

**KONINKLIJK NEDERLANDS  
METEOROLOGISCH INSTITUUT**

WETENSCHAPPELIJK RAPPORT

SCIENTIFIC REPORT

W. R. 79-10

W. Kohsiek

Een stomataire weerstandsmeter



---

De Bilt, 1979

Publikationsnummer: K.N.M.I. W.R. 79-10 (M.O.)

U.D.C. 551.508.79 :  
551.573

## INHOUD

### SAMENVATTING

### SUMMARY

1.	INLEIDING	1
2.	BESCHRIJVING VAN APPARATUUR EN MEETMETHODEN	6
2.1	De stomataire doos	6
2.2	Twee meetprincipes	8
2.2.1	De instationaire methode	8
2.2.2	De stationaire methode	9
2.3	Meetsystemen	9
3.	DE INSTATIONAIRE METHODE	11
3.1	Theorie en praktijk	11
3.2	Resultaten	17
3.2.1	Gevoeligheid voor $T_0$	17
3.2.2	Gevoeligheid voor de circulatiesterkte	18
3.2.3	Meting op verschillende plaatsen	19
4.	DE STATIONAIRE METHODE	24
4.1	Theorie en praktijk	24
4.2	Resultaten	28
4.2.1	Verandering van vochtdeficit	28
5.	VERGELIJKING TUSSEN DE STATIONAIRE EN DE INSTATIONAIRE METHODE	30
6.	VERGELIJKING VAN DE STOMATAIRE WEERSTAND VOLGENS DE STOMATAIRE DOOS MET DIE VOLGEND UIT ENERGIEBALANSMETINGEN	35
6.1	Bepaling van $r_{st}$ uit energiebalansmetingen en weerstand-model	35
6.2	Vergelijking met de stomataire doos	38
	CONCLUSIE	41
	DANKWOORD	41
	APPENDIX: Een nadere beschouwing van de energiehuishouding van de stomataire doos	43
	1. De instationaire methode	43
	2. De stationaire methode	50
	LITERATUUR	53
	SYMBOLENLIJST	54

## SAMENVATTING

Onderwerp van dit rapport is een apparaat waarmee op eenvoudige wijze de stomataire weerstand van een gewas met geringe hoogte kan worden gemeten. Het apparaat is in essentie een doos, welke met de open zijde op het gewas wordt geplaatst. De lucht in de doos wordt krachtig gecirculeerd. Er kan op twee manieren met de doos worden gewerkt: een gesloten, of een open systeem. In het eerste geval is de doos (op de gewaszijde na) geheel gesloten en wordt de toename van de waterdampconcentratie in de doos gemeten, en daaruit de stomataire weerstand bepaald; in het tweede geval wordt er lucht van buiten door de doos gevoerd en volgt de stomataire weerstand uit het verschil in waterdampconcentratie tussen de aangevoerde en afgevoerde lucht, alsmede het debiet van de luchtstroming. De eerste methode verdient de voorkeur voor routinematige bepalingen van de stomataire weerstand.

Een vereenvoudigde beschrijving van de zich afspelende processen wordt gegeven en de bepalingen van de stomataire weerstand volgens beide methoden worden met elkaar vergeleken. Bovendien worden metingen van de stomataire weerstand met het gesloten systeem vergeleken met bepalingen uit de energiebalansmetingen. In een Appendix wordt de energieuishouding van de zgn. stomataire doos nader beschouwd als aanvulling op de vereenvoudigde beschrijving.

## SUMMARY

In this report a method is described for measuring the bulk stomatal resistance of a surface covered with short grass. Basically, the principal of operation is that of a chamber method, which is a frequently used device for measuring the gas transfer across the crop-atmosphere interface (e.g. Louwse and Van Oorschot, 1969, and Matthias et al., 1973). Using this principle, it is possible to get an estimate for the resistance to water vapour transport between the stomatal chambers in the leaves and the atmosphere of the measuring device. This resistance may be seen as the sum of the bulk stomatal resistance of the crop under the chamber, and the resistance for the transport from the surface of the leaves to the chamber atmosphere. We have tried to reduce the latter resistance to a much lower value than the stomatal resistance by circulating the air in the chamber fiercely, and arrived at a value of 10-20  $\text{sm}^{-1}$ ; for the stomatal resistance a value of 50-200  $\text{sm}^{-1}$  is typical.

We used a perspex chamber with a surface area of 0.194  $\text{m}^2$  and a volume of 0.120  $\text{m}^3$ . The chamber could be operated in an open, as well as in a closed condition. In the first version, the evaporation from the crop surface is deduced from the difference between water vapour concentrations in the air flowing continuously into the chamber, and in the inside (stationary method); for the closed-chamber system, the vapour flux is derived from the measured rate of change of water vapour concentration with time (non-stationary method). In order to arrive at the resistance for the water vapour transport, for both cases a value for the crop-surface temperature has to be estimated. This parameter is the main source of uncertainties for the two methods. The evaluation of the surface temperature has therefore received much attention in this report.

The results from the open and closed chamber method are compared with each other, and with the bulk stomatal resistance derived from field measurements of the evaporation with Bowen's ratio, together with a model for transport resistances in the natural atmosphere. A reasonable agreement was found. From this it is concluded that both methods give a stomatal resistance that may be successfully used in a Penman-Monteith model for evaporation. From the operational point of view, the closed-chamber method is to be preferred. In contrast to the alternative, this method requires only very little auxiliary apparatus: only sensors and registration for the temperature and humidity inside the chambers are needed. We used a thermocouple psychrometer for this purpose (a dew-point hygrometer was also used, but this instrument hampers the handling of the system). It was found that the measuring of temperature and humidity at only two properly chosen points of time (we chose 9 and 27 seconds after placing the chamber on the grass) is needed for the evaluation of the stomatal resistance. The open-chamber method requires an operating time of about 2 minutes instead.

The results with the chamber are obtained on the basis of simple theory on the physical processes involved. For instance, in the theory of the open-chamber method it is assumed that the surface temperature does not change with time. Experimentally, it was found that this assumption does not hold. Therefore, a more complete description of the processes has been set up in the Appendix. It is found, however, that the crude approximations in the simple theory do not introduce very significant errors in the stomatal resistance derived with it.

## 1. INLEIDING

Het transport van waterdamp uit de plant naar de atmosfeer geschiedt grotendeels via kleine poriën in het bladoppervlak, de stomata of huidmondjes, die de sub-stomataire holten met buiten verbinden. De weerstand, die deze huidmondjes aan het waterdamptransport bieden, is in grootte vergelijkbaar met de weerstand die de waterdampstroom ondervindt gaande van het bladoppervlak naar een referentieniveau in de atmosfeer (op bijv. 2 m hoogte). Het zgn. weerstandenmodel van het waterdamptransport geeft een fysische beschrijving, waarbij een weerstand van een bepaald gedeelte van de transportketen is gedefinieerd als de verhouding tussen het verschil in waterdamconcentratie aan het begin en einde van dat gedeelte, en de waterdampstroomdichtheid. Het is gebruikelijk de waterdamconcentratie in kg water per m<sup>3</sup> lucht uit te drukken, en de waterdampstroomdichtheid in kg m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>. De weerstand heeft dan de dimensie sm<sup>-1</sup>.

Aangezien wij geïnteresseerd zijn in de verdamping van oppervlakken, welke groot zijn ten opzichte van de afmetingen van de gewaselementen, beschouwen wij de weerstanden zoals die ons gemiddeld over een oppervlak (en gemiddeld over een bepaalde periode in de tijd, bijv. een half uur) aan ons voordoen. In het eenvoudige weerstandenmodel veronderstellen we vervolgens dat we het gewasoppervlak a.h.w. kunnen platslaan tot een twee-dimensionaal oppervlak met een temperatuur T<sub>o</sub>. Verder veronderstellen we dat de waterdamp in de sub-stomataire holten verzadigd is bij temperatuur T<sub>o</sub>. De waterdampstroom vanuit het gewas is nu:

$$E = \frac{\rho_s^w(T_o) - \rho^w(z)}{r_{ST} + r_E} \quad (1)$$

Hierin is E de waterdampstroomdichtheid (in kg m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>),  $\rho_s^w(T_o)$  de (verzadigde) waterdamconcentratie in de sub-stomataire holten (kg m<sup>-3</sup>),  $\rho^w(z)$  de waterdamconcentratie op hoogte z, r<sub>ST</sub> de zgn. stomataire weerstand, gemiddeld

over een oppervlak, en  $r_E$  de weerstand voor het waterdamptransport van het bladoppervlak naar het referentieniveau.  $r_{ST}$  wordt ook wel aangeduid als de gewasweerstand of de oppervlakteweerstand, ter voorkoming van verwarring met de stomataire weerstand van een enkel blad. De grootte van  $r_{ST}$  ligt, voor gras, tussen ca. 20 en ca. 200  $sm^{-1}$ . De weerstand  $r_E$  hangt onder andere af van de windsnelheid, en ligt tussen ca. 20 en ca. 100  $sm^{-1}$ .

De bepaling van  $r_{ST}$  is niet eenvoudig. Een mogelijkheid is de stomataire weerstand van afzonderlijke bladeren te bepalen met een porometer (zie bijv. Stigter en Lammers, 1974), en dan een gemiddelde, gewogen over verschillende gewaslagen, voor een oppervlakte-eenheid vast te stellen. Deze methode is zeer tijdrovend en voor gras praktisch onuitvoerbaar. Een andere, indirecte methode is de volgende: de verdamping van het gewas wordt gemeten (op zichzelf geen eenvoudige zaak), de oppervlaktetemperatuur wordt gemeten of berekend, en de grootte van  $r_E$  wordt bepaald met behulp van (semi-)empirische uitdrukkingen. Dan kan uit verg. (1)  $r_{ST}$  worden bepaald. Deze procedure heeft het nadeel dat onnauwkeurigheden in de schakels ervan tot aanzienlijke fouten in  $r_{ST}$  kunnen leiden. Bovendien zou mogelijk ook een niet-reële afhankelijkheid van  $r_{ST}$  van meteorologische parameters (zoals de windsnelheid en het vochtdeficit) geïntroduceerd kunnen worden. Deze indirecte methode passen wij toe op de energiebalansmetingen te Cabauw.

Een derde mogelijkheid ter bepaling van de stomataire weerstand is de in dit rapport gepresenteerde. In principe komt de methode hierop neer, dat over een stukje gewas een doorzichtige doos wordt geplaatst, en de verdamping van het gewas alsmede de oppervlaktetemperatuur uit meting van vochtigheid en temperatuur van de lucht in de doos worden bepaald. Tijdens de meting wordt de lucht in de doos krachtig gecirculeerd. Met verg. (1) is dan  $r_{ST}$  te berekenen ( $r_E$  wordt verwaarloosbaar klein t.o.v.  $r_{ST}$  verondersteld). Het meetprincipe lijkt dus op dat van een bladporometer, met dit grote verschil dat hier de gemiddelde stomataire weerstand van een groot aantal bladeren wordt bepaald. De



toepassing van een doos of een kamer om de uitwisseling van gassen tussen een gewas of de bodem met de lucht erboven te onderzoeken is niet nieuw (Louwerse en Van Oorschot, 1969, en Matthias et al., 1978), maar een eerdere toepassing om er de stomataire weerstand mee te meten is ons niet bekend. Een voordeel van deze methode boven de indirecte methode zoals hiervoor beschreven, is dat de meting weinig gecompliceerd is (een niet-trage natte en droge bol thermometer is voldoende) en dat de apparatuur van bescheiden omvang is, zodat verschillende (korte) gewassen binnen een kort tijdsbestek bemeten kunnen worden. De methode biedt de mogelijkheid de momentane verdamping van een gewas op snelle wijze te bepalen, gebruik makende van het Penman-Monteith concept (verg. (23)). (Voor toepassing van de Penman-Monteith formule moeten onder meer de grootte van de nettostraling, bodemwarmtestroom, windsnelheid, temperatuur, luchtvochtigheid en de stomataire weerstand bekend zijn).

Vergelijking van stomataire weerstanden bepaald volgens de indirecte methode en volgens de laatste methode kan verder het inzicht in de fysische betekenis van de "indirecte"  $r_{ST}$  verdiepen (bijv. de vraag of de door ons geconstateerde correlatie tussen  $r_{ST}$  en het vochtdeficit veroorzaakt wordt door openen of sluiten van de huidmondjes, of door gewijzigde temperatuur- en vochtprofielen in het gewas, waardoor de middeling van de weerstanden der afzonderlijke huidmondjes verandert).

In dit rapport worden twee werkwijzen met de "stomataire doos" besproken en vergeleken, nl. een stationaire methode, waarbij de doos open is en lucht van buiten constant door de doos wordt gevoerd, en een instationaire methode, waarbij de doos dicht is (op de bodem na). In het eerste geval volgt de verdamping uit het verschil in waterdamconcentratie van de aan-gevoerde en afgevoerde lucht, en het verversingsdebiet, in het tweede geval uit de toename van de waterdamconcentratie in de doos met de tijd.

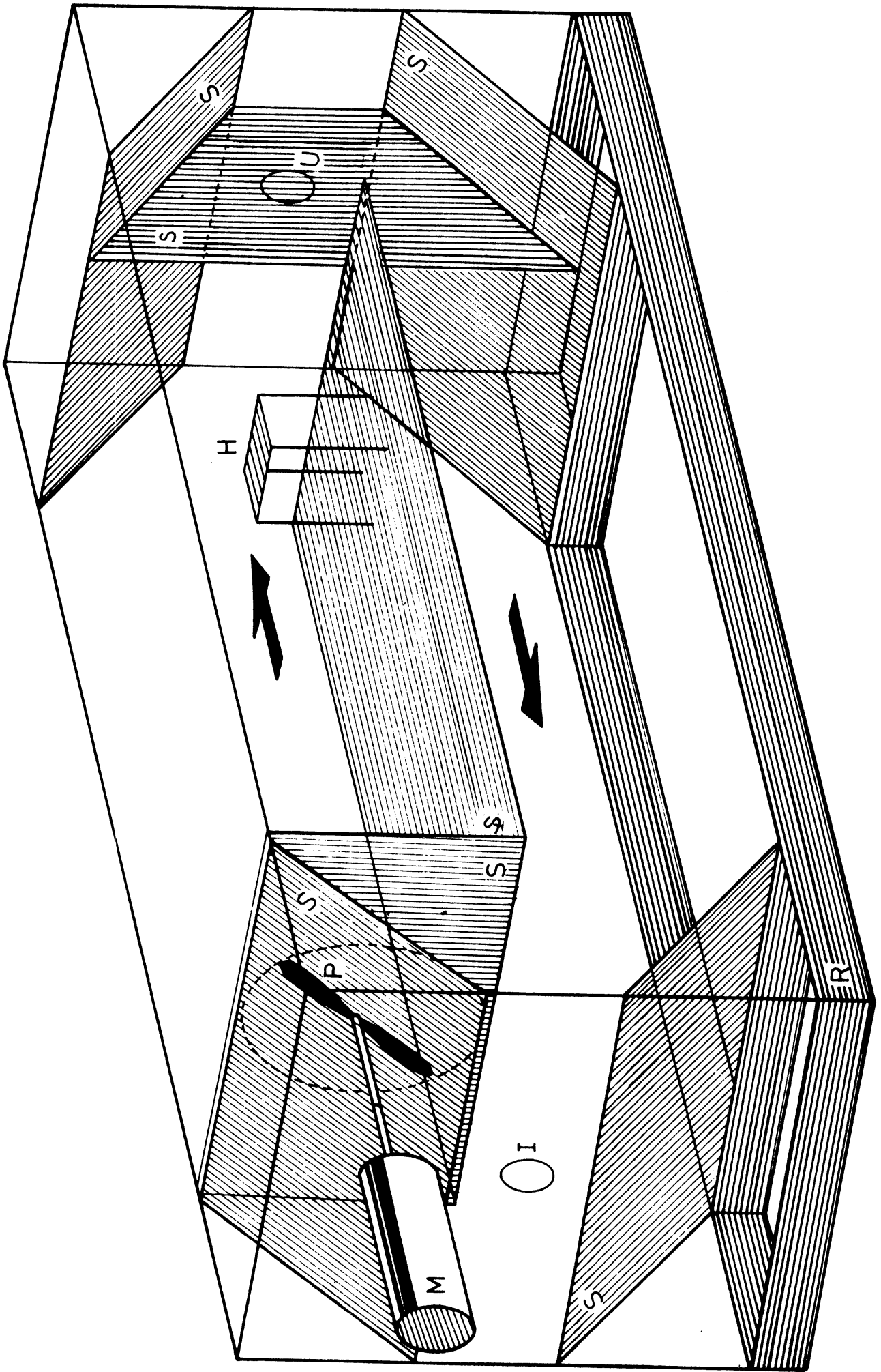


Fig. 1 Schets van de stomataire doos. De wanden zijn van perspex, evenals de schotten S, die een gelijkmatige verdeling van de luchtstroming over het gewasoppervlak beogen te bewerkstelligen. De uitwendige elektromotor M drijft propeller P aan. De richting van de luchtstroming is aangegeven. In de houder H kunnen thermokoppels worden aangebracht voor meting van de luchttemperatuur en vochtigheid. Thermokoppeldraden en dergelijke worden door de doorvoeren D buiten de doos gebracht. De openingen I en U dienen voor de toe- en afvoer van lucht bij de stationaire methode. Bij de instationaire methode zijn ze afgedicht. Door opening U werd incidenteel de oppervlaktetemperatuur met een stralingsthermometer gemeten. De doos is aan de onderzijde voorzien van een scherpe metalen rand R. De uitwendige afmetingen zijn:  $80 \times 44 \times 40 \text{ cm}^3$  (lengte x breedte x hoogte); het effectieve bodemoppervlak bedraagt  $0.194 \text{ m}^2$  en het nuttige volume  $0.120 \text{ m}^3$ .

Fig. 1 Draft of the stomatal chamber. The walls as well as the partitions S are made of perspex. The function of the partitions is to promote a uniform flow of air over the crop surface. The propeller P is driven by the external electromotor M. The direction of the air flow is indicated. Thermocouples for measuring the air temperature and humidity are mounted in holder H. The wires and other supplies are brought to the outside through feed-throughs D. In the stationary mode, air from the outside is blown into the chamber through opening I. The air leaves the chamber through the bottom and opening U. In the non-stationary mode, openings I and U are closed. Measurements of the surface temperature by radiation thermometry were made through opening U (only incidentally). The chamber is provided at the bottom with a sharp metal rim R. The outward dimensions are:  $80 \times 44 \times 40 \text{ cm}^3$  (length x breadth x height), the effective surface area is  $0.194 \text{ m}^2$  and the effective volume  $0.120 \text{ m}^3$ .

## 2. BESCHRIJVING VAN APPARATUUR EN MEETMETHODEN

### 2.1 De stomataire doos

Een schets van de stomataire doos is gegeven in fig. 1. De doos is van perspex, met uitwendige afmetingen: 80 cm lang, 44 cm breed en 40 cm hoog. De lucht in de doos wordt gecirculeerd d.m.v. een propellor, aangedreven door een elektromotor, welke tegen een zijwand van de doos is gemonteerd. In de doos zijn enkele schotten aangebracht om de luchtstroming in de doos te geleiden. De bodem van de doos is open, zodat een (gewas) oppervlak van  $0.194 \text{ m}^2$  vrijgelaten wordt. De nuttige inhoud van de doos is  $0.120 \text{ m}^3$ . In de voor- en achterkant van de doos is een gat gemaakt om, indien gewenst, lucht van buiten door de doos te voeren. De wanden van de doos absorberen in zekere mate waterdamp maar de hoeveelheden zijn bij de gegeven dimensionering van de doos te verwaarlozen. Verder mag er geen condensatie aan de wanden optreden.

Zoals in paragraaf 3.1 zal blijken, is een goede wisselwerking tussen de lucht in de doos en het gewas belangrijk. De uitwisseling van warmte en waterdamp zal des te beter zijn naarmate de snelheid van de lucht boven het gewas groter is. Om althans enige maat voor de wisselwerking te verkrijgen, is op negen plaatsen in de doos de (kunstmatige) windsnelheid gemeten. De metingen geschieden op ca. 10 cm boven een grasoppervlak met een verwarmde NTC weerstand (principe van een hittedraad-anemometer). De resultaten van de metingen zijn weergegeven in fig. 2, met als parameter de klemspanning op de elektromotor. Het blijkt dat de windsnelheidsverdeling globaal hetzelfde patroon vertoont bij verschillende ventilatiesnelheden. Op één plaats (rechts boven) is de snelheid veel lager dan op andere plaatsen. Het inhomogene karakter van het windveld zou tot gevolg kunnen hebben dat niet alle delen van het beschouwde grasoppervlak in gelijke mate meedoen. Dit hebben we niet nader experimenteel onderzocht. In eerste benadering is het effect te verdisconteren in de waarde van  $r_E$ .

$U_{CIRC}$	60 V	80 V	100 V	150 V	200 V
$\bar{U}$	0.49 ms <sup>-1</sup>	0.88 ms <sup>-1</sup>	1.28 ms <sup>-1</sup>	2.04 ms <sup>-1</sup>	2.79 ms <sup>-1</sup>
0.40	0.97	0.81	0.35	0.81	0.69
0.91	1.21	1.21	1.00	1.32	1.00
1.38	0.65	1.46	1.57	0.69	1.57
			0.36	0.82	0.77
			0.82	1.36	1.00
			1.59	0.68	1.59
			0.33	0.88	0.63
			1.17	1.37	0.98
			1.58	0.69	1.37
			0.34	0.85	0.72
			1.15	1.31	1.00
			1.58	0.64	1.40

Fig. 2 De luchtsnelheden in de doos bij verschillende circulatiesterkten, gemeten op 10 cm boven het gewasoppervlak, als fracties van de gemiddelde luchtsnelheden.  $U_{CIRC}$  is de spanning op de klemmen van de circulatiemotor. De lucht stroomt van boven naar beneden.

Wind speed in the chamber, at a height of 10 cm above the grass surface, at various values of the voltage on the circulation motor ( $U_{CIRC}$ ). Wind speeds are expressed as fractions of the average values. The air flow is from the top to the bottom.

Het is moeilijk de kunstmatige windsnelheden te vergelijken met in de natuur optredende. De turbulentie is voor beide gevallen sterk verschillend. Een zeer ruwe maatstaf is de visueel waargenomen beroering van het gewas. De indruk is, dat een ventilatiesnelheid bij 200 V overeenkomt met krachtige wind, en 100 V met matige wind. De metingen zijn in het algemeen steeds bij 200 V verricht. De luchtverplaatsing van het circulatiesysteem is dan ca.  $0.25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (bepaald uit meting van de windsnelheid in de doos op verschillende plaatsen, ook in de verticaal). Het is verder van belang dat er binnen de doos geen temperatuur- en vochtverschillen zijn. Dit bleek inderdaad niet het geval.

## 2.2 Twee meetprincipes

### 2.2.1 De instationaire methode

De procedure verloopt als volgt:  
Vóór de meting wordt de doos schuin omhoog boven het te bemeten stukje gewas geplaatst, zó dat de toestand van het gewas zo weinig mogelijk gestoord wordt. Dan wordt de doos naar beneden gekanteld en wordt het temperatuur- en vochtverloop van de lucht in de doos gedurende ca.  $\frac{1}{2}$  - 1 minuut gemeten. Tijdens de meting is de doos, met uitzondering van de bodem, geheel afgesloten. De waterdampconcentratie van de lucht zal toenemen, omdat het gewas water verdampt. De temperatuur van de lucht zal zich aanpassen aan die van het oppervlak. Uit de registratie van temperatuur en vochtigheid kan de stomataire weerstand worden bepaald (paragraaf 3.1). Gezien de korte duur van de meting en het feit dat de instraling niet sterk wordt beïnvloed, is het niet te verwachten dat tijdens de meting de openingstoestand van de stomata zich wijzigt. Concrete gegevens hieromtrent zijn ons echter, voor gras, niet bekend.

Bij toepassing van de instationaire methode kan het voorkomen dat er condensatie van waterdamp op de wanden optreedt. Deze situatie kan zich met name 's ochtends voordoen, als de verdamping hoog is en ook de relatieve vochtigheid groot is. De meting is dan slechts tot het moment dat de condensatie optreedt bruikbaar.

### 2.2.2 De stationaire methode

Er wordt nu lucht van buiten in de doos geblazen. De lucht verlaat de doos weer door een daartoe vrijgemaakte opening en door de bodem. Nadat de doos op het gewas is geplaatst, treedt er een periode in dat de luchtvochtigheid verloopt, totdat de evenwichtstoestand is bereikt, waarbij er evenveel waterdamp door het gewas aan de lucht in de doos wordt toegevoegd als er door toevoeging van (drogere) lucht van buiten aan onttrokken wordt. Deze toestand is na ca. 1 minuut bereikt. Uit meting van het verschil in waterdampconcentratie van de lucht in de doos en van de aangevoerde lucht, het verversingsdebiet en de luchttemperatuur kan de stomataire weerstand worden bepaald (paragraaf 4.1).

Deze methode heeft twee nadelen ten opzichte van de vorige: de meting duurt langer, hetgeen de kans op verstoring van de openingstoestand der huidmondjes vergroot, en er is meer apparatuur voor nodig. Voor beide methoden is het gewenst dat de instraling gedurende de meting niet veel verandert, daar anders de gewastemperatuur zal veranderen; dit bemoeilijkt de interpretatie van de meetgegevens in hoge mate. De stationaire methode biedt voordelen voor onderzoekdoeleinden: zo is het in principe mogelijk het vochtgehalte van de van buiten aangevoerde lucht te variëren en een eventuele responsie van de stomataire weerstand hierop na te gaan.

### 2.3 Meetsystemen

Zowel bij de stationaire als bij de instationaire methode moeten de vochtigheid en de temperatuur van de lucht in de doos worden gemeten. Voor de stationaire methode moet bovendien de vochtigheid van de aangevoerde lucht en het debiet ervan worden bepaald. Bij de instationaire methode veranderen vochtigheid en temperatuur vrij snel; de meetinstrumenten dienen een adequate responsietijd te hebben, in de orde van enkele seconden. Bij de stationaire methode is een snelle responsie geen dwingende eis.

Voor de bepaling van de temperatuur en vochtigheid bij de instationaire methode is in de doos een houder met thermokoppel thermometers geplaatst: één thermokoppel voor de temperatuur, en één droog en één bevochtigd thermokoppel voor de vochtigheid. De thermokoppels zijn geconstrueerd uit koper en constantaan draad met een diameter van 0.1 mm. Het thermokoppel voor de temperatuur wordt gerefereerd aan de temperatuur van een aluminium blokje, gemeten met een kwikthermometer. Het andere droge en het natte koppel zijn in één keten geschakeld. De responsietijd van de temperatuurmeting is voldoende kort, die van de meting van het droog-nat temperatuurverschil is echter zodanig dat de vochtveranderingen in de eerste seconden van de meting afgevlakt worden weergegeven. Een bezwaar is dit niet, omdat in de praktijk is gebleken dat die periode om andere redenen toch slecht bruikbaar is. We hadden ook de mogelijkheid de luchtvochtigheid met een dauwpuntshygrometer te meten. De responsie van dat systeem is ca.  $1\text{ }^{\circ}\text{C s}^{-1}$ , hetgeen sneller is dan de mate waarin de dauwpuntstemperatuur van de lucht verandert (ca.  $0.25\text{ }^{\circ}\text{C s}^{-1}$ ). Simultane metingen met de twee systemen vertonen een goede overeenkomst.

Bij de stationaire methode werd voor de vochtmeting uitsluitend de dauwpuntshygrometer gebruikt, omdat bleek dat meting van het verschil in vochtigheid van de lucht in de doos en de aangevoerde lucht met een psychrometersysteem onvoldoende nauwkeurig was. Er werd niet zonder meer lucht van buiten aangevoerd, omdat het vochtgehalte ervan zo snel in de tijd varieert dat de dauwpuntshygrometer dit niet goed kan verwerken (oscillaties (zie fig. 7)). Daarom werd, alvorens een meting te verrichten, een weerballon met ca.  $1.5\text{ m}^3$  buitenlucht gevuld en die lucht werd dan door de stomataire doos gevoerd. Het debiet werd gemeten met een turbineflowmeter. De luchttemperatuur in de doos werd gemeten als bij de instationaire methode.

Bij beide methoden werd incidenteel de oppervlaktetemperatuur van een stukje gewas onder de stomataire doos gemeten met een stralingsthermometer (Heimann, KT 24). In geval van de stationaire methode werd dit instrument voor de uitstroomopening van



de doorgevoerde lucht geplaatst; bij de andere methode was dit ook het geval, maar dan werd de uitstroomopening afgedekt met een polyethyleen folie. Het folie beïnvloedt de meting nauwelijks.

Alle signalen werden op één of twee recorders geregistreerd. De onnauwkeurigheid van de temperatuurmeting (ten gevolge van stralingsfout, onnauwkeurigheid in de referentietemperatuur en in de recorder) is maximaal  $0.5^{\circ}\text{C}$  en die van de meting van het droog-nat temperatuurverschil maximaal  $0.3^{\circ}\text{C}$ . Deze fouten zijn grotendeels systematisch voor één meting. De gevoeligheid van de dauwpuntshygrometer is  $0.05^{\circ}\text{C}$ , en de absolute nauwkeurigheid ca.  $0.3^{\circ}\text{C}$  (onder meer afhankelijk van de vervuiling van de spiegel). De stralingsthermometer werd regelmatig getoetst tegen een zwarte ruimte met bekende temperatuur. De meetfout in de oppervlaktetemperatuur, ten gevolge van ijkfout, recorder, emissie-coëfficiënt van het gras en eventueel de transmissie van het polyethyleenfolie, is naar schatting maximaal  $0.5^{\circ}\text{C}$ . De fout in de debietmeting is 2 %.

### 3. DE INSTATIONAIRE METHODE

#### 3.1 Theorie en praktijk

In deze uitvoering is de doos dus, op de bodem na, geheel dicht. De door de propellor opgewekte turbulente luchtstroming in de doos zorgt voor een uniforme temperatuur- en vochtverdeling van de lucht. De luchttemperatuur en de gewastemperatuur zullen zich aan elkaar aanpassen. In een weerstandenmodel wordt in het algemeen geen rekening gehouden met temperatuurgradiënten in het gewas. Zoals in de inleiding opgemerkt, wordt het gewas geschematiseerd tot een plat vlak met één temperatuur, waar straling geabsorbeerd, gereflecteerd en geëmitteerd wordt en waar de uitwisseling van warmte en waterdamp met de lucht geschiedt. Dank zij deze vereenvoudiging is het mogelijk aan de uitwisseling van warmte één weerstand toe te kennen ( $r_H$ ) en aan de uitwisseling van waterdamp twee, namelijk  $r_E$  en de stomataire weerstand,  $r_{ST}$ .

In het volgende geven we een eenvoudige theoretische beschrijving van de zich afspelende processen. Een meer uitgebreide beschrijving wordt gegeven in de Appendix.

We veronderstellen dat de geschematiseerde gewastemperatuur,  $T_o$ , tijdens de meting met de stomataire doos constant is. Verder nemen we aan dat er geen warmte-uitwisseling met de wanden van de doos is, noch dat er warmte geproduceerd wordt door de geforceerde circulatie. De warmte, die door het gewas aan de lucht wordt afgegeven, wordt dan gebruikt ter verwarming van de lucht volgens:

$$\rho c_p A \frac{T_o - T(t)}{r_H} = \rho c_p V \frac{dT(t)}{dt} \quad (2)$$

Hierin is  $\rho$  de dichtheid van lucht ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $c_p$  de warmtecapaciteit bij constante druk ( $\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ),  $A$  het grasoppervlak ( $\text{m}^2$ ) dat in contact staat met de lucht in de doos,  $T(t)$  de luchttemperatuur in de doos op tijdstip  $t$  en  $V$  de inhoud van de doos ( $\text{m}^3$ ).  $r_H$  is de weerstand voor het transport van warmte van het gewasoppervlak naar "buiten".

De oplossing van de differentiaalvergelijking (2) is:

$$T(t) = T_o - \{T_o - T(o)\} e^{-\frac{t}{\tau_H}}, \quad (3)$$

$$\tau_H = r_H \frac{V}{A} \quad (4)$$

Voor het transport van waterdamp kunnen we een analoge beschrijving toepassen. Onder de voorwaarden dat al het door het gewas verdampte water aan de lucht in de doos wordt toegevoegd, en dat de oppervlaktetemperatuur constant is, geldt:

$$A \frac{\rho_s^w(T_o) - \rho^w(t)}{r_E + r_{ST}} = V \frac{d\rho^w(t)}{dt}, \quad (5)$$

$$\text{dus: } \rho^w(t) = \rho_s^w(T_o) - \{ \rho_s^w(T_o) - \rho^w(o) \} e^{-\frac{t}{\tau_E}} \quad (6)$$

$$\tau_E = (r_E + r_{ST}) \frac{V}{A} \quad (7)$$

Hierin is  $\rho^W(t)$  de waterdampconcentratie van de lucht (in  $\text{kg m}^{-3}$ ) op tijdstip  $t$ , en  $\rho_s^W(T_0)$  de verzadigde waterdampconcentratie bij temperatuur  $T_0$ .

De transportweerstand  $r_E$  wordt verondersteld gelijk te zijn aan  $r_H$  op grond van analogie van het waterdamp- en warmtetransport.  $r_H$  is te bepalen uit verg. (3) en (4) bij bekende geometriefactor  $V/A$  (in ons geval  $0.62 \text{ m}$ ), en het gemeten verloop van  $T(t)$ . De tijdconstante  $\tau_E$  kan uit de meting van  $q(t)$  versus  $t$  met behulp van verg. (6) worden bepaald, mits  $T_0$  bekend is, en zo is  $r_{ST}$  ten slotte bepaald.  $T_0$  kan in principe met verg. (3) worden bepaald uit  $\lim_{t \rightarrow \infty} T(t)$ .

In de praktijk levert dit problemen op. De tijdconstante  $\tau_H$  is, naar schatting op grond van gemeten luchtsnelheden in de doos (paragraaf 2.1), in de orde van  $10 \text{ s}$  (bij  $200 \text{ V}$  op de klemmen van de circulatiemotor, dus  $\bar{u} = 2.7 \text{ ms}^{-1}$ ), dus eerst na ca.  $30 \text{ s}$  zou  $T(t)$  de oppervlaktetemperatuur  $T_0$  gaan benaderen. Het waargenomen gedrag van  $T(t)$  is echter anders (fig. 3). De luchttemperatuur neemt na de plaatsing van de doos sneller toe dan volgens eerder gegeven schatting  $\tau_H = 10 \text{ s}$ , om daarna geleidelijk te blijven stijgen. Het laatste verschijnsel is ongetwijfeld een broeikas-effect: op den duur neemt de verdamping af en zal de aan het gewasoppervlak toegevoegde netto stralingsenergie meer en meer in de vorm van (voelbare) warmte aan de lucht worden afgegeven. De snelle toeneming van  $T(t)$  in de eerste seconden van het experiment zou overigens duiden op een veel kleinere tijdconstante dan  $10 \text{ s}$  (zie ook paragraaf 6.2 en de Appendix).

Ten einde meer inzicht te krijgen in het gedrag van de oppervlaktetemperatuur, is deze gedurende een aantal metingen met een stralingsthermometer geregistreerd. Het is a priori niet zo, dat die temperatuur overeen zou komen met de temperatuur van het fictieve twee-dimensionale gewasoppervlak. De stralingstemperatuur zal onder meer afhangen van de hoek waaronder de betreffende infraroodstraling het oppervlak verlaat (in dit geval ca.  $30^\circ$ ) en van de verticale temperatuurverdeling in het gewas (in de gewaslaag kunnen temperatuurverschillen tot  $15^\circ\text{C}$  optreden!).

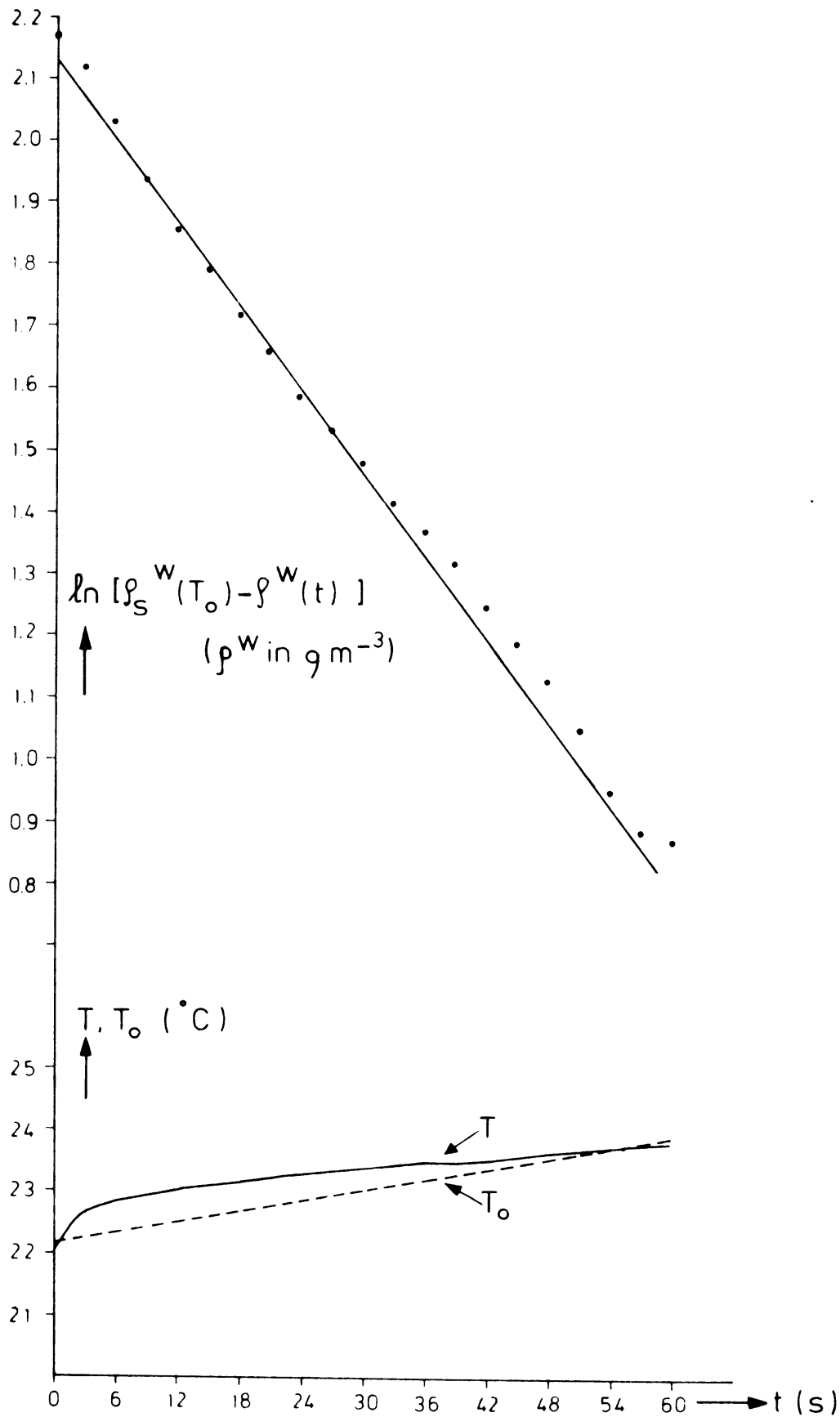


Fig. 3 De gemeten luchttemperatuur ( $T$ ) en oppervlaktetemperatuur ( $T_0$ ), en het verloop van  $\ln[\rho_s^w(T_0) - \rho^w(t)]$  bij een instationaire meting.  
 The observed air temperature ( $T$ ) and surface temperature ( $T_0$ ), and  $\ln[\rho_s^w(T_0) - \rho^w(t)]$  as functions of time (non-stationary method).

Het bleek dat de zo gemeten oppervlaktetemperatuur zowel groter als kleiner dan de luchttemperatuur in de doos kan zijn (verschillen ca.  $1^{\circ}\text{C}$ ), en dit zowel direct in het begin van de proef als na verloop van enige tijd. De verschillen waren vaak per dag systematisch, maar van dag tot dag vaak verschillend van teken. Aangezien de luchttemperatuur altijd in de beginfase toeneemt, zou men verwachten dat de oppervlaktetemperatuur dan altijd hoger is dan de luchttemperatuur. De stralingsthermometer geeft kennelijk de oppervlaktetemperatuur niet beter weer dan op ca.  $1^{\circ}\text{C}$ . De gemeten oppervlaktetemperatuur bleek niet constant gedurende de uitvoering van de proef: na een aanlooperperiode bleek er een geleidelijke stijging op te treden (fig. 3). Dit is dus een aanwijzing dat de veronderstelling  $T_0 = \text{constant}$ , welke ten grondslag ligt aan de vergelijkingen (3) en (6), niet geldig is. Een gevolg van het waargenomen verloop van de oppervlaktetemperatuur is, dat verg. (3) niet meer geldig is. Voor verg. (6) zijn de consequenties minder ernstig, omdat het verschil  $\rho_s^w(T_0) - \rho^w(t)$  niet zo sterk van  $T_0$  afhankelijk is als  $T_0 - T(t)$ , maar het verloop van  $T_0$  is toch ook weer niet te verwaarlozen. De oorzaak van het toenemen van  $T_0$  zou gelegen kunnen zijn in een plotselinge toename van de netto straling, zodra de doos over het gewas wordt geplaatst. Namelijk, de kortgolvlige straling wordt weliswaar wat gereduceerd ten gevolge van verliezen door het perspex, maar de langgolvlige instraling neemt toe, omdat perspex in het thermische infrarood zwart is. We hebben dit niet experimenteel onderzocht. Gezien de twijfels omtrent de geldigheid van verg. (3) zijn wij er dus niet in geslaagd  $r_H$  via die weg te bepalen.

Past men verg. (6) toe om experimenteel  $r_H + r_{ST}$  vast te stellen, dan moet toch een schatting van  $T_0$  worden gemaakt. Hiertoe hebben we standaard gekozen:  $T_0 = T(t = 9 \text{ s})$ . Deze keuze is zo gedaan, omdat na 9 s de snelle toename van  $T(t)$  in het algemeen voorbij is, en de geleidelijke toename van  $T(t)$  ten gevolge van het broeikas-effect nog nauwelijks is ingezet. In de volgende paragraaf gaan we nader in op het effect van de keuze van  $T_0$  op  $r_H + r_{ST}$ .

Het waargenomen verloop van  $\ln [\rho_s^w(T_0) - \rho^w(t)]$  versus de tijd is ook in fig. 3 te zien. Van ca. 9 s tot ca. 30 s is het verloop met de tijd bij benadering lineair (zoals volgens verg. (6)). Daarvoor en daarna zijn er afwijkingen. De afwijkingen in het begin van een meting zijn waarschijnlijk mede te wijten aan een slecht gedefinieerde begintoestand (het plaatsen van de doos neemt ca. één seconde in beslag en het mengen van de lucht erna kost enkele seconden), maar ook aan de tekortkomingen van verg. (6) (zie Appendix). Wordt het psychrometersysteem gebruikt, dan is ook nog een effect van de traagheid van de natte-bol thermometer merkbaar. De aanloopverschijnselen zijn wisselend van aard en sterkte. De afwijkingen na ca.  $\frac{1}{2}$  minuut hebben een vast patroon. Meestal is het vochtdeficit  $\rho(T_0) - \rho^w(t)$  te groot, hetgeen impliceert dat de vochtconcentratie  $\rho^w(t)$  niet snel genoeg toeneemt. De oorzaak hiervan zou kunnen liggen in sluiting van de huidmondjes waardoor de verdamping minder wordt dan verwacht, en zo de vochtconcentratie. Een andere mogelijkheid is, dat onder in het gewas, waar de temperatuur overdag in het algemeen het laagst is, de waterdampconcentratie haar verzadigingswaarde bereikt en waterdamp condenseert, hetgeen ten koste gaat van de toename van  $\rho^w(t)$ . Dit mechanisme zou in incidentele gevallen een rol kunnen spelen, maar meestal is na  $\frac{1}{2}$  minuut de verzadigingsdampconcentratie bij de temperatuur van het bodemoppervlak nog lang niet bereikt. Een derde proces dat verantwoordelijk zou kunnen zijn voor een te geringe toename van  $\rho^w(t)$  is diffusie van waterdamp in de grond door poriën en spleten. De vraag is dan waarom dat proces pas na enige tijd inzet. Ook de meer uitgebreide beschouwing van de processen welke zich afspelen, gegeven in de Appendix, geeft geen verklaring waarom  $\rho(t)$  te langzaam toeneemt; integendeel, volgens die beschouwing neemt  $\rho(t)$  juist sneller toe dan volgens verg. (6).

Het gedrag van de grootte  $\ln [\rho_s^w(T_0) - \rho^w(t)]$  versus de tijd is tussen  $t = 9$  s en  $t = 30$  s niet altijd fraai lineair. Vaak vertoont de curve een lichte slingering. Dit zou kunnen liggen aan een niet-constante oppervlaktetemperatuur. Met de stralings-thermometer is waargenomen dat een verloop van  $T_0$  van ca.  $1^\circ\text{C}$  tussen  $t = 9$  en  $t = 30$  s normaal is. Hiermee houdt verg. (6),

zoals al eerder opgemerkt, geen rekening. De theorie, gegeven in de Appendix, waarin wèl een verloop van  $T_0$  wordt toegelaten, simuleert de slingering echter niet overtuigend. Bij de uitwerking van de metingen hebben we steeds slechts de gemeten waarden van  $T$  en  $\rho^w$  op de tijdstippen  $t = 9$  s en  $t = 27$  s gebruikt ter berekening van  $r_H + r_{ST}$ .

Samenvattend kunnen we stellen, dat verg. (6) een vrij sterke simplificering van de werkelijk optredende processen is. Het waargenomen verloop van  $\rho^w(t)$  met de tijd is slechts tussen  $t = 9$  s en  $t = 30$  s bij benadering exponentieel. De meting geeft verder de som van  $r_H$  en  $r_{ST}$  (in het vervolg  $r_\Sigma$  genoemd). De grootte van  $r_H$  bleek niet met verg. (3) te bepalen, maar zal naar schatting niet meer zijn dan  $20 \text{ sm}^{-1}$ . In de Appendix wordt langs een andere weg een waarde van  $5 \text{ sm}^{-1}$  gevonden. Al met al is het raadzaam deze meting van  $r_{ST}$  als een methode met enige empirische inslag te beschouwen, een methode die haar rechtvaardiging mede moet vinden in vergelijkingen met andere metingen van  $r_{ST}$ .

### 3.2 Resultaten

In de maanden augustus en september 1977 alsmede in het zomerseizoen 1978 zijn vele metingen met de stomataire doos verricht. In het volgende worden alleen metingen met een speciaal karakter besproken; deze metingen dienden om de eigenschappen en mogelijkheden van de instationaire methode nader te onderzoeken. Andere metingen komen in de hoofdstukken 5 en 6 aan de orde. Alle metingen zijn gedaan op grasland, en wel (op een enkele uitzondering na) op het KNMI energiebalansterrein te Cabauw.

#### 3.2.1 Gevoeligheid voor $T_0$

In paragraaf 3.1 hebben we vermeld dat we voor  $T_0$  de luchttemperatuur 9 s na aanvang van de meting hebben gekozen. Om inzicht te krijgen in het effect van de keuze van  $T_0$  op  $r_\Sigma$ , hebben we een aantal metingen ook uitgewerkt voor het geval dat voor  $T_0$  de luchttemperatuur 30 s na aanvang van de meting wordt genomen. Het resultaat is gegeven in tabel 1. Er blijkt dat ingeval  $T_0 = T(t = 30 \text{ s})$   $r_\Sigma$  groter is dan ingeval  $T_0 = T(t = 9 \text{ s})$ . Het verschil tussen de twee bepalingen is  $7-11 \text{ sm}^{-1}$ , onafhankelijk van de grootte van  $r_\Sigma$  en de grootte van de circulatiesterkte.

Tabel 1. Effect van  $T_o = T (t = 9 \text{ s})$ , resp.  $T_o = T (t = 30 \text{ s})$  op  $r_\Sigma$ .  
Effect of  $T_o = T (t = 9 \text{ s})$ , resp.  $T_o = T (t = 30 \text{ s})$  on  $r_\Sigma$ .

datum	tijd	$U_{\text{circ.}}$	$r_\Sigma(9 \text{ s})$	$r_\Sigma(30 \text{ s})$	$r_\Sigma(30 \text{ s}) - r_\Sigma(9 \text{ s})$	$\frac{r_\Sigma(30 \text{ s}) - r_\Sigma(9 \text{ s})}{r_\Sigma(9 \text{ s})}$	$t(30 \text{ s}) - t(9 \text{ s})$
	GMT	v	$\text{sm}^{-1}$	$\text{sm}^{-1}$	$\text{sm}^{-1}$		$^\circ\text{C}$
24-5	12.36	100	79	89	10	1.13	0.18
	12.41	150	64	71	7	1.11	0.23
	12.47	200	71	78	7	1.09	0.27
30-5	8.33	200	99	107	8	1.08	0.53
	8.37	100	124	133	9	1.07	0.44
	8.39	150	117	124	7	1.06	0.46
	8.41	200	107	115	8	1.07	0.56
20-6	12.58	200	166	176	10	1.06	0.69
	13.32	200	162	171	9	1.06	0.57
	14.00	200	183	194	11	1.06	0.51
21-7	9.17	200	55	66	11	1.20	0.34
	10.15	200	52	61	9	1.18	0.47
	11.13	200	43	51	8	1.19	0.53
	12.24	200	50	58	8	1.16	0.70
	13.18	200	53	62	9	1.17	0.51

### 3.2.2 Gevoeligheid voor de circulatiesterkte

De mate waarmee de lucht in de doos wordt gecirculeerd beïnvloedt de weerstand  $r_H$  (welke het transport van waterdamp en warmte vanaf het gewasoppervlak naar een referentieniveau betreft), en mogelijk ook de stomataire weerstand  $r_{ST}$ . Het laatste effect is een gevolg van het gebruik van een "platgeslagen" gewasmodel, waarbij de stomataire weerstand fysisch gezien het resultaat is van een parallelle werking van vele huidmondjes. De gemiddelde stomataire weerstand kan afhankelijk zijn van de mate waarin



verschillende gewaslagen tot de verdamping bijdragen. Dit laatste nu zal onder andere afhangen van het windsnelheidsprofiel in het gewas, en op die manier zou  $r_{ST}$  gevoelig kunnen zijn voor de windsnelheid, zelfs al verandert er niets aan de openings-toestand van de individuele huidmondjes.

Om de invloed van de circulatiesterkte op de bepaling van  $r_{\Sigma}$  te onderzoeken, hebben we enkele meetseries verricht waarbij we de spanning op de circulatiemotor hebben gevarieerd, en zo de circulatiesterkte. Het resultaat is weergegeven in figuur 4. Voor de overzichtelijkheid hebben we alle metingen genormeerd op  $U_{circ} = 200$  V. De relatie tussen  $U_{circ}$  en de windsnelheid op 0.1 m hoogte is reeds eerder gegeven (fig. 2). Met nadruk moeten we stellen dat gemeten is  $r_{\Sigma} = r_H + r_{ST}$ , en niet  $r_{ST}$  zelf. De kennelijke toename van de genormeerde som-weerstand bij afnemende circulatiesterkte kan dus aan een toename van  $r_H$  en/of van  $r_{ST}$  te wijten zijn. Het in fig. 4 gepresenteerde beeld is in overeenstemming met de verwachting dat zowel  $r_H$  als  $r_{ST}$  bij afnemende windsnelheid toeneemt, waarbij het effect op  $r_{ST}$  waarschijnlijk geringer is, omdat het een indirect effect is. Uit de figuur blijkt verder dat voor  $u > 2 \text{ ms}^{-1}$  de genormeerde  $r_{\Sigma}$  niet meer duidelijk afneemt. Bij die circulatiesterkte is  $r_H$  veel kleiner dan  $r_{ST}$  (voor  $u < 1 \text{ ms}^{-1}$  is dat vermoedelijk niet meer het geval). Dit impliceert dat in ieder geval boven een zeker windsnelheidsniveau  $r_{ST}$  niet gevoelig is voor de windsnelheid. Voor kleinere windsnelheden kunnen we geen uitspraak doen.

### 3.2.3 Meting op verschillende plaatsen

De instationaire meetmethode leent zich er goed voor om binnen korte tijd metingen op verschillende plaatsen te verrichten. De apparatuur is bescheiden van omvang: naast de stomataire doos met het systeem ter bepaling van de luchttemperatuur en het droog-nat temperatuurverschil, is alleen een 2-kanaals registratie nodig voor de thermokoppelsignalen (wij gebruikten een

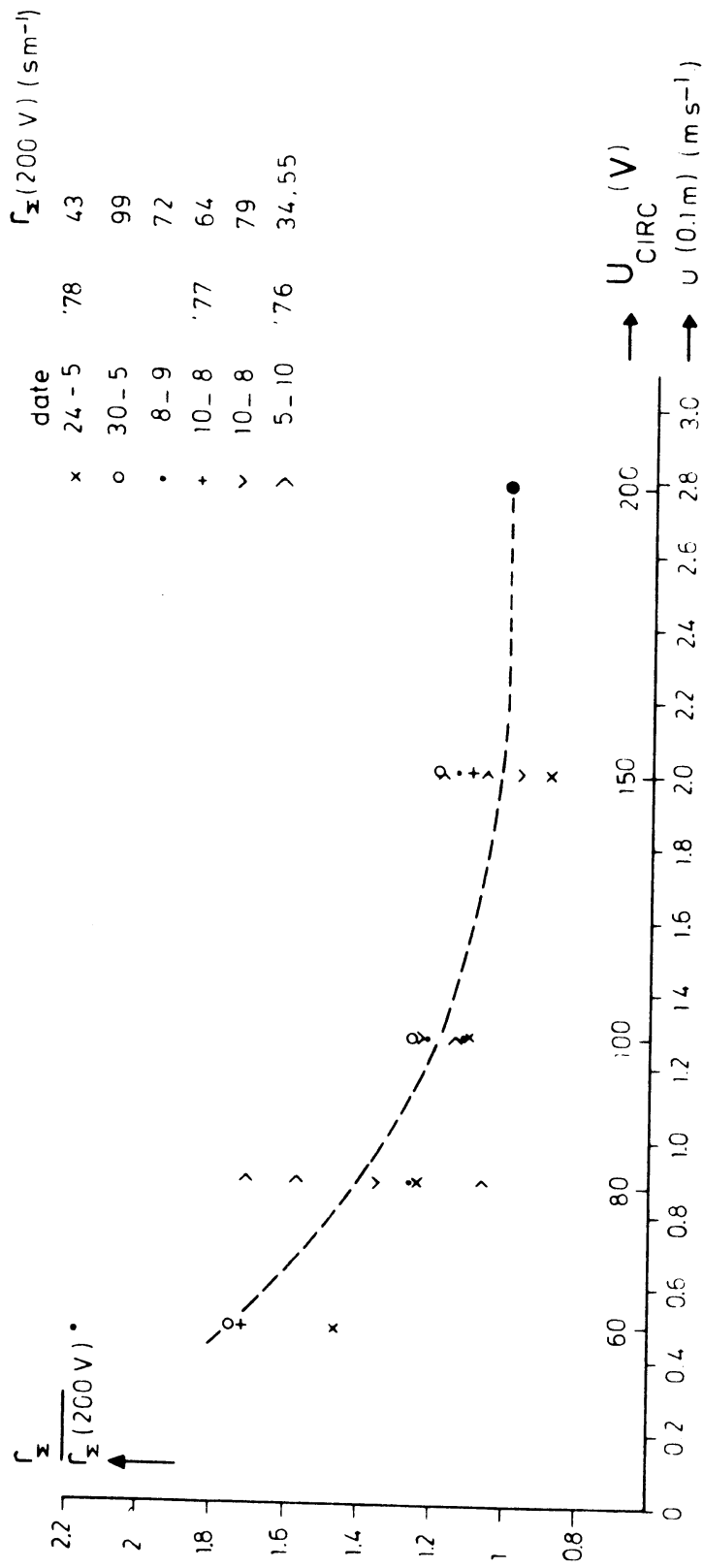


Fig. 4  $r_{\Sigma}$ , genormeerd op  $r_{\Sigma}(200 V)$  versus de klemspanning op de circulatiemotor, en de gemiddelde luchtsnelheid 10 cm boven het gewas. De streeplijn is op het oog getrokken.  
 $r_{\Sigma}/r_{\Sigma}(U_{circ}=200 V)$  as function of the voltage on the circulation motor ( $U_{circ}$ ), and of the average wind speed at a height of 10 cm above the grass surface. The broken line is drawn by eye.

2-pens Kipp recorder op het 1 mV bereik), en een 220 V voorziening (voor de circulatiemotor en de registratieapparatuur). Dit instrumentarium is gemakkelijk verplaatsbaar en snel inzetbaar. Wij hebben er de stomataire weerstand op diverse plaatsen op het KNMI proefveld te Cabauw (grootte ca. 1 ha) mee gemeten, alsmede op één plek buiten het proefveld. Het veld is begroeid met gras dat ca. 8 cm hoog wordt gehouden. In het gewas waren plekken te onderscheiden met afwijkende bedekking (o.a. klaver). Bij de eerste serie metingen werden naast "representatieve plekken" ook juist die plekken gekozen.

Ter compensatie voor het verloop van de stomataire weerstand in de tijd werd regelmatig naar één bepaald meetpunt teruggekeerd. Uit fig. 5 blijkt dat  $r_{\Sigma}$  van dit referentiepunt wat groter is dan die van de meeste overige plaatsen. De "niet-representatieve plekken" en een plek buiten het proefveld (weidegras, ca. 20 cm hoog) geven niet duidelijk andere waarden dan de "representatieve" plekken. Bij een tweede serie metingen werden enkele willekeurige plaatsen op het proefveld bezocht en één plaats erbuiten. Het referentiepunt was hetzelfde. Ook in dit geval is  $r_{\Sigma}$  van het referentiepunt wat groter dan op de andere plaatsen. (Zie fig. 6). De figuren 5 en 6 geven enige indruk omtrent de spreiding van de stomataire weerstand over het energiebalansterrein. De meeste meetpunten liggen binnen een band van  $20 \text{ sm}^{-1}$ , d.w.z. ca. 30% van de gemiddelde  $r_{\Sigma}$ . Hierbij is uiteraard ook inbegrepen de toevallige fout inherent aan de meetmethode (ca. 10%).

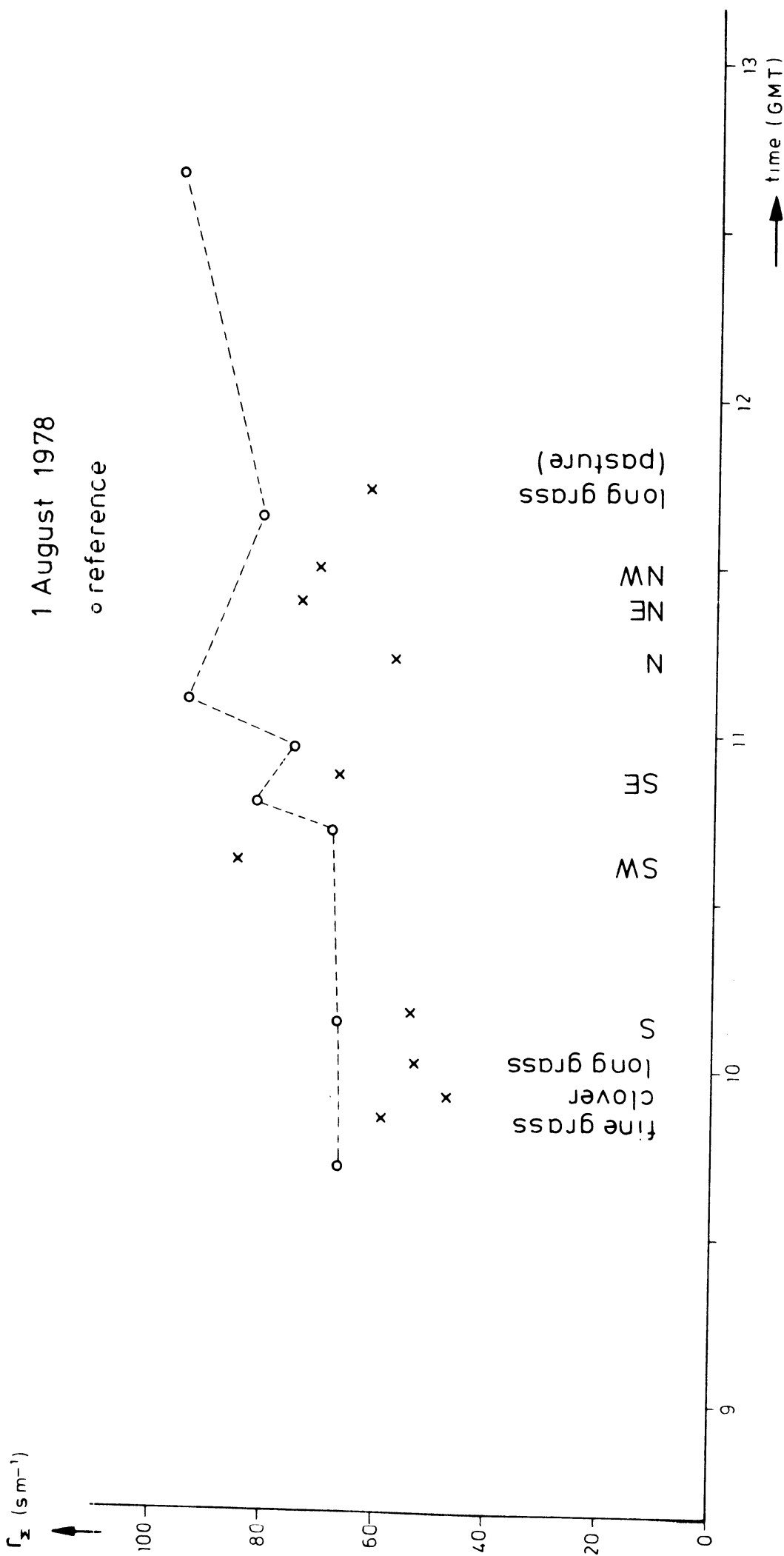


Fig. 5  $r_{\Sigma}$  van verschillende plaatsen op het energiebalansterrein. Gemeten is - behalve op een referentieplaats - op voor het oog afwijkende stukjes begroeiing, en op meer representatieve plekken (aangeduid met S, SW, enz.).

$r_{\Sigma}$  at various locations on the energy balance site. Plots were selected for apparently different types of vegetation, and for representative vegetation (the latter indicated by S, SW, and so on). One measurement is made on "natural" pasture grass. Local time = GMT + 20 min.

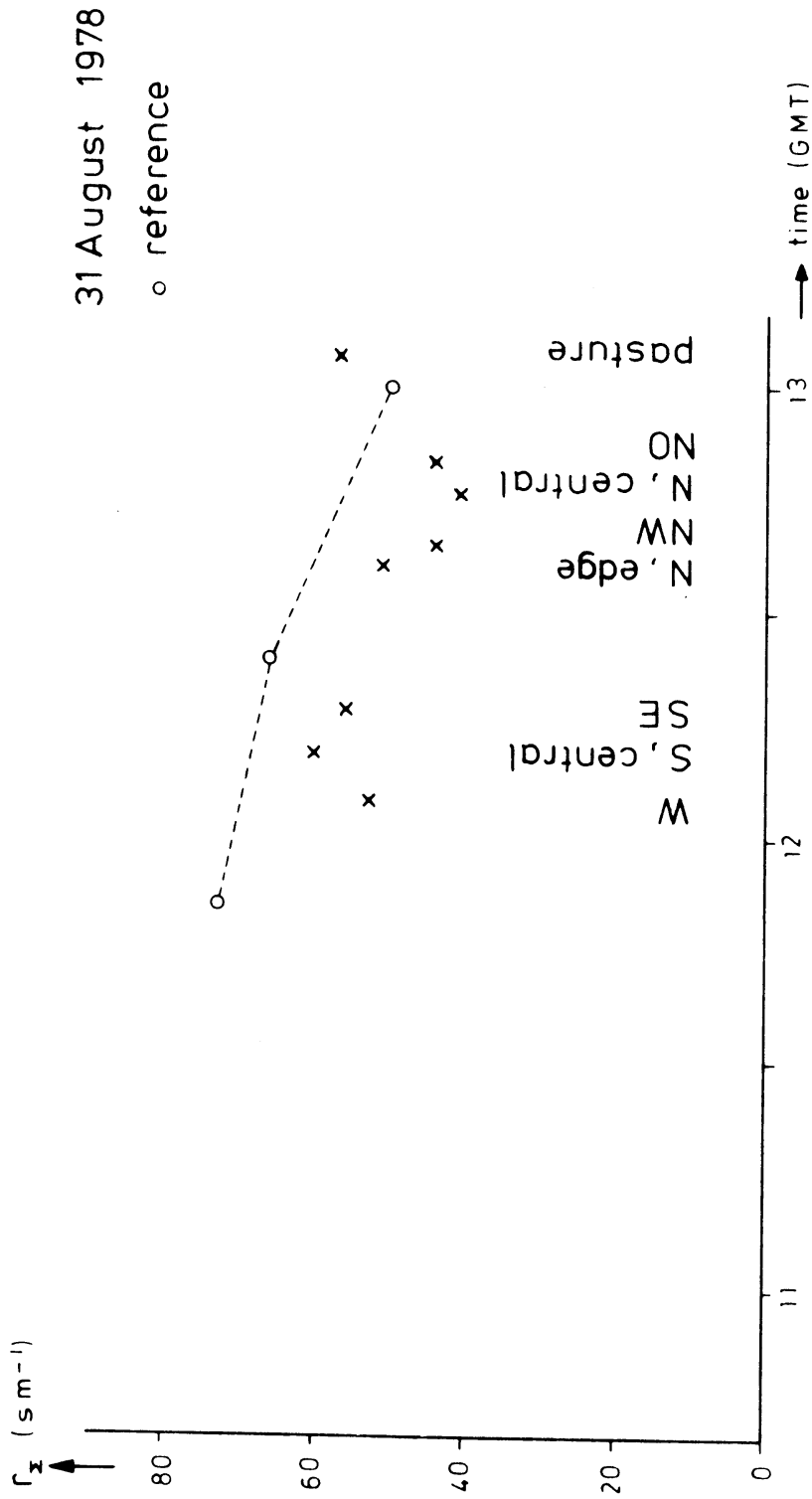


Fig. 6 Als fig. 5, maar nu zijn de bezochte meetplaatsen niet geselecteerd op al dan niet afwijkende begroeiing (met uitzondering van een meting van weidegras).

Like fig. 5, except for a more random selection of plots.

#### 4. DE STATIONAIRE METHODE

##### 4.1 Theorie en praktijk

Er wordt lucht van buiten in de doos geblazen. Door verdamping van het gewas wordt aan de lucht waterdamp toegevoegd. De lucht in de doos wordt, net als bij de instationaire methode, door middel van een circulatiesysteem gemengd. De vochtiger lucht verlaat de doos door een opening en door de bodem. Na enige tijd heeft zich een evenwichtstoestand ingesteld, met waterdamconcentratie  $\rho_i^w$ , welke volgt uit:

$$r_H + r_{ST} = \frac{A}{Q} \frac{\rho_s^w(T_o) - \rho_i^w}{\rho_i^w - \rho_u^w} \quad (8)$$

Teneinde te weten hoe snel dit evenwicht wordt bereikt, beschouwen we de verandering van de waterdamconcentratie in de doos met de tijd:

$$V \frac{d\rho^w(t)}{dt} = EA + Q \{ \rho_u^w - \rho^w(t) \} \quad (9)$$

waarin E de verdamping is (in  $\text{kg m}^{-2}$ ), Q het debiet van de ingeblazen lucht ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) en  $\rho_u^w$  de vochtconcentratie van die lucht. Met verg. (1) voor E krijgen we dan:

$$V \frac{d\rho^w(t)}{dt} = \frac{\rho_s^w(T_o) - \rho^w(t)}{r_{ST} + r_E} A + Q \{ \rho_u^w - \rho^w(t) \} \quad (10)$$

De oplossing van deze differentiaalvergelijking is:

$$\rho^w(t) = \frac{\frac{A \rho_s^w(T_o)}{r_H + r_{ST}} + Q \rho_u^w}{\frac{A}{r_H + r_{ST}} + Q} - \left[ \frac{\frac{A \rho_s^w(T_o)}{r_H + r_{ST}} + Q \rho_u^w}{\frac{A}{r_H + r_{ST}} + Q} - \rho^w(o) \right] e^{-\left( \frac{A}{r_H + r_{ST}} + Q \right) \frac{t}{V}} \quad (11)$$

Hierbij hebben we verondersteld dat  $T_o$  constant is. Uit verg. (11) blijkt dat  $\rho^w(t)$  voor  $t \rightarrow \infty$  nadert tot  $\rho_i^w$ , met de tijdconstante:

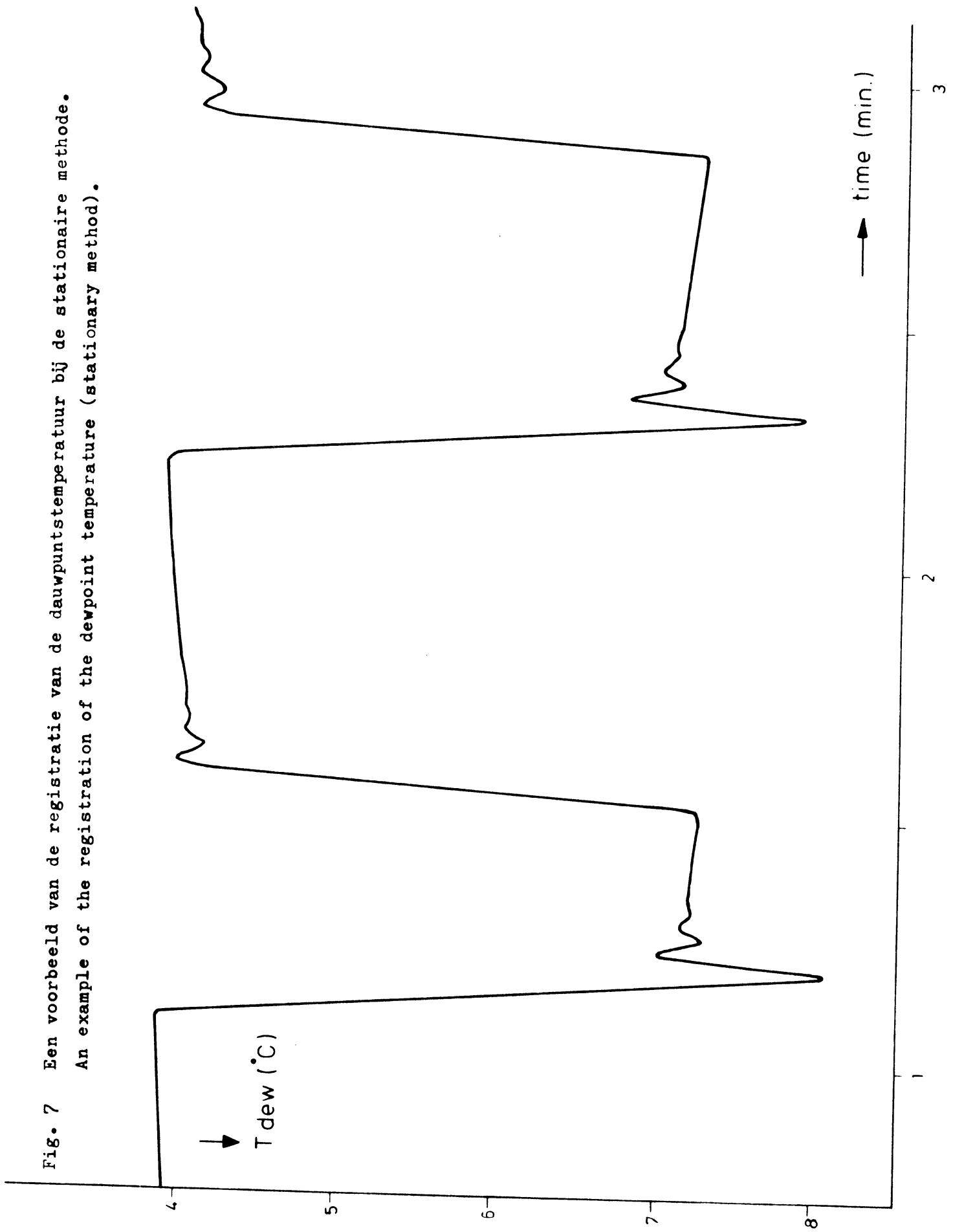
$$\tau = \frac{V}{\frac{A}{r_H + r_{ST}} + Q} \quad (12)$$

Met  $V = 0.120 \text{ m}^3$ ,  $A = 0.194 \text{ m}^2$ ,  $r_H + r_{ST} = 100 \text{ sm}^{-1}$  en  $Q = 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  is  $\tau = 10 \text{ s}$ . Na circa  $\frac{1}{2}$  minuut zal in dat geval de evenwichtstoestand zijn bereikt en kan  $r_H + r_{ST}$  worden bepaald met behulp van verg. (8) en bekende waarden voor  $\rho_s^W(T_0)$ ,  $\rho_i^W$ ,  $\rho_u^W$  en  $Q$ .

Het debiet  $Q$  wordt zodanig gekozen dat het verschil  $\rho_i^W - \rho_u^W$  met voldoende nauwkeurigheid meetbaar is. De meting werd verricht met een dauwpuntshygrometer, aan welke alternerend lucht van binnen de doos en lucht van buiten werd toegevoerd. Zoals in paragraaf 2.3 al is opgemerkt, werd de "buiten"lucht uit een weerballon betrokken om oscillaties van de dauwpuntshygrometer te voorkomen. In fig. 7 is een voorbeeld van de dauwpuntsregistratie gegeven. Het valt op dat het dauwpunt van zowel de toegevoerde lucht als dat van de lucht in de doos schijnbaar verloopt. Dit is waarschijnlijk te wijten aan absorptie van waterdamp door het leidingsysteem (rilsan slangen). Het verloop beperkt de nauwkeurigheid van de meting van  $\rho_i^W - \rho_u^W$  tot 10 % à 20 % in ongunstige gevallen.

Een andere bron van onnauwkeurigheid in de bepaling van  $r_\Sigma = r_H + r_{ST}$  is de oppervlaktetemperatuur  $T_0$ . We kozen hiervoor de temperatuur van de lucht in de doos, op hetzelfde tijdstip als waarvoor de andere grootheden in verg. (8) werden gemeten. Hierbij zijn twee kanttekeningen te maken. In de eerste plaats bleek dat  $T(t)$  ook na 3x de insteltijd gegeven door verg. (12) nog verandert. Waargenomen zijn veranderingen van  $-0.1$  tot  $+0.4 \text{ }^\circ\text{C}$  in het tijdsinterval 1-2 min. De toestand is dus niet altijd volkomen stationair. In de tweede plaats is de gelijkstelling  $T_0 = T(t)$  alleen gerechtvaardigd, indien er geen voelbare warmtestroom van het gewasoppervlak naar de lucht in de doos is. Deze kwestie wordt in de Appendix nader bekeken. Daar wordt geconcludeerd dat een temperatuurverschil van ca.  $1 \text{ }^\circ\text{C}$  kan voorkomen.

Fig. 7 Een voorbeeld van de registratie van de dauwpuntstemperatuur bij de stationaire methode.  
An example of the registration of the dewpoint temperature (stationary method).





Ook hebben wij de oppervlaktetemperatuur bij een aantal metingen met de doos op directe wijze gemeten met een stralingsthermometer. Er geldt dezelfde beperking als bij de instationaire methode: de stralingsthermometer hoeft niet noodzakelijkerwijs  $T_o$  te meten (zie (3.1)): de metingen met de stralingsmeter hebben de beperking dat ze binnen een marge van ca.  $1^\circ\text{C}$  geen informatie geven omtrent de toelaatbaarheid van de aanname, dat de (model)oppervlaktetemperatuur gelijk is aan de luchttemperatuur). Het bleek dat de gemeten oppervlaktetemperatuur vaak lager is dan de luchttemperatuur. Het grootste waargenomen verschil bedraagt  $1.7^\circ\text{C}$ ; meestal waren de verschillen echter kleiner dan  $1^\circ\text{C}$ . (Ook bij de instationaire methode werden verschillen van deze orde van grootte geconstateerd). De metingen met de stralingsmeter laten verder zien dat de oppervlaktetemperatuur niet strikt constant is na enkele tientallen seconden, net als dat voor de luchttemperatuur het geval bleek. Waargenomen zijn veranderingen van  $-0.4$  tot  $+0.8^\circ\text{C}$  in het tijdsinterval van 1 tot 2 minuten na aanvang van de meting.

Een fout in de bepaling van  $T_o$  leidt, via het verschil  $\rho_s^w(T_o) - \rho_i^w$  tot een fout in  $r_\Sigma$ . De grootte van de fout in  $T_o$  is in het algemeen niet binnen  $1^\circ\text{C}$  af te grenzen. De relatieve fout van  $\rho_s^w(T_o) - \rho_i^w$  bij een fout in  $T_o$  neemt toe naarmate de vochtigheid van de lucht in de doos toeneemt. Ook de onnauwkeurigheid van de dauwpuntshygrometer zelf (ca.  $0.3^\circ\text{C}$ ) kan nog een rol spelen. Veronderstellen we de fout in  $T_o$   $1^\circ\text{C}$ , dan is de fout in  $\rho_s^w(T_o) - \rho_i^w$  bij onze meetseries ca. 20 %, met een enkele uitschieter tot bijna 100 %. In het laatste geval waren de energieflexen (netto-straling, verdamping, voelbare warmtestroom) echter gering en is de fout in  $T_o$  wellicht kleiner dan  $1^\circ\text{C}$ , omdat de toestand dicht bij een isotherme situatie komt. Door de bovengenoemde fouten in de vochtmeting en in de oppervlaktetemperatuur kan de mogelijke fout in  $r_\Sigma$  ca. 30 % zijn. De fout in de meting van het debiet  $Q$  (2 %) kan worden verwaarloosd ten opzichte van de andere fouten. Gezien de geringe wijzigingen, die het microklimaat in de gewaszone tijdens de duur van de meting (ca. 2 minuten) ondergaat, is het niet te verwachten dat de openingstoestand van de huidmondjes zich zal wijzigen. Evenals

bij de instationaire methode, is ook bij de stationaire methode een vrij constante instraling (directe en diffuse straling) tijdens de uitvoering van een meting gewenst, daar anders de oppervlaktetemperatuur te veel zou kunnen verlopen. In dit opzicht is de stationaire methode in het nadeel ten opzichte van de instationaire, omdat de eerste methode circa vier maal zoveel tijd in beslag neemt als de tweede. Ook met de stationaire methode wordt niet  $r_{ST}$ , maar  $r_H+r_{ST}$  gemeten.

#### 4.2 Resultaten

Zowel in 1977 als in 1978 zijn er op het energiebalansterrein metingen verricht volgens de stationaire methode. In 1977 werd de vochtigheid nog met een psychrometersysteem gemeten (in 1978 met een dauwpuntshygrometer), en zijn er metingen bij verschillende circulatiesterkten verricht. In 1978 is uitsluitend bij  $U_{circ} = 200$  V gewerkt.

Met de stationaire methode is niet op verschillende plekken op het energiebalansterrein gemeten, dit wegens de omslachtegheid van de apparatuur (dauwpuntshygrometer, ventilatiemotor, turbineflowmeter, slangen, koppelingen, enz.).

Waarden van  $r_{ST}$  verkregen met de stationaire methode komen in de hoofdstukken 5 en 6 nader aan de orde bij vergelijkingen met de instationaire methode en met de resultaten van de energiebalansmetingen. Over één variant op de gebruikelijke werkwijze bij de stationaire methode handelt de volgende paragraaf, nl. het inblazen van tevoren gedroogde lucht.

##### 4.2.1 Verandering van het vochtdeficit

Het vochtdeficit van de lucht in de doos stelt zich in naar de vochtigheid van de toegevoerde lucht en de verdamping van het gewas. Door de vochtigheid van de toegevoerde lucht te veranderen, kan men in zekere mate het vochtdeficit van de lucht in de doos variëren. Dit kan om zuiver praktische redenen gewenst zijn, nl. als de aangevoerde lucht bijna verzadigd is met waterdamp. Wij hebben getracht het vochtdeficit te variëren om een andere reden. Het is nl. gebleken dat de

stomatataire weerstand, bepaald met behulp van de energiebalansmetingen (paragraaf 6.1), correleert met het vochtdeficit van de lucht (Keijman en Kohsiek, 1977). Een mogelijke verklaring hiervoor is, dat een verandering van het vochtdeficit een ander vochtprofiel in het gewas veroorzaakt; dientengevolge zou er een verschuiving van de mate waarin de individuele huidmondjes bijdragen tot de verdamping kunnen optreden, zonder dat de openingstoestand verandert. (Een dergelijk verschijnsel, maar dan met betrekking tot de windsnelheid, hebben we in paragraaf 3.2.2 behandeld). Een tweede mogelijkheid is, dat de opening van de huidmondjes samenhangt met het vochtdeficit (zie bijv. Hall en Hoffman, 1976). We hebben gepoogd het eerste effect te isoleren door het vochtdeficit van de lucht in de doos van meting tot meting te variëren. We veronderstellen dat de responsietijd ten aanzien van het tweede effect langer is dan de duur van een meting (ca. 2 minuten). Teneinde het vochtdeficit te kunnen veranderen werd de luchtballon, welke als voorraadvat dienst deed, gevuld met lucht waaruit van tevoren 2-4 g waterdamp per m<sup>3</sup> onttrokken was door middel van silicagel.

Tabel 2 geeft de resultaten.

Tabel 2.  $r_H + r_{ST}$  bij variërend vochtdeficit.  
 $r_H + r_{ST}$  at varying watervapour deficit.

datum	tijd (GMT)	$\rho_s^w$ (kgm <sup>-3</sup> )	$\rho_i^w$ (kgm <sup>-3</sup> )	$\rho_u^w$ (kgm <sup>-3</sup> )	Q (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	$\rho_s^w - \rho_i^w$ (kgm <sup>-3</sup> )	$r_H + r_{ST}$ (sm <sup>-1</sup> )
18-9-'78	12.20	19.1	10.1	6.1	0.0056	9.0	81*
	12.39	18.8	11.5	8.9	0.0053	7.3	101
	13.01	18.8	9.1	4.5	0.0051	9.7	78*
	13.25	16.6	10.7	8.8	0.0076	5.9	79
	13.42	15.6	8.2	3.9	0.0072	7.4	88*
22-9-'78	8.34	13.5	12.0	11.2	0.0086	1.5	48
	9.11	13.7	9.8	7.4	0.0072	3.9	44*
	9.28	14.3	12.2	11.4	0.0079	2.1	66
	9.58	14.0	9.0	6.5	0.0079	5.0	48*

\* met gedroogde lucht.  
 with artificially dried air.

Deze metingen tonen geen afhankelijkheid van  $r_{ST}$  van het vochtdeficit aan. De variatie van het vochtdeficit is echter niet zo ruim dat een dergelijke afhankelijkheid ook door de metingen uitgesloten wordt. Het is aan te bevelen dit soort metingen nog eens te verrichten, maar dan met een verbeterde drogingsmethode, en eventueel gecombineerd met een inrichting om de toegevoerde lucht juist vochtiger te maken.

##### 5. VERGELIJKING TUSSEN DE STATIONAIRE EN DE INSTATIONAIRE METHODE

Een vergelijking tussen de resultaten van de beide methoden om  $r_{\Sigma}$  te bepalen is een middel om mogelijke systematische fouten in  $r_{\Sigma}$  te onderkennen. Beide methoden hebben hun zwakke punten. Mogelijke bronnen van fouten bij de instationaire methode zijn de onzekerheid in de grootte van de oppervlaktetemperatuur, het verloop van de oppervlaktetemperatuur gedurende de metingen en, bij de uitwerking van de metingen, de benadering van de  $\ln [\rho^w(T_0) - \rho^w(t)] - t$  curve door een rechte lijn tussen  $t = 9$  en  $t = 27$  s.

Bij de stationaire methode is er ook de onzekerheid in de oppervlaktetemperatuur. Enig verloop van de oppervlaktetemperatuur is van minder belang, omdat de relevante metingen vrijwel op één en hetzelfde tijdstip worden uitgevoerd. Beide methoden leveren  $r_H + r_{ST}$ , en niet  $r_{ST}$  zelf.

Ten behoeve van de vergelijking tussen de twee methoden zijn uit het waarnemingsmateriaal van 1977 en 1978 paren metingen gevormd; de ene meting met de instationaire methode, de andere uitgevoerd volgens de stationaire methode, kort vóór of na de eerste meting. De metingen in 1977 werden verricht bij een windsnelheid in de doos van  $1.28 \text{ ms}^{-1}$  ( $U_{\text{circ}} = 100 \text{ V}$ ), in 1978 bij  $2.79 \text{ ms}^{-1}$ . Daarom werden voor 1977 de uitkomsten van beide methoden met 16 % verlaagd (zie fig. 4).

De uiteindelijke resultaten zijn weergegeven in fig. 8. Het blijkt dat de waarden van  $r_{\Sigma}$ , bepaald volgens beide methoden, gemiddeld genomen niet systematisch van elkaar verschillen. Er is wel een spreiding; de meeste waarnemingen verschillen niet meer dan

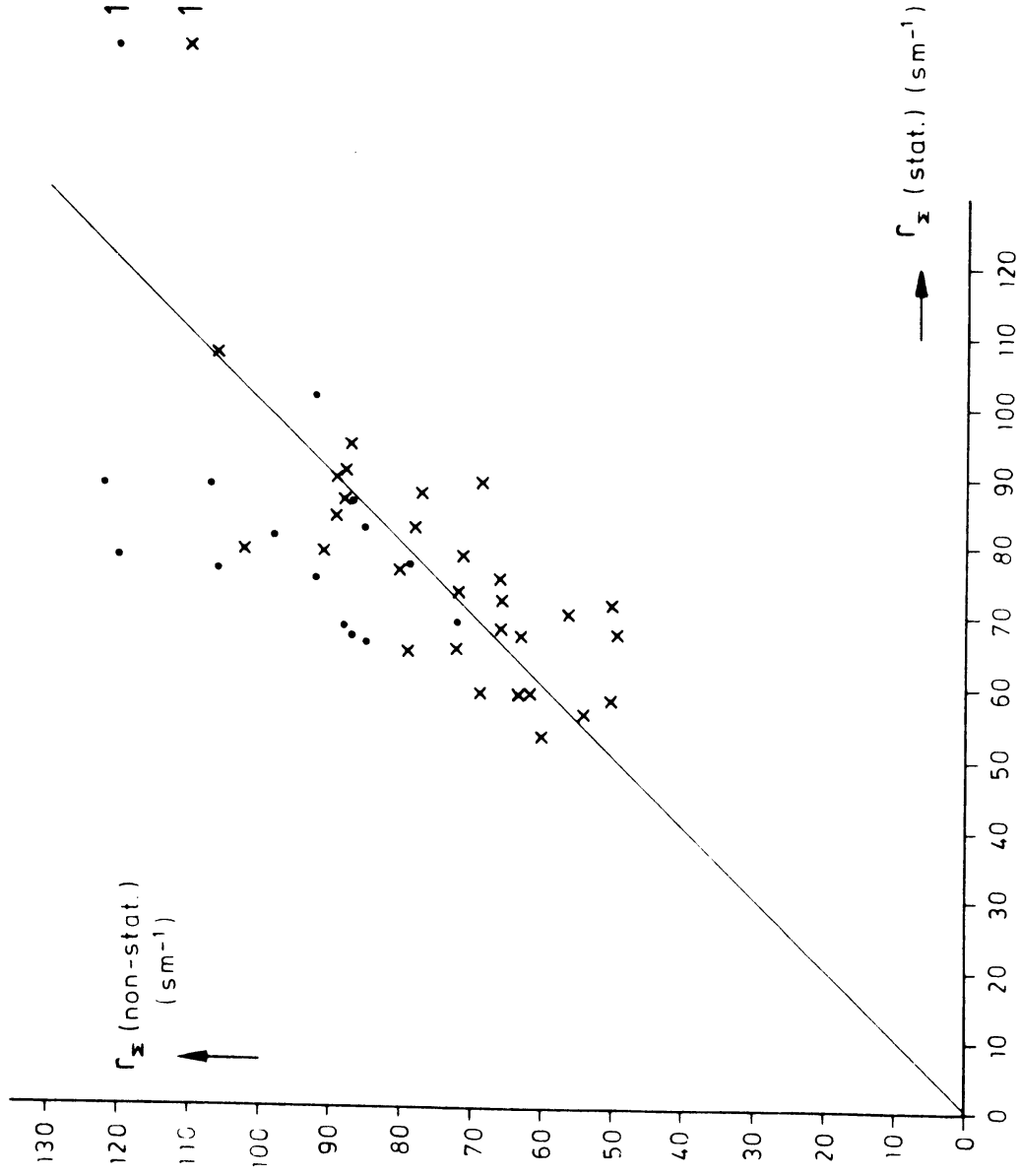


Fig. 8 Vergelijking van de stationaire methode en de instationaire methode.  
 Comparison of the stationary and non-stationary method.

8 September 1978  
 I instationairy method  
 o stationairy method

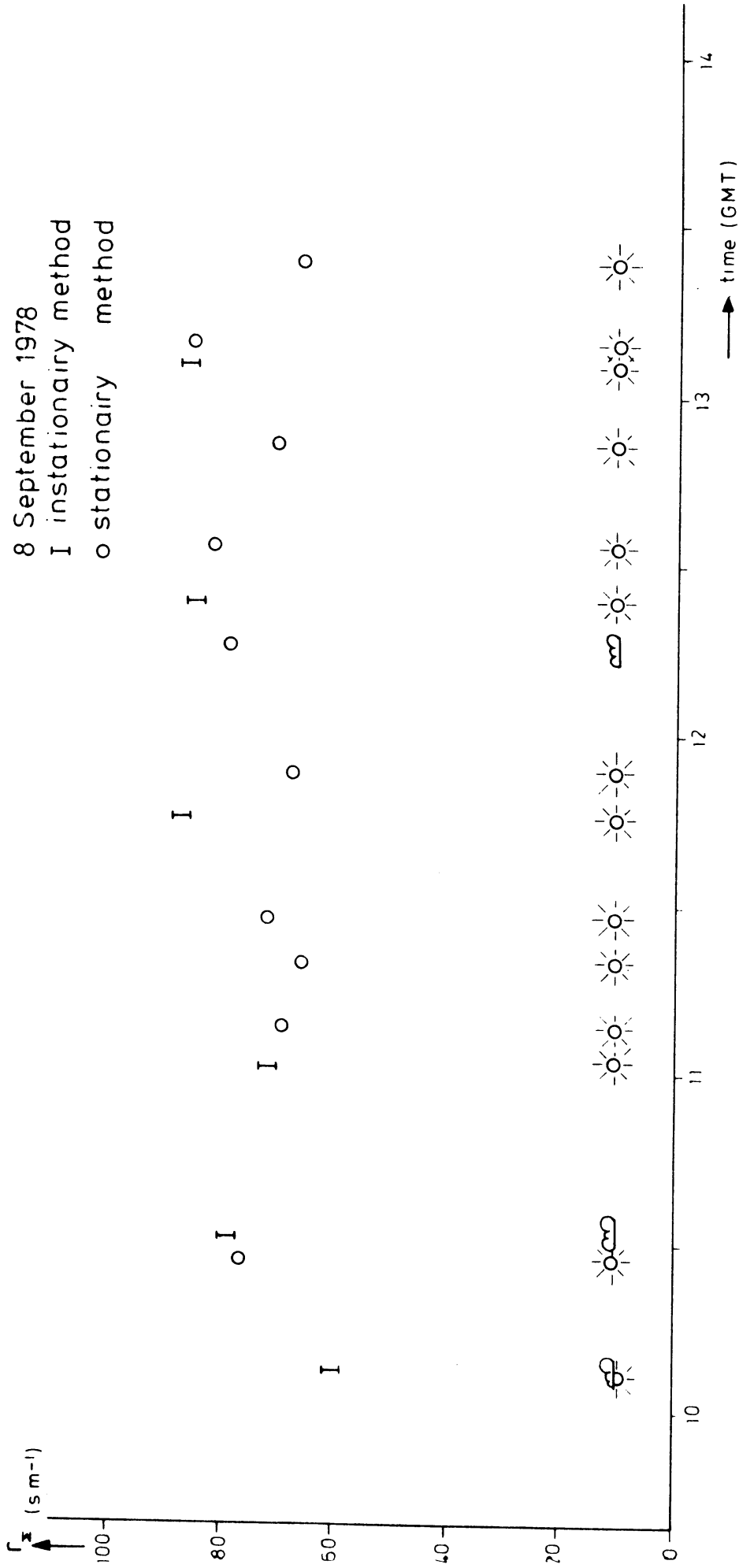


Fig. 9 Vergelijking van de dagelijkse gang van  $r_{\Sigma}$  volgens de stationaire en de instationaire methode.  
 ☁ = bewolkt; ☀ = zon; ☁☀ = wel schaduwen, maar geen vol zonlicht.  
 Example of the daily course of  $r_{\Sigma}$ , according to the stationary and the non-stationary method.  
 ☁ = cloudy; ☀ = sunshine; ☁☀ = shadows, but no full sunshine.

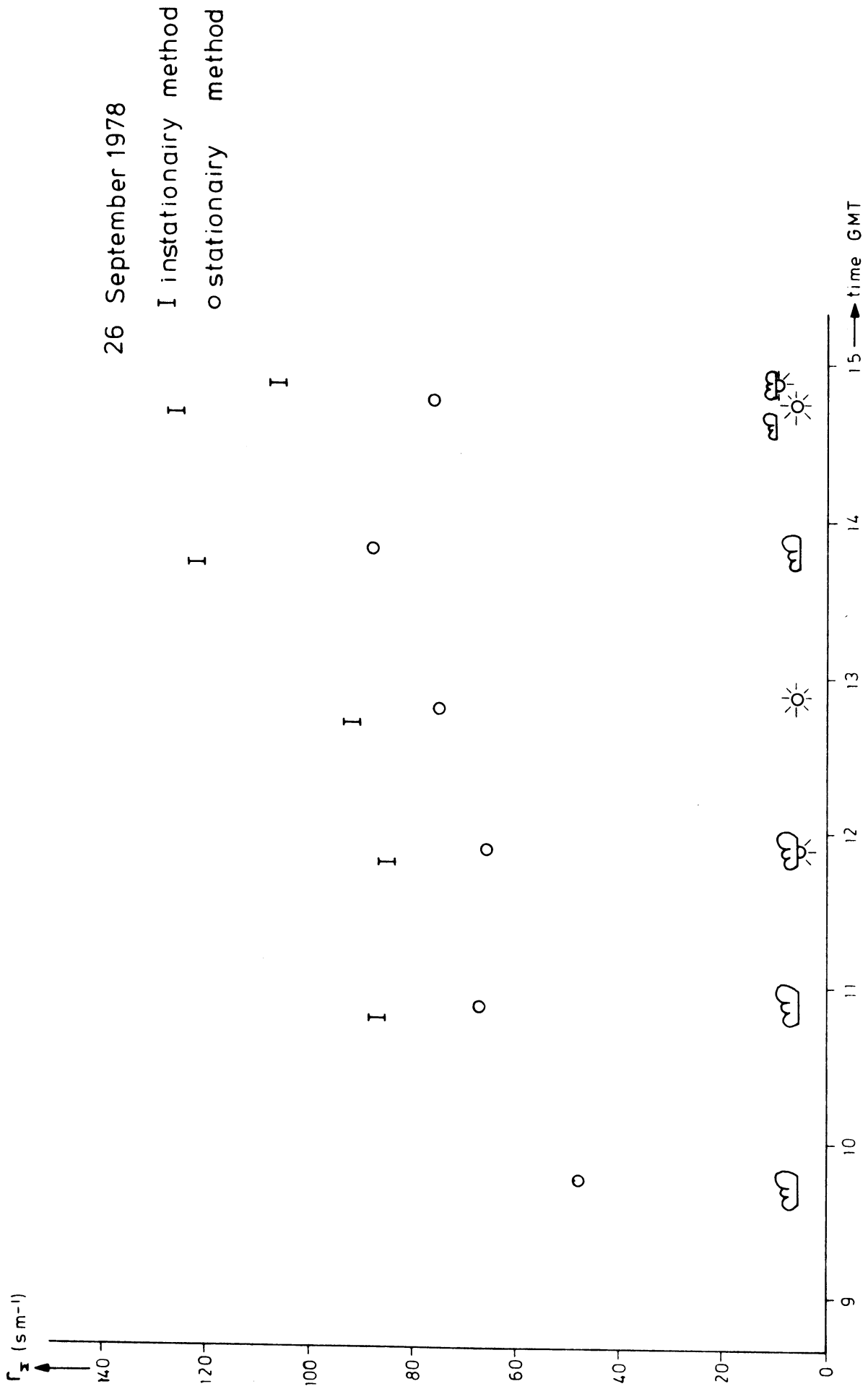


Fig. 10 Als fig. 9.  
Like fig. 9.

$20 \text{ sm}^{-1}$ . In 1978 is in het algemeen  $r_{\Sigma}$ , bepaald met de instationaire methode, groter dan volgens de stationaire werkwijze. In 1977 was dat niet het geval. Alhoewel fig. 8 in zijn geheel genomen geen systematische afwijkingen laat zien, is het beeld anders als we de metingen dag voor dag bekijken. De figuren 9 en 10 geven het verloop van  $r_{\Sigma}$  met de tijd voor twee dagen in 1978. Op de ene dag zijn er geen systematische verschillen tussen de twee bepalingen, maar op de andere dag wel. De verschillen gaan echter niet uit boven hetgeen men alleen al mag verwachten op grond van een onzekerheid van  $1^{\circ}\text{C}$  in de oppervlaktetemperatuur bij de stationaire methode (zie par. 4.1).

Concluderend kunnen we stellen dat de instationaire methode, ondanks de vereenvoudigingen in de theorie en in de uitwerking van de meetgegevens, toch waarden voor  $r_{\Sigma}$  levert die vergelijkbaar zijn met de, minder veronderstellingen vereisende, stationaire methode. De waarnemingen duiden op een onzekerheid van ca.  $20 \text{ sm}^{-1}$  in de stomataire weerstand bepaald met de instationaire of met de stationaire methode, bij een  $r_{\Sigma}$  van ca. 50 tot  $100 \text{ sm}^{-1}$ .



6. VERGELIJKING VAN DE STOMATAIRE WEERSTAND VOLGENS DE STOMATAIRE DOOS EN DIE VOLGEND UIT ENERGIEBALANSMETINGEN

6.1 Bepaling van  $r_{ST}$  uit energiebalansmetingen en weerstandenmodel

De verdamping van het proefterrein te Cabauw, waar ook de metingen met de stomataire doos zijn verricht, wordt continu gemeten door middel van de energiebalansmethode. Deze komt erop neer dat gemeten of bepaald worden: de netto straling ( $Q^*$ ), de verhouding tussen de voelbare en latente warmtestroom ( $\beta$ ) en de bodemwarmtestroom ( $G$ ). Met deze gegevens kunnen de voelbare warmtestroom ( $H$ ) en de latente warmtestroom (= verdamping) ( $LE$ ) worden berekend, gebruik makend van de energiebalansvergelijking

$$Q^* - G = H + LE \quad (13)$$

In deze vergelijking zijn enkele minder belangrijke processen, zoals opslag van warmte in het gewas en fotosynthese, weggelaten. De twee energiestromen  $H$  en  $LE$  zijn nu weer te modelleren met een weerstandenmodel, waarbij het gewas als een twee-dimensionaal oppervlak wordt beschouwd met een zekere oppervlaktetemperatuur. De voor de flux van waterdamp relevante weerstanden zijn de weerstand voor het transport vanaf het gewasoppervlak naar het referentieniveau in de atmosfeer, en de weerstand voor het transport van binnen het blad naar buiten, de stomataire weerstand dus. De eerste weerstand ( $r_H$ ) kan worden berekend uit de grootte van de windsnelheid (op bijv. 2 m), de luchttemperatuur, de ruwheidslengte  $z_0$  van het terrein en de grootte van de voelbare warmtestroom ( $H$ ). (Er moet hierbij rekening worden gehouden met het verticale transport tussen de gewaselementen, hetwelk noch geheel turbulent, noch geheel moleculair diffuus is). Voor meer details van de berekening van  $r_H$  verwijzen we naar De Bruin en Kohnsiek, 1979. Hier zij alleen het resultaat vermeld:

$$r_H(z) = \frac{1}{\alpha} \frac{1}{ku_*} \left[ \ln \frac{z}{z_0} - 1.08 \sqrt{-\frac{z}{L}} \right] + B^{-1} u_*^{-1} \quad (14)$$

waarin

$$\alpha = 1.35 \frac{\ln \frac{z}{l} - 1.08 \left( \sqrt{-\frac{z}{L}} - \sqrt{-\frac{l}{L}} \right)}{\ln \frac{z}{l} - 1.42 \left( \sqrt{-\frac{z}{L}} - \sqrt{-\frac{l}{L}} \right)} \quad (15)$$

$$L = \frac{-u_*^3 T \rho c_p}{\text{kg H}} \quad (16)$$

$$k = 0.35 \quad (17)$$

$$B^{-1} = 6.27 u_*^{1/3} \quad (18)$$

$$u_* = k u \left[ \ln \frac{z}{z_0} - 1.08 \sqrt{-\frac{z}{L}} \right] \quad (19)$$

$$z_0 = 0.02 \text{ m}, \quad l = 0.08 \text{ m} \quad (20)$$

Hierin is  $g$  de versnelling van de zwaartekracht,  $T$  de luchttemperatuur in K en  $l$  de gewashoogte. Het referentieniveau is  $z$  (m) boven het aardoppervlak. Bovenstaande formules zijn gebaseerd op werk van Businger et al. (1971), Van Ulden (interne mededeling betreffende de zgn. stabiliteitscorrecties  $1.08 \sqrt{-\frac{z}{L}}$  en  $1.42 \sqrt{-\frac{z}{L}}$ ) en Thom (1972). De stomataire weerstand is dan te bepalen volgens:

$$r_{ST} = \frac{\rho_s^w(T_0) - \rho^w(z)}{E} - r_H(z) \quad (21)$$

$E$  is de verdamping (in  $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) volgend uit de energiebalansmetingen. De oppervlaktetemperatuur  $T_0$  wordt berekend uit

$$T_0 = T(z) + r_H(z) \frac{H}{\rho c_p} \quad (22)$$

met  $H$  de voelbare warmtestroom (in  $\text{Wm}^{-2}$ ), volgend uit de energiebalansmetingen.

De stomataire weerstand is ook op andere wijze uit de energiebalansmetingen te bepalen, nl. met behulp van de formule Penman-Monteith: (zie bijv. Monteith, 1973)

$$LE = \frac{s(Q^*-G) + \rho c_p \{ \rho_s^w(T(z)) - \rho^w(z) \} / r_H}{s + \gamma \left( 1 + \frac{r_{ST}}{r_H} \right)} \quad (23)$$

waaruit  $r_{ST}$  is op te lossen:

$$r_{ST} = \frac{\rho c_p}{\gamma} \frac{\rho_s^w(T(z)) - \rho^w(z)}{LE} + \left( \frac{s}{\gamma} \beta - 1 \right) r_H \quad (24)$$

Hierin is  $s$  de helling van de verzadigde waterdampconcentratiecurve (in  $\text{kg m}^{-3}\text{K}^{-1}$ ),  $\gamma$  de psychrometerconstante (eveneens in  $\text{kg m}^{-3}\text{K}^{-1}$ ) en  $\beta$  de zgn. Bowen-verhouding,  $\beta = H/LE$ .

Bij de bepaling van  $r_{ST}$  met verg. (24) wordt dus de oppervlakte-temperatuur omzeild; in feite is verg. (24) tot stand gekomen uit verg. (21), (22) en de energiebalansvergelijking (13), door  $T_0$  uit dit stelsel te elimineren en het verschil in verzadigde waterdampconcentratie bij de temperaturen  $T(z)$  en  $T_0$  te benaderen met  $s(T(z)-T_0)$ . Verg. (24) verschaft ons de mogelijkheid de gevoeligheid van  $r_{ST}$  voor fouten in andere grootheden, nl.  $LE$ ,  $r_H$  en  $\beta$ , te onderzoeken. We gaan ervan uit dat de fout in de gemeten grootheden  $\rho^w(z)$  en  $T(z)$  van ondergeschikt belang is.

De term  $\left(\frac{s}{\gamma} \beta - 1\right)r_H$  kan zowel positief als negatief zijn.  $\frac{s}{\gamma}$  heeft de volgende waarden: bij  $10^\circ\text{C}$ : 1.26;  $20^\circ\text{C}$ : 2.20;  $30^\circ\text{C}$ : 3.68, terwijl de grootte van  $\beta$  voor een gewas dat goed van water is voorzien tussen 0.2 en 0.5 ligt (bij uitdroging kan  $\beta$  veel groter worden). De factor  $\frac{s}{\gamma} \beta - 1$  zal, globaal genomen, dus waarden tussen -0.75 en 2 kunnen aannemen, en de gehele tweede term zal dus tussen  $-0.75 r_H$  en  $2 r_H$  kunnen variëren. Voegen we hierbij dat de eerste term in de praktijk even groot tot enkele malen zo groot als  $r_H$  kan zijn, dan blijkt dat een algemeen geldende foutenschatting voor  $r_{ST}$  niet goed is uit te voeren. Per geval zal een foutenberekening moeten worden uitgevoerd, hetgeen is geschied. Er is hierbij uitgegaan van veronderstelde fouten in de directe meetgegevens, leidende tot fouten in  $LE$  en  $\beta$ , en een onzekerheid in  $r_H$ .

De gehanteerde lineaire benadering voor de fout in  $r_{ST}$  luidt:

$$\delta(r_{ST}) = \frac{\rho^c_p}{\gamma} \frac{\Delta p^w}{LE} \frac{\delta(R-G)}{R-G} + \left( \frac{\rho^c_p}{\gamma} \frac{\Delta p^w}{R-G} + \frac{s}{\gamma} r_H \right) \delta\beta + \left| \frac{s}{\gamma} \beta - 1 \right| \delta r_H \quad (25)$$

Hierbij is  $\Delta p^w = \rho_s^w(T(z)) - \rho^w(z)$  gesteld. Bij de berekening van  $\delta(r_{ST})$  is aangenomen:  $\delta(R-G)/(R-G) = 0.1$  en  $\delta r_H = 0.2 r_H$ . De fout in de Bowen-verhouding,  $\delta\beta$ , volgde uit de veronderstelling dat de meting van verticale temperatuurverschillen, uit welke de Bowen-verhouding berekend wordt, een onnauwkeurigheid van  $0.03^\circ\text{C}$  heeft.

## 6.2 Vergelijking met de stomataire doos

De vergelijking tussen de stomataire weerstand, volgend uit de energiebalansmetingen en die volgens de stomataire doos, is gegeven in tabel 3 en figuur 11. In de tabel zijn veelal twee waarden voor  $r_{ST}$  opgenomen, overeenkomend met twee overeenkomstige opstellingen ter bepaling van de Bowen-verhouding. De in de figuur weergegeven waarden zijn in dat geval de gemiddelden. Uit de tabel blijkt, dat de twee energiebalanswaarden voor  $r_{ST}$  systematisch verschillen. Dit kan te wijten zijn aan instrumentele verschillen tussen de opstellingen. Fig. 11 toont aan dat er een duidelijk verband is tussen de uitkomsten van de twee methoden ter bepaling van  $r_{ST}$ . De regressierechte is  $y = 0.97x + 14$ , de correlatiecoëfficiënt is 0.916. Leggen we op het oog een  $45^\circ$  lijn door de puntenverzameling, dan snijdt deze de y-as bij  $r_H + r_{ST} = 10 \text{ sm}^{-1}$ . Hieruit volgt een schatting voor de  $r_H$  van de stomataire doos, nl.  $r_H = 10 \text{ sm}^{-1}$ . Eerder, in paragraaf 3.1, is al gesteld dat  $r_H < 20 \text{ sm}^{-1}$  zou zijn. Fig. 11 geeft dus enige ondersteuning aan die afschatting.

Op grond van deze resultaten mogen we stellen dat met de stomataire doos een stomataire weerstand wordt gemeten, welke toepasbaar is als invoerparameter in het weerstandenmodel voor de verdamping, gegeven door verg. (23). Deze uitspraak is alleen getoetst voor het energiebalansterrein.

1978

- PS 1, PS 2
- x PS 1
- o PS 2

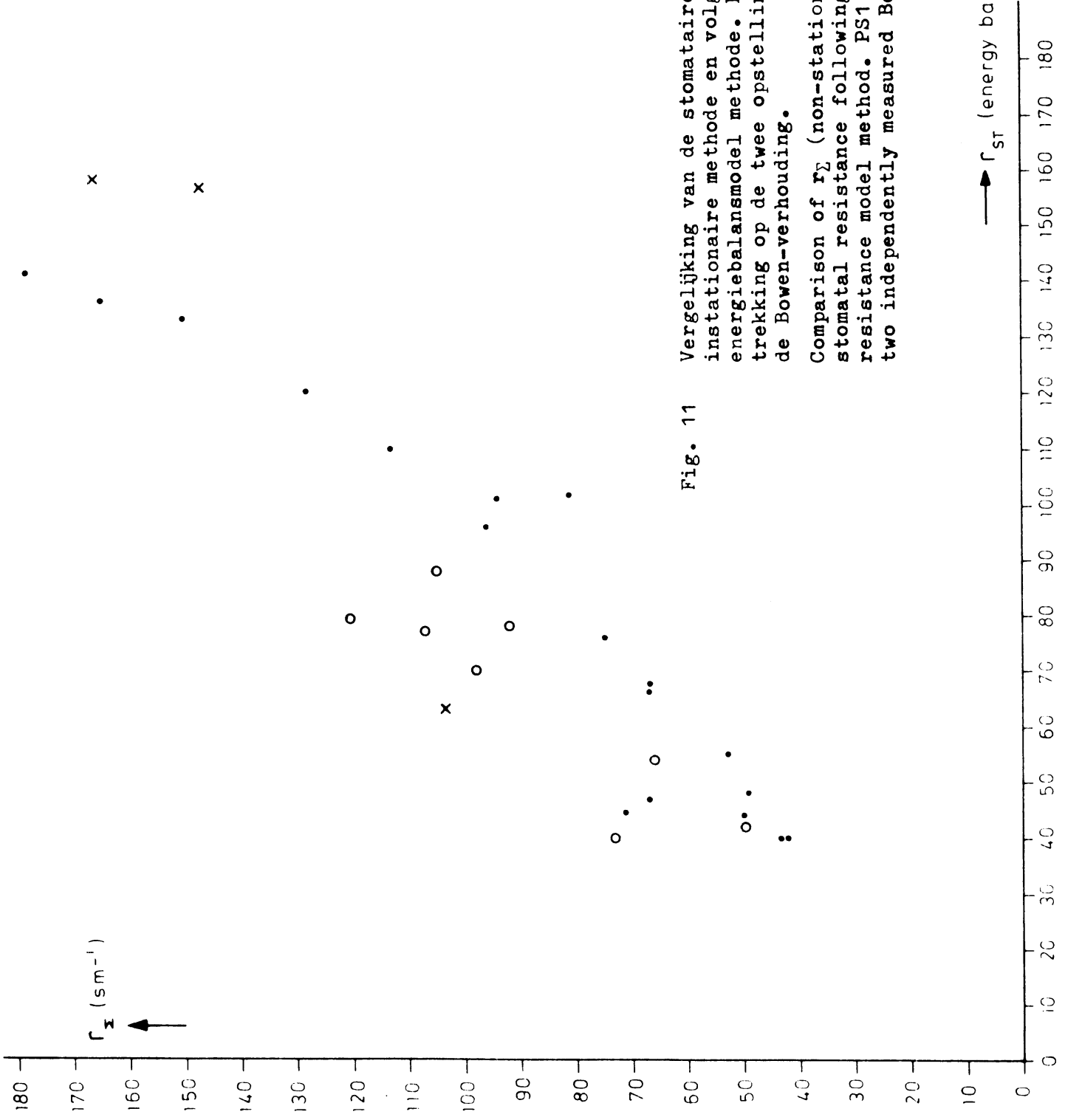


Fig. 11

Vergelijking van de stomataire weerstand volgens de instationaire methode en volgens de gecombineerde energiebalansmodel methode. PS1 en PS2 hebben betrekking op de twee opstellingen ter bepaling van de Bowen-verhouding.

Comparison of  $r_s$  (non-stationary method) and the stomatal resistance following from the energy balance-resistance model method. PS1 and PS2 are related to two independently measured Bowen ratios.

→  $r_{sr}$  (energy balance) ( $sm^{-1}$ )

Tabel 3. Vergelijking  $r_H+r_{ST}$  (stomataire doos) -  $r_{ST}$  (energiebalans)  
 Comparison  $r_H+r_{ST}$  (stomatal chamber) -  $r_{ST}$  (energy balance)

datum	tijdvak* (GMT)	$r_H+r_{ST}$ ( $sm^{-1}$ )	$r_{ST}$ ( $sm^{-1}$ )	$\delta r_{ST}$ (EB) ( $sm^{-1}$ )	datum	tijdvak* (GMT)	$r_H+r_{ST}$ ( $sm^{-1}$ )	$r_{ST}$ ( $sm^{-1}$ )	$\delta r_{ST}$ (EB) ( $sm^{-1}$ )
1978					1978				
24-5	12.00	71	37/53	18/24	1-8	10.00	67	63/70	18/17
30-5	09.00	103	63	11		10.30	67	64/70	13/13
20-6	13.00	147 (2)	156	26		11.00	75 (3)	72/80	12/14
	14.00	166 (3)	158	26		11.30	94	97/106	23/23
21-7	09.00	53	52/58	24/26		12.00	81	98/107	30/30
	09.30	49	44/53	18/19	31-8	13.00	96	93/100	17/17
	10.30	42	35/46	9/9		12.00	73	40	8
	11.30	43	34/47	7/10		12.30	66	54	15
	12.30	50	39/50	7/10		13.00	50	42	12
	13.30	67	42/52	8/10	18-9	12.30	98	70	12
31-7	09.30	145	88	16		13.00	92	78	13
	10.30	113	110	19		13.30	120	79	18
	11.30	128	116/125	17/19		14.00	107	77	21
	12.30	150	132/135	19/19					
	13.30	178	135/147	36/36					
	14.30	165	136	29					

\*  $r_{ST}$  (EB) is berekend uit halfuur-gemiddelde invoergegevens; het tijdvak 13.00 is de periode 12.30-13.00.  
 $r_{ST}$  (EB) is calculated with half-hour averaged input parameters; the period 12.30-13.00 is indicated by 13.00, and so on.

\*\* Tussen haakjes is het aantal metingen van  $r_H+r_{ST}$  in een tijdvak gegeven, indien dit meer dan één is.  
 The number of measurements of  $r_H+r_{ST}$  is indicated between brackets, if more than one.

\*\*\* Indien er twee bepalingen van  $r_{ST}$  (EB) zijn, zijn beide gegeven.  
 If two measurements of  $r_{ST}$  (EB) are available, both are given.

## CONCLUSIE

Het is gebleken dat waarden van de stomataire weerstand, bepaald met de stomataire weerstandsmeter op het energiebalans-terrein te Cabauw (kort gras), goed overeenkomen met bepalingen van deze grootheid uit de combinatie van de energiebalansmetingen met een weerstandenmodel voor het transport van waterdamp in de atmosfeer. Verder is gebleken dat twee verschillende meetmethoden - bij de ene is de doos, op het gewas na, afgesloten, bij de andere wordt er geventileerd - ongeveer dezelfde resultaten geven. Een gedetailleerde beschouwing van de processen bij de eerste methode (zie Appendix) geeft een zekere ondersteuning aan de routinematig gevolgde procedure ter bepaling van de stomataire weerstand, waarbij alleen gebruik wordt gemaakt van de meting van de luchttemperatuur en luchtvochtigheid in de doos op de tijdstippen 9 s en 27 s na plaatsing van de doos. De methode geeft de stomataire weerstand op een constante grootheid na, welke ca.  $10 \text{ sm}^{-1}$  bedraagt. Het apparaat is, dank zij de beperkte omvang en het geringe extra instrumentarium, in de praktijk gemakkelijk hanteerbaar gebleken.

## DANKWOORD

De instrumentele afdeling van het KNMI wordt dankgezegd voor de snelle en efficiënte wijze waarop de stomataire doos is gemaakt. De metingen van 1977 zijn verricht door de heer J. Schols; hiervoor, en voor zijn inbreng in de interpretatie van de metingen, is schrijver dezes hem erkentelijk.





APPENDIX: EEN NADERE BESCHOUWING VAN DE ENERGIEHUISHOUDING  
VAN DE STOMATAIRE WEERSTANDMETER

1. De instationaire methode

Bij de in dit rapport beschreven methode ter bepaling van  $r_{ST}$  is onder meer verondersteld dat de oppervlaktetemperatuur van het gewas tijdens de meting niet verandert. Uit metingen met een stralingsthermometer is gebleken dat aan deze veronderstelling meestal niet wordt voldaan. Dit zou een weerslag kunnen hebben op de waarde van de aldus bepaalde stomataire weerstanden. Deze kwestie wordt in het onderstaande nader onderzocht.

We beginnen bij de energiebalansvergelijking voor het gewas:

$$Q^* = H + LE + G + S \quad (A.1)$$

Hierin is  $Q^*$  de netto straling ontvangen door het gewas (in  $Wm^{-2}$ ),  $G$  de bodemwarmtestroom (positief gerekend als er warmte aan de bodem wordt toegevoegd) en  $S$  de opslag van warmte in het gewas. In tegenstelling tot verg. (13) is in deze beschouwing dit laatste proces wel van belang. Enkele minder ter zake zijnde termen, zoals de energie benodigd voor fotosynthese, zijn weggelaten.

Ten gevolge van  $S$  zal de temperatuur van de (nog steeds "platgeslagen") gewaslaag ( $T_o$ ) veranderen; we kunnen schrijven:

$$S = C \frac{dT_o}{dt} \quad (A.2)$$

$C$  is de warmtecapaciteit van het gewas per eenheid van oppervlak (dimensie  $JK^{-1}m^{-2}$ ). Evenzo zal door  $H$  de luchttemperatuur met de tijd veranderen:

$$H = \rho c_p \frac{V}{A} \frac{dT}{dt} = \rho c_p \frac{T_o - T}{r_H} \quad (A.3)$$

en evenzo voor de vochtigheid:

$$LE = L \frac{V}{A} \frac{d\rho^w}{dt} = L \frac{\rho_s^w(T_o) - \rho^w}{r_H + r_{ST}} \quad (A.4)$$

In verg. (A.3) is aangenomen dat er geen andere toevoer van warmte aan de lucht in de doos is dan die van het gewas. Deze veronderstelling dient nader te worden toegelicht. In de eerste plaats geeft de propeller, die de luchtcirculatie in de doos in stand houdt, een constante toevoer van energie. Het aan de propeller toegevoerde mechanisch vermogen is ca. 60 W (bij  $u = 2.8 \text{ ms}^{-1}$ ). In de tweede plaats is er transport van warmte van de lucht naar de wand van de perspex doos. Teneinde de grootte van deze transporten (energietoevoer door de propeller, energietoevoer naar de wand) te kunnen kwantificeren, hebben we een simulatieproef uitgevoerd waarbij de doos op een isolerende, vlakke ondergrond werd geplaatst en er door middel van een verwarmingselement, geplaatst in de doos, een regelbaar thermisch vermogen aan de lucht werd toegevoerd. Het verloop van de luchttemperatuur in de doos werd geregistreerd. Na inschakeling van de circulatiemotor en het verwarmingselement bleek er een snelle stijging van temperatuur op te treden, welke na ca. 10 s afvlakte tot een min of meer constant niveau. Dan was er kennelijk een evenwicht bereikt tussen het aan de lucht gedissipeerde vermogen door de propeller en het verwarmingselement, en het aan de wand afgegeven vermogen. Verder bleek dat de propeller alleen nauwelijks een temperatuurstijging gaf. Een extra vermogen van 10 W van het verwarmingselement gaf daarentegen wel een merkbare temperatuurstijging. We concluderen hieruit dat de interne dissipatien gevolge van de turbulente circulatie van de lucht kleiner is dan 10 W. Waar de rest van het door de propeller afgegeven vermogen blijft, kunnen we slechts naar gissen; misschien nemen de wanden van de doos door de wisselende belasting van de turbulente luchtstroming dit op.

Het temperatuurverschil tussen het bovengenoemde evenwichtsniveau en de begintoestand bleek ruwweg evenredig met het door het verwarmingselement gedissipeerde vermogen. Hiermee konden we een schatting maken van de warmteoverdrachtscoëfficiënt lucht-wand. Er moeten dan wel enkele veronderstellingen worden gemaakt; in de eerste plaats dat, vóór de aanvang van de proef, lucht en wand dezelfde temperatuur bezitten, en in de tweede plaats dat de temperatuur van het wandoppervlak, grenzend aan de lucht in

de doos, gedurende de eerste 10 s van het experiment weinig verandert. Ten slotte moet er nog een schatting worden gemaakt van het "effectieve" wandoppervlak. Namelijk, delen van de wand evenwijdig aan de luchtstroming zullen een veel slechtere warmte-wisselwerking met de lucht hebben dan delen die de stroming doen afbuigen. Als ruwe schatting hebben we genomen  $1 \text{ m}^2$ , maar het zou ook  $0.5 \text{ m}^2$  kunnen zijn. We vonden dan voor de warmte-overdrachtscoëfficiënt K:

$$K \approx 30 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Aan de hiervoor genoemde veronderstellingen is redelijk voldaan. Het temperatuurverloop van het oppervlak van de wand is, bij de gegeven K, te berekenen; het blijkt dat dit gedurende de eerste 10 s inderdaad gering is, ook indien K tweemaal zo groot is als hierboven gegeven. De weerstand, overeenkomend met  $K = 30 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ , is  $r_H = 40 \text{ sm}^{-1}$ . Vergelijken we dit met de eerdere schatting van  $r_H$  voor de koppeling van de lucht met het gewas,  $r_H \approx 10\text{-}20 \text{ sm}^{-1}$ , dan blijkt dat de lucht zowel met het gewas als met de wand van de doos een sterke wisselwerking heeft. Dit heeft waarschijnlijk een stabiliserende invloed op de gewastemperatuur: indien de lucht geen wisselwerking met de wand zou hebben, zou de gewastemperatuur tijdens een meting sterker verlopen dan nu het geval is. Men zou ook kunnen zeggen dat de schijnbare warmtecapaciteit van het gewas groter lijkt dan op grond van de massa van het gewas alleen. Hieraan moet direct worden toegevoegd dat zo'n schijnbare warmtecapaciteit gedurende het verloop van een meting verandert, aangezien de indringdiepte van een temperatuurverandering in perspex eindig is; bijv. voor een periodieke temperatuurverandering met een periode van 10s is dit ca. 0.6 mm, klein dus vergeleken met de dikte van de wand (ca. 5 mm). (N.B.: de warmtegeleidingscoëfficiënt van perspex is  $0.23 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ , de soortelijke warmte  $2.2 \cdot 10^6 \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$ ).

In het volgende verwaarlozen we de turbulente dissipatie van de lucht, en verdisconteren we de wisselwerking met de wand in de grootte van de warmtecapaciteit C in verg. (A.2).

Differentiatie van verg. (A.4) naar de tijd geeft:

$$\frac{d^2 \rho^w}{dt^2} \frac{V}{A} (r_H + r_{ST}) + \frac{d \rho^w}{dt} = \frac{d \rho_s^w(T_o)}{dt} = s \frac{dT_o}{dt} \quad (A.5)$$

Combineren met verg. (A.1), (A.2), (A.3) en (A.4) geeft:

$$\frac{d^2 \rho^w}{dt^2} \frac{V}{A} (r_H + r_{ST}) + \left(1 + s \frac{\rho LV/A}{C}\right) \frac{d \rho^w}{dt} = \frac{s}{C} \left(Q^* - G - \rho c_p \frac{dT}{dt}\right) \quad (A.6)$$

Deze differentiaalvergelijking is niet analytisch oplosbaar, omdat  $\frac{dT}{dt}$  (in het rechter lid) van de tijd afhangt. De oplossing hebben we numeriek aangepakt volgens de volgende stappen:

1. onbekende parameters zijn  $T$ ,  $T_o$  en  $\rho^w$  op tijdstip  $t$ ;  
veronderstel dat de begintoestand  $(T, T_o, \rho^w)$  op  $t=0$  is gegeven;
2. bereken met (A.3):  $H$ ; met (A.4):  $LE$ ; met (A.1) en (A.2):  
 $\frac{dT_o}{dt}$ ;
3.  $H \xrightarrow{(A.3)} T(0+\Delta t)$ ;  $LE \xrightarrow{(A.4)} \rho^w(0+\Delta t)$ ;  $\frac{dT_o}{dt} \rightarrow T_o(0+\Delta t)$ ;
4. herhalen.

Het resultaat is  $T$ ,  $\rho^w$  en  $T_o$  op tijdstippen  $0, \Delta t, 2\Delta t, \dots$ , alsmede  $H$  en  $LE$  op die tijdstippen. De invoerparameters zijn (naast constante grootheden):  $Q^*$ ,  $G$ ,  $r_H$ ,  $r_{ST}$  en  $C$ .  $Q^*$  en  $G$  zijn constant verondersteld, alhoewel ze in feite met de tijd veranderen, omdat ze afhangen van de tijdafhankelijke oppervlaktetemperatuur.

We hebben de berekening uitgevoerd voor een tiental gevallen. Voor één geval (30 mei 1978, 08.33 GMT) hebben we uitvoerig de invoerparameters gevarieerd om zodoende tot een optimale overeenkomst tussen het berekende en het gemeten verloop van  $T$  en  $\rho^w$  te komen, en om de gevoeligheid voor variaties van de invoerparameters te onderzoeken. Voor de andere negen gevallen hebben we in beperkter mate variatie van invoerparameters toegepast, het accent leggende op een optimale overeenkomst voor de vochtigheid en minder voor de temperatuur. Steeds is getracht de overeenkomst te optimaliseren voor de eerste 30 seconden van een meting. De tijdstap was 0.1 s. Voor de begintoestand  $(T(o), T_o(o), \rho^w(o))$  zijn de gemeten waarden van  $T$  en  $\rho^w$  op

$t=0$ , en  $T_0(0) = T(9 \text{ s})$  (overeenkomstig de "eenvoudige" methode) gekozen.

Variatie van de invoerparameters voor het geval 30 mei 1978, 08.33 GMT, bracht het volgende aan het licht:

1. De beste passing werd bereikt met  $Q^*-G = 400 \text{ Wm}^{-2}$ ,  $C = 4000 \text{ Jm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ,  $r_H = 5 \text{ sm}^{-1}$  en  $r_{ST} = 95 \text{ sm}^{-1}$ . De verschillen tussen de berekende en de gemeten temperatuur en vochtigheid zijn weergegeven in fig. 12.
2. Variatie van  $Q^*-G$  en van  $C$  heeft weinig invloed op de passing van het verloop van de vochtigheid, maar duidelijk invloed op de passing voor het temperatuurverloop, vooral enige tijd na aanvang van de processen.
3. Variatie van  $r_H+r_{ST}$  heeft invloed op de vochtigheid.
4. Variatie van  $r_H$  heeft vooral in de beginfase invloed op het temperatuurverloop.  $r_H = 20 \text{ sm}^{-1}$  geeft een duidelijk te langzame toename van de temperatuur in de eerste 10 s. Aan de passing van het temperatuurverloop in de beginfase kan overigens slechts een beperkte betekenis worden toegekend, aangezien de invloed van een verschil in wandtemperatuur en gewasoppervlaktetemperatuur niet in rekening is gebracht.

Deze bevindingen impliceren dus dat de simulatie van het verloop van de vochtigheid in hoge mate door  $r_H+r_{ST}$  wordt beïnvloed, en in veel mindere mate door  $Q^*$ ,  $G$  en  $C$ . Geven we  $r_H$  een vaste waarde, dan volgt hieruit dat de bepaling van  $r_{ST}$  door middel van passing van het vochtigheidsverloop weinig gevoelig is voor  $Q^*$ ,  $G$  en  $C$ . Dit wordt nog eens geïllustreerd door het volgende staatje ( $r_{ST}$  afgerond op 10-tallen;  $r_H = 10 \text{ sm}^{-1}$ ):

$Q^*-G$ ( $\text{Wm}^{-2}$ )	$C$ ( $\text{Jm}^{-2}\text{K}^{-1}$ )	beste $r_{ST}$ ( $\text{sm}^{-1}$ )
600	4000	100
400	4000	90
200	4000	80
400	2000	90
400	6000	90

30 May 1978, 8.33 GMT

$Q^* = 400 \text{ W m}^{-2}$   
 $r_H = 5 \text{ s m}^{-1}$   
 $r_{ST} = 95 \text{ s m}^{-1}$   
 $C = 4000 \text{ J K}^{-1} \text{ m}^{-2}$

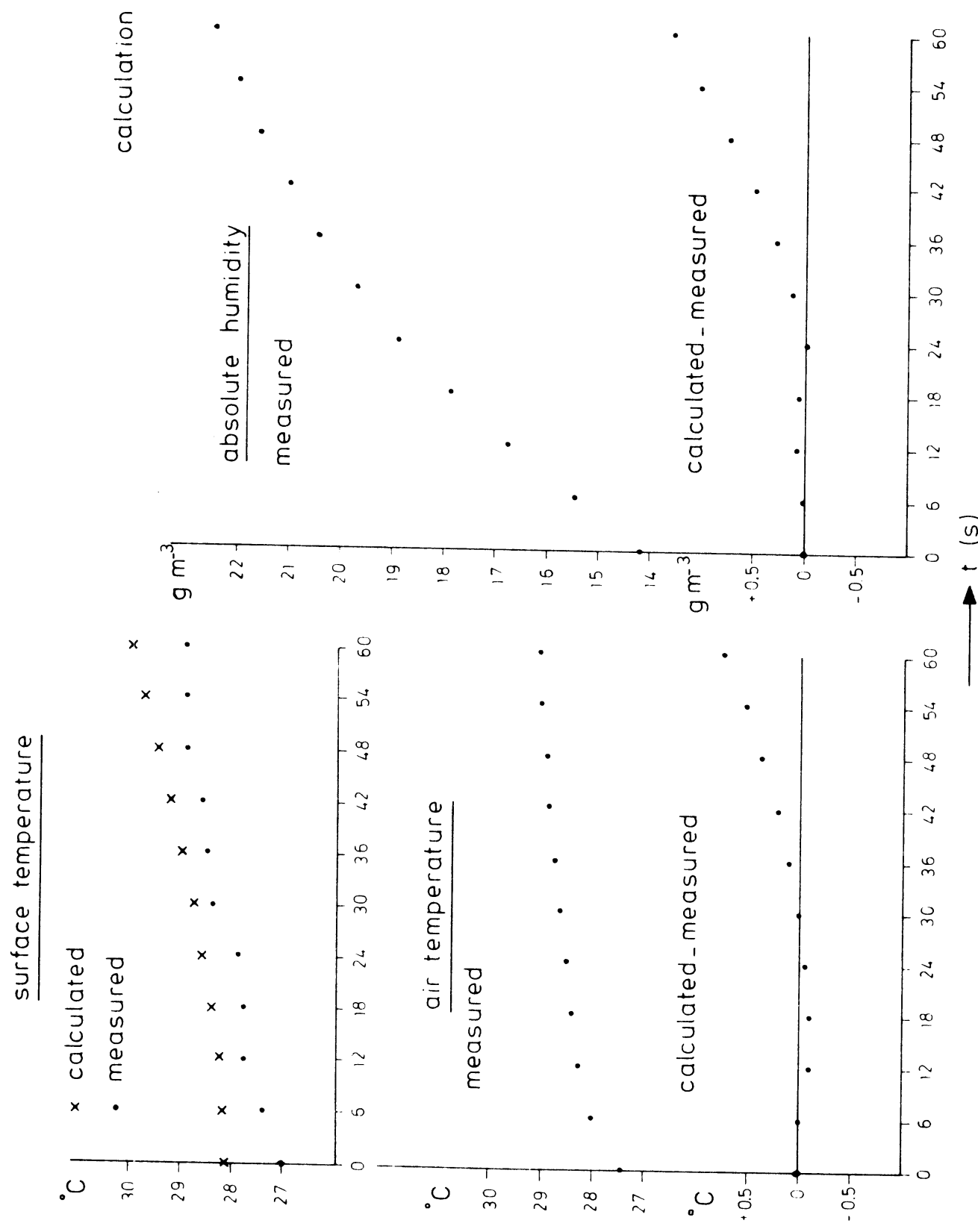


Fig. 12 Voorbeeld van de resultaten van de simulatieberekening voor de instationaire methode.  
 Example of the results of the simulating calculation for the non-stationary method.

Een uitvoerige variatie van  $Q^*-G$  en  $C$  voor de overige negen gevallen werd op grond van deze bevindingen overbodig geacht. In drie van de tien gevallen is de oppervlaktetemperatuur ook met een stralingsthermometer gemeten. Afgezien van vrij grote niveauverschillen (zie ook paragraaf 3.1) was de waargenomen toename van  $T_o$  in twee van die gevallen sterker dan de berekende toename (eerste 30 seconden), en in één geval ongeveer hetzelfde. De vraag blijft, in hoeverre de gemeten oppervlaktetemperatuur representatief is voor de "gemiddelde" gewastemperatuur. De optimale waarde voor de warmtecapaciteit  $C$ ,  $4000 \text{ Jm}^{-2}\text{K}^{-1}$ , is niet zo scherp vastgelegd, aangezien deze mede van de keuze van  $Q^*-G$  afhangt, maar ligt toch wel ruim boven de waarde voor gras alleen (ca.  $1000-2000 \text{ Jm}^{-2}\text{K}^{-1}$ , indien alleen de groene gewasdelen in rekening worden gebracht). Hieruit zou de bijdrage van de perspex wand tot  $C$  kunnen blijken.

In tabel A.1 is de vergelijking tussen  $r_{\Sigma}(1)$ , volgend uit het eenvoudige model waarbij alleen de waarnemingen op de tijdstippen  $t = 9 \text{ s}$  en  $t = 27 \text{ s}$  gebruikt worden, en  $r_{\Sigma}(2)$  volgend uit de bovenstaande passingsprocedure weergegeven. Bij de laatste is steeds  $C = 4000 \text{ Jm}^{-2}\text{K}^{-1}$  en  $r_H = 5 \text{ sm}^{-1}$  genomen. De waarden voor  $r_{\Sigma}(2)$  zijn afgerond op hele 10-tallen.

Tabel A.1. Vergelijking  $r_{\Sigma}$  eenvoudig model - numerieke procedure.  
Comparison  $r_{\Sigma}$  simple model - numerical procedure.

datum	tijd GMT	het weer	$T(o)$ $^{\circ}\text{C}$	$\rho^w(o)$ $\text{gm}^{-3}$	$T_o$ $^{\circ}\text{C}$	$r_{\Sigma}(1)$ $\text{sm}^{-1}$	$Q^*-G$ $\text{Wm}^{-2}$	$r_{\Sigma}(2)$ $\text{sm}^{-1}$	$\frac{r_{\Sigma}(1)}{r_{\Sigma}(2)}$	$\frac{T_o(30\text{s}) - T_o(0\text{s})}{T_o(0\text{s})}$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) (berekend)
24-5	12.47	B	11.23	9.2	13.60	71	120	80	0.89	0.44
30-5	08.33	Z	27.43	14.2	28.15	99	400	100	0.99	0.63
20-6	13.32	Z	26.07	8.9	28.70	162	500	160	1.01	1.02
21-7	08.53	B	14.59	9.1	14.96	53	150	40	1.33	0.09
	12.24	Z	18.23	12.5	19.39	50	450	60	0.83	1.55
31-7	12.12	Z	30.63	16.7	31.88	150	350	150	1.00	0.23
1-8	12.39	B	23.34	12.9	25.23	96	150	90	1.07	-0.72
31-8	12.23	B	16.34	9.5	16.84	66	150	50	1.32	-0.06
18-9	13.10	B	16.52	8.4	17.73	120	150	100	1.20	-0.05
26-9	12.41	Z	17.63	10.2	18.57	92	200	80	1.15	0.10

B = bewolkt/cloudy; Z = zonneshijn/sunshine.

Uit de tabel blijkt dat de verschillen tussen de beide  $r_{\Sigma}$ 's niet zo groot zijn, gezien de benaderingen die aan de eenvoudige methode ten grondslag liggen. We concluderen dat de bepaling van  $r_{\Sigma}$  met de temperatuur en vochtigheid op twee tijdstippen ( $t = 9$  en  $27$  s) geen systematisch andere waarden geeft dan een veel meer tijdrovende, ingewikkelder berekening. Voor toepassing van de stomataire doos in de praktijk betekent dit dat het niet constant zijn van de oppervlaktetemperatuur geen ernstige fouten in de bepaling van  $r_{ST}$  volgens de eenvoudige methode met zich brengt.

## 2. De stationaire methode

De grootste bron van onzekerheid in de bepaling van  $r_{ST}$  volgens deze methode is de grootte van de oppervlaktetemperatuur. We hebben deze gelijkgesteld aan de luchttemperatuur. Door de energiebalans (warmtebalans) van de lucht in de doos op te stellen, kunnen we dit nader onderzoeken:

$$\rho_c A_1 \frac{T_o - T}{r_H} + KA_2(T_w - T) + \rho_c Q(T_u - T) = 0 \quad (A.7)$$

Hierin is  $A_1$  het oppervlak van het grensvlak doos-gewas ( $0.194 \text{ m}^2$ ),  $A_2$  dat van het grensvlak lucht-wand doos (ca.  $1 \text{ m}^2$ ),  $K$  de warmteoverdrachtscoëfficiënt lucht-wand ( $30 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ , zie vorige paragraaf),  $T_o$  de gewasoppervlaktetemperatuur,  $T$  de luchttemperatuur in de doos,  $r_H$  de weerstand gewas-lucht (stel  $10 \text{ sm}^{-1}$ ),  $T_w$  de temperatuur van de wand,  $T_u$  de temperatuur van de aangevoerde lucht en  $Q$  het debiet van de aangevoerde lucht (wordt gemeten). Indien nu  $T_w - T$  en  $T_u - T$  bekend zijn, kunnen we met verg. (A.7)  $T_o - T$  bepalen. Metingen van  $T_u - T$  geven overwegend negatieve waarden, welke ca.  $-1 \text{ }^\circ\text{C}$  kunnen bedragen. Met  $Q \approx 7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  geeft dit een schatting van de derde term van (A.7):  $-10 \text{ W}$ . De schatting van de tweede term is lastiger: de grootte  $K$  is nogal onzeker, en het temperatuurverschil  $T_w - T$  niet gemeten. Als de stationaire toestand is ingetreden, kunnen we de tweede term vervangen door de term  $K'A(T_1 - T_w)$ ,



waarin  $K'$  de warmteoverdrachtscoëfficiënt met de buitenlucht is, en  $T_1$  de temperatuur van de buitenlucht.  $K'$  zal veel kleiner zijn dan  $K$ , omdat de stroming van de buitenlucht om de doos heen veel minder "krachtig" is dan de interne circulatie. We stellen  $K' = 0.1 K$ . Dan kunnen we, wegens de gelijkheid

$$K'A(T_1 - T_w) = KA(T_w - T) ,$$

stellen dat  $T_1 - T_w \approx T_1 - T$ . De grootte  $T_1 - T$  kunnen we schatten uit het waargenomen temperatuurverloop van de lucht in de doos, aannemende dat vóór het begin van een proef deze gelijk is aan de luchttemperatuur. We vinden dan:  $T_1 - T \approx -1$  °C. De schatting van de tweede term is dan:  $K'A(T_1 - T_w) \approx -3$  W. Nu kunnen we  $T_o - T$  bepalen:

$$T_o - T \approx 0.6 \text{ °C} .$$

Een veiligheidsmarge in acht nemend, kunnen we dus stellen dat de oppervlaktetemperatuur 1 °C kan verschillen met de luchttemperatuur. De consequenties hiervan voor de bepaling van  $r_H + r_{ST}$  werden in paragraaf 4.1 besproken.



LITERATUUR

- De Bruin, H.A.R. en W. Kohsiek, 1979: Toepassingen van de Penman-formule. KNMI W.R. 79-3.
- Businger, J.A., J.C. Wyngaard, Y. Izumi and E.F. Bradley, 1971: Flux profile relationships in the atmospheric surface layer. J. Atmos. Sci., 28, 181-189.
- Hall, A.E. en G.J. Hoffman, 1976: Leaf resistance response to humidity and water vapour transport in plants. Agronomy J. 68, 876-881.
- Keijman, J.Q. en W. Kohsiek, 1977: A simple model of the energy balance of a grass surface. Interne meded. KNMI (memorandum).
- Louwerse, W. en J.L.P. van Oorschot, 1969: An assembly for routine measurements of photosynthesis, respiration and transpiration of intact plants under controlled conditions. Photosynthetica 3, 303-315.
- Matthias, A.D., D.N. Yarger en R.S. Weinbeck, 1978: A numerical evaluation of chamber models for determining gas fluxes. Geoph. Res. Lett. 5, 765-768.
- Monteith, J.L., 1973: Principles of Environmental Physics. Edward Arnold, London.
- Stigter, C.J. en B. Lammers, 1974: Leaf diffusion resistance to water vapour and its direct measurement. Meded. Landbouwhogeschool Wageningen, 74-21.
- Thom, A.S., 1972: Momentum, mass and heat exchange of vegetation. Quart. J. R. Met. Soc., 98, 124-134.

SYMBOLENLIJST

<u>Symbool</u>	<u>Betekenis</u>	<u>Eenheid</u>
A	oppervlak	$m^2$
$B^{-1}$	empirische grootheid (form. (18))	-
C	warmtecapaciteit van het gewas per eenheid van oppervlak	$J K^{-1} m^{-2}$
$c_p$	warmtecapaciteit van lucht bij constante druk	$J kg^{-1} K^{-1}$
E	waterdampstroombichtheid	$kg m^{-2} s^{-1}$
G	bodemwarmtestroom	$W m^{-2}$
g	versnelling van de zwaartekracht	$ms^{-2}$
K	warmteoverdrachtscoëfficiënt	$W m^{-2} K^{-1}$
k	von Kármán constante	-
L	verdampingswarmte van water	$J kg^{-1}$
-	Monin-Obukhov lengte	m
l	<b>gewashoogte</b>	m
Q	debiet aangevoerde lucht	$m^3 s^{-1}$
$Q^*$	netto straling op het gewasoppervlak	$W m^{-2}$
$r_E$	weerstand voor het transport van waterdamp	$sm^{-1}$
$r_H$	weerstand voor het transport van voelbare warmte	$sm^{-1}$
$r_{ST}$	stomataire weerstand	$sm^{-1}$
$r_{\Sigma}$	de som $r_H + r_{ST}$	$sm^{-1}$
S	warmteberging in het gewas	$W m^{-2}$
s	helling van de verzadigde waterdampconcentratiecurve	$kg m^{-3} K^{-1}$
T	temperatuur van de lucht in de doos	$^{\circ}C, K$
-	luchttemperatuur	K
$T_l$	temperatuur van de buitenlucht ter plaatse van de doos	$^{\circ}C$
$T_o$	oppervlaktetemperatuur	$^{\circ}C$

<u>Symbool</u>	<u>Betekenis</u>	<u>Eenheid</u>
$T_u$	temperatuur van de aangevoerde lucht	$^{\circ}\text{C}$
$T_w$	temperatuur van de perspex wand	$^{\circ}\text{C}$
$t$	tijd	s
$U_{\text{circ}}$	klemspanning circulatiemotor	V
$u$	windsnelheid	$\text{ms}^{-1}$
$u_*$	wrijvingssnelheid	$\text{ms}^{-1}$
$V$	inhoud stomataire doos	$\text{m}^3$
$z$	hoogte boven het gewas	m
$z_0$	ruwheidslengte	m
$\alpha$	empirische grootheid (form. (15))	-
$\beta$	Bowen-verhouding (H/LE)	-
$\gamma$	psychrometerconstante	$\text{kg m}^{-3}\text{K}^{-1}$
$\rho$	dichtheid van lucht	$\text{kg m}^{-3}$
$\rho^w$	waterdamconcentratie van de lucht in de stomataire doos	$\text{kg m}^{-3}$
$\rho_i^w$	evenwichtswaarde van $\rho^w$	$\text{kg m}^{-3}$
$\rho_s^w$	verzadigde waterdamconcentratie	$\text{kg m}^{-3}$
$\rho_u^w$	waterdamconcentratie van de aangevoerde lucht	$\text{kg m}^{-3}$
$\tau$	tijdconstante	s