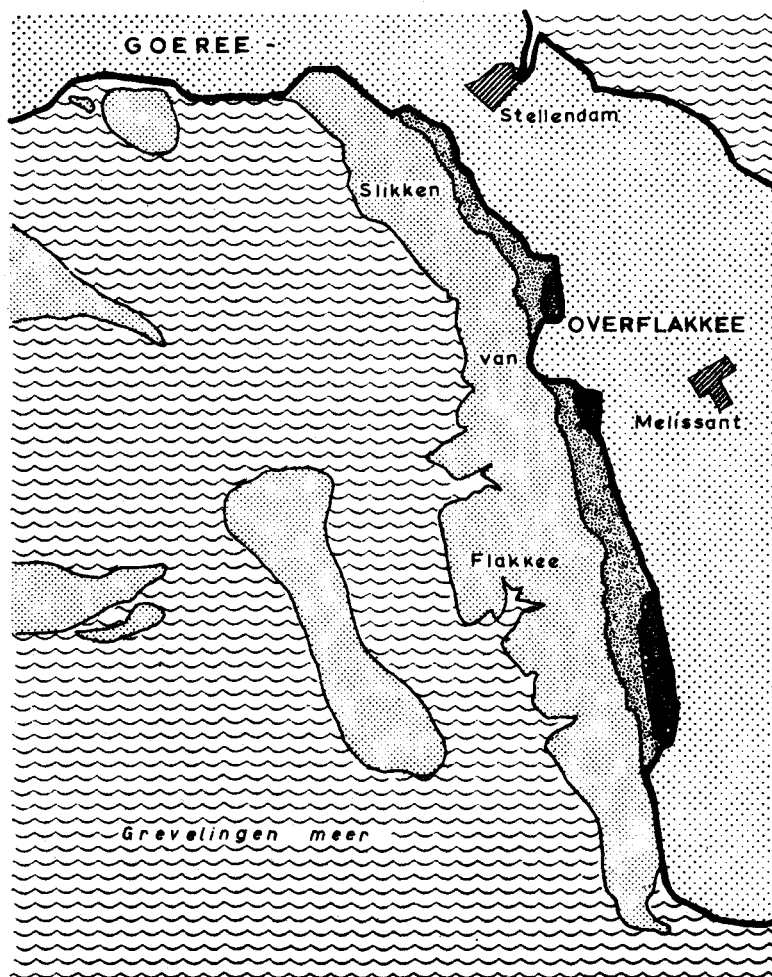


LANDSCHAPSOECOLOGISCH ONDERZOEK

SLIKKEN VAN FLAKKEE

Interim rapport



Deelrapport Microklimaat

Rijkswaterstaat
Deltadienst
afdeling milieuonderzoek
's Heer Arendskerke

Rijksdienst voor de
IJsselmeerpolders
wetenschappelijke afdeling
Lelystad

e 3420,
6

Het microklimaat van de Slikken van Flakkee in 1972.

Bijlage bij het Interim-rapport
Landschaps-Oecologisch Onderzoek
Slikken van Flakkee.



nota 73-13

juni 1973

drs. J.A. van den Berg
Rijksdienst voor de
IJsselmeerpolders,
Wetenschappelijke Afdeling
Lelystad.

	blz.
1. INLEIDING	1
2. OPZET VAN HET ONDERZOEK	3
2.1. GEBIEDSBESCHRIJVING EN SITUERING VAN DE MEETPOSTEN	3
2.2. INSTRUMENTARIUM	4
2.2.1. TEMPERATUURMETINGEN	4
2.2.2. WINDSNELHEIDSMETINGEN	5
3. BEWERKING VAN DE MEETGEGEVENS	6
4. ENIGE NATUURKUNDIGE EIGENSCHAPPEN VAN HET ONDER- ZOCHE GEBIED	6
4.1. DE TEMPERATUURGELEIDING IN DE BODEM	6
4.2. DE AERODYNAMISCHE RUWHEID	8
4.3. DE ALBEDO	8
5. ENIGE RESULTATEN VAN HET ONDERZOEK	10
5.1. VERGELIJKING VAN DE SLIKKEN MET DE SCHORREN	10
5.2. VERGELIJKING VAN KREEKBODEMS MET "INTERFLUVES"	19
6. SAMENVATTING	20
7. LITERATUUR	21

1. INLEIDING

In het kader van de landschapsoecologische studie van "de Slikken van Flakkee" is in 1972 een onderzoek geëntameerd naar het voorkomen van microklimatologische verschillen in dit gebied. Het microklimatologisch onderzoek heeft tot doel na te gaan onder welke omstandigheden er zich momenteel microklimatologische verschillen in het gebied van de slikken en de schorren voordoen en of deze verschillen in de nabije toekomst zullen blijven bestaan als aan het gebied een bepaalde bestemming wordt gegeven.

Te-zamen met de onderzoeksresultaten van andere disciplines zullen de uitkomsten tevens van dienst kunnen zijn voor de waardebepaling van het gebied.

Bij de bestudering van het microklimaat - dit is het klimaat op zeer kleine schaal dat zich uitstrekt vanaf het eigenlijke aardoppervlak tot een hoogte waar de invloed van het er onmiddellijk onder aanwezige oppervlak niet langer kan worden onderscheiden van een meer algemeen lokaal- of mesoklimaat - zijn vooral de temperatuur en de windsnelheid belangrijke elementen. Deze elementen zijn door menselijke ingrijpen te beïnvloeden en behoren bovendien tot de factoren die van invloed zijn op de mate waarin de mens het verblijf in de buitenlucht als aangenaam ervaart (Den Tonkelaar, 1972).

Wat betreft windrichting, neerslag, straling en luchtvochtigheid (in iets mindere mate) vallen verschillen van enige betekenis nauwelijks te verwachten. Derhalve is het onderzoek beperkt tot temperatuur en windsnelheid.

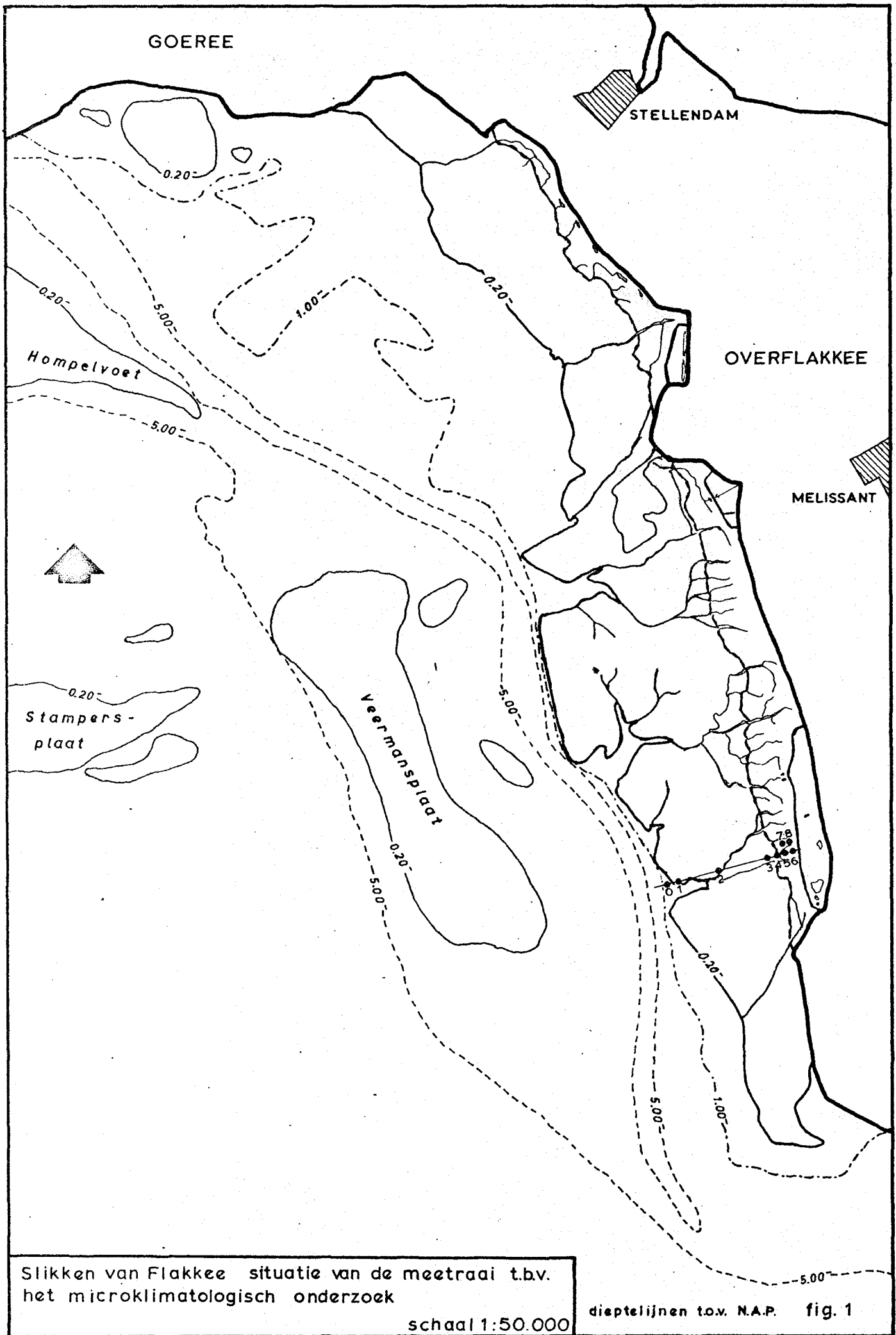
Het onderzoek wordt door de Wetenschappelijke Afdeling van de R.I.J.P. uitgevoerd in samenwerking met het Fysisch Geografisch Laboratorium van de Universiteit van Amsterdam. Met name van drs. G.F.A. van Zuylen, heeft de auteur veel waardevolle adviezen ontvangen, zowel bij de uitvoering van het onderzoek als bij de samenstelling van dit rapport. Een deel der tot nu toe verzamelde gegevens is bewerkt door de student W.J. ten Veen, die gedurende de periode van 25 juli t/m 20 augustus tevens de metingen verrichtte. Ten aanzien van de opzet en de inrichting van de meetposten is tevens geprofiteerd van de ervaring bij het K.N.M.I., dat ook een deel van het instrumentarium (met name de bodem-sixthermometers) in bruikleen gaf.

De verdere indeling van dit rapport is als volgt.

In paragraaf 2, wordt nadat een korte beschrijving van het gebied is gegeven, uiteengezet hoe het onderzoek is opgezet en wordt de inrichting van de meetposten beschreven.

In paragraaf 3 wordt beschreven op welke wijze de metingen zijn bewerkt. In de volgende paragraaf wordt in een theoretische beschouwing nagegaan welke verschillen in de natuurkundige eigenschappen als; temperatuurgeleiding in de bodem, de aerodynamische ruwheid en de albedo van het aardoppervlak, per gebied mogen worden verwacht en hoe deze verschillen zich zullen manifesteren in de componenten van de warmtehuishouding van lucht en bodem. Daarna volgt een analyse van de waarnemingen en worden de uitkomsten vergeleken met de resultaten van overeenkomstige onderzoekingen uit de literatuur.

Het rapport wordt besloten met een samenvatting en conclusie.



Slikken van Flakkee situatie van de meetraai t.b.v. het microklimatologisch onderzoek

schaal 1:50.000

dieptelijnen tov. N.A.P. fig. 1

2. OPZET VAN HET ONDERZOEK

2.1. GEBIEDSBESCHRIJVING EN SITUERING VAN DE MEETPOSTEN

In andere deelrapporten wordt het gebied, waar het landschaps-oecologisch onderzoek plaats vindt, uitvoerig beschreven (geomorfologisch, bodemkundig en hydrologisch etc.). Op grond van de daarin beschreven eigenschappen van het gebied lijkt het zinvol voor het microklimatologisch onderzoek de volgende deelgebieden te onderscheiden:

- a. de eigenlijke slikken,
- b. de min of meer vlakke onversneden gedeelten ("interfluves") van het schorregebied,
- c. de kreekbodems in het schorregebied.

Om microklimatologische verschillen in temperatuur op te sporen, is gekozen voor een representatieve raai van 6 à 7 vaste en 2 "zwervende" meetposten plus op stralingsdagen te houden meettochten, waarin de luchttemperatuur op verschillende hoogten en plaatsen wordt gemeten.

Voor de situering van de vaste raai hebben de volgende overwegingen gegolden:

- a. gelet op de ligging van de deelgebieden lijkt een west-oost oriëntatie geschikt, d.w.z. te beginnen bij de oeverlijn van het Grevelingenmeer en eindigend in het schorregebied.
- b. de combinatie met een grondwaterstandsraai is gewenst om over de vochttoestand van de bodem ter plaatse te zijn geïnformeerd. De combinatie betekent tevens een aanzienlijke tijdwinst voor de waarnemer.
- c. de meetposten moeten vrij toegankelijk zijn.

Gelet op de toestand in het voorjaar van 1972 kwam de grondwaterstandsraai F 12 - 18 het meest in aanmerking (zie figuur 1).

De slikken en de schorren hebben ter plaatse van deze raai de volgende eigenschappen (samengevat uit andere deelrapporten).

	S L I K K E N	S C H O R R E N
de bodem bestaat uit	middelfijn zand (U cijfer ca.80)	10 à 20 cm zavel op zand
met lutumgehalte van	< 3 %	ca. 10 %
volume gewicht	1,48	1,25
volume fractie vaste stof	0,56	0,47
begroeiingsdichtheid	nagenoeg onbegroeid	matig (gras en lage kruiden)
diepste zomergrondwaterstand (gemidd. van 3 in 1972)	80-90 cm - m.v.	90-110 cm - m-v-
maximum waargenomen stand		
t.o.v. diepste grondwaterstand	+ 60 - 80 cm	+ < 40 cm

Gedurende de hydrologische zomer komen op de slikken herhaaldelijk hogere grondwaterstanden voor dan in het schorregebied. Tijdens droge perioden zal zich in het zand van de slikken een droog bovenlaagje vormen waardoor de verdamping stagneert. Op de schorren gaat de verdamping dan via de vegetatie door. Afgezien van de allerbovenste centimeters is de bovengrond van de slikken 's zomers doorgaans vochtiger dan die van de schorren. Dit kan worden geïllustreerd met vochtbepalingen op 9 oktober 1972, waaraan een droge periode met veel straling vooraf ging. Het vochtgehalte in de laag 5-20 cm bedroeg toen op de slikken 22 vol. % en op de schorren 11 vol. %.

2.2. INSTRUMENTARIUM

2.2.1. TEMPERATUURMETINGEN

Langs de grondwaterstandsraai F 12-18 zijn 7 vaste posten (nrs 0 t/m 6) ingericht. Post 0 bevindt zich boven het water, enkele meters vanaf de gemiddelde waterlijn. De posten 1 en 2 bevinden zich op de slikken, posten 5 en 6 op de schorren en de posten 3 en 4 in het overgangsgebied hiertussen. (figuur 1). Voorts zijn er twee zogenaamde zwervende posten die van tijd tot tijd worden verplaatst. Tot nu toe hebben deze op twee verschillende plaatsen in het schorregebied gestaan.

De posten zijn als volgt uitgerust:

- een grasminimumstatief met 3 thermometers voor resp. de momentane -, de maximum - en de minimumtemperatuur;
- 3 grondthermometers voor de maximum- en de minimumtemperatuur op 5 en 10 cm diepte en de momentane thermograaf, met een dubbelwandig stralingsschild op de grond opgesteld.
- Op post 3 is een verdampingspan opgesteld (ingegraven) en wordt de windweg op 2 meter hoogte geregistreerd. Bij post 5 staat een regenmeter (opvangopening van 2 dm²) in een grondregenmeter opstelling.

De aflezing geschiedt op werkdagen dagelijks, de thermografen hebben dan een dagomloop. In de weekends worden de thermografen op weekomloop gezet. Wat betreft de vloeistofthermometers gaan de maximum temperaturen van vrijdag, zaterdag en zondag, de minimumtemperaturen van zaterdag, zondag en maandag en de momentane temperatuuraflezingen op zaterdag en zondag verloren.

Voor de dagelijkse temperatuuramplitude betekent dit bijvoorbeeld dat er per week slechts 3 kunnen worden berekend zonder gebruik te maken van de maar in beperkte mate te corrigeren thermogrammen (1 maximum-, 1 minimum- en 1 momentane temperatuur voor 3 dagen.)

In augustus zijn enkele meettochten gehouden, waarbij op een 20 à 30-tal punten langs het traject de luchttemperatuur op 5, 10, 15, 25, 50, 100, 150 en 200 cm hoogte werd gemeten met elektrische thermometers.

2.2.2. WINDSNELHEIDSMETINGEN

Afgezien van incidentele metingen tijdens een temperatuurmeettocht en de windweg registratie bij post 3, zijn de windsnelheidsmetingen nog niet begonnen. De ontwikkeling van de apparatuur hiervoor verkeert thans echter in een ver gevorderd stadium. De waarnemingen zullen er op gericht zijn het verticale windsnelheidsprofiel in de onderste 2 à 3 meter te onderzoeken. Van belang zijn vooral de windvlagen en gemiddelden over korte tijdvakken.

Deze zijn bepalend voor de transpiratie van plant en mens (behaaglijkheidsfactor, Den Tonkelaar, 1972). De gegevens kunnen verder worden gebruikt voor het verstuivingsonderzoek dat op de Hompelvoet plaats vindt.

Wat betreft de registratie moest rekening worden gehouden met twee factoren:

- a. de gegevens moeten beschikbaar zijn zonder dat een arbeidsintensieve bewerking nodig is.
- b. het ontbreken van netspanning ter plaatse.

Er is een constructie ontwikkeld met digitale registratie, waarbij 10 minuten gemiddelde worden geprint. Eén anemometer zal tevens analoog worden geregistreerd.

Het 10 minuten tijdvak sluit aan bij de onderzoeksresultaten van Wieringa, die hierover tijdens zijn colloquium (K.N.M.I.) op 17 okt. 1972 opmerkte: "Uit spectraalanalyses is gebleken dat een 10 minuten interval het meest geschikt is voor het onderzoek van lokale windeigenschappen". Wieringa toont verder aan dat met behulp van de vlaagfactor ("gustfactor") de windsnelheidsmaxima uit de 10 minuten gemiddelden kunnen worden geschat.

3. BEWERKING VAN DE MEETGEGEVENS

Op iedere post is een nauwkeurige kwikthermometer aanwezig (zogenaamde stationsthermometer). Deze is geijkt. Hiermee worden de maximum- en minimumstand van de beide andere vloeistofthermometers gecorrigeerd. Met behulp van de gecorrigeerde extreme temperaturen en de momentane temperatuur van de stationsthermometer kan het thermogram worden gecorrigeerd (methode Instructie K.N.M.I.).

De elektrische thermometers zijn eveneens geijkt en de metingen met behulp daarvan gecorrigeerd.

Bij analyse is dus steeds met de gecorrigeerde meetwaarden gewerkt.

4. ENIGE NATUURKUNDIGE EIGENSCHAPPEN VAN HET ONDERZOCHE GEBIED

Alvorens in paragraaf 5 tot de analyse van de metingen over te gaan, volgen hier enige natuurkundige eigenschappen van het materiaal waaruit de deelgebieden bestaan. Hierop gebaseerd zal met behulp van theoretische overwegingen worden aangegeven welke microklimatologische verschillen tussen de deelgebieden verwacht mogen worden, ervan uitgaande dat er geen sterke advectionele veranderingen optreden.

De warmtetoestand van een lichaam wordt bepaald door de energiehuishouding en als maat hiervoor geldt de temperatuur. De belangrijkste energiebron voor de bodem en de zich hierboven bevindende luchtlaag is de straling.

De netto inkomende straling op het aardoppervlak wordt gebruikt:

- a. voor de verwarming van de lucht (turbulent transport van voelbare warmte, ook wel vrije convectione genoemd),
- b. voor de verwarming van de bodem,
- c. als latente warmte voor de verdamping.

Tengevolge van verschillen in de begroeiing en bodemvochtgehalte gedragen de deelgebieden zich in meteorologisch opzicht ongelijk met betrekking tot de temperatuurgeleiding in de bodem, de aerodynamische ruwheid en wellicht ook de albedo.

4.1. DE TEMPERATUURGELEIDING IN DE BODEM

De warmteflux H ($\text{cal. cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$) in de bodem, dit is de hoeveelheid energie Q (cal.) die per tijdseenheid en per eenheid van oppervlakte de bodem passeert, is evenredig met de temperatuur gradiënt in de bodem:

$$H = \frac{\delta Q}{\delta t} = -\lambda \frac{\delta T}{\delta z} \quad (4.1)$$

T is de temperatuur ($^{\circ}\text{C}$) op diepte z cm onder het aardoppervlak, λ is een evenredigheidsconstante die het specifieke warmtegeleidingsvermogen van de grond wordt genoemd ($\text{cal. cm}^{-1} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ sec}^{-1}$). In tabel 1 is het warmtegeleidingsvermogen voor een paar stoffen vermeld.

TABEL 1. HET SPECIFIEKE WARMTEGELEIDINGSVERMOGEN (λ) EN HET TEMPERATUURGELEIDINGSVERMOGEN (K).

	λ in $10^{-3} \text{ cal cm}^{-1} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ sec}^{-1}$	in $10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-1}$
Zand (veldcap.)	4,6	12,1
Droog zand	0,5 - 1,5	1,8 - 5
Leemgrond	2 - 4	5 - 8
Veengrond	2	2,2
Thermometer glas	2,4	4,9

Behalve het warmtegeleidingsvermogen is ook de warmtecapaciteit van invloed op het temperatuur verloop in de bodem. De warmtecapaciteit C ($\text{cal cm}^{-3} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) of waterwaarde van de grond is gelijk aan het product van het soortelijk gewicht ρ en de soortelijke warmte per eenheid van massa c:

$$C = \rho \cdot c$$

De snelheid waarmee de temperatuur zich in de bodem voortplant is evenredig met het warmtegeleidingsvermogen en omgekeerd evenredig met de warmtecapaciteit. Men heeft derhalve het quotiënt k van warmtegeleidingsvermogen en warmtecapaciteit gedefinieerd als temperatuurgeleidingsvermogen

$$k = \frac{\lambda}{C} \quad (4.2)$$

Met name het vochtgehalte van de bodem is van invloed op de grootte van het temperatuurgeleidingsvermogen (zie tabel 1), zodat voor de slikken een hogere k-waarde verwacht mag worden dan voor de schorren. Voor wat betreft de luchttemperatuur op 10 cm hoogte zal dit resulteren in een tendens naar lagere maxima overdag en hogere nachtelijke minima op de slikken.

4.2. DE AERODYNAMISCHE RUWHEID

Bij het turbulente warmtetransport in de onderste luchtlaag kunnen twee processen worden onderscheiden, te weten de vrije convectie als gevolg van dichtheidsverschillen (veroorzaakt door verschillen in temperatuur) en de gedwongen convectie of mechanische turbulentie, welke een gevolg is van de obstakels (de ruwheid) die de wind aan het aardoppervlak ontmoet.

De mechanische turbulentie neemt toe met de windsnelheid en de aerodynamische ruwheid van het aardoppervlak. De verhouding tussen vrije convectie en gedwongen convectie wordt weergegeven door het getal van Richardson. Door het ontbreken van gegevens over de windsnelheidsgradiënt bestaat hierover geen verdere informatie.

Bij hoge windsnelheden (> 8 m/sec) domineert de mechanische turbulentie nabij de grond zodanig, dat de stabiliteit vrijwel neutraal is (Wieringa, colloquium K.N.M.I. op 17 okt. 1972). Daar de schorren aerodynamisch ruwer zijn dan de nagenoeg onbegroeide slikken zal dit er toe bijdragen dat, vooral tijdens een stralingsdag met kleine windsnelheden, boven de schorren een steilere verticale temperatuurgradiënt wordt opgebouwd dan boven de slikken.

4.3. DE ALBEDO

De albedo geeft aan welk percentage van de op het aardoppervlak vallende zonnestraling wordt teruggekaatst. De albedo voor droog en nat zand is verschillend. Munn (1966:15) vermeldt voor droog duinzand een albedo van 37% en voor nat duinzand 24%. Het bovenste laagje zand dat de mate van reflectie van de kortgolvlige straling bepaalt, zal op de slikken in de zomer niet steeds als nat zand kunnen worden beschouwd. Voorts zijn de schorren spaarzaam tot matig dicht begroeid met gras en kruiden die een albedo bezitten tussen 16 en 27%. Het is dus moeilijk te voorspellen of er belangrijke verschillen in albedo zullen optreden. Daarom zullen in de zomer van 1973 enige albedometingen worden uitgevoerd.

Wat onder I is opgemerkt voor de slikken en de schorren geldt in principe ook voor de kreekbodems en de vlakke terreingedeelten van de schorren. Echter zijn hier ook processen in tegenovergestelde richting werkzaam: de kreekbodems zijn, afhankelijk van de heersende windrichting in meer of mindere mate beschermd, waardoor de mechanische turbulentie in de kreek wordt bemoeilijkt,

hetgeen op stralingsdagen tendeert naar hogere temperaturen aan de kreekbodem overdag. Anderzijds heeft de koude lucht, die tijdens heldere stralingsnachten aan het aardoppervlak ontstaat de neiging naar depressies in het terrein af te vloeien ("Kaltluftseen"). Dit tendeert naar lagere nachtelijke temperaturen aan de kreekbodem.

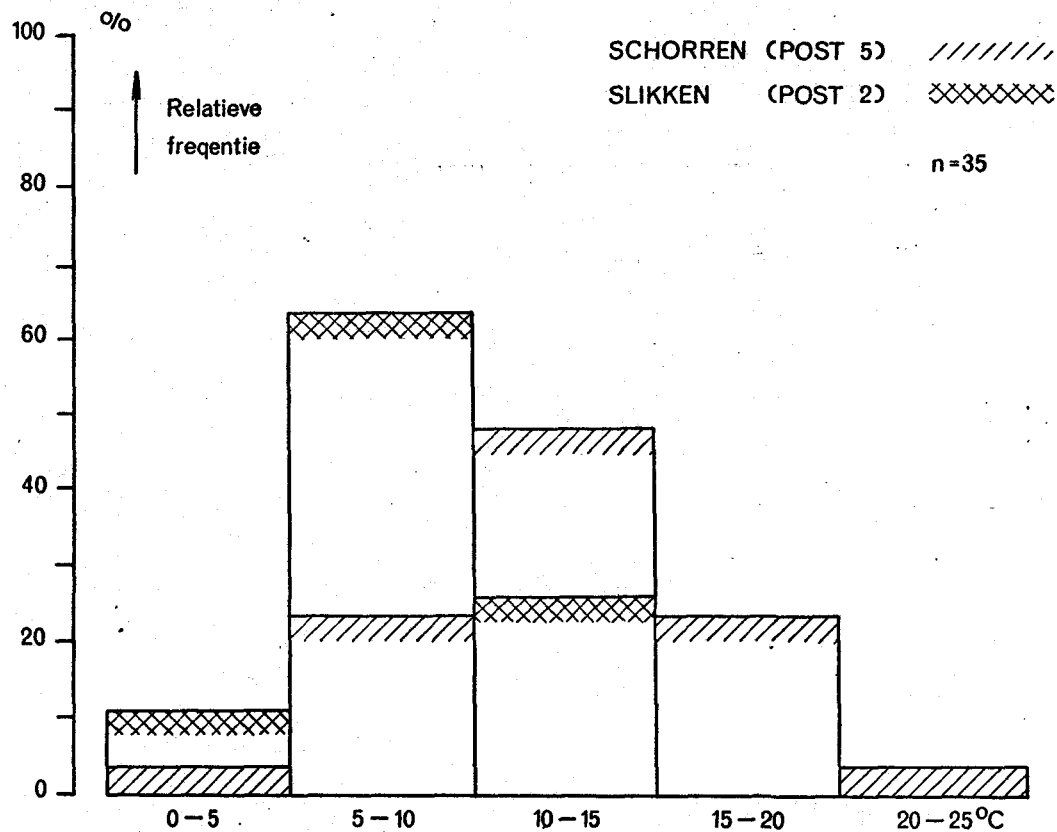
5 . ENIGE RESULTATEN VAN HET ONDERZOEK

Een deel der tot nu toe verzamelde gegevens is door W.J. ten Veer bewerkt. De eerste bestudering hiervan leverde de volgende resultaten.

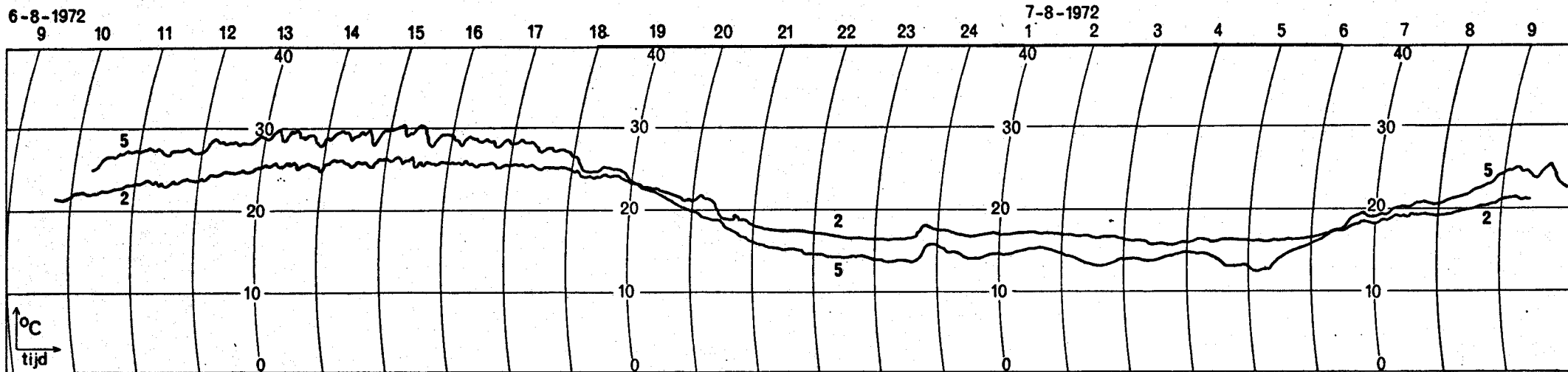
5.1. VERGELIJKING VAN DE SLIKKEN MET DE SCHORREN

LUCHTTEMPERATUUR (op 10 cm hoogte)

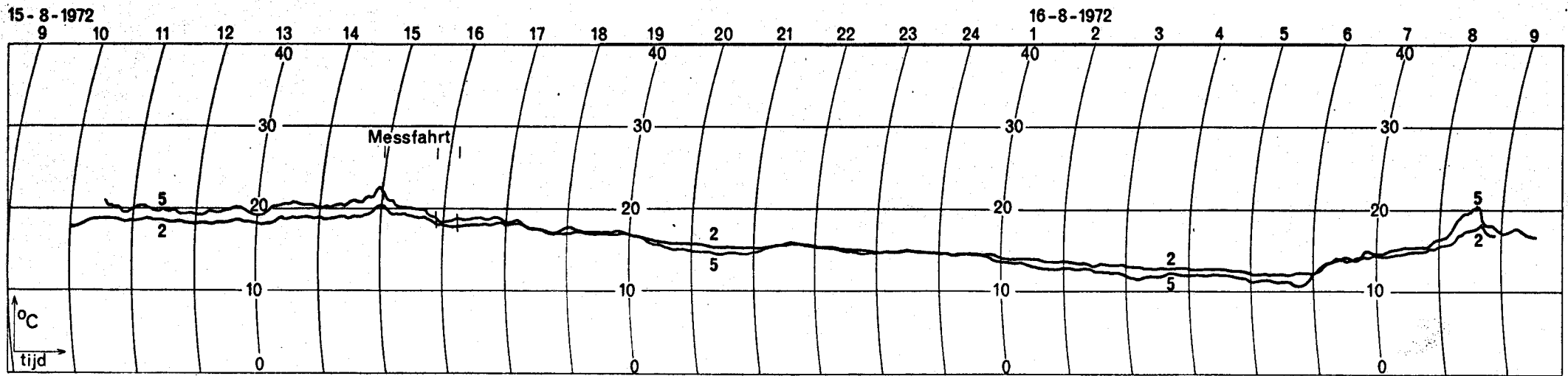
Voor de posten 2 (slikken) en 5 (schorren) is de dagelijkse amplitudo van de luchttemperatuur op 10 cm hoogte berekend uit de gecorrigeerde standen van de maximum- en minimumthermometer in het grasstatief. Gebruikt zijn de gegevens uit het tijdvak 7 augustus / 31 december 1972. Deze periode is op grond van het voorkomen van stralingsdagen gesplitst in twee delen, die lopen van 7 augustus / 1 november en 2 november / 31 december. Voor beide tijdvakken is een frequentieverdeling van de temperatuuramplitudo gemaakt, die grafisch is afgebeeld in figuur 2.



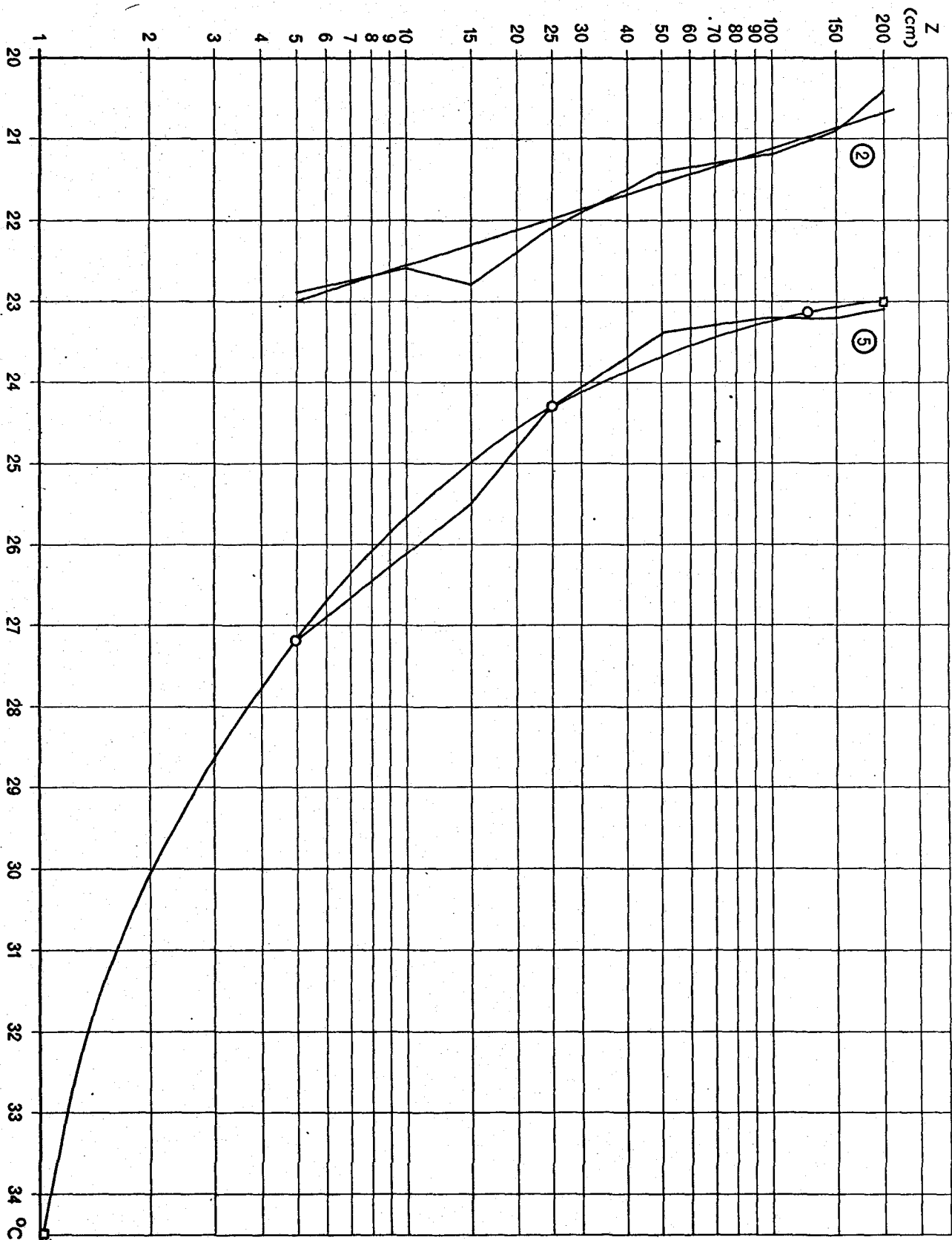
Figuur 2. Frequentieverdeling van het verschil tussen de hoogste en de laagste dagelijkse luchttemperatuur (= 2x de temperatuuramplitudo) in de periode van 7 augustus - 1 november 1972.



figuur 3. Het verloop van de luchttemperatuur op 10 cm hoogte op de slikken (2) en de schorren (5) tijdens een heldere stralingsdag (6 augustus 1972).



figuur 4. Het verloop van de luchttemperatuur op 10 cm hoogte op de slikken (2) en de schorren (5) tijdens een dag met bedekte hemel (15 augustus 1972).



figuur 5. Het verticale profiel van de luchttemperatuur zoals dit tijdens een meettocht op de slikken (post 2) en de schorren (post 5) is gemeten (polygoon lijn). De vloeiende lijnen zijn afbeeldingen van een model dat zo goed mogelijk aan de punten is aangepast.

Uit de figuur blijkt, dat zoals werd verwacht, de dagelijkse gang van de luchttemperatuur boven de schorren aanzienlijk groter kan zijn dan boven de slikken. Dit is vooral het geval op stralingsdagen met niet te sterke wind. Elf keer was de temperatuur amplitudo van post 5 minstens twee maal zo groot als die van post 2. Ter illustratie zijn in figuur 3 de thermogrammen van 6/7 augustus weergegeven. Opvallend is het onrustige temperatuurverloop overdag boven de schorren, een gevolg van turbulente warmte uitwisseling in de sterk onstabiele onderste luchtlaag. Op dagen zonder directe straling (mist, stratus-bewolking) is het temperatuurverloop op beide plaatsen nagenoeg gelijk, zie figuur 4 met de thermogrammen van 15 augustus.

Uit metingen tijdens de meettocht op 16 augustus zijn de waarnemingen bij de posten 2 en 5 in figuur 5 weergegeven. De gemiddelde windsnelheid op 2 meter hoogte bedroeg tijdens de meettocht ca. 4m/sec.. Het blijkt dat bij gebruik van een logaritmische hoogte-schaal door de waarnemingen bij post 2 bij benadering een rechte gaat en door waarnemingen bij post 5 een holle kromme. Deacon (1949; 96) beschrijft het verticale verloop van de potentiële temperatuur θ met de vergelijking

$$\frac{d\theta}{dz} = b \cdot z^{-a} \quad (5.1)$$

(Onder de potentiële temperatuur wordt de temperatuur verstaan die de lucht zou verkrijgen als deze droogadiabatisch op een druk van 1000 mbar zou worden gebracht). Daar het hier om temperaturen gaat die binnen een klein hoogte-interval en ongeveer ter hoogte van het 1000 mbar niveau gemeten zijn, kan vergelijking 5.1 geschreven worden als

$$\frac{dT}{dz} = b \cdot z^{-a} \quad (5.2)$$

met z in cm en T in ° Celsius.

Deze formule geldt voor een quasi-stationaire warmtestroom waarbij de warmteoverdracht uitsluitend via turbulente warmtegeleiding plaats vindt. De meettocht op 16 aug. 1972 vond plaats tussen 13.40 en 15.30 gedurende welk tijdvak de temperatuur nauwelijks meer dan 1° C varieerde (de bedekkingsgraad van de hemel liep van halfbewolkt terug tot licht bewolkt). De omstandigheid van een quasi-stationaire warmtestroom wordt tijdens de meettocht dus redelijk goed benaderd.

Integreren van (5.2) geeft voor $a=1$

$$T - p = b \ln(z) \quad (5.3)$$

Voor $a \neq 1$ leidt integratie tot

$$z^{-a+1} = \left(\frac{a-1}{b}\right) (p - T) + 1 \quad (5.4)$$

In beide gevallen heeft de integratieconstante p de waarde van de temperatuur ter hoogte van $z = 1$ cm.

De waarde van a is afhankelijk van de stabiliteit van de lucht. Exacte waarden voor a geeft Deacon in dit artikel niet, wel zegt hij dat a op dezelfde manier maar in sterkere mate, varieert met de stabiliteit als exponent α uit een identieke vergelijking voor het windsnelheidsprofiel:

onstabiel : $\alpha > 1$

neutraal : $\alpha = 1$

stabiel : $\alpha < 1$

Voor het temperatuurprofiel van de slikken (post 2) is $a \approx 1$, de lucht verkeert hier blijkbaar in een ongeveer neutrale toestand. Voor het profiel boven de schorren (post 5) kan a berekend worden door de temperatuur voor $z=5$, $z=25$ en $z=125$ (gemiddelde van de temperatuur bij $z=100$ en $z=200$) in vergelijking 5.4 in te vullen. Hiermee zijn de volgende waarden van de parameters a , b en p berekend:

$$a=1,57 ; b = -6,96 ; p = 34,5^\circ\text{C}.$$

De hierbij behorende gedaante van (5.4) is eveneens in figuur 5 getekend. Deacon (1949) vermeldt dat voor de onstabiele situatie $a > 1$. Townsend (1962: 51-56) onderscheidt vanaf het aardoppervlak drie lagen waarin a overdag achtereenvolgens de waarde 1, $4/3$ en 2 heeft. De waarde van a wijst dus op een onstabiele luchtlaag boven de schorren. Deze frappante tegenstelling, op zo korte afstand van elkaar, werd waarschijnlijk begunstigd door een vrij zwakke (4m/sec) noordelijke wind (ongeveer evenwijdig aan de grens tussen slikken en schorren).

BODEMTEMPERATUUR

De niet-stationaire ééndimensionale warmtestroming in een homogeen medium kan beschreven worden met de volgende differentiaalvergelijking (Wylie 1966: 290)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (5.5)$$

Bij de oplossing van deze differentiaalvergelijking wordt van de volgende randvoorwaarden uitgegaan:

- a. de temperatuur heeft aan het aardoppervlak ($z=0$) een sinusvormig verloop

$$T(0,t) = T_g + A_0 \sin(\omega t) \quad (5.6)$$

- b. op oneindige diepte ($z \rightarrow \infty$) is de temperatuur constant en gelijk aan T_g .

De gebruikte symbolen hebben de volgende betekenis:

$T(z,t)$ = de temperatuur op diepte z (cm) en tijdstip t (sec)

T_g = de gemiddelde temperatuur aan het aardoppervlak ($z=0$)

A_0 = de dagelijkse temperatuur amplitudo aan het aardoppervlak

ω = de hoekfrequentie = $2\pi/86400 = 7,27 \cdot 10^{-5}$ rad/sec.

Gegeven de randvoorwaarden zal een oplossing van vergelijking (5.5) de volgende gedaante hebben:

$$T = \exp(-az) A_0 \sin(\omega t + bz) \quad (5.7)$$

De factor $\exp(-az)$ vertegenwoordigt de demping en de term bz de faseverschuiving met toenemende diepte. a en b kunnen worden bepaald met vergelijking (5.5):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \omega A_0 \exp(-az) \cos(\omega t + bz); \quad \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 2ab \exp(-az) A_0 \cos(\omega t + bz) + (a^2 - b^2) T$$

Substitutie in (5.5) geeft na vereenvoudiging (mits $\exp(-az) \neq 0$, $A_0 \neq 0$, $a^2 - b^2 \neq 0$): $(\omega - 2kab) \cos(\omega t + bz) = (a^2 - b^2) \sin(\omega t + bz)$

$$\text{tg}(\omega t + bz) = (\omega - 2kab) / (a^2 - b^2) \quad (5.8)$$

Voor $t=0$ en $z=0$ is $\text{tg}(0) = 0$ dus $\omega = 2kab$

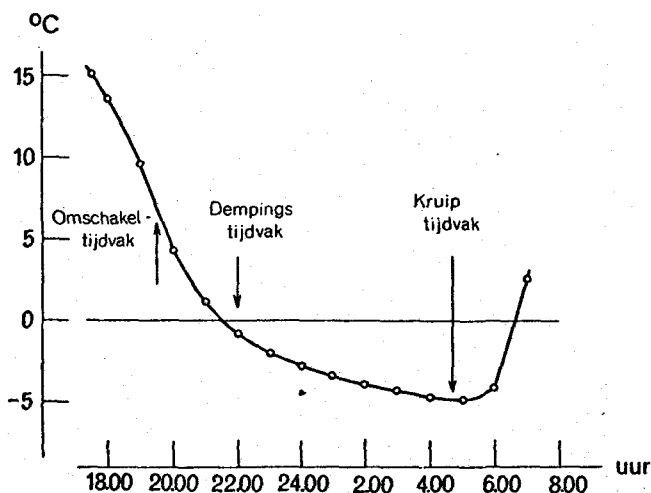
Dit leidt met (5.8) tot $a=b = -\sqrt{\omega/2k}$. In de literatuur treft men in de formule dikwijls de reciproke absolute waarde van a aan, welke wordt aangeduid met de dempingsdiepte $D = \sqrt{2k/\omega}$. (5.9)

Een andere oplossing van (5.5) is $T=T_g$ en daar het een lineaire differentiaalvergelijking is, voldoet ook de som van de oplossingen:

$$T(z,t) = T_g + \exp(-z/D) A_0 \sin(\omega t - z/D) \quad (5.10)$$

Alvorens met deze formule verder te werken, wordt nog even ingegaan op de aanname van een sinusvormig temperatuurverloop aan het aardoppervlak. Een sinusvormig verloop van de luchttemperatuur wordt het meest benaderd op bewolkingsarme stralingsdagen. Mede gelet op de staat van uitrusting van de meetposten, komen hiervoor in aanmerking 24, 29/31 augustus.

Ook op stralingsdagen is het temperatuurverloop echter niet sinusvormig, met name de nachtelijke tak wijkt hiervan af. Schnelle (1963:153) beschrijft het temperatuurverloop, tussen zonsondergang en zonsopgang voor heldere nachten, met een formule voor een aperiodyieke gedempte trilling (kruipgeval) zie figuur 6:



Figuur 6. Het temperatuurverloop nabij het aardoppervlak tijdens een heldere stralingsnacht. (uit Schnelle, 1966).

$$T = T_n + \Delta T \cdot e^{-bt} (1 + bt) \quad (5.11)$$

In deze formule hebben de gebruikte symbolen de volgende betekenis:

T = de uurlijkse luchttemperatuur

T_n = de minimum temperatuur (omstreeks zonsopgang)

ΔT = het verschil tussen de temperatuur bij zonsondergang T_0 en T_n .

t = het aantal uren na zonsondergang

b = de dempingsfactor (tussen 0,1 en 0,5)

Voor de nachtelijke tak van het thermogram van 30-31 aug. wordt voor post 2 een waarde van b berekend van 0,4.

Berekening : uit het thermogram wordt afgelezen $T_0=18,0$ (zons-
 ondergang te 19.38), $T_n=11,8$; $\Rightarrow \Delta T = 6,2$. Ten tijde $t=8$ is
 $T=12,8 \Rightarrow e^{-8b}(1 + 8b) = 0,161 \Rightarrow b = 0,4$

Controle : $t=6 \Rightarrow$ (uit thermogram) $T = 13,7$.

$$\text{volgens (5.13) } T = 11,8 + 6,2 e^{-2,4}(1+2,4)=13,7.$$

Daar de luchttemperatuur op 10 cm hoogte een afspiegeling is van de bodemoppervlaktetemperatuur blijkt randvoorwaarde a, die voor het oplossen van de differentiaalvergelijking 5.5 is gebruikt, zelfs op stralingsdagen een sterke simplificering. Beter zou zijn slechts gedurende het tijdvak van zonsopgang tot 1 à 2 uur voor zonsondergang een sinusvormig verloop te veronderstellen en gedurende de "nacht" een aanpassing als door Schnelle is vermeld toe te passen. Hierdoor wordt het oplossen van vergelijking 5.5 echter aanzienlijk ingewikkelder zodat is besloten voor deze analyse toch een sinusvormig verloop als randvoorwaarde te kiezen.

De dempingsdiepte D kan nu berekend worden als de temperatuur amplitudo A_z op twee diepten in de bodem bekend is. Immers, uit (5.10) volgt dat de amplitudo van de bodemtemperatuur op diepte z is

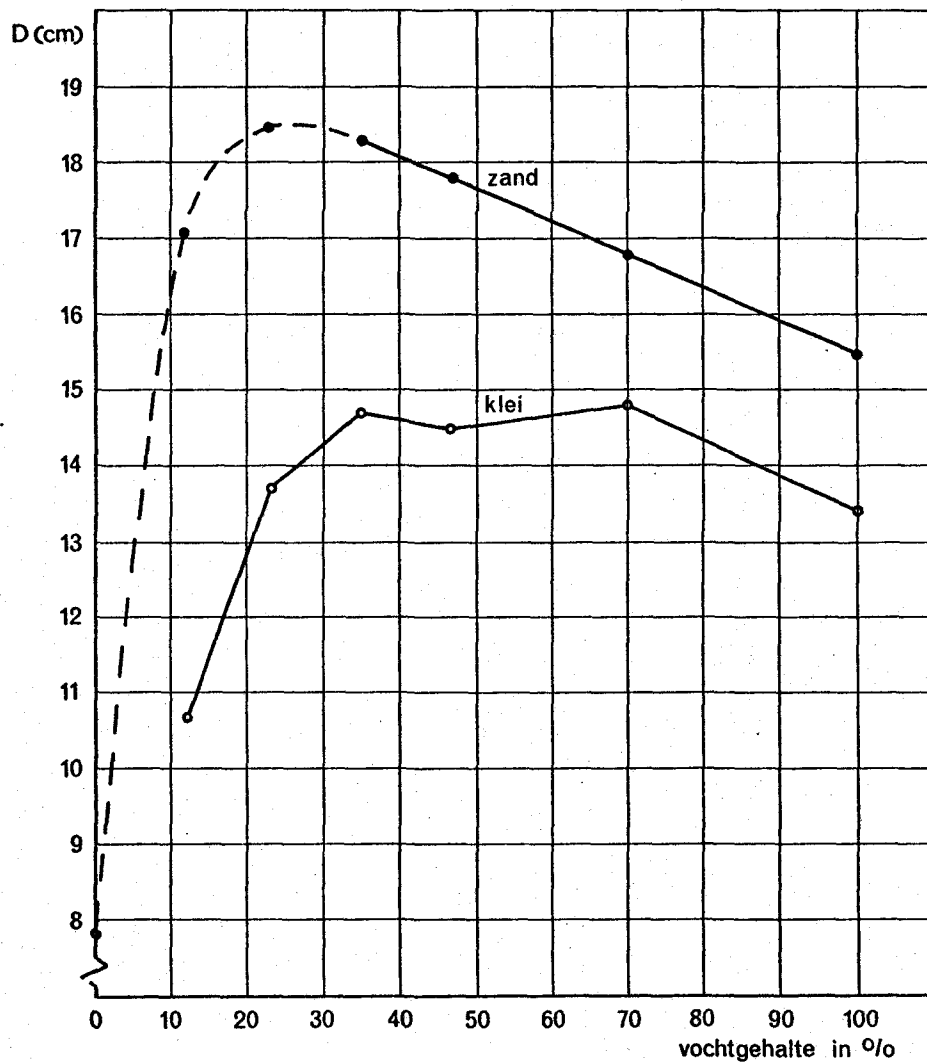
$$A_z = \exp-(z/D) A_0$$

$$\text{en dus geldt } A_{z_1} : A_{z_2} = \exp.((z_2 - z_1)/D) \quad (5.12)$$

Op de reeds eerder genoemde stralingsdagen 24, 29/31 aug. 1972 zijn de volgende amplitudo's gemeten:

Datum	slikken (post 2)			schorren (post 6)		
	$2A_5$	$2A_{10}$	$A_5:A_{10}$	$2A_5$	$2A_{10}$	$A_5:A_{10}$
24 aug.	11,0	8,5	1,293	5,0	4,4	1,137
29 "	9,8	7,0	1,40	4,9	4,2	1,166
30 "	12,5	9,3	1,345	4,7	4,0	1,174
31 "	12,1	8,9	1,36	4,3	3,6	1,195
gemiddeld			1,35			1,17

Met vergelijking (5.12) wordt voor de slikken een dempingsdiepte van 16,5 berekend en voor de schorren 32 cm.. Mej.Rethmeier (1966: 48,50) vermeldt voor zand op veldcapaciteit $D = 18,2$ voor droog zand $D = 7,8$ en voor klei met 5 volume procent $D = 10,7$; de volume fractie vaste stof was zowel voor het zand als de klei 0,57. De gegevens zijn nog eens grafische uitgezet in figuur 7. Het vochtgehalte is uitgedrukt in procenten van het poriënvolume, omdat het hier gaat om het temperatuurgeleidingsvermogen.



Figuur 7. Het verband tussen het vochtgehalte en de dempingsdiepte D. Het vochtgehalte is uitgedrukt in procenten van het poriënvolume.

Naar B.C.Rethmeier (1966:48,50)

Voor de slikken en de schorren zijn ter plaatse van de klimatologische raai de volgende gegevens bekend:

		Slikken	Schorren
A cijfer 1)	29.8.72	-	18,2
vochtgehalte	"	-	43%
A cijfer 5-20 cm,	9.10.72	14,7	9,2
vochtgehalte 5-20 cm,	"	50 %	23%

1) Het A cijfer geeft het aantal grammen water in de bodem per 100 gram droge grond.

De berekende dempingsdiepte $D = 16,5$ cm voor de slikken past bij de gegevens uit de literatuur, de waarde van $D = 32$ cm voor de schorren niet. Meer inzicht hierin verschaffen de waargenomen extreme bodemtemperaturen wellicht zelf. Het blijkt dat gedurende de stralingsdagen de minima op de slikken en de schorren ongeveer op hetzelfde niveau liggen, maar dat de maxima op de slikken aanzienlijk hogere waarden bereiken. De gemiddelde bodemtemperatuur zou, op eenzelfde diepte op de schorren, dus lager zijn dan op de slikken. Dit verschil kan veroorzaakt worden door het feit dat de schorren begroeid zijn. Uit de literatuur is bekend nl., dat de warmteflux in een begroeide bodem gering is. Daarentegen is zo'n oppervlak een goede straler voor langgolvlige straling.

Een andere verklaring kan zijn, dat de bodemsixthermometers niet steeds de werkelijk heersende temperatuur aanwijzen. Dit zou kunnen worden veroorzaakt door het feit, dat het temperatuurgeleidingsvermogen van thermometerglas in dezelfde orde van grootte ligt als die van nat zand en zavel, maar die van droog zand overschrijdt, waardoor deze fout in droge zomerperioden op de schorren zwaarder weegt. Dit vermoeden is versterkt door recente (12 juni 1973) bodemtemperatuur metingen met elektrische thermometers.

Het temperatuurgeleidingsvermogen voor de slikken wordt met vergelijking 5.9 berekend op $k = 9,9 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}..$

Van Duin (1956: 20) berekende voor een zandgrond met 3,5% lutum en overeenkomstige volume procenten vaste stof en water een $k = 5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}..$

Met berekende dempingsdiepte voor de slikken kunnen nog enige bewerkingen worden uitgevoerd. De faseverschuiving bedraagt volgens vergelijking 5.10 $\frac{z}{\omega D}$, dit is op 5 cm diepte 4160 sec. en op 10 cm diepte 8320 sec.. Met behulp van vergelijking 5.10 en de dempingsdiepte $D = 16,5$ cm kan de momentane temperatuur geschat worden. Deze berekening wordt uitgevoerd voor 30 aug.. Op het thermogram van de luchttemperatuur op 10 cm hoogte wordt afgelezen: $T_x = 25,0 \text{ }^\circ\text{C}$ te 14.40 uur $\rightarrow t_0 = 8.40$ uur.

$$T_n = 11,8 \text{ }^\circ\text{C}$$

Als gemiddelde temperatuur wordt genomen $T_g = \frac{1}{2}(T_x + T_n)$, dus $T_g = 18,4 \text{ }^\circ\text{C}$ (de extreme temperaturen op 10 cm hoogte verschillen weliswaar met die aan het aardoppervlak, maar de gemiddelde temperatuur veel minder).

T_x is de maximum temperatuur, T_n is de minimum temperatuur, gemeten op 10 cm hoogte.

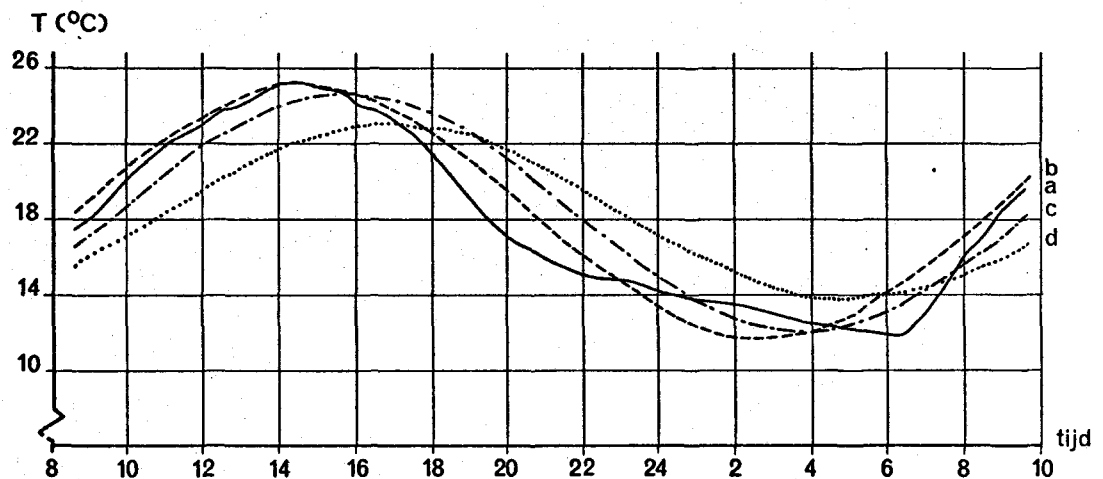
Te 8.30 uur worden de volgende momentane temperaturen afgelezen:

$T(5, \text{mom}) = 15,7 \text{ }^\circ\text{C}$; $T(10, \text{mom}) = 14,7 \text{ }^\circ\text{C}$. Berekend worden (met de waargenomen temperatuur amplitudo's), $t = t_0 - 10 \text{ min.} = - 600 \text{ sec.}$:

$$T(5, \text{mom}) = T_g + A_5 \sin \omega(t + z / (D\omega)) = 18,4 - 6,25 \sin(4760\omega) = 16,2 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$T(10, \text{mom}) = T_g + A_{10} \sin \omega(t + z / (D\omega)) = 18,4 - 4,65 \sin(8920\omega) = 15,6 \text{ }^\circ\text{C}.$$

In figuur 8 is het thermogram en de sinusvormige aanpassing van de luchttemperatuur op 10 cm hoogte plus het met (5.10) geconstrueerde bodemtemperatuurverloop op 5 en 10 cm diepte weergegeven.



Figuur 8. Het temperatuurverloop tijdens een stralingsdag op de slikken (30-8-'72).

- a. in de lucht op 10 cm hoogte, gemeten
- b. idem , sinusaanpassing
- c. in de bodem op 5 cm diepte , berekend met (5.10)
- d. in de bodem op 10cm diepte, idem.

5.2. VERGELIJKING VAN KREEKBODEMS MET "INTERFLUVES".

De twee "zwervende" posten zijn sinds 25 september 1972 op een kreekbodem en de aangrenzende oeverwal geïnstalleerd. De verschillen waren in de nazomer gering : op de stralingsdagen van 2 t/m 6 oktober is de maximum luchttemperatuur op de oeverwal iets groter (1 °C), de minima nagenoeg gelijk. Bodemtemperaturen zijn niet bekend, omdat de thermometers zijn verdwenen. De gegevens van de elektrische thermometers zijn hier niet goed bruikbaar, omdat bij geringe windsnelheden (< 2 m/sec) nog stralingsfouten van enkele °C optreden (Schurer 1972,28). In tabel 2 zijn de windmetingen weergegeven, verricht in een kreek, die parallel loopt aan de windrichting en in één loodrecht daarop. Bij deze laatste blijkt nabij de bodem duidelijk het beschuttende effect.

In 1973 zullen de metingen met de elektrische thermometers worden herhaald, waarbij deze dan zijn voorzien van een metalen stralings scherm.

TABEL 2. WINDGEGEVENS VERZAMELD OP ZATERDAG 10 MAART 1973
OP DE SLIKKEN VAN FLAKKEE.

HEERSENDE WINDRICHTING : WEST.

	W-O kreek, 1,5m diep		N-Z kreek, 1,2m diep	
	windsnelheid in m/sec.	verschil in windsnelheid	windsnelheid in m/sec.	verschil in windsnelheid
200 + m.v.	6		6	
200 + kreekbodem	4,5	+1,5	6	0
maaiveld	3,5	+1,0	4	+2
10 cm+kreekbodem	4,0	-0,5	1,5	+2,5

6. SAMENVATTING EN CONCLUSIE

Uit de in 1972 verzamelde gegevens over de luchttemperatuur en de bodemtemperatuur tot 10 cm diepte is gebleken, dat het verloop van de luchttemperatuur op de schorren extremer is dan op de slikken. Dit kan worden verklaard door de verschillen in begroeiing en bodemvochtigheid. M.b.v. een op eenvoudig model voor de warmtebeweging in de bodem gebaseerde formule, is het temperatuurgeleidingsvermogen van de slikken in de zomer geschat en hiermee het temperatuurverloop met de diepte en de tijd voor stralingsdagen. Voor de schorren is dit niet gelukt. Mogelijk waren de schorren tijdens deze stralingsdagen zoveel droger, dat het temperatuurgeleidingsvermogen van de thermometer een belangrijke rol speelde in het temperatuurevenwicht van het vloeistofreservoir. Een andere factor is de begroeiing op de schorren, waardoor de warmteflux in de grond overdag kleiner is dan op de slikken.

Kunstmatige ontwatering van en de ontwikkeling van de vegetatie op de slikken zullen het verschil in microklimaat tussen de schorren en de slikken doen afnemen.

7. LITERATUUR

- Deacon, E.L. Vertical diffusion in the lowest layers of the atmosphere.
Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 1949, vol 75, 89-103.
- Duin, R.H.A. van Over de invloed van grondbewerking op het transport van warmte, lucht en water in de grond.
Proefschrift 1956.
Verslagen van landbouwkundige onderzoeken no. 62.7, 's-Gravenhage, 1956.
- Munn, R.E. Descriptive micrometeorology.
Academic Press, New York, 1966.
- Rethmeier, B.C. Grondtemperaturen en de groei van mais.
Meteorologie in de landbouw, Leergang 1966, Landbouwhogeschool Wageningen.
- Schnelle, F. Frostschutz und Pflanzenbau.
BLV Verlagsgesellschaft, München 1963.
- Schurer, K. Dynamisch gedrag en stralingsfout van meetvoelers voor meting van klimaatgrootheden.
Mededelingen no. 13 van de Technisch Fysische Dienst van de Landbouw.
Wageningen, 1972.
- Tonkelaar, J.F. den Het strandweer. Wetenschappelijk rapport no. 72-10 van het K.N.M.I. 1972.
- Townsend, A.A. Natural convection in the earth's boundary layer.
Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 1962, vol 88, 51-56.
- Wylie, C.R. Advanced engineering mathematics.
McGraw-Hill, New York 1966.

