sprinkhanen omhoog gevoerd worden naar de top van de menglaag. Met de wind mee, zwevend van de ene stijgende bel in de volgende, kost het geen energie om in de lucht verplaatst te worden. Vergelijk: zweefvliegtuigen of roofvogels (gieren, buizerds) in zweefvlucht, die kilometers afleggen alleen gebruik makend van de thermiek.

De daalsnelheid van zwevende sprinkhanen is ongeveer 1 m/s, zodat concentraties van individuen ontstaan in die luchtlagen, waar de verticale windsnelheid 1 m/s is (Roffey '63). De daalsnelheid neemt toe bij een afnemende temperatuur. Volgens Green & Quin is de geïnduceerde opwaartse snelheid, 'lift', van zwevende sprinkhanen in "thermals" ongeveer 5 m/s, als de terminale daalsnelheid, ten opzichte van stilstaande lucht, 1 m/s zou zijn. De sprinkhanen in thermals kunnen door deze 'lift' bij de top van de menglaag gebracht worden (Green & Quin '86).

Deze gemakkelijke manier van zweefvliegen staat tegenover het energie verslindende actieve vliegen in een stabiele opbouw van de menglaag. 90 Procent van de energie, die door de vliegspieren gebruikt wordt, moet dan worden omgezet in stijgende beweging ('lift') om de zwaartekracht en de dalende luchtbewegingen op te heffen (Chapman '76).

Een zwerm, die in een zeer onstabiele menglaag vliegt, strekt zich vaak uit tot aan de top van de menglaag, zoals weergegeven is in figuur 2.17. De vorm van zo'n in thermals zwevende zwerm wordt wel "cumuliform" genoemd (zie fig 2.18). Tijdens een stabiele opbouw van de menglaag worden alleen laag vliegende zwermen gevormd, die "stratiform" genoemd worden (zie nogmaals fig. 2.18). Stratiforme zwermen vliegen altijd onder 50 meter boven het aardoppervlak, het merendeel van de zwermen vliegt echter op een hoogte tussen de 3 en de 15 meter. Stratiforme zwermen hebben een grotere dichtheid (100 tot 1000 maal) dan de cumuliforme zwermen.

Sprinkhanenzwermen worden significant vaker gesignaleerd in een onstabiele menglaag en vliegend in de richting van grootschalige convergentie gebieden ('lage druk' gebieden), en dan voornamelijk van de late ochtend tot zonsondergang. Omdat de lucht van een 'hoge druk' gebied naar een 'lage druk' gebied stroomt: is het logisch dat met de wind mee vliegende zwermen altijd in de richting van een 'lage druk' gebied vliegen, dit verband werd echter pas in 1963 door Rainey opgemerkt (WMO '65).

Grootschalige convergentie gebieden liggen nabij de ITCZ (Inter Tropische Convergentie Zone). De ITCZ ligt in West-Afrika tussen de 15° NB en de 5° ZB rondom de Evenaar (zie fig 2.19). De ITCZ beweegt zich afhankelijk van de zonnestand naar het noorden of het zuiden. Het meest noordelijk ligt de ITCZ in augustus, het meest zuidelijk in januari. In de maanden april tot en met oktober trekt de ITCZ over de Sahel-landen.

Neerslag in die (semi)aride gebieden hangt bijna altijd samen met het optreden van storingen (voornamelijk in zogenaamde "easterly waves") in de grootschalige convergentiezones, zoals de ITCZ. Omdat neerslag nodig is voor vegetatie vorming en voor de ovipositie, legt dit een extra verband tussen gebieden 'met sprinkhanenzwermen' en gebieden 'met grootschalige convergentie'.

Terzijde:

Er zijn aanwijzingen, dat er een verhoogde vluchtactiviteit van de Australische treksprinkhanenzwermen optreedt na het passeren van een front of na een onweerstoring (Casimir en Bament '74). Ditzelfde geldt voor de Afrikaanse soorten voor en na een weeromslag zoals bijvoorbeeld een "easterly wave" storing met (onweers)buien, of bij de passage van de ITCZ, of het Inter Tropische Front. Dit is echter voorlopig nog niet te voorspellen, omdat meteorologische modellen te weinig nauwkeurigheid zijn op deze schaal. Juist voor en na frontpassages en buien kan een grote verandering in de windrichting optreden.

## 2.5 Samenvatting: Zwermvorming onderdrukkende omstandigheden

- Geslachtsrijpe en -onrijpe imago's in de solitaire fase.
- s'Nachts (tussen zonsondergang en zonsopkomst).
- Windsnelheden boven 21 km per uur (5.8 m/s) op 10 m.
- Temperatuur op zwermhoogte boven 36 °C, of beneden 22 °C.
- RV lager dan 17%, of hoger dan 77% .
- Harde windstoten of windvlagen.
- Dichte lage of middelbare bewolking.
- Stabiele opbouw van demenglaag, of sterkdalende lucht-bewegingen (kern van een 'hoge druk' gebied).
- Langer dan 3 weken aanhoudende droogte en voedselschaarste net na de vervelling tot imago.
- Tijdens buien.

## 2.6 Samenvatting: zwermvorming stimulerende omstandigheden

- Geslachtsrijpe en -onrijpe imago's in de gregaire fase.
- Overdag vanaf 10 uur 's ochtends tot aan zonsondergang.
- Bij grondtemperaturen boven 50 °C, met weinig schaduwplaatsen.
- Detemperatuur op zwermhoogte ligt tussen de 26 en 36 °C, gecombineerd met een relatieve luchtvochtigheid van 17-77%
- Windsnelheid op 10 meter ligt tussen de 9 en 15 km/uur. (algemener : tussen 8 en 40 km/uur op zwermhoogte).
- Geen of zeer weinig lage of middelbare bewolking.
- Onstabiele opbouw van de grenslaagatmosfeer.
- Veel buoyancy en/of een grootschalig convergentie gebied (kern van 'lage druk' gebied of langs de ITCZ en ITF).
- Voor en na buien of onweerstoringen.
- Voedselschaarste
- Te weinig bodemvocht voor ovipositie.

## HOOFDSTUK 3

### HOE WORDEN SPRINKHANENPLAGEN VOORSPELD

#### 3.1 Inleiding

Het voorspellen van sprinkhanenplagen valt uiteen in een aantal onderdelen: Allereerst zullen de omstandigheden voorspeld moeten worden, die tot een "upsurge" leiden, met name wanneer de overgang van solitaire naar gregaire fase plaatsvindt. De mogelijkheden van het voorspellen hiervan zullen in par 3.2 behandeld worden. Als er eenmaal groepen gevormd zijn, is het belangrijk om de omstandigheden te voorspellen, waarbij de sprinkhanen massaal gaan trekken. Wanneer zwermen optreden is het belangrijk te weten welke route deze zullen gaan volgen. Deze onderdelen worden in de paragrafen 3.3 tot en met 3.5 behandeld.

#### 3.2 Het voorspellen van gregarisatie.

De ontwikkeling van groepjes solitaire sprinkhanen tot massaal samenscholende gregaire sprinkhanen vindt plaats, als meerdere generaties sprinkhanen zich snel opeenvolgend kunnen ontwikkelen in een broedgebied. Dit wordt een "upsurge" binnen het recessiegebied genoemd. Er moeten regelmatige periodes met wijdverspreide neerslag geweest zijn, waardoor er voldoende bodemvocht en groene vegetatie in deze broedplaatsen is.

Omdat de broedgebieden in het recessiegebied wijdverspreid liggen en meestal ver van de bewoonde wereld verwijderd zijn, ligt het voor de hand om deze omstandigheden door middel van satelliet gegevens te volgen. De komende jaren zal het overkoepelende orgaan van de sprinkhaan bestrijding en tevens van de voortschrijdende droogte in de Sahel, de FAO (Food and Agriculture Organisation) een operationeel systeem opzetten, waarbij uit de NOAA-satelliet gegevens een vegetatie-index berekend wordt, en uit de METEOSAT-satelliet gegevens een schatting van het bodemvocht gemaakt wordt. Dit systeem heeft de naam ARTEMIS gekregen (zie ook de Boer '87a voor een uitgebreidere uitleg).

Tesamen met een, op historische bronnen berustende, kaart van potentiële broedgebieden kan dan een "groei model" bijgehouden worden voor die plaatsen, waar een "upsurge" van sprinkhanen mogelijk geacht wordt. Zo'n groei model is een simulatie model met een beschrijvend dynamisch karakter waarbij de vegetatie-index, historische broedplaatsen, en de meteorologische, biologische en epidemiologische gegevens gebruikt worden om een optimalisatie van de beslissingen te krijgen.

Via gerichte controles van dergelijke verdachte gebieden is tijdige preventieve bestrijding mogelijk.

### 3.3 Het voorspellen van zwermgedrag.

Voor plaatsen die volgens de methode van par. 3.2 verdacht van een "upsurge" worden, of waar op andere wijze zwermen zijn geconstateerd, moet dagelijks worden vastgesteld of er een grote kans op migratie bestaat. Dit kan gebeuren met gegevens van het Europese Centrum Model, dat beschreven is in Appendix A.

Momenteel zijn de verwachtingen van dit model tot 2 à 3 dagen vooruit redelijk betrouwbaar. Maar het model wordt echter in de komende jaren zodanig verbeterd, dat in de tropen de betrouwbaarheid van de voorspellingen tot waarschijnlijk 3 à 4 dagen toeneemt.

Voorlopig kan deze voorspelling het beste gemaakt worden door een meteoroloog, omdat het voorspellen aan de hand van een aantal parameters gedaan moet worden, die tesamen een complex geheel vormen:

De temperatuur moet liggen tussen de 26-36 °C. Hieraan is in de tropen overdag meestal wel voldaan, maar met hulp van de voorspelde temperaturen kan hier nog eens naar gekeken worden.

Ook ademhalingsbeperkingen spelen een rol: Bij hoge luchtvochtigheden mogen geen lage windsnelheden en geen hoge temperaturen gecombineerd zijn, omdat deze bij het vliegen ernstige ademhalings- en transpiratieproblemen geven.

Bij zandstormen of te sterke wind (boven 6.8 m/s) worden zwermvluchten onderdrukt. Voorspelde windvelden (isotachen) aan de grond en vochtigheidskaarten moeten hiervoor geraadpleegd worden.

Uitdrogende vegetatie is op de satellietfoto's waarneembaar, en is een belangrijke aanwijzing dat eventueel aanwezige sprinkhanen uit dit gebied wegtrekken.

De moeilijkste en één van de belangrijkste interpretaties is de bewolgingsgraad. Bij een hoge bedekkingsgraad, vooral gelaagde bewolking, wordt er weinig in zwermen gevlogen. Maar voor en na grote regenbuien (of onweer) wordt er juist wel gevlogen. Dit soort subtiele verschillen zijn moeilijk uit bewolkings en neerslag voorspellingen te halen, alleen al omdat deze twee veel minder betrouwbaar zijn dan bijvoorbeeld de windverwachtingen.

Waarschijnlijk zal een 'kansverwachting', dat wil zeggen het geven van een zekere kans op zwermvorming in een bepaald gebied voor 1 tot 3 dagen vooruit, de beste manier van verwachten zijn. Een dergelijke kansverwachting kan bijvoorbeeld berekend worden door een optimalisatie model voor zwermvorming.

### 3.4 Het voorspellen van de trekroute van zwermen.

Het achteraf nagaan van de trekroute van insecten migraties, aan de hand van opgetreden winden, is al met succes toegepast (o.a. Tucker, et al '82, Rose, et al '85). Deze trajectoriën werden met de hand berekend en zijn weliswaar nauwkeuriger dan de model berekeningen, maar niet van toepassing in de praktijk.

Het voorspellen van de trekroute van een sprinkhanenzwerm is nu ook mogelijk, en wel met een trajectoriën model, dat gebruikt maakt van de voorspelde windvelden van het Europees Centrum Model. Deze methode kan door de meteoroloog aansluitend op de verwachtingen van het zwermgedrag (par. 3.2, en 3.4) toegepast worden, maar ook op reeds trekkende zwermen, waarvan men de bestemming over een paar dagen wil schatten. Als de informatie over de "roosting" plaats (overnachtings plaats) al enige dagen oud is, hetgeen meestal voorkomt, dan kunnen de trajectoriën gebaseerd op de geanalyseerde windvelden van het Europees Centrum Model (ECMWF) gebruikt worden.

## HOOFDSTUK 4

### RESULTATEN EN DISKUSSIE

#### 4.1 Inleiding

Het trajectoriën model is ontwikkeld om luchtstromingen te kunnen simuleren. De baan van een luchtstroom kan berekend worden aan de hand van windvelden die door het Europese Centrum Model bepaald worden. Deze berekeningen kunnen op verschillende manieren uitgevoerd worden.

Met behulp van voorspelde windvelden kan, tot enkele dagen vooruit, de verwachte bestemming van een luchtstroom bepaald worden. Een andere mogelijkheid is de achteraf bepaling van de oorsprong van een luchtstroom met behulp van geanalyseerde windvelden. Berekening van de bestemming van een eerder opgetreden luchtstroom m.b.v. geanalyseerde windvelden is natuurlijk ook mogelijk (zie ook Bijlage B).

Omdat de geanalyseerde windvelden van het Europese Centrum Model een grotere betrouwbaarheid hebben dan de voorspelde windvelden, werden allereerst een aantal 'bekende' trekroutes van zwermen nagerekend op geanalyseerde velden. Aan de hand van deze resultaten kan men beslissen of het trajectoriën model in principe geschikt is voor het bepalen van zwermroutes. Er werden voor elke trekroute meerdere trajectoriën berekend op verschillende hoogtes en tijdstippen, en voor de omliggende plaatsen. Wanneer de trajectoriën dezelfde baan volgen op verschillende tijden, hoogtes of plaatsen dan kan aangenomen worden dat de weersituatie consistent in tijd of ruimte is, hetgeen de betrouwbaarheid van dergelijke trajectoriën sterk verhoogt. In dat geval werden alleen de grondtracers in de figuren getoont, omdat de begeleidende trajectoriën dan geen extra informatie toevoegden buiten een verhoogde betrouwbaarheidswaarde.

Daarna werden de 'geanalyseerde' trajectoriën vergeleken met 'voorspelde' trajectoriën.

Het trajectoriën model werd in het laatste voorbeeld ook gebruikt om een aantal zwermen die een "upsurge" veroorzaakt hadden terug te traceren.

#### 4.2 Tracering van zwermen over de Rode Zee in juli 1986.

Een schip rapporteerde op 1 juli '86, gedurende 22 uur door verschillende groepen en kleine zwermen treksprinkhanen vermengd met veldsprinkhanen, gevaren te zijn vanaf het midden van de Rode Zee tot in de Golf van Aden (FAO bulletin 94).

De vermoedelijke herkomst van deze groepen en kleine zwermen werd bepaald met het trajectoriën model met behulp van geanalyseerde windvelden. Deze trajectoriën werden gedurende 4 dagen achteruit berekend. De banen van de begeleidende trajectoriën waren dagenlang bijna exact gelijk, zodat de gegeven trajectorie zeer betrouwbaar geacht kan worden, en tevens kan dienen als representatief voorbeeld.

In figuur 4.1 is de trajectorie weergegeven, die enkele meters boven de grond de luchtstroom langs het aardoppervlakte volgt (de 'grondtracer'). De trajectorie volgt de wadi's van de blauwe nijl, waar goede omstandigheden voor het broeden van (veld)sprinkhanen gesignaleerd waren. De gearceerde gebieden in de figuur geven alle broedplaatsen aan die door survey teams van Sudan en Ethiopië gevonden waren in juni en juli. Die gebieden waarbij opgegeven werd dat de sprinkhanenpopulatie vermengd was met veldsprinkhanen zijn dubbel gearceerd.

Omdat veldsprinkhanen over veel minder grote afstanden migreren dan treksprinkhanen is het waarschijnlijk dat de vlak aan de kust gelegen broedgebieden het oorsprong gebied van deze massale oversteek vormden. De andere (potentiële) broedgebieden mogen echter niet uitgesloten worden.

Vanuit hetzelfde punt werd ook de bestemming nagerekend met het trajectoriën model (eerst m.b.v. geanalyseerde windvelden). Zoals uit figuur 4.2 blijkt volgt de 'grondtracer' een aantal uur de Rode Zee om vervolgens vlak voor het hoge kustgebergte van Noord Yemen aan land te gaan. Het (\*) teken in figuur 4.2 geeft een zwerm aan die een maand later op 4 augustus op die plaats gesignaleerd werd. Deze zwerm kwam ook vanaf de Rode Zee. Het blijkt dus mogelijk te zijn voor sprinkhanenzwermen om op deze plaats het kustgebergte van Noord Yemen over te steken. Eenmaal op land aangekomen zijn de veldsprinkhanen waarschijnlijk zo snel mogelijk neergestreken in een van de valleien, waar door afwatering van de bergen voldoende vegetatie en bodemvocht was om te broeden. Treksprinkhanen zouden waarschijnlijk verder landinwaarts trekken richting de wadi's van het Hadramout-gebergte in Zuid Yemen. Daar zijn enkele weken later ook broedgebieden van woestijnsprinkhanen gevonden. Al de gevonden broedgebieden zijn met arcering weergegeven in de figuur.

Op dezelfde wijze werd ook het eindpunt in het scheepsbericht op de Golf van Aden nagerekend met 'geanalyseerde' trajectoriën. In figuur 4.3 is de oorsprong teruggerekend op verschillende hoogtes. In dit geval waren de trajectoriën niet consistent in de hoogte en werden dus twee trajectoriën weergegeven (de 'grondtracer' en op 750 meter hoogte (925 mbar)), die samen wel representatief waren voor de verschillende banen. Er was wel consistentie in de ruimte en tijd van de begeleidende trajectoria. De drukvlakken op de zes-uurlijkse plaatsen in de trajectoriën zijn in deze figuur tevens weergegeven.

De oorsprong van de 925 mbar trajectorie lag weer in Sudan, maar de 'grondtracer' kwam oorspronkelijk uit de Rift vallei tussen Ethiopië en Kenya. Beide oorsprong gebieden zijn mogelijk maar gezien de vorige berekeningen en de rapporten van trek- en veldsprinkhanen van de kust van Sudan en Eritrea is het waarschijnlijk dat de sprinkhanen daar vandaan kwamen en met de lucht mee omhoog gevoerd zijn. Er waren geen waarnemingen of rapporten uit de Rift vallei vermeld.



De vooruit berekende trajectoriën m.b.v geanalyseerde windvelden zijn weergegeven in figuur 4.4, en ook weer op twee hoogtes weergegeven. De eerste 48 uur lopen de twee trajectoriën over hetzelfde gebied langs de kust van Zuid Yemen, daarna verwijderen de trajectoriën zich iets in het berggebied. Dit is een voorbeeld met een consistent beeld voor de banen op verschillende hoogtes, die ook weergegeven had kunnen worden met een trajectorie. Voor veldsprinkhanen die zich binnen deze tijd al gevestigd hebben is het verdere verloop van de trajectoriën overbodig. Het is mogelijk dat de sprinkhanen de broedgebieden ten oosten van 50° OL hebben bereikt, maar ook op de kuststrook waren de omstandigheden voor broeden gunstig. Er werden echter geen waarnemingen of surveys vermeld in de daarop volgende FAO bulletins.

Vervolgens werden vanaf beide vertrekpunten uit de hierboven beschreven voorbeelden 'voorspelde' trajectoriën berekend. Deze laatsten werden tot 2 juli (18.00 GMT) vooruit berekend op voorspelde windvelden, die op grond van de analyse van 12 uur GMT 29 juni '86 gemaakt waren door het ECMWF model.

De voorspelde 'grondtracer' vanaf de Rode Zee laat in figuur 4.5 zien dat de eerste 48 uur exact dezelfde route afgelegd word als met de 'geanalyseerde' trajectorie. De 'voorspelde' grondtracer in figuur 4.6 vanaf de Golf van Aden volgt de geanalyseerde trajectorie erg goed, ondanks het feit dat dan de voorspelde windvelden al 48 uur oud zijn. Ook bij deze voorspelde trajectorie is de afwijking in de tijd groter dan in de ruimte. Juist voor het traceren van zwermen is deze continuïteit in de ruimte het belangrijkste, omdat de zwerm-snelheid niet altijd gelijk is aan de windsnelheid, en er 's nachts meestal niet gevlogen wordt.

#### 4.3 Bepaling van de oorsprong van een "upsurge".

Een andere manier om trajectoriën te gebruiken bij sprinkhanen zwermen is een achteraf bepaling van de oorsprong van een "upsurge". Een dergelijke "upsurge" deed zich voor in september 1983 in Pakistan en India.

De sprinkhanen zwermen, die eind juli en begin augustus vanuit het westen Pakistan binnen vlogen werden met trajectoriën terug getraceerd. Deze zwermen waren zeer waarschijnlijk de veroorzakers van de "upsurge". Immigratie was in dit geval noodzakelijk, omdat het in Pakistan en India zelf te droog was om lokaal te broeden. De moesonregens kwamen dit jaar uitzonderlijk laat, zodat pas in augustus de condities voor broeden gunstig werden. Er waren tijdens de intensieve surveys van juni en juli in dit gebied dan ook alleen nog niet geslachtsrijpe solitaire sprinkhanen gesignaleerd.

Om deze eerste zwermen te traceren werden 3-daagse trajectoriën terug berekend, vanaf de eerste plaatsen in Pakistan waar deze gesignaleerd waren. De trajectoriën gebruikten geanalyseerde windvelden van juli 1983 van het ECMWF. Net zoals bij de vorige voorbeelden wordt in de figuur slechts twee (nl. 1000 en 925 mbar) van de trajectoriën getoont. De andere trajectoriën gaven geen verdere toelichting.

De baan van de luchtstromingen op 1000 mbar loopt, zoals in figuur 4.7 te zien is, van de kust van Zuid-Somalië over zee naar de eerste waarnemingsplaats op de kust van Pakistan. Op zich is deze afstand eerder overbrugd door sprinkhanenzwermen (o.a. in de zomer van 1952, zie D.L.F.M. vol. 2, en in juni 1982, zie Roffey '82), maar in 1983 waren er geen sprinkhanen in Zuid-Somalië. De luchtstroming op 925 mbar had als oorsprong Oman, waar op dat moment ook geen broedplaatsen van sprinkhanen aanwezig waren. Het is echter niet uitgesloten dat deze zwerm vanuit Zuid Yemen, waar in juli wel gregaire sprinkhanen gesignaleerd werden, Oman ingetrokken is. Omdat dit echter volgens J. Roffey (sprinkhanen coördinator van de FAO) niet waarschijnlijk was, werd er onderzocht of het mogelijk was om het zwermgedrag beter te simuleren met het trajectoriën model.

Sprinkhanenzwermen vliegen bij voorkeur overdag van 4 uur na zonsopkomst tot zonsondergang (zie ook Hoofdstuk 2). Het trajectoriënmodel werd aangevuld met een subroutine, waarin de zonnestand op elke lengtegraad berekend kan worden. Hiermee kan per vertrekpunt het juiste aantal vliegreuen bepaald worden. Buiten dit vliegtraject werd de windsnelheid in horizontale richting met nul vermenigvuldigd, zodat elke nieuwe dag gestart werd op de landingsplaats van de vorige. Met andere woorden 's nachts werd de zwermverplaatsing nul.

Met deze verkorte trajectoriën werden dezelfde zwermen nogmaals teruggerekend en wel op 925 mbar, omdat de 1000 mbar in dit geval om vier redenen niet voldeed. Ten eerste heeft de wind op 1000 mbar een verkeerde richting, zodat de zwerm de eerste dag al in zee zou moeten landen. Ten tweede is de 1000 mbar trajectorie te onbetrouwbaar om meer dan 5 dagen achteruit te berekenen, doordat het ECMWF model geen kleinschalige terreinverschillen onderscheid, die door laagvliegende zwermen wel gevolgd worden. Ten derde is de zwerm-snelheid gelijk aan de windsnelheid op het 925 mbar niveau. En ten vierde is de gemiddelde zwermhoogte op een dag ongeveer 750 meter (op het 925 mbar niveau) omdat de eerste twee uur stratiform (onder 50 m.) dan ongeveer vier uur cumuli-form (tot 1500 m.) en daarna weer circa twee uur stratiform gevlogen wordt.

Zoals uit figuur 4.8 blijkt is de op deze wijze gesimuleerde route van de zwermen afkomstig uit de Arabische Emiraten. De tijd, die nodig was om deze afstand af te leggen, was ongeveer 9 dagen. Roffey bevestigde ons dat de oorsprong van de juli-augustus zwermen waarschijnlijk inderdaad de Arabische Emiraten geweest is.

#### 4.4 Diskussie

Zoals uit de vorige voorbeelden blijkt is het trajectoriënmodel in staat om sprinkhanenzwermen te traceren. Er werden drie verschillende trekroutes onderzocht, namelijk over land en over open water, en een trajectorie, die alleen overdag berekend werd, terwijl de zwermverplaatsing 's nachts op nul gesteld werd.

Allereerst een toelichting van trekroutes over open water. De zwerm snelheid wordt nu bijna gelijk aan de windsnelheid verondersteld, omdat er dan geen sprinkhanen zullen neerstrijken (hetgeen boven land aanzienlijke vertragingen geeft). De voor congregatie noodzakelijke vliegrichting van de groepjes binnen de zwerm geeft een kleine vermindering van de zwerm snelheid t.o.v. de windsnelheid met ongeveer 95 procent. Verder wordt er doorgevlogen na zonsondergang, wanneer de zwerm nog geen land bereikt heeft. De baan van een dergelijke zwerm volgt de luchtstromingen bijna exact, zodat de trekroute berekend kan worden zonder aanpassingen van het trajectoriën model.

Hoog vliegende, "cumuliforme", zwermen boven land volgen de luchtstromingen op dezelfde wijze (met een zwerm snelheid die bijna gelijk is aan de windsnelheid), maar alleen gedurende een aantal uren tussen zonsopkomst en zonsondergang. Een aanpassing van het model is hiervoor mogelijk. Het trajectoriën model kan banen op verschillende drukvelden berekenen, zodat de hoogte van de vlucht geen probleem vormt.

Laag vliegende, "stratiforme", zwermen boven land ten zuiden van 20° N.B. volgen de luchtstromingen met een aanzienlijke vertraging van 30% tot 50% t.o.v. de windsnelheid. Ook voor deze vertraging is het trajectoriën model aanpasbaar. Het aantal vliegers wordt op dezelfde manier bepaald, als bij hoog vliegende zwermen.

Ook de 'nacht vluchten' over de woestijngebieden kunnen door een aanpassing in het trajectoriën model goed getraceerd worden. Voorlopig worden de nacht vluchten vanaf zonsondergang tot zonsopkomst verondersteld. Het is echter nog niet bekend wanneer (en waarom) zwermen 's nachts neerstrijken. De vliegsnelheid wordt gelijk aan de windsnelheid verondersteld. Men vermoedt dat boven de Sahara 's nachts vliegende zwermen zich laten meevoeren door de 'low level Jetstream', waardoor hoge vliegsnelheden tot 40 km/uur gehaald kunnen worden. Dit verklaard de enorme afstanden die sommige zwermen in korte tijd overbrugd hadden. Radar waarnemingen bevestigden de aanwezigheid van sprinkhanen op die Jetstream hoogte (Roffey '63, Schaefer '76, Roffey pers. comm.).

Enkele kritische kanttekeningen bij het gebruik van trajectoriën zijn echter noodzakelijk.

Ten eerste: Bij het gebruik van voorspelde windvelden van het ECMWF neemt de betrouwbaarheid na een aantal dagen snelheid af. Deze termijn is afhankelijk van de variabiliteit van de weersystemen. Ze neemt door de continue verbeteringen in het ECMWF model juist in de (sub)tropen nog steeds toe. Voorlopig wordt 2 à 3 vooruit nog betrouwbaar geacht in de (sub)tropen. Voor de gematigde breedten is deze termijn 4 à 5 dagen.

Het is aan te raden om in de omgeving van het vertrekpunt van de beoogde trajectoriën een aantal contrôle trajectoriën te berekenen. Deze extra trajectoriën geven een beeld van de variabiliteit van het windveld in de ruimte: lopen de trajectoriën allen parallel dan is de betrouwbaarheid van de gewenste trajectorie hoog, en anderzijds wijken de trajectoriën sterk uiteen dan is het noodzakelijk om later de trajectorie opnieuw te berekenen met behulp van geanalyseerde windvelden ter contrôle.

Ten tweede: Voor de juiste bepaling van het oorsprongs- dan wel bestemmingsgebied van een zwerm moet rekening gehouden worden met de toenemende fout in de trajectorie met de tijd. Een trajectorie met betrouwbaarheids marge beslaat een gebied in de vorm van een pluim. Met een zekere mate van betrouwbaarheid zal de zwerm binnen het gebied, dat door de pluim bestreken wordt, overgetrokken zijn. De mate van gewenste waarschijnlijkheid bepaald de dikte van de pluim.

Ten derde: sprinkhanenzwermen alleen bij bepaalde weersomstandigheden. Met meteorologische modellen, analyses en weersatellieten kunnen deze parameters bepaald worden op plaatsen waar zwermvorming verwacht wordt. Dit is nodig, omdat alléén dan de trajectoriën op een juiste hoogte en gedurende het juiste aantal vliegreuren per dag berekend kunnen worden. De bestemmingsplaats kan dan preciezer bepaald worden. De meteorologische omstandigheden, die voor zwermen van belang zijn staan samengevat in de paragrafen 2.5 en 2.6.

Ten vierde: Behalve meteorologische omstandigheden zijn ook biologische gegevens, historische kaarten van seizoens trekrichtingen en hoogtes, en vegetatieindexkaarten van belang om de juiste hoogte voor de trajectoriën berekeningen te nemen, en voor de juiste snelheid van de vlucht te bepalen. De relatieve snelheid kan met behulp van de formule van Draper berekend worden (zie paragraaf 4.3).

## HOOFDSTUK 5

### CONCLUSIES

Het doel van deze voorstudie was na te gaan of het mogelijk zou zijn om met behulp van een trajectoriën model, de trekroute van een sprinkhanenzwerm 2 à 3 dagen vooruit te kunnen bepalen. Deze trajectoriën dienen als aanvullende informatie op andere (meteorologische) gegevens, die het zwermgedrag beïnvloeden, zoals temperatuur, bewolking vegetatie en dergelijke.

Het trajectoriën model gebruikt gegevens van het ECMWF en is daardoor niet sterk afhankelijk van de in dit gebied wijd uit elkaar liggende en vaak onregelmatig rapporterende radiosonde stations.

Er werden twee 'case-studies' verricht. In deze case-studies werden trekroutes onderzocht met trajectoriën over land en over open water. In een geval met een aangepaste trajectorie, die alleen overdag berekend werd. De trajectoriën werden berekend met geanalyseerde en met voorspelde windvelden van het ECMWF; behalve voor de aangepaste trajectorie, in dat geval werden alleen geanalyseerde windvelden gebruikt.

In alle gevallen leidden de trajectoriën naar de gevonden broedgebieden, zoals die (onafhankelijk van dit onderzoek), weergegeven waren in de FAO bulletins. Zowel de achterwaartse trajectoriën, die de oorsprong van de zwermen moesten traceren, als de voorwaartse trajectoriën die de bestemming van de zwerm moesten bepalen, voldeden uitstekend aan de verwachtingen. In één geval (Pakistan '83) voldeed het gewone trajectoriën model minder goed. Maar nadat het model aangepast was (alleen overdag verplaatsing van de zwerm), voldeed de aangepaste trajectorie uitstekend.

Wanneer men er van uitgaat dat de geanalyseerde trajectoriën als contrôle kunnen dienen voor de voorspelde trajectoriën, dan waren de resultaten van de voorspelde trajectoriën goed tot 3 dagen vooruit. De voorspelde trajectoriën volgden exact dezelfde baan als de geanalyseerde trajectoriën, en de afwijking in de daarvoor benodigde tijd was gering.

Het trajectoriën model zou voor vier toepassingen gebruikt kunnen worden:

- (1) Het voorspellen van trekroutes van een aantal aanwezige zwermen, om de zwerm, die potentieel de meeste schade kan toebrengen te kunnen aanwijzen.
- (2) Het voorspellen van de trekroute van grote zwermen uit verzamelgebieden.
- (3) Het achteraf bepalen van de waarschijnlijke oorsprongsgebieden van plotseling verschenen zwermen.
- (4) Het voorspellen van trekroutes van zwermen, die op grond van neerslag en vegetatieindex gegevens (evt. berekend door een optimalisatie model) verwacht worden, maar waarvan tot dan toe nog geen rapporten binnen gekomen zijn.

In principe is het mogelijk om voorspellende trajectoriën voor de trekroute van sprinkhanenzwermen tot 5 dagen vooruit te draaien. Intensieve trials op de nauwkeurigheid van de trajectoriën in gebieden, met een maximale spreiding in de verwachte betrouwbaarheid, zullen echter nodig zijn om aan te geven wat in de praktijk haalbaar is (waarschijnlijk zo'n 2 à 3 dagen). Deze testen zijn tevens noodzakelijk, omdat de onnauwkeurigheid van de schattingen van de zwerm snelheid en de vliegduur op het ogenblik nog onbekend is.

Ons inziens kunnen trajectoriën een uitstekend hulpmiddel zijn bij de bepaling van trekroutes van sprinkhanenzwermen. Een goede kennis van de meteorologische omstandigheden en van het gedrag van sprinkhanen daarop is echter noodzakelijk. De combinatie van de uitkomsten van een trajectoriën model met meteorologische parameters, historische gegevens, satelliet waarnemingen, en de biologie van de sprinkhaan in een optimalisatie model, is naar onze mening de volgende stap in het effectiever contrôleren, bijhouden en adviseren omtrend de sprinkhanen-situatie van een overkoepelend orgaan als de FAO. Mede omdat voor de "upsurge" voorspelling op de FAO de afhankelijkheid van de schaarse en slechte veldrapporten door een dergelijk model verminderd wordt.

## APPENDIX A

Het Europese Centrum (ECMWF) model.

Sedert 1978 worden op het Europese Centrum, een keer per dag, 10-daagse voorspellingen geleverd aan de verschillende lidstaten. Deze voorspellingen bestaan o.a. uit windvelden, temperatuurvelden, en drukvelden op verschillende niveaus. Aan de lidstaten wordt tot 84 uur vooruit 6-uurlijkse velden geleverd op 100, 850, 700, 500, en 250 mbar, daarna gebeurt dit voor 1000 mbar 12-uurlijks tot 144 uur vooruit.

De voorspelde windvelden zijn voor het noordelijk halfrond betrouwbaar tot op circa 5 dagen (120 uur vooruit), in de tropen en op het zuidelijk halfrond is dit minder. De betrouwbaarheid van het model in de tropen neemt echter de laatste jaren sterk toe (zie fig. A.1), en naar aanleiding van het werk van Mohanty, et al. ('85) mag verwacht worden dat de betrouwbaarheid de komende jaren nog sterk zal stijgen. Begin 1987 was de voorspelbaarheid van de vector wind op 850 mbar in de tropen ruim 3 dagen (ECMWF pers. comm.).

Het Europese Centrum model is, zoals alle moderne numerieke meteorologische verwachtingsmodellen, gebaseerd op de zogenaamde 'primitieve vergelijkingen', een vorm van Navier-Stokes vergelijkingen voor 'vloeistofdynamica', waarin aangenomen is dat de atmosfeer op een drukvlak incompressibel is, waarin de geluidsgolven zijn uitgefilterd, en waar de hydrostatische en de adiabatistische aanname geldt. Zie voor een inleiding hierover Haltiner ('71). Deze vergelijkingen maken het mogelijk, gegeven een begintoestand, de evolutie van die toestand in tijd te berekenen. Deze begintoestand wordt gedefinieerd door, aan de hand van voorspellingen en waarnemingen, de waarden van de variabele wind (3 componenten) druk, temperatuur en vochtigheid op een aantal roosterpunten te geven. Deze roosterpunten liggen in de huidige modelversie op een rooster dat de globe bedekt, op afstanden van circa 120 km. uiteen. Boven elkaar, dus op verschillende hoogten, liggen er 18 roosters, waarvan er circa 3 in de grenslaag liggen.

Als input in het model worden meteorologische waarnemingen van grondstations, radiosonde stations, vliegtuigen, schepen, boeien en satellieten gebruikt. Het waarnemingsnetwerk wordt nog steeds verbeterd, o.a. komen er in de toekomst, 4 à 5 jaar, satellietwaarnemingen, die de wind boven het zeewateroppervlak meten, beschikbaar. Hoe beter het waarnemingsnetwerk, hoe beter de modelresultaten. In combinatie hiermee worden de modelresultaten verbeterd door een kleinere roosterpuntsafstand te nemen. Hierdoor worden ook de kleinere meteorologische systemen beter beschreven, waardoor de voorspeltermijn van de grotere systemen, die hiermee in wisselwerking zijn, vergroot.

Tenslotte worden de modellen verbeterd, door een betere parameterisatie af te leiden uit de kleinschalige meteorologische processen, die binnen een grid (roostereenheid) plaatsvinden, zoals wolkenvorming, stalingsprocessen e.d. Juist een verdere verbetering van deze 'fysische processen' zal in de tropen tot een aanzienlijke verlenging van de voortplantingstermijn leiden (zie Mohanty et al. '85).

## APPENDIX B

### Het trajectoriën model.

Het trajectoriën model, dat op het K.N.M.I. ontwikkeld is (Reiff, et al '86) werkt als volgt:

Windvelden van het ECMWF worden 6-uurlijks afgelezen. Het trajectoriën model interpoleert deze naar 2-uurlijkse windvelden, berekent Fourier-componenten, en met behulp van deze Fourier-componenten wordt elke 2 uur een stukje verwachte trekroute berekend. Dit kan van elk willekeurig vertrekpunt op aarde gebeuren.

De trajectoriën boven de grenslaag zijn over het algemeen betrouwbaarder dan de trajectoriën in de grenslaag, waar de sprinkhanen vliegen.

Momenteel worden door de sprinkhanenexperts de voorvoorspelling benodigde windgegevens meestal gehaald uit veeljarig gemiddelde maandkaarten of zelfs seizoenskaarten van de windvelden. Verder gebruikt men zo mogelijk de gegevens van de dichtsbijzijnde synoptische stations.

Het is te verwachten, dat met trajectoriën, gebaseerd op voorspelde (of achteraf geanalyseerde) windvelden, de plaats, waar de sprinkhanen heen vliegen of zijn gevlogen, veel beter geschat kan worden, dan met trajectoriën, die gebaseerd zijn op klimatologische windvelden. Dit argument wint nog steeds aan kracht, aangezien juist de laatste jaren de betrouwbaarheid van de voorspelde windvelden sterk is toegenomen (zie fig. A.1).

Het argument dat wel eens gehoord wordt, dat numerieke windveld analyses niet beter kunnen zijn dan windveld analyses berustend op de weinige en vaak nog onbetrouwbare waarnemingen ter plaatse geldt echter niet. Hiervoor zijn twee redenen:

- (1) De Europese Centrum windanalyse is niet alleen gebaseerd op waarnemingen aan de grond en radiosondes, maar ook op winden die uit de verplaatsing van wolkenvelden uit satellietfoto's, op 1500 m. hoogte en 8 à 10 km. hoogte, afgeschat zijn. Daarnaast worden er nog waarnemingen van op grote hoogten overvliegende vliegtuigen gebruikt. Aangezien er tussen de windvelden van de luchtlagen op diverse hoogten in de verticaal een zekere consistentie heerst, gevende geanalyseerde gegevens van het windveld op diverse hoogten ook informatie over het windveld in de grenslaag nabij de grond.
- (2) In de numerieke analyses wordt ook gebruik gemaakt van de consistentie die er in 'de tijd' moet heersen. Een voorbeeld: Als er boven het Midden Oosten een meteorologisch systeem ontdekt en in de analyses verwacht is, dan wordt allereerst aangenomen dat dit systeem zich met de heersende winden verplaatst, bijvoorbeeld naar Noord Afrika, en zich volgens bestaande meteorologische wetten ontwikkeld (aansterkt, of juist afzwakt). Er zijn dan maar weinig meteorologische waarnemingen boven Noord Afrika nodig, bijvoorbeeld 24 uur na de eerste analyse, wanneer het systeem daar is aangekomen, om het hele systeem nauwkeurig in de analyses op te nemen, en om een verwachting te maken voor een volgend etmaal.



De conclusie luidt dus: Het huidige Europese Centrum model is zo goed, dat de analyses hiervan, boven gebieden met schaarse waarnemingen, te prefereren zijn boven analyses van waarnemingen, die geen hoogte of tijdconsistentie bevatten. Hoe goed de trajectoriën gebaseerd op 'verwachte' of geanalyseerde windvelden zijn om de trekroute van sprinkhanen te beschrijven, kunt u lezen hoofdstuk 4.

De lengte van het termijn, waarvoor betrouwbaar voorspelde trajectoriën mogelijk zijn, is op het ogenblik 2 à 3 dagen. Hierbij zijn de afwijkingen ten opzichte van de werkelijke trekroute minder dan 30%. In de komende jaren zal de voorspeltermijn toenemen tot 3 à 4 dagen, aangezien juist het tropische gedeelte van het Europese Centrum model nog sterk verbeterd zal worden.

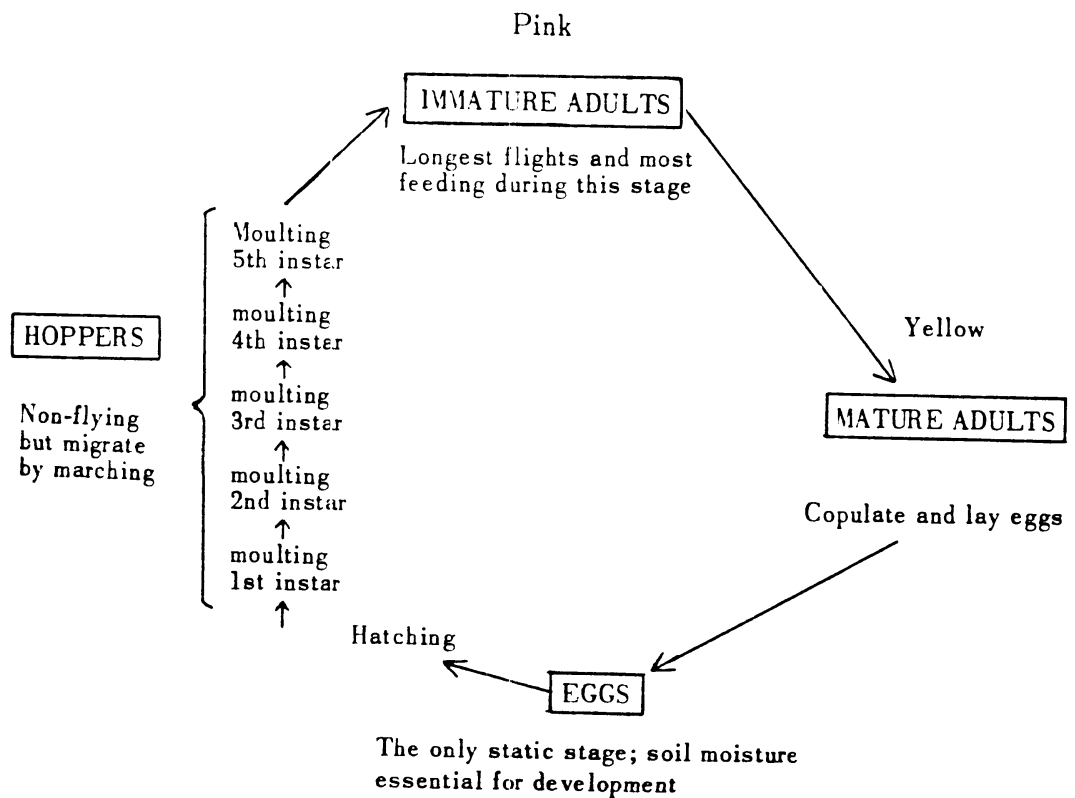
Terzijde:

De betrouwbaarheid van de berekende trajectorie hangt sterk af van de meteorologische situatie. Is er in het windveld weinig verandering in de tijd en/of in de ruimte, dan zijn de trajectoriën 2 à 3 keer zo betrouwbaar als in situaties waarin het windveld sterk veranderlijk is. Daarnaast moet gezegd worden, dat trajectoriën over niet te geaccidenteerd terrein betrouwbaarder zullen zijn dan trajectoriën door berggebieden. Dit komt, omdat de wind in de grenslaag juist bij bergachtig gebied de neiging heeft om de valleien te volgen. Het oplossend vermogen van de meteorologische numerieke modellen is thans te klein om deze valleien in het model 'terug te zien'. Tevens hebben dit soort modellen moeite om de land-zee wind circulatie, die soms in kustgebieden in sterke mate kunnen optreden, te voorspellen. De afstand tussen de verschillende roosterpunten in de moderne modellen (75-150 km.) is nog te groot om deze circulatie juist te voorspellen. Ook hier zal echter met de tijd verbetering in komen.

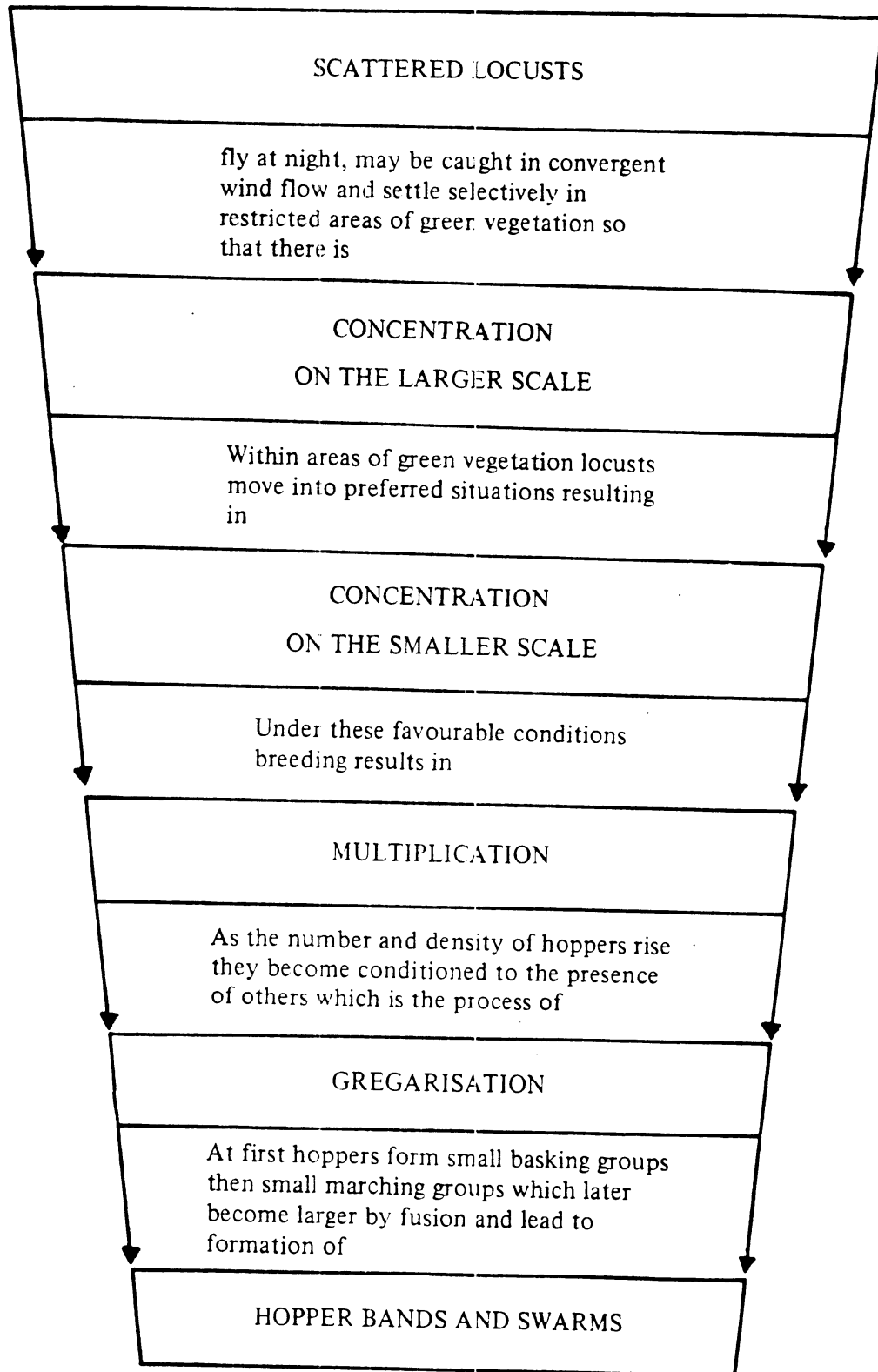
## LIFE CYCLE OF THE DESERT LOCUST

(*Schistocerca gregaria*)

The life cycle may be summarised thus:



tabel 1.1 Levenscyclus van de woestijnsprinkhaan in een schematische weergave (Locust Handbook).



Diagrammatic representation of processes involved in a desert locust outbreak.

tabel 1.2 Weergave van de processen die leiden tot een "upsurge" van sprinkhanen in een diagram (Locust Handbook).

## PHASE DIFFERENCES IN THE DESERT LOCUST

Some of the main phase differences in the Desert Locust are given in the table below.

<i>Solitarious, non-swarming locusts</i>	<i>Gregarious, swarming locusts</i>
<b>APPEARANCE AND MORPHOMETRICS</b>	
Hoppers entirely green or with a few dark markings	Hoppers yellow or orange with heavy dark patterns, if living under cool conditions, or bright yellow with slight dark markings under hot conditions
Adults with $\frac{E}{F}$ ratios under 2.05	Adults with $\frac{E}{F}$ ratios over 2.16
<b>BEHAVIOUR</b>	
Time interval between laying of egg pods generally longer	Time interval between laying of egg pods generally shorter
Mean number of eggs per pod over 90 (120 quite common)	Mean number of eggs per pod under 80 (60 quite common)
Adults longer-lived	Adults shorter-lived
Hopper development generally slower	Hopper development generally quicker
Never form groups, or form only small temporary groups	Form dense groups or bands of hoppers and swarms of adults
Hoppers do not march in concerted fashion	Hoppers march in concerted fashion
Hoppers do not move more than a few yards per day	Hoppers move as much as one mile per day
Adults fly by day only when disturbed; frequently fly at night	Adults fly spontaneously, mainly by day

tabel 1.3 De verschillen in uiterlijk, morfologie en gedrag tussen de solitaire en de gregaire fase van de woestijnsprinkhaan (Locust Handbook).

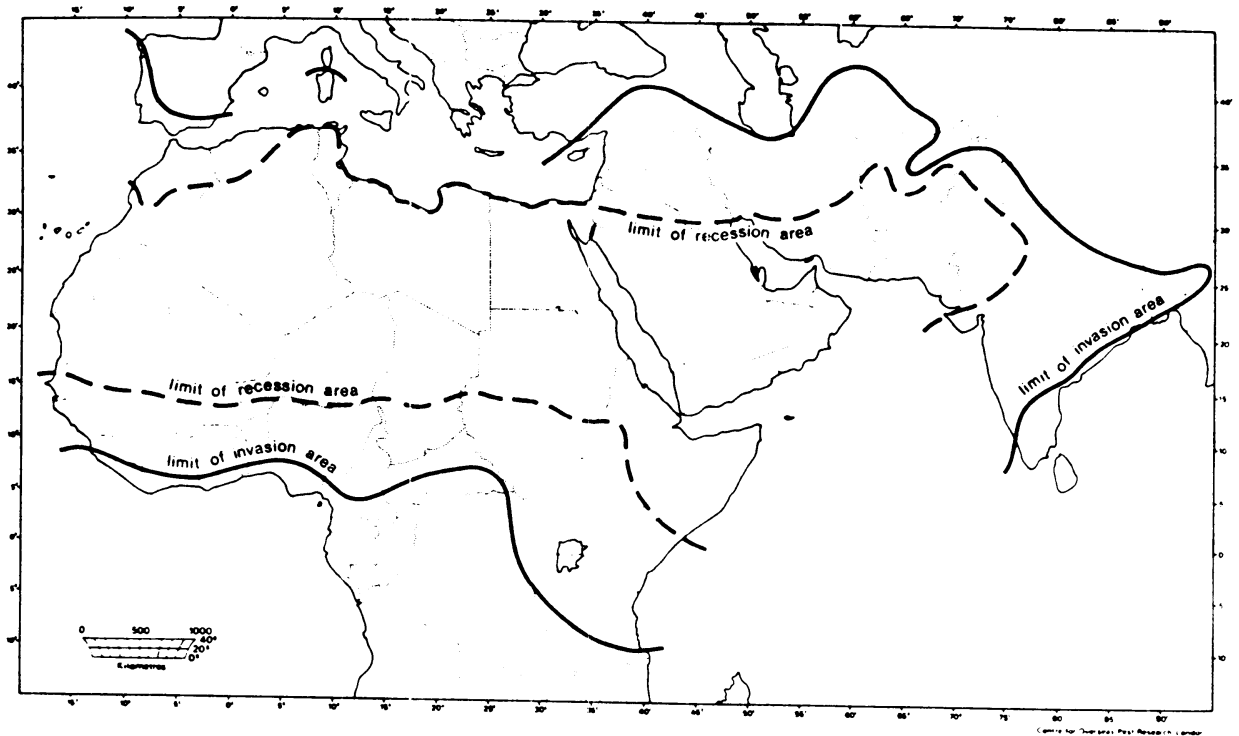
## Daily pattern of behaviour of swarming locusts

Desert Locusts in swarms fly by day and settle on vegetation at night, although they have sometimes been seen flying after dark.

It is not easy to say exactly what their behaviour will be at any one time as this depends on the weather, the type of country they are in and the state of the locusts themselves, but very often the general daily behaviour pattern for immature (pink) swarms in tropical Africa or Asia will be as follows:

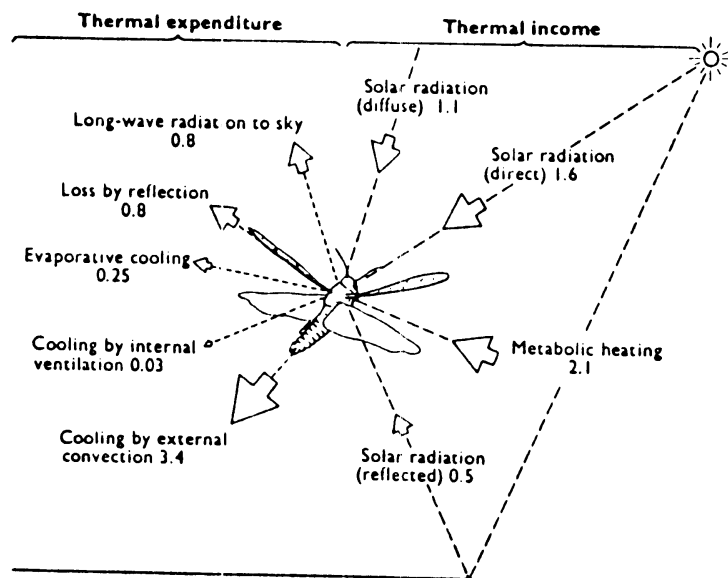
<u>Time</u>	<u>Behaviour</u>
Night (1 hour after sunset to sunrise)	Settled on vegetation; the place where the swarm settles is called the ROOSTING SITE.
Sunrise + ½ hour	Crawling about slowly on vegetation. A few locusts may jump or fly about on disturbance. During the next hour or so more locusts make short flights and many come to the ground.
Sunrise + 2 hours (about 0800 hours)	Dense carpets of locusts now on the ground lying broadside on to the sun's rays to absorb radiant heat. Some still basking on trees and some flying between groups. During the next hour the amount of local flying increases with streams of locusts flying in different directions while still remaining within the area of the roosting site.
0900 to 1000 hours	Majority of locusts become airborne. As the air temperature rises and convection starts the locusts rise higher into the air and the swarm begins to leave the roosting site; this is usually referred to as MASS DEPARTURE.
1000 hours to sunset or just after it	Swarm in flight as a whole, but there are nearly always many locusts temporarily settling beneath the swarm, particularly at the leading edge; near the rear edge these take off again and follow the rest of the swarm. Thus the swarm moves in a rolling manner.
Sunset or soon afterwards	Settling in progress, very often followed by heavy feeding

tabel 1.4 Algemeen overzicht van het dagelijkse gedrag van een niet geslachtsrijpe sprinkhanen zwerm (Locust Handbook).



Invasion and recession areas of the Desert Locust (updated from Waloff 1976).

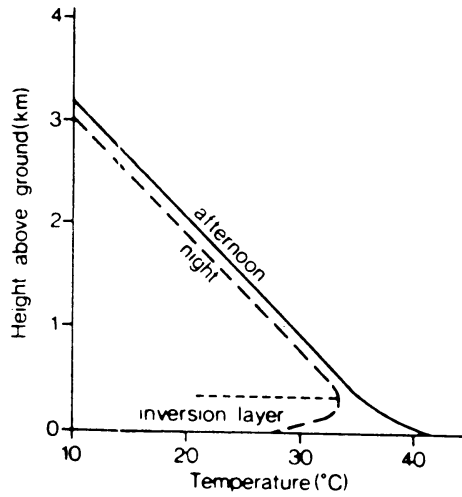
1.1 Recessie- en invasiegebied van de woestijnsprinkhaan (D.L.F.M. vol 1).



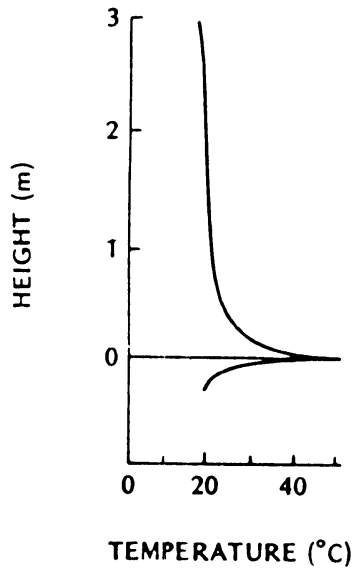
An example of the thermal balance of a large flying insect with a body temperature about 10°C above air temperature. The numbers indicate cal/min and are based on observations made on the red locust. (After RAINEY, R. C., 1974, *A. Rev. Ent.*, 19, 407-39.)

2.1 Temperatuur balans van een vliegende sprinkhaan.

Schematic variation of temperature with height in cloudless weather, day and night.

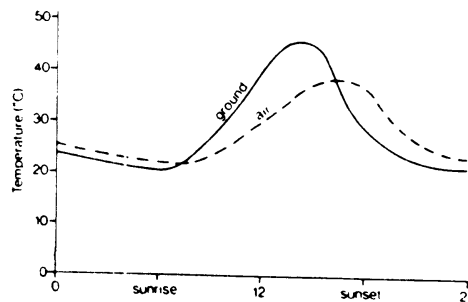


2.2 Schematische variatie van de temperatuur met de hoogte in onbewolkt, subtropisch weer, dag en nacht. (D.L.F.M. vol. 1).

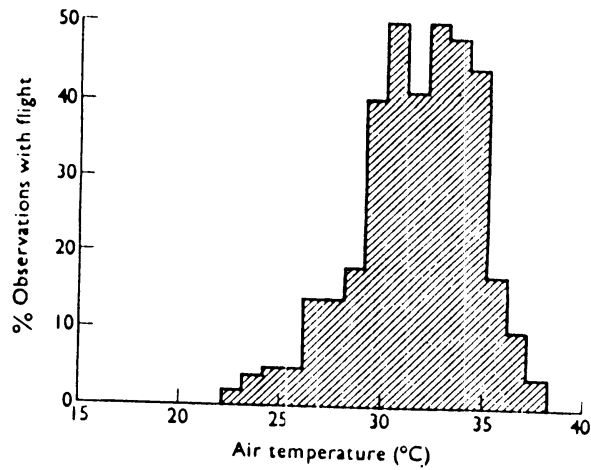


2.3 Gemiddeld profiel van lucht- en bodemtemperatuur dicht bij het grondoppervlak (Oke '78).

Schematic diurnal variation of air and ground temperature in cloudless weather.

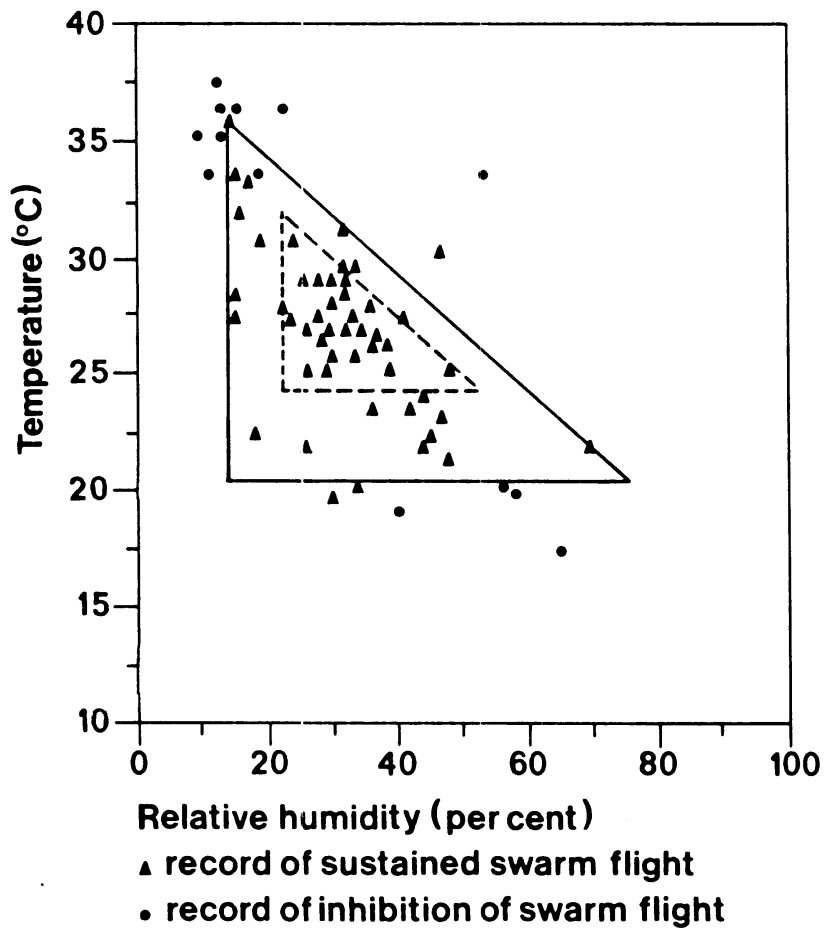


2.4 Schematische dagelijkse variatie in lucht- en bodemtemperatuur bij onbewolkt weer (D.L.F.M. vol. 1).



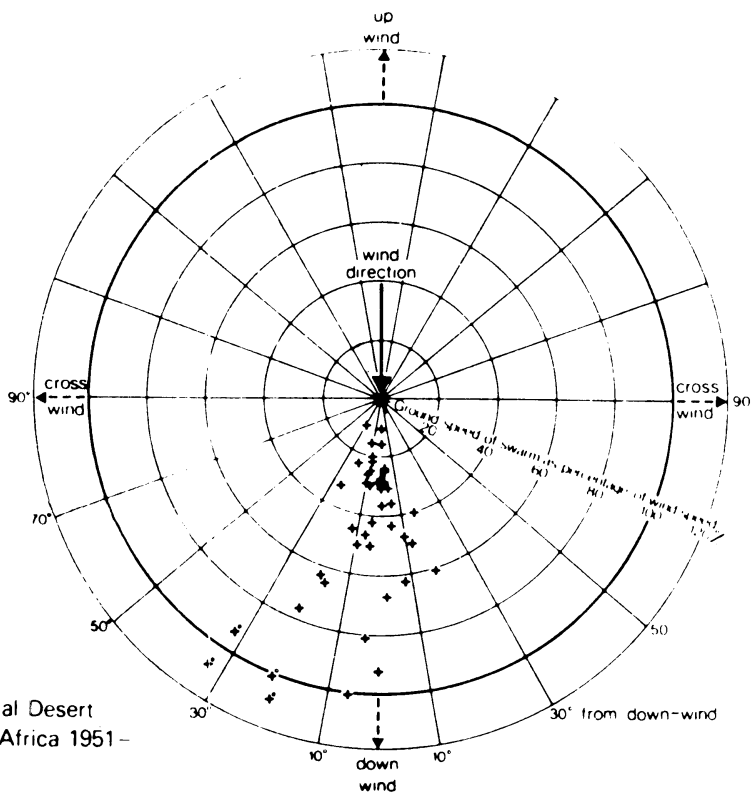
Flight activity of the red locust in relation to air temperature. (After CHAPMAN, R. F., 1959, *Behaviour*, 4, 300-34.)

## 2.5 Vlucht activiteit in relatie met luchttemperatuur.



2.6 Temperatuur en luchtvochtigheid combinaties in relatie met vlucht activiteit van zwermen (naar Casimir & Bament '74).



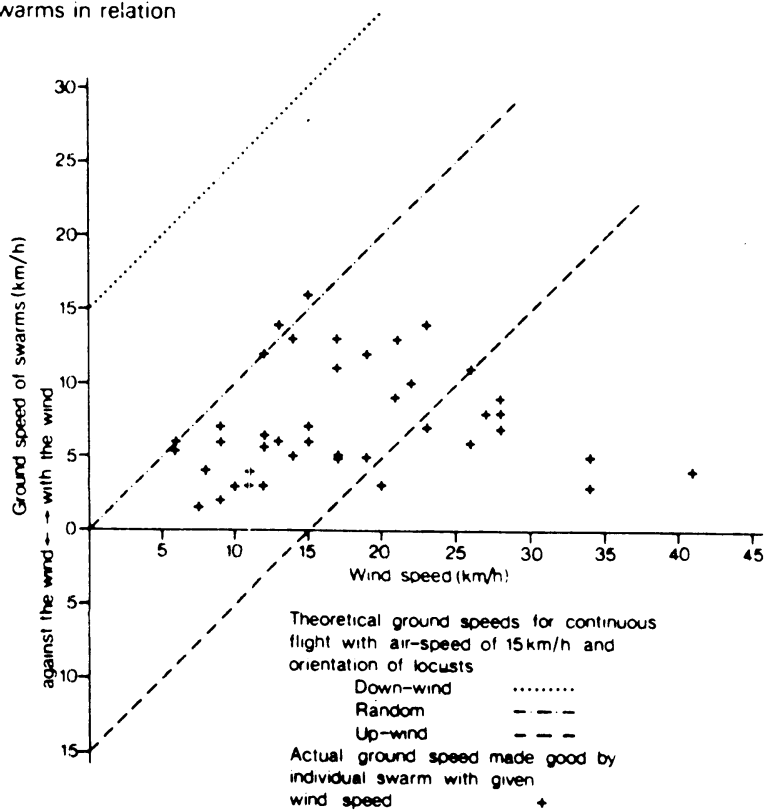


Direction and speed of displacement of individual Desert Locust swarms in relation to the wind: eastern Africa 1951-57 (After Rainey 1963).

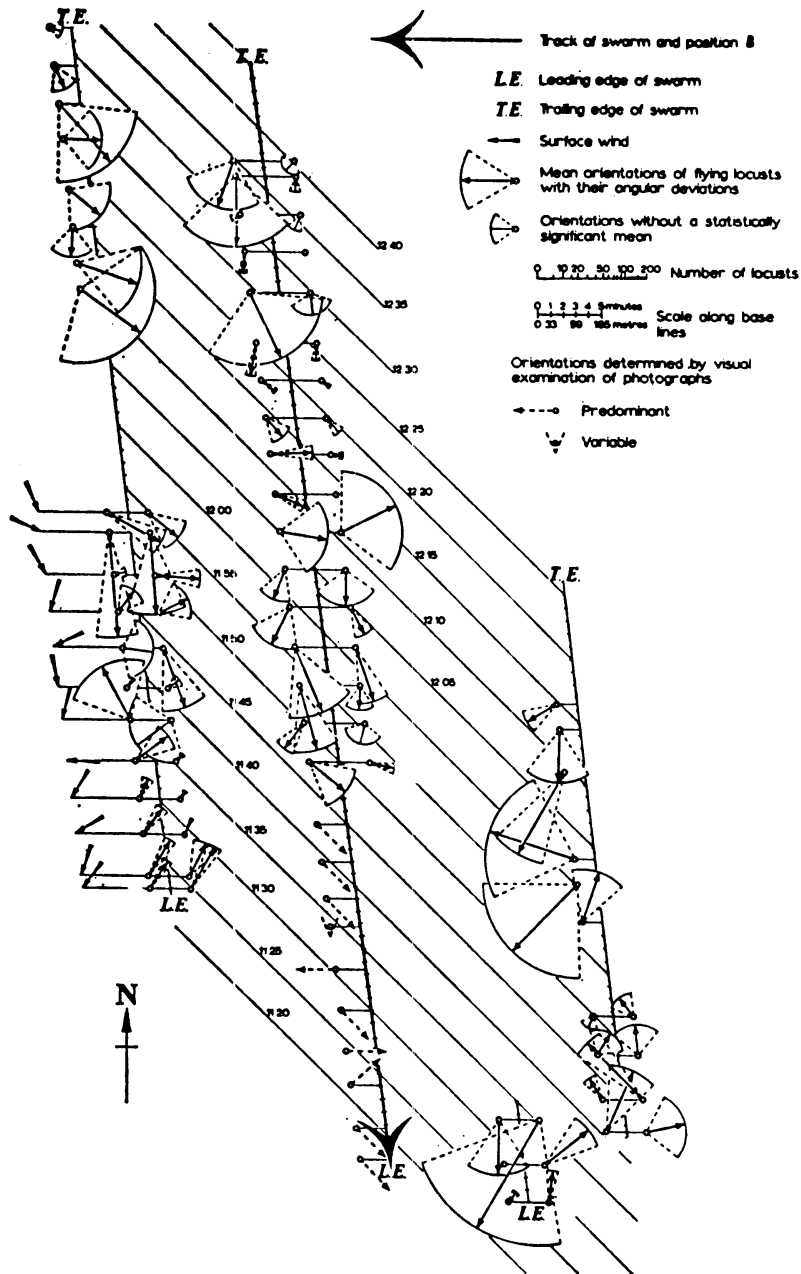
Swarm flying up to more than 900 m above ground +

## 2.7 Verplaatsings-snelheid en -richting van individuele zwermen t.o.v de wind.

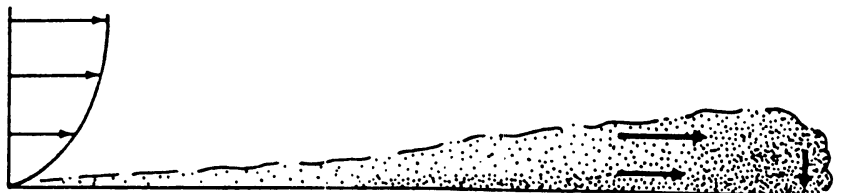
Ground speed of individual Desert Locust swarms in relation to wind speed (after Rainey 1963).



## 2.8 Verplaatsings snelheid van individuele zwermen t.o.v. de wind snelheid.



2.9 Oriëntaties van groepjes sprinkhanen aan de flanken en in het centrum van een zwerm (Waloff '72).



The distribution of desert locusts in a swarm carried along by the wind. They tend to settle at the front where the swarm is dense and take off when there are few above.

2.10 Schematische distributie van sprinkhanen in een laagvliegende zwerm (Scorer '78).

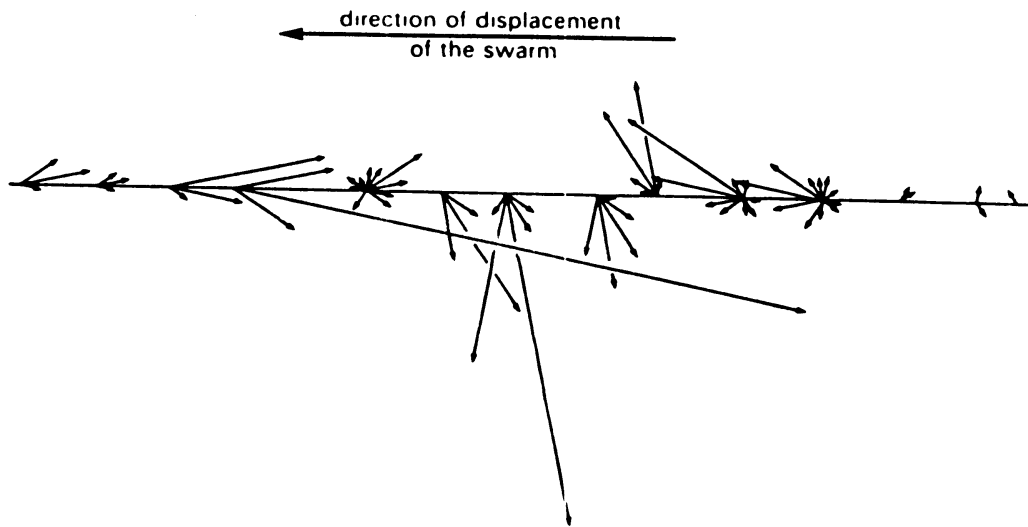
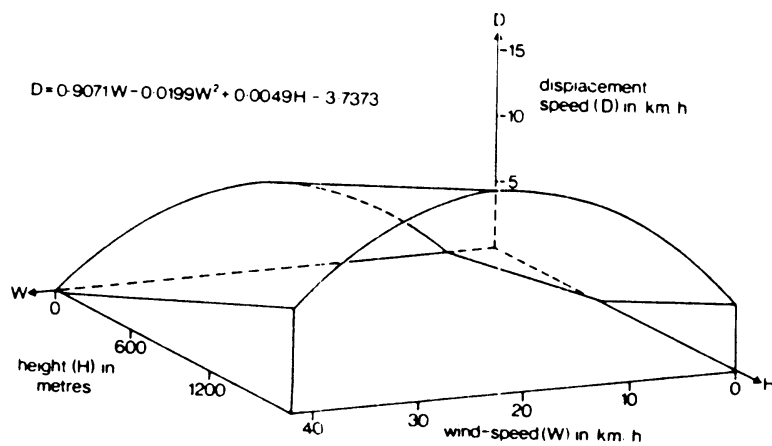


Diagram illustrating the orientations of individual locusts in a swarm, based on a series of photographs taken at intervals as the swarm passed overhead. The length of each arrow is proportional to the number of locusts orientated in the direction shown (from Haskell, 1960)

2.11 Oriëntatie van een passerende zwerm van onderaf gezien (D.L.F.M. vol. 1).



Relation between swarm displacement speed, wind speed and maximum height of flight (after Draper).

2.12 Relatie tussen zwermverplaatsings snelheid, wind snelheid en maximum hoogte van de vlucht (D.L.F.M. vol. 1).

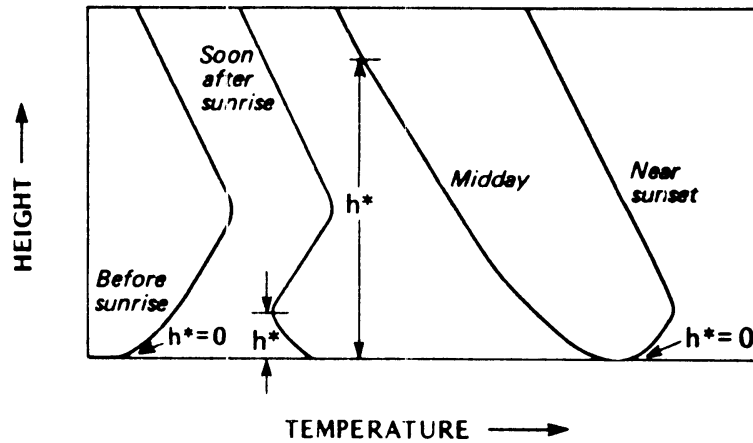


Figure 2.13 Generalized form of the air temperature profile in the boundary layer at several times on a day with fine weather at a rural location, including the depth of the surface mixed layer,  $h^*$  (modified after Shaw and Munn, 1971).

2.13 Gegeneralizeerde luchttemperatuur profielen in de grenslaag op verschillende tijdstippen van de dag (Oke '78).

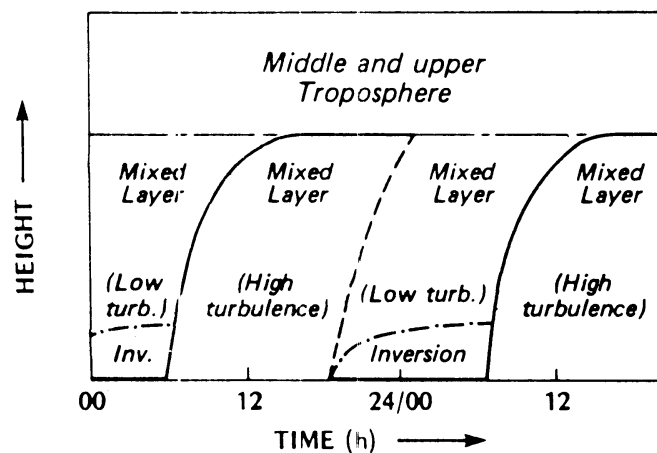


Figure 2.14 Schematic representation of the structure of the lower troposphere during a period of fine weather. The solid line shows the depth of the mixed layer,  $h^*$  (modified after Munn and Bolin, 1971).

2.14 Schematische weergave van de structuur van de grenslaag met daarin de aangroei van de menglaag (Oke '78).

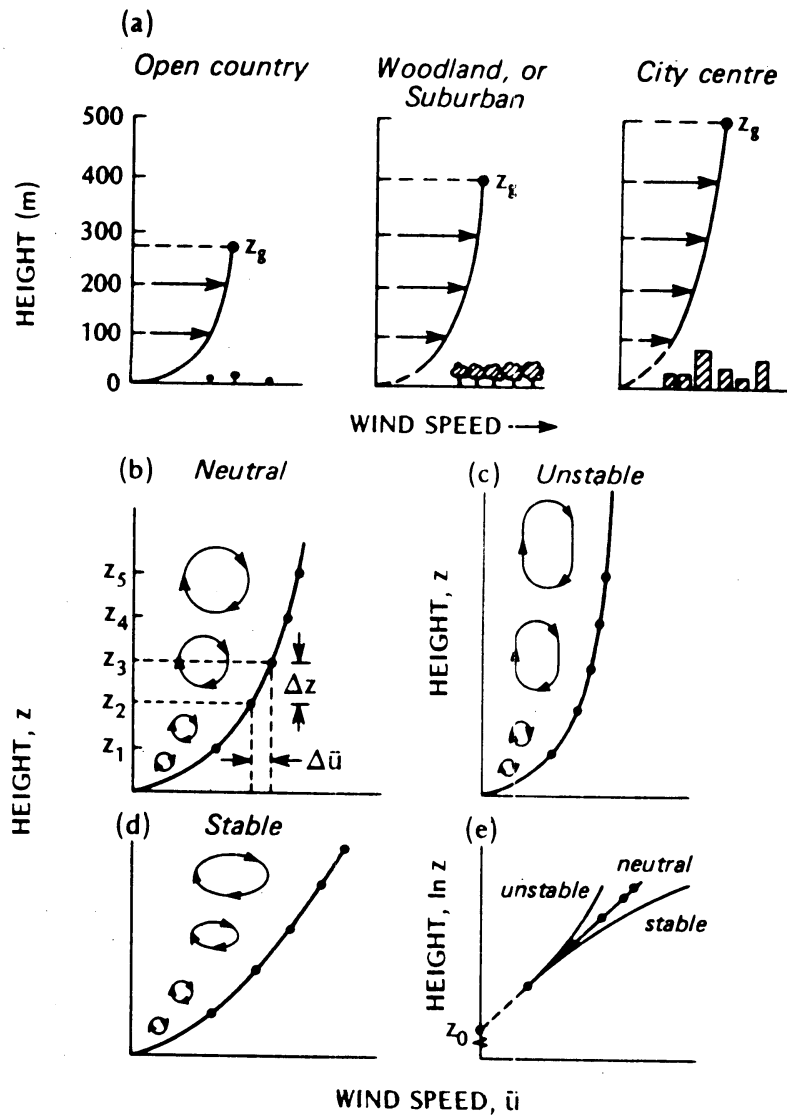
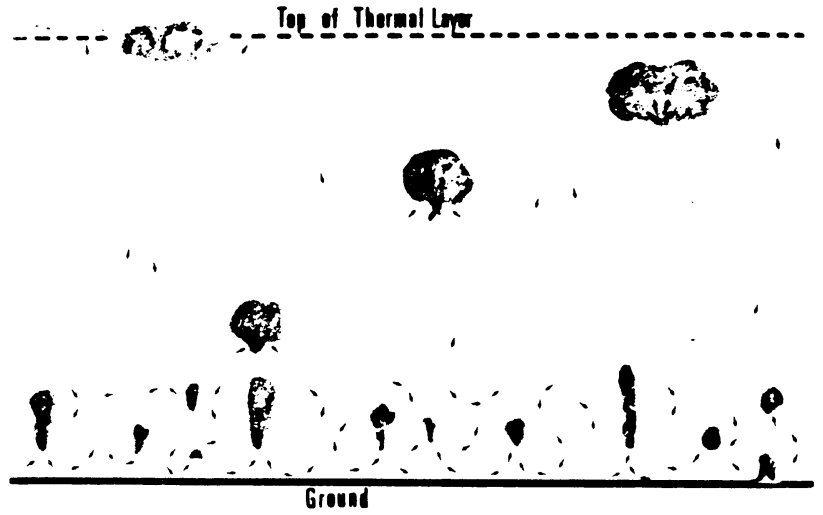


Figure 2.9 The wind speed profile near the ground including: (a) the effect of terrain roughness (after Davenport, 1965), and (b) to (e) the effect of stability on the profile shape and eddy structure (after Thom, 1975). In (e) the profiles of (b) to (d) are plotted with a natural logarithm height scale.

2.15 Het windsnelheids-profiel nabij het oppervlak onder invloed van (a) terreinruwheid en (b) stabiliteit. (Oke '78).

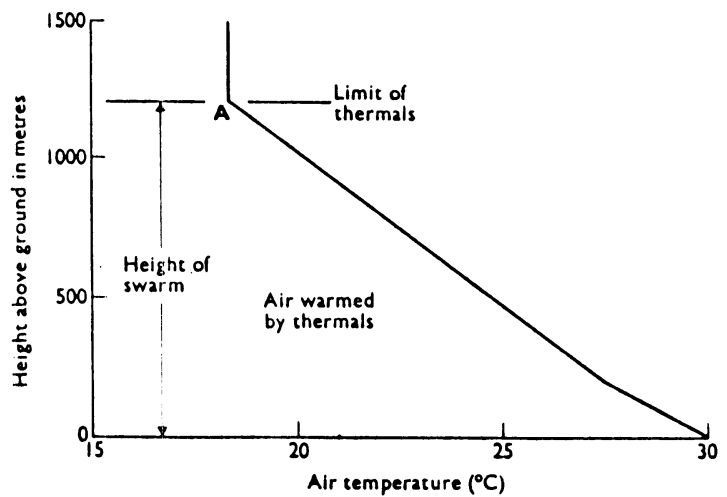
**Dry Thermals**



The nature of the thermal layer.

2.16b

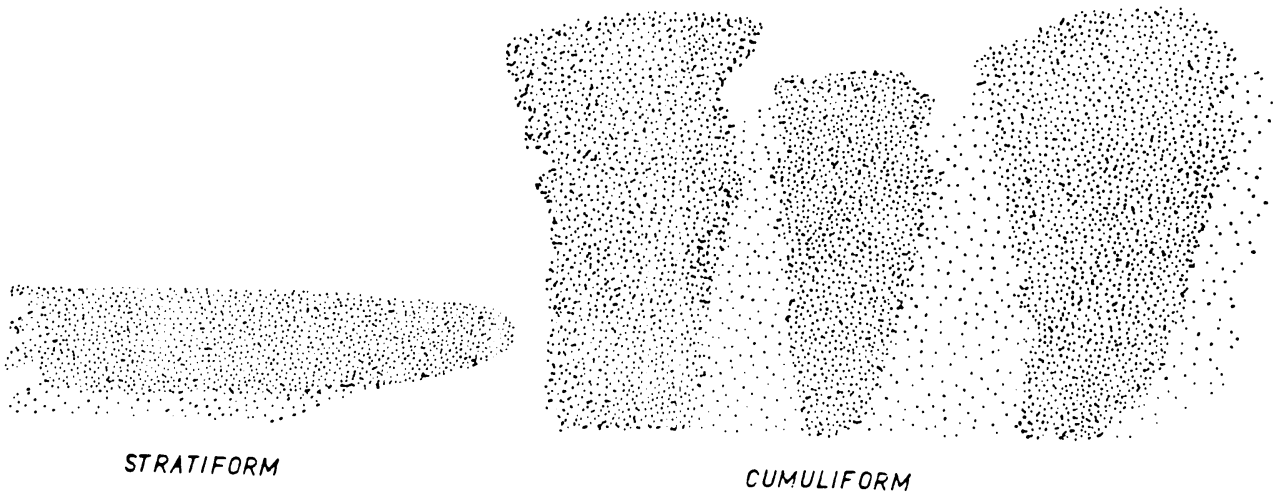
Schematisch overzicht van de onstabiele grenslaag met convectieve pluimen; "thermals" (Wallington '77).



The height of a cumuliform swarm of *Schistocerca* in relation to air temperature. Above point (A) the temperature is more or less constant; below it the air is warmed by thermals. The upper limit of the swarm roughly coincides with the upper limit of the thermals. (After RAINEY, R. C., 1958, *Q. Jl R. met. Soc.*, 84, 334-54.)

2.17 De hoogte van een cumuliforme zwerm in relatie met de luchttemperatuur.

2.16a Ontwikkeling van thermals.  
Zie ook 2.16b.



Seen in generally overcast weather conditions or in the late afternoon when the ground has cooled and convection has died down. Topmost locusts no more than about 300 feet above the ground.

Seen for the greater part of the day in sunny conditions. Caused by locusts being taken up sometimes to several thousand feet by convection currents. Continuously changing in appearance with changes in density of different parts of the swarm.

Large swarms generally fly higher than small ones.

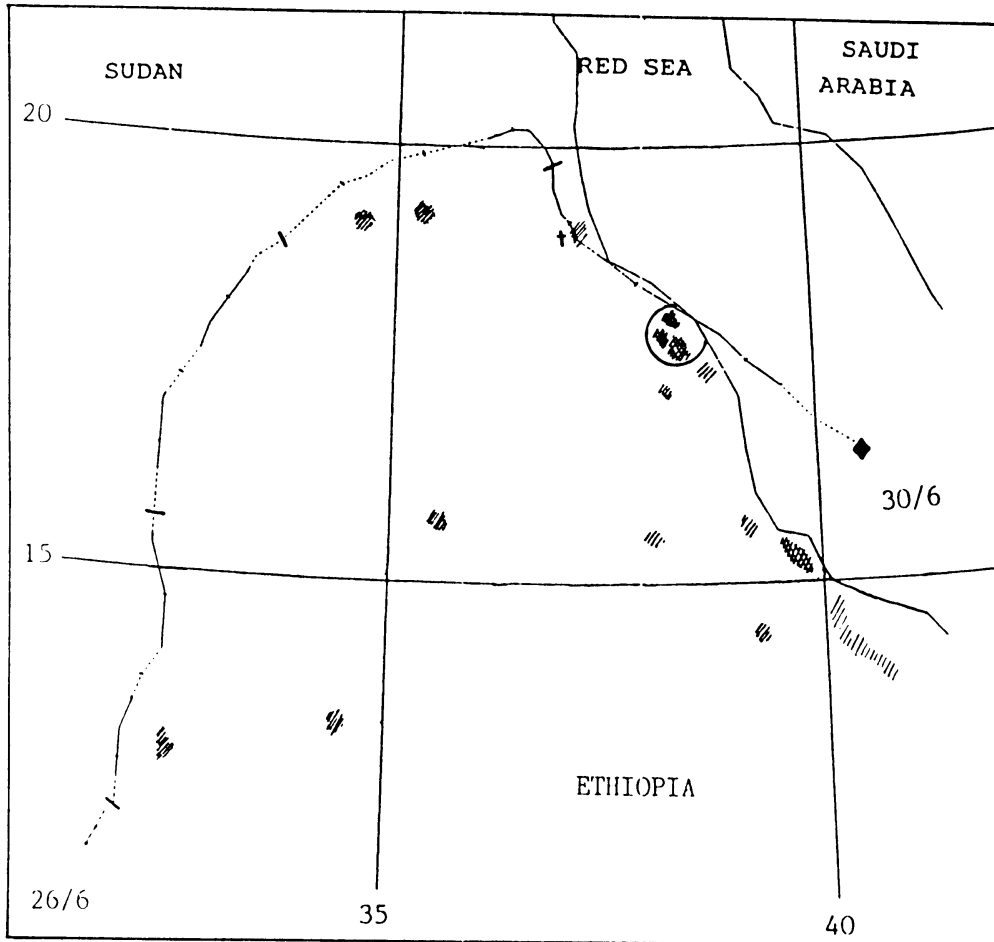
According to the weather conditions it experiences, a swarm may appear at one time as a very large single swarm and perhaps a few days later as several small swarms with scattered locusts between them.

2.18 Schematische weergave van laagvliegende (stratiforme) in hoogvliegende (cumuliforme) zwermen (Locust Handbook).



2.19 De gemiddelde maandelijkse variatie in de ligging van de Inter Tropische Convergentie Zone boven Afrika (Leroux '83).

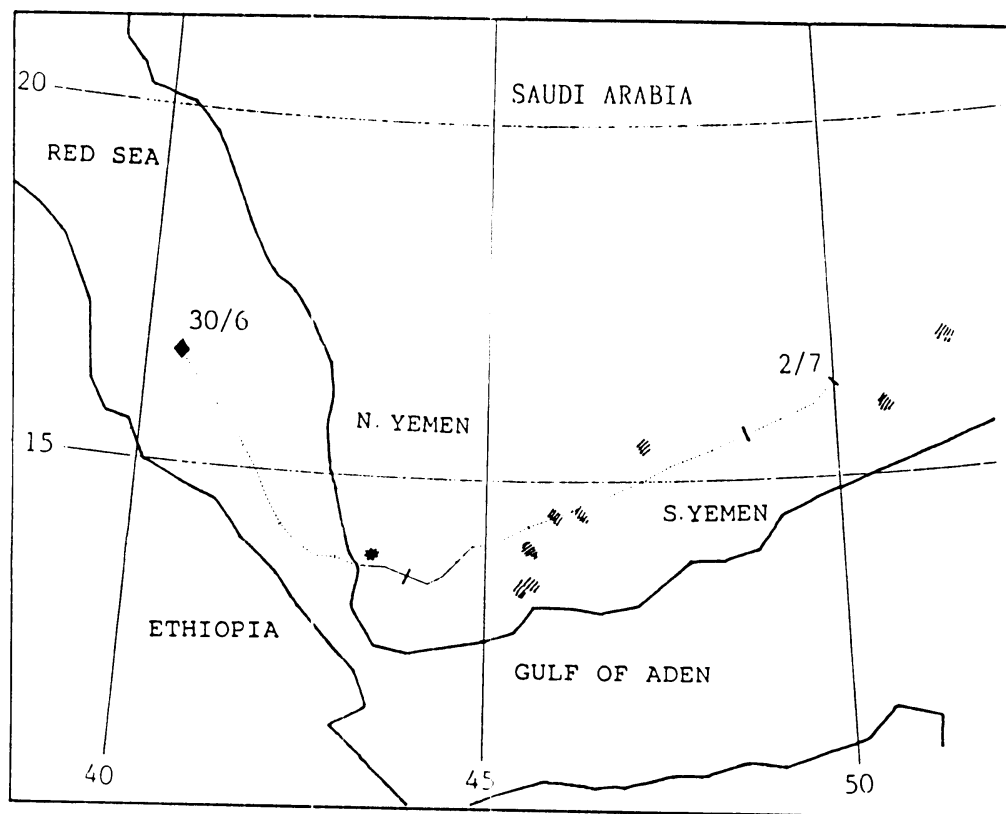




Vertrek: 30/06/'86 12.00 GMT, Aankomst 26/06/'86 06.00 GMT

- ◆ Zwerm
- /// Broedgebieden van de woestijnsprinkhaan
- ⊠ Broedgebieden van veld- en woestijnsprinkhaan combinatie
- † Bestrijdings maatregelen uitgevoerd
- Waarschijnlijk oorsprongsgebied van de zwerm

4.1 Achterwaartse trajectorie vanaf 1648N/4048E (30/06/'86, 12.00 GMT) berekend op geanalyseerde windvelden ('grondtracer').



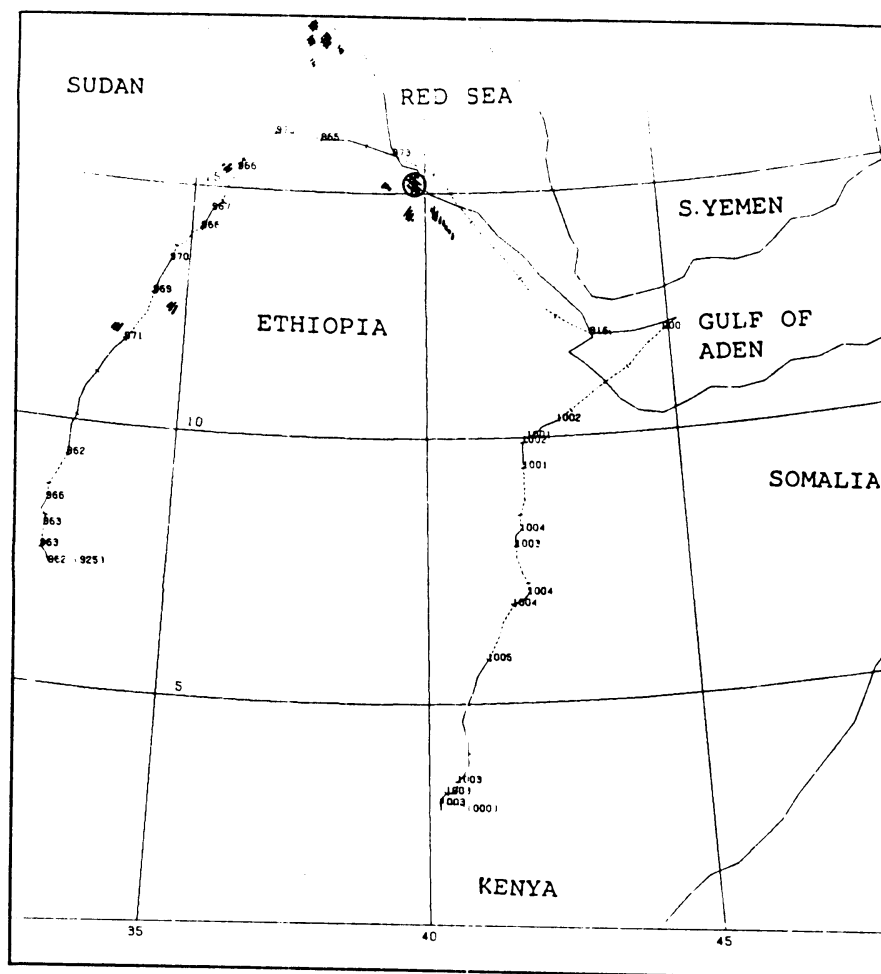
Vertrek: 30/06/'86 12.00 GMT, Aankomst 02/07/'86 18.00 GMT

◆ Zwerm

\* Zwerm gesignaleerd op 4-8-86 komend vanaf de Rode Zee.

/// Broedgebieden van de woestijnsprinkhaan

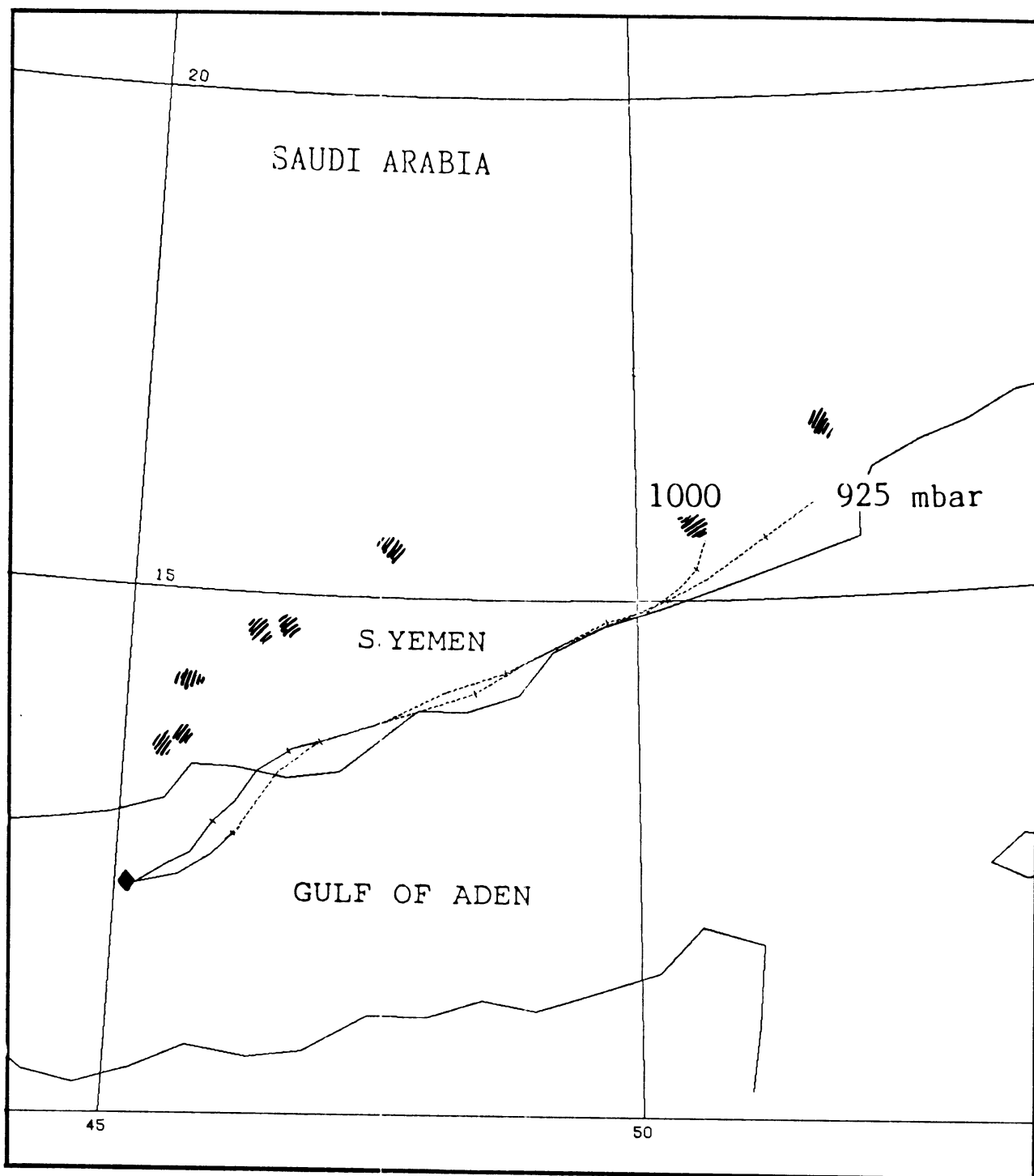
4.2 Voorwaartse trajectorie vanaf 1648N/4048E (30/06/'86, 12.00 GMT) berekend op geanalyseerde windvelden ('grondtracer').



Vertrek: 30/06/'86 12.00 GMT, Aankomst 26/06/'86 06.00 GMT

- ◆ Zwerm
- ≡ Broedgebieden van de woestijnsprinkhaan
- ⊕ Broedgebieden van veld- en woestijnsprinkhaan combinatie
- † Bestrijdings maatregelen uitgevoerd
- Waarschijnlijk oorsprongsgebied van de zwerm

4.3 Achterwaartse trajectoriën vanaf 1225N/4529E (01/07/'86, 10.00 GMT) berekend op geanalyseerde windvelden (grondtracering en 925 mbar niveau).

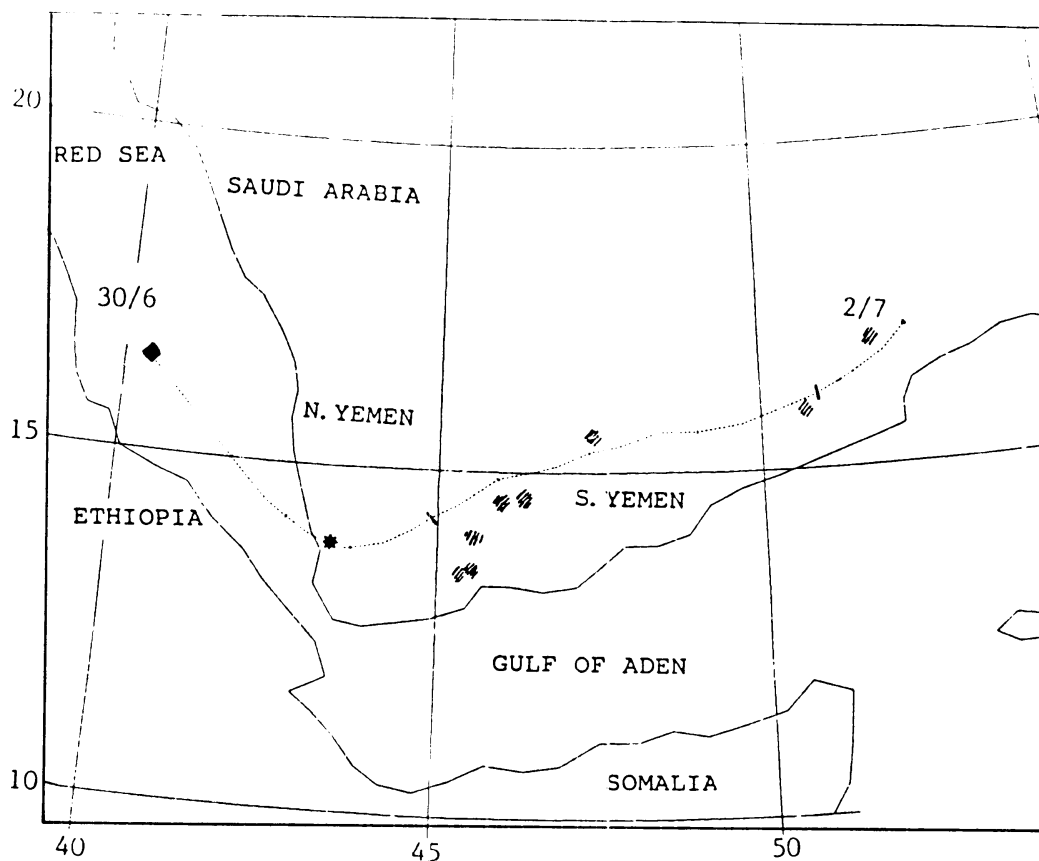


Vertrek: 01/07/'86 10.00 GMT, Aankomst 03/07/'86 14.00 GMT

◆ Zwerm

/// Broedgebieden van de woestijnsprinkhaan

4.4 Voorwaartse trajectoriën vanaf 1225N/4529E (01/07/'86, 10.00 GMT) berekend op geanalyseerde windvelden (grondtraceringen 925 mbar niveau).



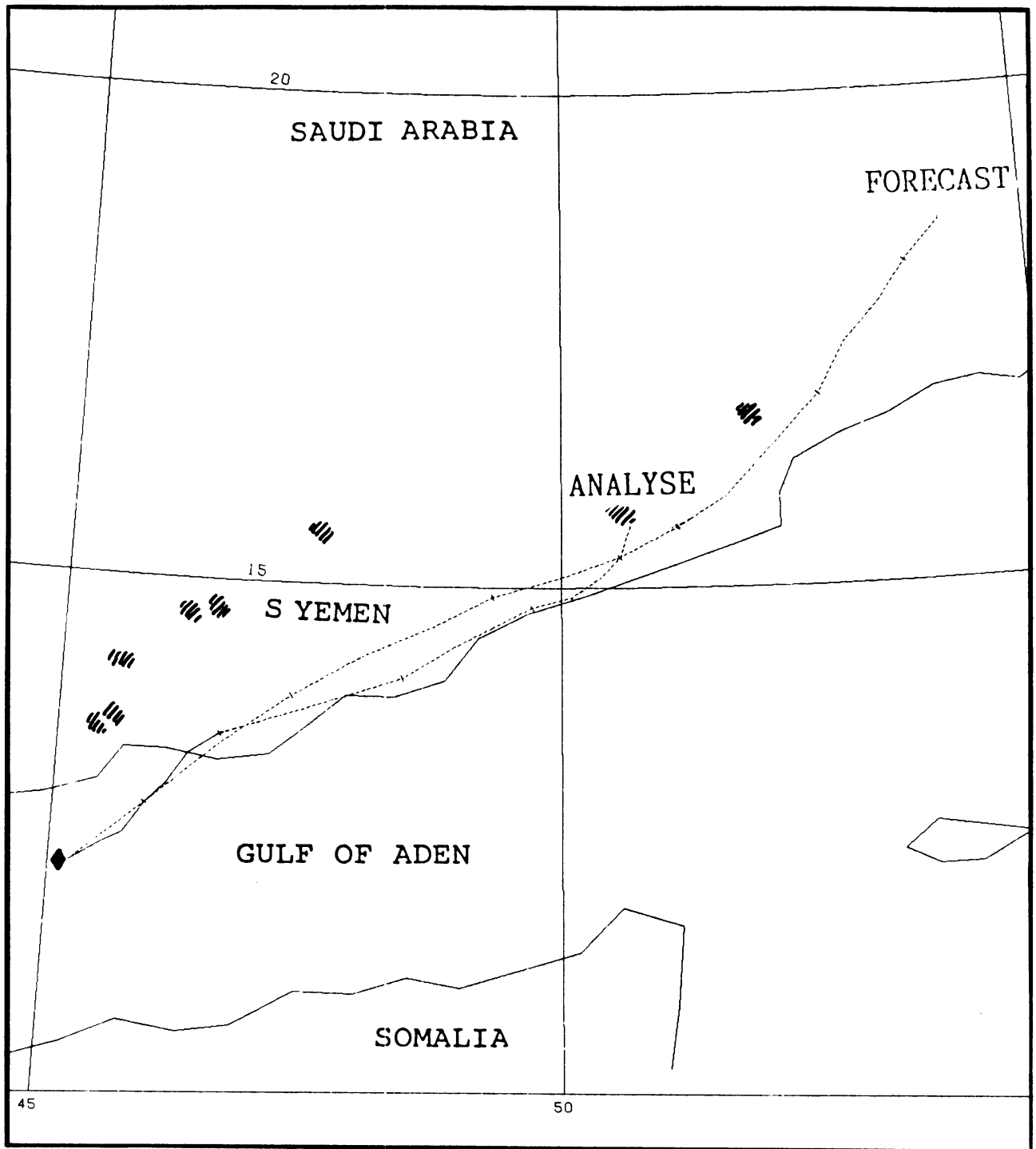
Vertrek: 30/06/'86 12.00 GMT, Aankomst 02/07/'86 18.00 GMT

◆ Zwerm

\* Zwerm gesignaleerd op 4-8-86 komend vanaf de Rode Zee.

// Broedgebieden van de woestijnsprinkhaan

4.5 Voorwaartse trajectoriën vanaf 1648N/4048E (30/06/'86, 12.00 GMT) berekend op voorspelde windvelden ('grondtracer'). Vergelijk met figuur 4.2

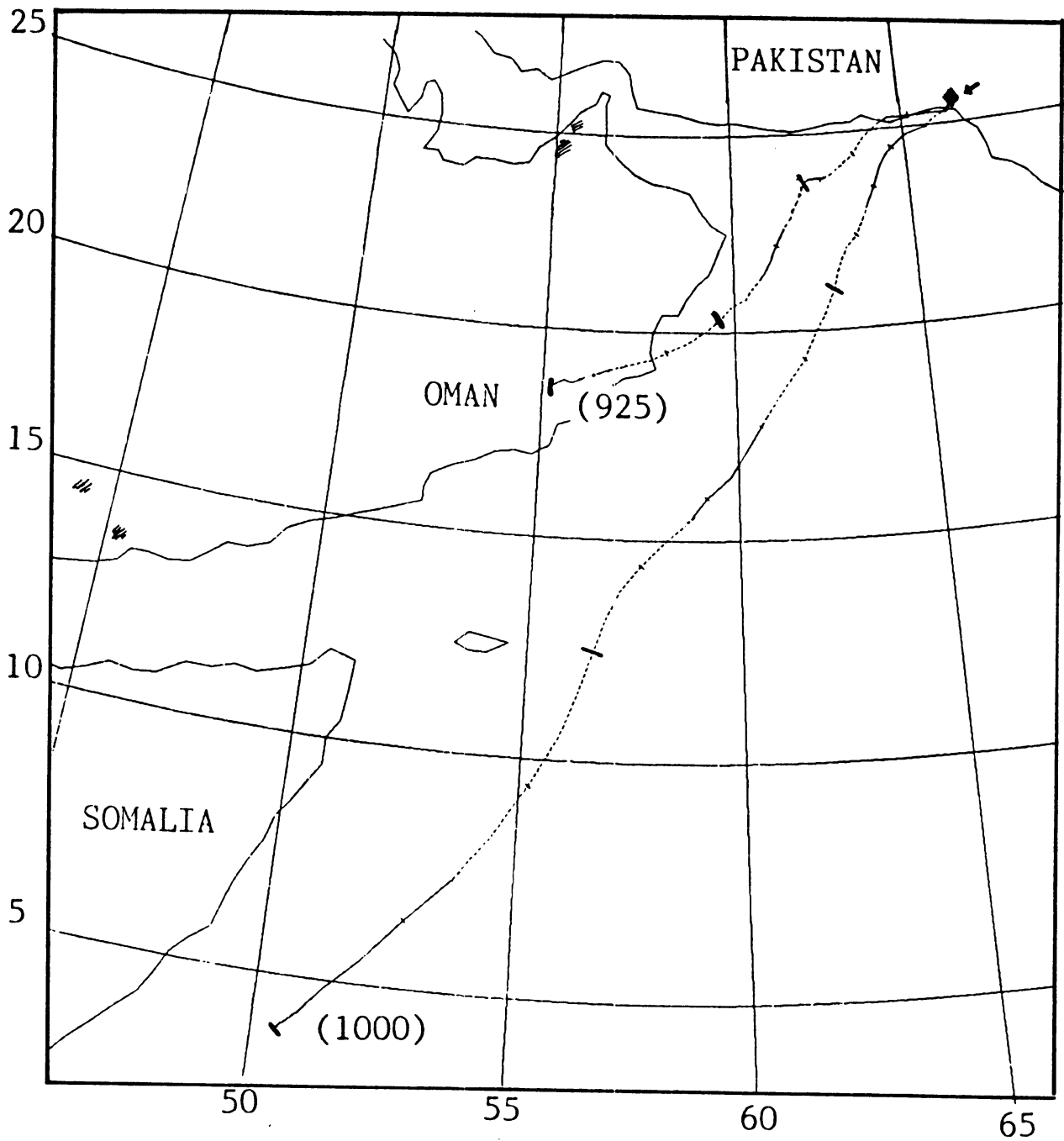


Vertrek: 01/07/'86 10.00 GMT, Aankomst 02/07/'86 18.00 GMT

◆ Zwerm

/// Broedgebieden van de woestijnsprinkhaan

4.6 Voorwaartse trajectoriën vanaf 1225N/4529E (01/07/'86, 10.00 GMT) berekend op geanalyseerde en voorspelde windvelden ('grondtracers').

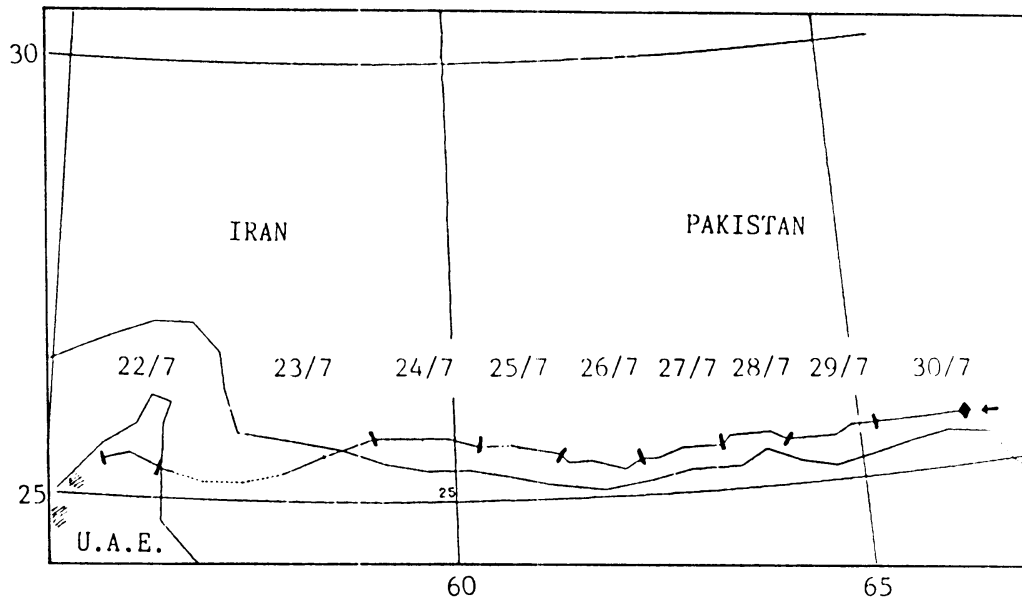


Vertrek: 30/07/'83 12.00 GMT, Aankomst 27/07/'83 04.00 GMT

◆ Zwerm

≡ Broedgebieden van de woestijnsprinkhaan

4.7 Achterwaartse trajectoriën vanaf 2535N/6636E (30/07/'83, 12.00 GMT) berekend op geanalyseerde windvelden (1000 mbar niveau en 925 mbar niveau).



Vertrek: 30/07/'83 12.00 GMT, Aankomst 22/07/'83 04.00 GMT  
 Trajectoriën berekend van 12.00 GMT tot 04.00 GMT  
 Geen zwermverplaatsing 's nachts

◆ Zwerm  
 // Broedgebieden van de woestijnsprinkhaan

4.8 Achterwaartse trajectoriën vanaf 2535N/6636E (30/07/'83, 12.00 GMT) berekend op geanalyseerde windvelden (925 mbar niveau, alleen overdag)



## REFERENTIES

- Boer, J.H. de 1987a. De biologie, en de epidemiologie van de woestijnsprinkhaan, *Schistocerca gregaria* (Forsk.): een literatuuroverzicht. Wageningen, LUW Entomologie, pp. 30.
- Bourke, A. 1985. Climate and diseases and pests of agriculture. The climatic scene. Tooley, M.J., and G.M. Sheail (ed.), Lond., Allan & Unwin, p. 255-278
- Casimir, M. and R.C. Bament 1974. An outbreak of the Australian plague locust, *Chortoicetes terminifera*, during 1966-67 and the influence of weather on swarm flight. *Anti-Locust Mem.* no 12.
- Chapman, R.F. 1976. A biology of locusts. Arnold, London *Studies in Biology*, p 67.
- Chapman, R.F. 1983. The insects. structure and function. third ed. Hodder & Stoughton, London, p 271-302.
- Desert Locust Forecasting Manual 1981. Pedgley, D. (ed.) C.O.P.R., London, vol. 1 & 2, pp. 247.
- FAO situation, summary and forecasting bulletins 1983 and 1986. FAO, no. 53-60 and 92-98.
- Green, J.S.A. and M.F. Quin 1986. Levitation by convection: Does what goes up necessarily come down? *Weather* 41, p. 110-114.
- Holtslag, A.A.M. and A.P. van Ulden 1983. A simple scheme for daytime estimates of the surface fluxes from routine weather data. *J. Clim. Appl. Meteor.* 22, p. 517-529.
- Haltiner, G.J. 1971. Numerical weather prediction. N.Y. etc, Wiley, 1st ed..
- Locust Handbook, the. 1966. Lond. Anti-Locust Research Centre.
- Leroux, M. 1983. Le climat de l'Afrique tropicale. Paris, Champion, afbeelding. 23.
- Mohanty, U.C. et al. 1985. Impact of modified physical processes on the tropical simulation in the ECMWF model. Reading, ECMWF tech. rep. 52, pp. 47.
- Oke, T.R. 1978. Boundary Layer climates. Methuen, London, pp. 372
- Pedgley, D. 1982. Windborne pests and diseases: meteorology of airborne organisms. Ellis Horwood, Chichester, pp. 250.
- Rainey, R.C. 1951. Weather and the movements of locust swarms: A new hypothesis. *Nature*, London, 168, p. 1057-1060.
- Reiff, J. et al. 1984. An air mass transformation model for short-range weather forecasting. *Monthly Weather Rev.* 112, p 393-412.
- Reiff, J. et al. 1986. African dust reaching northwestern Europe: a case study to verify trajectory calculations. *J. Clim. Appl. Meteor.* 25, p. 1543-1567.
- Riehl, H. 1979. Climate and weather in the tropics. Acad. Press, London, p 611.
- Roffey, J. 1963. Observations in night flight of the Desert Locust. *Anti-Locust Bull.*, London, 39, pp. 32.
- Roffey, J. 1982. The Desert Locust upsurge and its termination 1977-79. Field Research Stations, FAO, AGP/DL/TS/23 p. 1-74.

- Rose, D.J.W. et al. 1985. Downwind migration of the African armyworm moth, *Spodoptera exempta*, studied by mark-and-capture and by radar. *Ecol. Entomology* 10, p. 299-313.
- Rosier, P.W. et al. 1983. Het gebruik van trajectoriën bij een korte-termijn verwachting. *KNMI T.R.* 35, pp. 36.
- Schaefer, G.W. 1976. Radar observations of insect flight. *Insect Flight: Sym. R. ent. Soc. London*, 7, p. 157-197.
- Scorer, R.S. 1978. *Environmental aerodynamics*. Chichester, Ellis Horwood pp. 487, p. 443-460.
- Tucker, C.J. et al. 1985. The potential of satellite remote sensing of ecological conditions for survey and Forecasting desert-locust activity. *Int. J. Remote Sensing* 6, p. 127-138.
- Wallington, C.E. 1977. *Meteorology for glider pilots*. London, Murray 3rd ed., p. 128-142.
- Waloff, Z. 1972. Orientation of flying locusts, *Schistocerca gregaria* (Fors.), in migrating swarms. *Bull. ent. Res.* 62, p. 1-72.
- World Meteorological Organization 1963. *Meteorology and the Migration of Desert Locusts: Application of synoptic meteorology in locust control*. R.C.Rainey WMO Tech. Note 54. pp. 115.
- World Meteorological Organization 1965. *Meteorology and the Desert Locust*. WMO Tech. Note 69. pp 310.