

**MASTER**

**Konvektie aan de rand van een warmteopslag in zand**

van Loon, W.K.P.

*Award date:*  
1986

[Link to publication](#)

**Disclaimer**

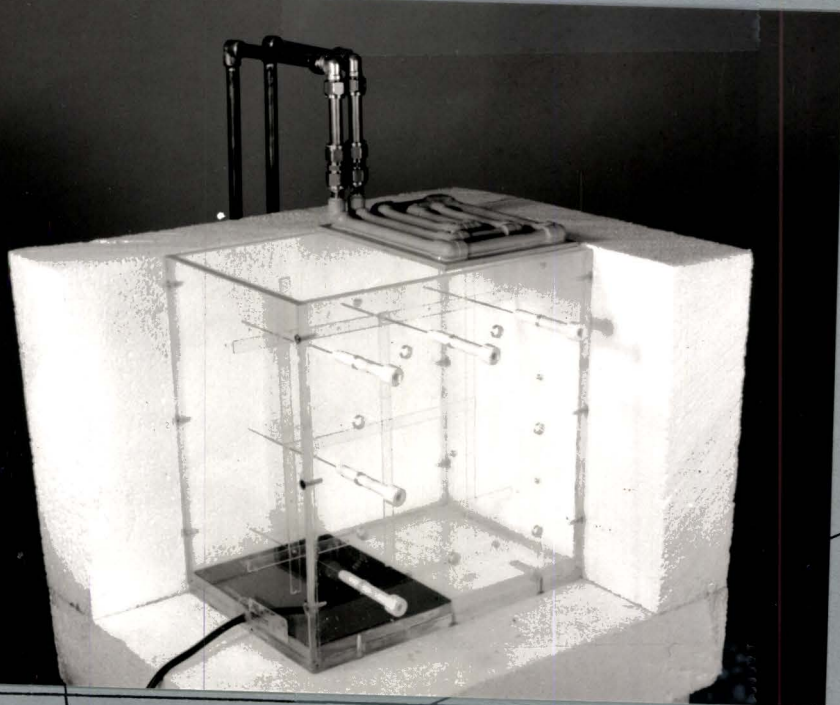
This document contains a student thesis (bachelor's or master's), as authored by a student at Eindhoven University of Technology. Student theses are made available in the TU/e repository upon obtaining the required degree. The grade received is not published on the document as presented in the repository. The required complexity or quality of research of student theses may vary by program, and the required minimum study period may vary in duration.

**General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain

# KONVEKTIE AAN DE RAND VAN EEN WARMTEOPSLAG IN ZAND



afstudeerverslag t.h. eindhoven

wilko van loon

dec. 1985

KONVEKTIE AAN DE RAND VAN EEN WARMTEOPSLAG IN ZAND

door

Wilko van Loon

Technische Hogeschool Eindhoven

Afdeling Technische Natuurkunde

Het onderzoek werd in het kader van afstuderen uitgevoerd in de  
Sektie Energietechnologie van de  
Vakgroep Werktuigkundige Ontwerpen voor de Procestechneken  
Afdeling Werktuigbouwkunde.

Rapport WOP-WET 85.012, december 1985, T.H. Eindhoven

ERRATA bij Konvektie aan de rand van een warmteopslag in zand.  
door Wilko van Loon, rapport WOP-WET 85.012

blz 13 regel 1: "Indien  $\lambda$  niet konstant is,..."

na (11): "stroomstofsnelheden" ipv "vloeistofsnelheden"

blz 14 na (14): "met (9)" ipv "met (8)"

blz 16 form(18):  $\gamma = \left\{ 2\pi \Gamma_l + \frac{\ln(u/r)}{\lambda_{isol}} + \frac{\ln(V/u)}{\lambda_{omh}} \right\} \lambda$

blz 17 form(20):  $t_0 = [(\alpha-2)V^2 \ln(4a/V^2 c^*) + V^2(\alpha-4\gamma)] / 2\alpha a$

na (21):  $B = Q_p [\ln(4a/V^2 c^*) + 2\gamma] / 4\pi\lambda$

$E = Q_p [(\alpha-2)V^2 / 2 a\alpha] / 4\pi\lambda$

blz 18 na (24): ...met 0.4% agargel uitgerekend...

kop van tabel "Fig 9": " $\Delta AA/AA$ " ipv " $AA/AA$ " en " $\Delta\lambda [\%]$ " ipv " $[\%]$ "

blz 28 na 5.1.1 regel inlassen: Appendiks 4 bevat de listing van NAALD1.

blz 29 na 5.1.2 regel inlassen: De listing van NAALD3 staat in Appendiks 6.

voor (29): Voor de n-de berekening geldt (zie appendiks 5):

blz 31 na 5.2.1 regel inlassen: De listing van het rekenmodel GELEIDING  
staat in appendiks 8.

blz 32 na 5.2.2 regel inlassen: Appendiks 10 bevat de listing van EKSTRA/20TOT51.

blz 33 2<sup>e</sup> regel na 5.3.1 toevoegen: (zie appendiks 12)

blz 35 3<sup>e</sup> regel na 6.1 weglaten: beschreven

blz 36 4<sup>e</sup> regel 1<sup>e</sup> alinea weglaten: keer

blz 42 5<sup>e</sup> regel na 6.4: ...een kleine gradient in  $\lambda$  als gevolg...

blz 46 11<sup>e</sup> regel: "[18]" ipv "[20]"

blz 47 6<sup>e</sup> regel 2<sup>e</sup> alinea: "verminderingen" ipv "verminnderingen",

blz 49 1<sup>e</sup> gedachtestreepje: ...wordt groter met  $\lambda_{w,eff} = nw \lambda_w$

2 regels verder: ...  $\lambda_{w,eff} = 0.06W/mK$

blz 50 een na laatste regel:  $18 \cdot 10^{-9} m^2 \dots$

SAMENVATTING



KONVEKTIE AAN DE RAND VAN EEN WARMTEOPSLAG IN ZAND

Bij de opslag van (zonne)warmte in de grond blijken soms onverwacht hoge energieverliezen op te treden. Dit vindt vooral plaats in het driefasenmedium bestaande uit grond, water en lucht. Verschillende warmtetransportmechanismen kunnen een rol spelen: warmtegeleiding van de poreuze grond en van water, konvektie van de vochtige lucht en het warmtepijpeffekt. Met een model meetopstelling en een numeriek model is hier onderzoek naar verricht. Met de meetopstelling kunnen de temperaturen en de effectieve warmtegeleidingscoëfficiënten in zand gemeten worden. In het homogene rivierzand, met een karakteristieke korreldiameter  $d_{10}=0.85\text{mm}$  zijn verschillende stationaire toestanden doorgemeten. Het gemiddelde watergehalte  $w$  varieerde van 0 tot 9.4%, de warmtestroom lag tussen 0 en  $213\text{W/m}^2$ .

Natuurlijke konvektie van de vochtige lucht is duidelijk waargenomen. In vijf stationaire toestanden draaide de konvektieve stroom rechtsom en tweemaal draaide de stroom linksom. Dit laatste gebeurde bij droog zand en bij een watergehalte van 1% met een warmtestroom van  $106\text{W/m}^2$ . De schijnbare warmtegeleidingscoëfficiënten van lucht variëren van 0.48 tot 0.88 W/mK. De hieruit berekende effectieve permeabiliteit van het zand komt overeen met de permeabiliteit zoals berekend is met  $d_{10}$ . Alleen bij het hoogste watergehalte  $w=9.4\%$  is effectieve permeabiliteit de helft van de berekende permeabiliteit. In de meeste gemeten toestanden is het warmtetransport door de opstelling met geleiding en natuurlijke konvektie te verklaren. Slechts in de eerder genoemde toestand met  $w=1\%$  en warmtestroom  $106\text{W/m}^2$  is een beperkt warmtepijpeffekt waargenomen. Ongeveer 0.13% van de damp, die in de konvektiestroom zit, kondenseert dan bij de koelplaat en stroomt als water naar beneden.

Tenslotte zijn twee warmteopslagen uit de praktijk bekeken: een zonnevijver in de Australische woestijn [6] en een seizoensopslag in Groningen [21]. In het eerste geval kan het teruglopen van de temperatuur tot  $50^\circ\text{C}$  verklaard worden met de natuurlijke konvektie van vochtige lucht. Het verder teruglopen tot  $40^\circ\text{C}$  kan verklaard worden met het warmtepijpeffekt: 2% van de damp uit de konvektiestroom moet dan echter bij het aardoppervlak kondenseren. Voor de seizoenopslag in Groningen kan het ekstra energieverlies door de isolatielaag volledig verklaard worden met de konvektie van lucht.

## INHOUDSOPGAVE

SAMENVATTING . . . . .	1
1 VOORWOORD: AARDE, WATER, LUCHT EN VUUR . . . . .	3
2 INLEIDING: OPZET VAN HET ONDERZOEK . . . . .	6
3. THEORIE . . . . .	8
3.1 ENKELE EIGENSCHAPPEN VAN ONVERZADIGDE GROND. . . . .	8
3.2 KONVEKTIE VAN WATER, DAMP EN LUCHT . . . . .	10
3.3 HET NIET STATIONAIR METEN VAN DE WARMTEGELEIDING . . . . .	15
4 MEETMETHODE. . . . .	19
4.1 ALGEMENE OPZET . . . . .	19
4.2 ONTWERP EN EIGENSCHAPPEN VAN DE MEETBAK. . . . .	19
4.3 ONTWERP VAN DE LAMBDA NAALDEN . . . . .	23
4.4 OPBOUW VAN MEETOPSTELLING MET RANDAPPARATUUR.. . . .	24
5 VERWERKING VAN DE MEETGEGEVENS MET NUMERIEKE MODELLEN. . . . .	27
5.1 DE SIMULTANE BEPALING VAN DE THERMISCHE PARAMETERS . . . . .	27
5.1.1 Beschrijving van NAALD1. . . . .	28
5.1.2 Beschrijving van NAALD3. . . . .	29
5.2 VERWERKING VAN DE TEMPERATUURMETINGEN. . . . .	30
5.2.1 Beschrijving van GELEIDING . . . . .	31
5.2.2 Beschrijving van EKSTRA/20TOT51. . . . .	32
5.2.3 Beschrijving van EKSTRA/LAMBDA . . . . .	32
5.3 HET REKENPROGRAMMA "TEKEN" . . . . .	33
5.3.1 Beschrijving van TEKEN . . . . .	33
6 RESULTATEN EN VERDERE BEREKENINGEN . . . . .	35
6.1 BEREKENINGEN VOLGENS DE WAGENINGSE METHODE . . . . .	35
6.2 BEREKENINGEN MET NAALD3. . . . .	37
6.3 DE TEMPERATUURMETINGEN . . . . .	40
6.4 BEREKENINGEN MET HET REKENMODEL GELEIDING. . . . .	42
7 VERGELIJKING MET DE LITERATUUR . . . . .	49
7.1 EEN ZONNEVIJVER IN ALICE SPRINGS . . . . .	49
7.2 EEN SEIZOENSOPSLAG IN GRONINGEN. . . . .	50
8 KONKLUSIES EN AANBEVELINGEN. . . . .	52
INHOUDSOPGAVE VAN DE APPENDICES. . . . .	55
LITERATUURLIJST. . . . .	103
SYMBOLENLIJST. . . . .	104

# 1 VOORWOORD: AARDE, WATER, LUCHT EN VUUR

---

Het in dit verslag beschreven onderzoek heb ik verricht als afstudeeropdracht aan de afdeling Technische Natuurkunde aan de TH Eindhoven. In dit voorwoord zal ik vertellen waarom ik dit onderzoek heb gedaan en in welk deel van de natuurkunde het zich heeft afgespeeld.

Ik ben al lange tijd geïnteresseerd in de toepassing van "alternatieve" of hernieuwbare energiebronnen. Alternatief in zoverre dat ze een alternatief vormen voor de gebruikelijke energiebronnen zoals steenkool, olie en aardgas. Hernieuwbare energiebronnen zijn in feite de oudste energiebronnen die de mens gebruikt: zonnewarmte, zonlicht, waterkracht en windenergie. Deze alternatieven zijn hard nodig omdat de voorraden van "gewone" energiedragers snel aan het slinken zijn en de (Westerse) mens niet van plan is om weer onder primitieve omstandigheden te gaan leven. Bovendien is de verbranding van olie, aardgas en steenkool milieuvervuilend.

Vanwege deze interesse leek het me zinvol om mijn kennis en vaardigheden te gebruiken voor het bestuderen van een zeer klein onderdeel van het energievraagstuk. Het werkt voor mij sterk motiverend als ik weet waarvoor ik mijn werk doe en als het werk in mijn ogen nuttig is. Daarom heb ik een paar jaar geleden contact gezocht met de sectie Energietechnologie van de vakgroep Werktuigkundige Ontwerpen voor de Procestechnieken van de THE. Deze sectie houdt zich onder andere bezig met het ontwerpen en onderzoeken van installaties waarmee zonnewarmte gebruikt kan worden. Deze installaties omvatten zonnekollektoren, een opslagvat voor warm water, een pomp, zeer veel waterleidingen, verwarmingsradiatoren, een bijstookinstallatie, enzovoort.

Een van de grootste problemen bij het gebruik van zonnewarmte is dat er 's winters de grootste warmtevraag is, terwijl 's zomers de zon het meeste warmte levert. De zonnewarmte moet dus liefst een half jaar bewaard worden. Deze opslag moet goedkoop en milieuvriendelijk gebeuren. Een van de mogelijkheden is het opslaan van warmte in de grond. Om de warmteverliezen te beperken heeft de opslag een volume van tenminste  $10000\text{m}^3$  in een vorm van een halve bol (de straal van de bol is dan minimaal 25m). In deze grondmassa bevindt zich een gesloten leidingennet. De bovenkant bevindt zich enkele meters onder het aardoppervlak en is van een thermische isolatielaag voorzien.





Ik ben blij dat ik op deze elementaire manier heb kunnen werken en ik wil bij deze ook iedereen bedanken voor zijn of haar bijdrage aan mijn onderzoek. Deze bijdragen varieerden van de vraag: "Waarom doe je dit onderzoek" tot discussies over een bepaalde theorie. Met name wil ik de volgende mensen bedanken:

Rob van den Berg, Frans Filippini, Ad van Huygevoort en Theo Janssen voor het helpen ontwerpen en uitvoeren van de meetopstelling.

Hennie Boshoven en Ies van Haneghem voor praktische en theoretische begeleiding bij het meten met lambdanaalden.

En Chris van Koppen, Piet Verhaart en Gerrit Vossers voor de algemene begeleiding.

Wilko van Loon

december 1985

## 2 INLEIDING: OPZET VAN HET ONDERZOEK

Aan de TH Eindhoven wordt sinds een tiental jaar onderzoek gedaan aan de seizoensopslag van zonnewarmte in de grond. Sinds najaar 1983 werkt een dergelijke opslag in de praktijk in Groningen [21]. De opslag zelf bestaat uit met water verzadigde grond. Hierin zit een gesloten waterleidingnet waarmee de warmte aan- en afgevoerd kan worden. De bovenzijde van de opslag is geïsoleerd met foamplaten, geëkspandeerde kleikorrels en enkele lagen zand. In de laag met kleikorrels bleek een onverwacht groot warmteverlies op te treden. Tussen deze korrels zit vochtige lucht en misschien ook water. Er bestaat een sterk vermoeden dat het ekstra energieverlies veroorzaakt wordt door konvektief warmtetransport.

Niet alleen in Groningen, maar ook bij een warmteopslag in een zonnevijver nabij Alice Springs in de Australische woestijn [6] trad een groot energieverlies op. Hier werd het warmtetransport in de grond sterk vergroot, nadat regen de grond vochtig had gemaakt.

In vochtige grond kan konvektief warmtetransport kan plaatsvinden door verplaatsing van elk van de drie stroomstoffen water, lucht en damp. Er geldt in beide gevallen dat de temperatuur onder (enkele meters in de aarde) hoger is dan boven (het aardoppervlak zelf). Dit is een voorwaarde voor natuurlijke konvektie. Ook een warmtepijpeffekt is niet ondenkbaar. Onder wordt water verdampt, de damp diffundeert door de grond naar boven en kondenseert bij het aardoppervlak. Op die manier wordt ook de verdampingswarmte mee getransporteerd. Na condensatie zal het water weer naar beneden sijpelen.

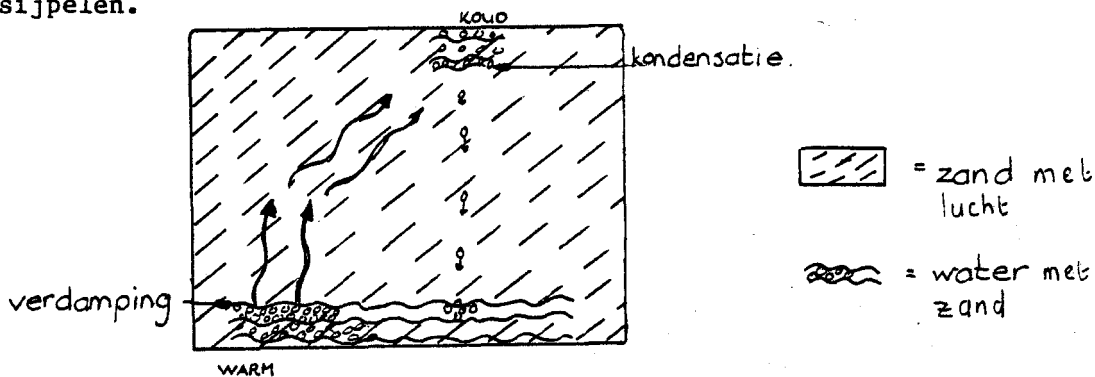


Fig 2 Principe van warmtepijpeffekt

Het doel van het onderzoek is het aantonen van de verschillende warmtetransportmechanismen in onverzadigde grond. Met onverzadigde grond wordt bedoeld dat de grond niet geheel met water verzadigd is: er zit in de holtes (poriën) tussen de zandkorrels niet alleen water maar ook lucht. Een van de eersten, die tot een adequate beschrijving kwam van het driefasen medium (grond, water en vochtige lucht) was de Vries [19]. Met diffusievergelijkingen werd het vloeistof- en damptransport omschreven. Beukema [2] geeft een overzicht van recentere ontwikkelingen; onder andere het warmtetransport door

middel van een schijnbare warmtegeleidingscoëfficiënt wordt uitgediept. Menenti[14] tenslotte gaat uitgebreid in op de fase-overgang water- waterdamp. Vooral de plaats waar de fase-overgang zich afspeelt (het verdampingsfront) is van belang. Ook wordt in zijn proefschrift ingegaan op het gebruik van de schijnbare warmtegeleidingscoëfficiënt.

Om het warmtetransport te meten is een model meetopstelling gebouwd (4). In het onderzoek wordt gebruik gemaakt van zogenaamde lambdanaalden om in zand de warmtegeleidingscoëfficiënt te bepalen. Het meten met lambdanaalden is uitgebreid onderzocht door van Haneghem [9]. Hij heeft een methode ontwikkeld waarin de meettijd wordt teruggebracht tot slechts enkele minuten. Tevens kan in principe de warmtecapaciteit van zand en de contactweerstand tussen de naald en het zand worden bepaald.

In het onderzoek naar het verlies bij warmteopslag in de grond is vooral de rol van vrije konvektie bekeken. Tevens zal onderzocht worden of het warmtepijpeffekt een rol kan spelen. Voor het verwerken van de resultaten wordt ook een numeriek model ontworpen (5). De resultaten van beide modellen worden met elkaar vergeleken en worden theoretisch onderbouwd. Tenslotte wordt met behulp van de eigen bevindingen verklaringen gezocht voor de verschijnselen in Groningen en Alice Springs (7).

### 3. THEORIE

---

#### 3.1 ENKELE EIGENSCHAPPEN VAN ONVERZADIGDE GROND

---

Zoals in de inleiding is beschreven gaat het onderzoek over massa- en warmtetransport in onverzadigde grond. Om er iets meer over te kunnen zeggen moet eerst een geschikt model worden gevonden. De grond zoals die is onderzocht is korrelachtig van structuur. De meest eenvoudige benadering is die van op elkaar gestapelde knikkers. De zandkorrels zijn helaas niet bolvormig en ook niet allemaal even groot. Het eerste probeert men wel te ondervangen door een ongelijkvormigheidscoëfficiënt in te voeren. Het is een maat voor de afwijking van de bolvorm. Dit getal is voor de meeste zandsoorten gelijk [1,p67]. Klei- en leemsoorten wijken hier sterk van af. De ongelijke grootte komt tot uitdrukking in een korrelverdelingsdiagram. Hierin staat horizontaal de korreldiameter  $d$  en vertikaal het gewichtspercentage van de korrels dat een kleinere diameter heeft. (Zie ook Appendix 1) De zanden met een steil korrelverdelingsdiagram noemt men uniform: de korrels hebben min of meer dezelfde grootte. Als bijvoorbeeld de helft van het gewicht bestaat uit korrels kleiner dan een bepaalde diameter  $d_{50}$ , dan komt in de grafiek op de verticale schaal 50% overeen met  $d_{50}$  op de horizontale schaal. Een belangrijk getal is ook  $d_{10}$ : 10% van de korrels heeft een kleinere diameter dan  $d_{10}$ . Voor uniforme zanden kan  $d_{10}$  gebruikt worden om de doorlatendheid  $K$  uit te rekenen:  $K$  is evenredig met  $d_{10}$ -kwadraat. De doorlatendheid of permeabiliteit geeft aan hoe gemakkelijk een stroomstof door de poriën in de grond stroomt.

De poriën zijn de ruimtes tussen de zandkorrels. Zand is dus een poreuze stof; de porositeit  $n$  is het poriënvolume gedeeld door het totale volume. In de poriën zit water en/of lucht met waterdamp. Er zijn hierin vijf toestanden te onderscheiden. Met toenemend watergehalte  $w$  ( $w$ =watervolume/poriënvolume) zijn dat:

- Droge grond: er zit alleen lucht in de poriën:  $w=0\%$ . Dit is slechts het geval met in de oven gedroogde grond.
- Pendulaire verzadiging: het water zit als een film van enkele molekulen dik om de zandkorrels. Deze film ontstaat al als zand wordt blootgesteld aan vochtige lucht. Het vocht dat bij  $20^{\circ}\text{C}$  en bij een relatieve vochtigheid van 50% wordt geadsorbeerd heet ook wel hygroscopisch water. Bij iets meer vocht ontstaat rond de contactpunten tussen de korrels ringetjes water; de zogenaamde pendulaire ringen.
- Funiculaire verzadiging: De pendulaire ringen zijn zo ver uitgegroeid dat een continue fase van vloeibaar water is ontstaan. Er is zowel een continuum water als een continuum lucht.
- Verzadiging met luchtpakketten: het watergehalte is verder gestegen zodat er geen continuum van lucht meer is. De lucht zit opgesloten in pakketten.
- Volledig verzadigde grond:  $w=100\%$ . Dit komt voor onder het grondwaterniveau.

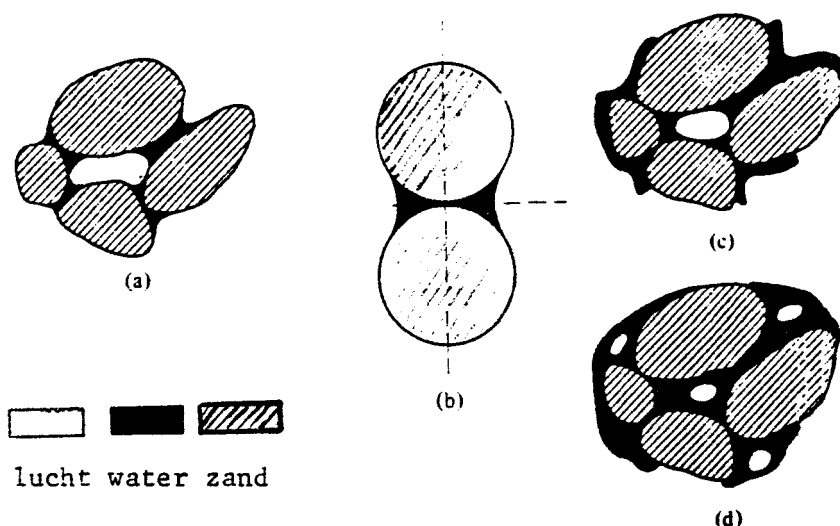


Fig 3 Verschillende vormen van verzadiging: a)pendulaire verzadiging, b)pendulaire ringen, c)funiculaire verzadiging en d)verzadiging met luchtpakketten.

Water en lucht worden van elkaar gescheiden door de oppervlaktespanning  $\sigma$ . Deze is om te rekenen in een waterdruk. Het is duidelijk dat de waterdruk  $h$  afhankelijk is van het watergehalte en de soort grond.

Bij een bepaalde soort grond echter is er geen eenduidig verband tussen het watergehalte en de waterdruk. Er is hysteresis die ontstaat door drie oorzaken [1]:

- Het inktfles-effekt: De poriën liggen als in serie geschakeld en worden na elkaar gevuld of geledigd. Tussen de poriën zit een vernauwing, die het scheidingsvlak tussen water en lucht steeds moet passeren. Tijdens deze passage neemt de oppervlaktespanning tijdelijk toe, zodat een tijdelijke extra druk nodig is.
- Het regendruppel-effekt: de kontakthoek van een druppel die zich verplaatst is aan de voorkant groter dan aan de achterkant. De achterkant lijkt dan sterker bevochtigd.
- Ingesloten lucht kan ook hysteresis veroorzaken.

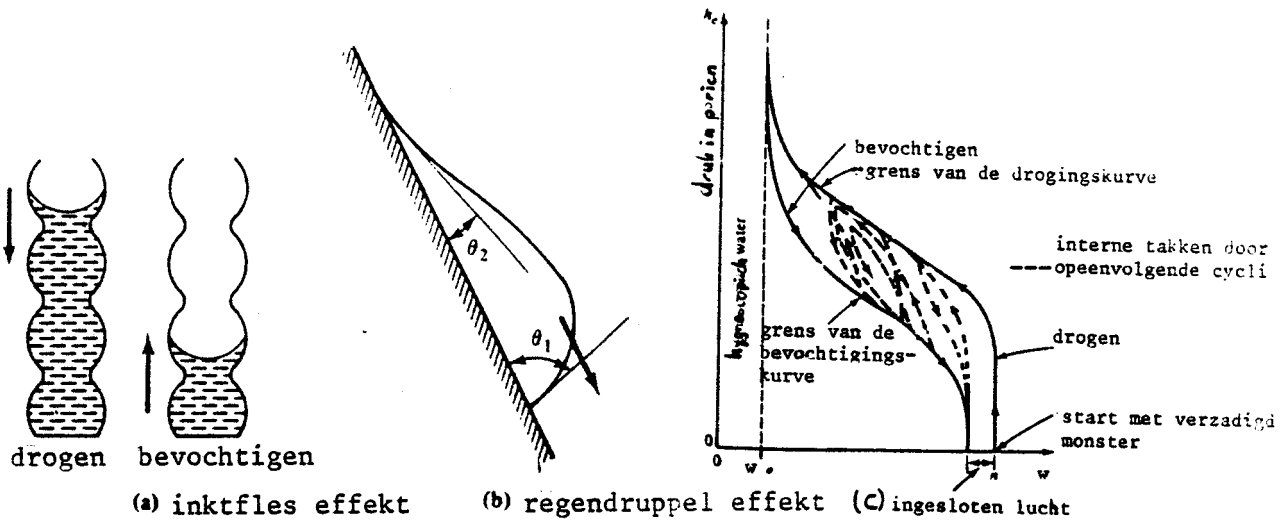


Fig 4a, b en c Hysterese in de poriëndruk. [1]

### 3.2 KONVEKTIE VAN WATER, DAMP EN LUCHT

Voor stroomstofsnelheden in onverzadigde grond wordt een uitgebreide vorm van de wet van Darcy gebruikt:

$$v_{sz} = \frac{-K_{eff}(p) \partial(p - \rho g z)}{\eta_s \partial z} \quad (1)$$

met  $v_{sz}$  de poriënsnelheid van de stroomstof in de z-richting (omhoog)  
 $K_{eff}$  de effectieve permeabiliteit, waarbij  $0 < K_{eff} < K$ .  
 en  $p$  de druk in de poriën

Deze wet geldt alleen als de stroming in de poriën laminair is. Het laminair zijn van een stroming is af te leiden uit het getal van Reynolds; als  $Re < 2$  dan is de stroming laminair. Het getal van Reynolds is als volgt gedefiniëerd:

$$Re = v_{sz} d_{10} \rho_s / \eta_s \quad (2) \quad [1, p65]$$

Bij de wet van Darcy wordt vaak de kapillaire geleidbaarheid  $k$  gebruikt:

$$k(h) = K_{eff} \rho_s g / \eta_s \quad \text{zodat } v = -k(h) \partial(h-z) / \partial z \quad [14, p27]$$

$h$  is de poriëndruk in meters water. De poriëndruk wordt vaak met een waterkolom gemeten, zodat  $h$  direkt afleesbaar is van het meetinstrument. De kapillaire geleidbaarheid is afhankelijk van de druk in de poriën. Deze afhankelijkheid is, zoals gezegd in §3.1, zeer kompleks voor poreuze stoffen met verschillende poriëngroottes zoals grond. De relatie tussen de poriëndruk en de kapillaire geleidbaarheid vertoont minder hysterese naarmate het zand homogener is. Er zijn in

een driefasen medium altijd twee kapilaire geleidbaarheden: die van de gasvormige fase  $k_d$  en die van de vloeibare fase  $k_w$ .

Het zand dat in het onderzoek gebruikt is, bevindt zich voornamelijk in de funiculaire verzadiging. Hier speelt vooral de combinatie van vloeistof en damp/luchttransport een belangrijke rol. Bij funiculaire verzadiging is er in principe een continuüm van water en een continuüm van lucht. Toch zijn er plaatselijk pakketten lucht of water aanwezig. De Vries [19] gaat er van uit dat er een continue uitwisseling is van water en damp. Als opstijgende damp tegen de onderkant van een pakket water botst, zal de damp kondenseren. De warmte wordt door het pakket getransporteerd en aan de bovenkant van het pakketje zal water verdampen. De dampstroom kan dus via de tussenstap van vloeibaar water door de waterpakketten heen gaan. De droge lucht kan dit niet. Een bijkomend effect is dat de pakketten zich langzaam tegen de dampstroom in verplaatsen. Hiernaast kan ook nog gewone konvektie plaatsvinden.

Vergelijking (1) is ook op te vatten als een diffusievergelijking: Water en lucht diffunderen door concentratieverschillen door de poreuze massa heen. In dit verband wordt de diffusiecoëfficiënt  $D(w)$  gebruikt, die afhankelijk is van het watergehalte  $w$ .

$$D(w) \frac{\partial w}{\partial z} = k(p) \frac{\partial p}{\partial z}$$

Hoe deze afhankelijkheid eruit ziet hebben Jackson e.a. uitgezocht [14].

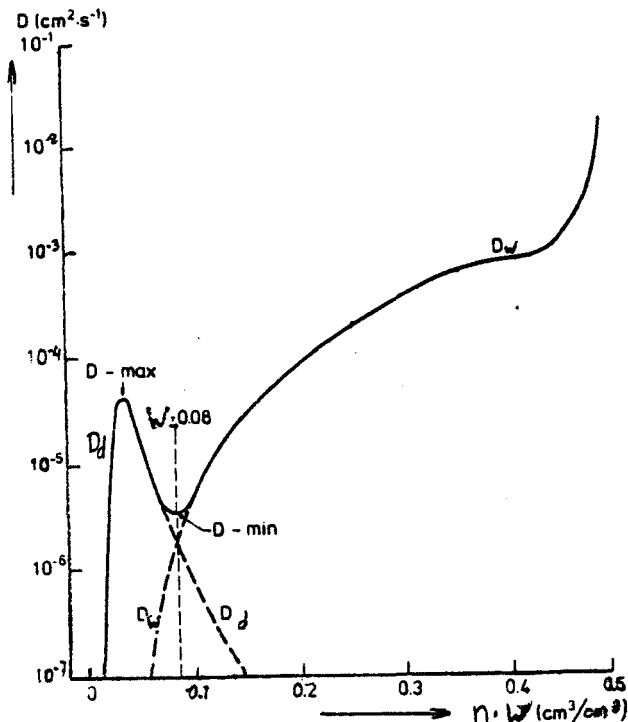


Fig 5 Diffusiecoëfficiënten van water en waterdamp [14]

Het is duidelijk dat de diffusie van vloeibaar water geen rol van betekenis kan spelen in het warmtetransport als  $w < 80\%$ .  $D_w$  is kleiner dan  $1\%$  van  $D_w, verz$ ; dus ook de vloeistofsnelheid is minstens honderd keer zo klein geworden.

Vloeistofkonvektie in poreuze media wordt meestal door middel van temperatuurveld geschreven.

$$(\rho C)_{gw} \partial T / \partial t = \nabla (\lambda_g \nabla T) - (\rho C)_s \vec{v}_s \cdot \nabla T \quad (3)$$

Hierbij zijn  $(\rho C)_{gw}$  en  $\lambda_{gw}$  respektievelijk de effectieve warmtecapaciteit en de warmtegeleidingscoëfficiënt van grond met vloeibaar water samen,  $(\rho C)_s$  is de warmtecapaciteit van de stroomstof. De stroomstof is in de praktijk de vochtige lucht. De  $\lambda_{gw}$  en de  $(\rho C)_{gw}$  zijn met de instationaire naaldmethode te bepalen (zie §3.3). Deze grootheden zijn te benaderen met het volumepercentage waarin grond en water voorkomen. Voor grond is dit één min de porositeit  $n$  en voor water is dat het watergehalte  $w$  maal de porositeit.

$$\lambda_{gw} = n \lambda_g + w n \lambda_w \quad (4)$$

$$(\rho C)_{gw} = n(\rho C)_g + w n(\rho C)_w \quad (5)$$

Een zelfde temperatuurveld als bij (3) kan ook met een geleidingsachtige vergelijking geschreven worden [14, p45]:

$$(\rho C)_{gw} \partial T / \partial t = \nabla (\lambda^* \nabla T) \quad (6)$$

$\lambda^*$  is de schijnbare warmtegeleidingscoëfficiënt waarin alle warmtetransportmechanismen zijn verborgen. De belangrijkste mechanismen zijn: de geleiding van water en grond en de konvektie van lucht en damp. Als (3) en (6) voor een dimensie ( $z$ -richting) wordt bekeken en de temperatuurverdeling wordt gelineariseerd dan ontstaan voor (3) en (6) de volgende vergelijkingen:

$$(\rho C)_{gw} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial \lambda_{gw}}{\partial z} \frac{\Delta T}{\Delta z} - \frac{(\rho C)_s v_s \Delta T}{\Delta z} \quad (3a)$$

$$(\rho C)_{gw} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial \lambda^*}{\partial z} \frac{\Delta T}{\Delta z} \quad (6a)$$

zodat

$$\frac{\partial \lambda^*}{\partial z} = \frac{\partial \lambda_{gw}}{\partial z} - (\rho C)_s v_s \quad (7)$$

Voor een laag watergehalte  $w < 2\%$  is de effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt van grond en water samen  $\lambda_{gw}$  ongeveer konstant. Met deze aanname is de snelheid van de stroomstof:

$$v_s = \frac{-\lambda^* + \lambda_{gw}}{\Delta z (\rho C)_s} \quad (8)$$

[14, p45]



Indien  $\lambda_{gw}$  niet konstant is, maar lineair met de hoogte afneemt, dan is  $\lambda_{gw}(z) = \lambda_{gw}(0) + \{\lambda_{gw}(\Delta z) - \lambda_{gw}(0)\}z/\Delta z$ . Invullen in (7) en integreren levert een eerste korrektheid op (8):

$$v = \frac{-\lambda^* + \lambda_{gw} + \frac{1}{2}\Delta z \frac{\partial \lambda_{gw}}{\partial z}}{\Delta z (\rho C)_s} \quad (9)$$

Dit is dezelfde snelheid als in (1), waarbij de warmtecapaciteit van de stroomstof gelijk is aan de warmtecapaciteit van de vochtige lucht:  $(\rho C)_s = (1-n)(1-w)(\rho C)_v$ . De vrije konvektie wordt veroorzaakt door de opwaartse druk. Omdat er sprake is van een mengsel van waterdamp en lucht, met verschillende soortelijke massa's, moet gecorrigeerd worden voor de dampdruk. Het kan soms gebeuren dat het damptransport tegengesteld is aan de temperatuurgradiënt. Dit komt doordat de dichtheidsverschillen grotere krachten kunnen uitoefenen dan de temperatuurverschillen. De eenvoudigste korrekthemethode is het invoeren van een virtuele temperatuur. Deze wordt als volgt gedefinieerd:

$$T_{vi} = \left(1 + \frac{18}{29} \frac{p_d}{p_t}\right) T \quad [K] \quad (10)$$

met  $p_t$  = totale luchtdruk. [14, p41]

Hier is 18 het molekuulgewicht van water en 29 het (gemiddelde) molekuulgewicht van lucht. De dampdruk  $p_d$  zal in de vochtige gerond gelijk zijn aan de verzadigingsdruk van de damp. Deze grootheid is reeds lang onderzocht en eenvoudig in tabellen op te zoeken. De drukgradiënt in de poriën kan als volgt geschreven worden:

$$\frac{\partial (p - \rho_l g z)}{\partial z} = \frac{R}{\rho_l} \frac{\partial (\rho_l T_{vi})}{\partial z} - g \frac{\partial (\rho_l z)}{\partial z} \quad (11)$$

met  $R = 287$  J/kg/K de gaskonstante voor lucht.

Voor het uitrekenen van vloeistofsnelheden kan (11) in (1) ingevuld worden.

Om metingen te kunnen evalueren worden vaak dimensieloze getallen gebruikt. Het getal van Reynolds  $Re$  is al ter sprake geweest: het is de verhouding van de stationaire traagheidskracht en de viskeuze kracht. Er is voor poreuze media nog een andere manier om  $Re$  te definiëren: met behulp van de effectieve permeabiliteit  $K_{eff}$  en de porositeit  $n$ .

$$Re = v_s \sqrt{(K_{eff}/n)} \rho / \eta \quad (12)$$

Als maat voor de sterkte van de thermische gelaagdheid in een poreus medium wordt vaak een getal van Rayleigh gedefinieerd [4]:

$$Ra = \frac{\rho_s g \beta_s \Delta T \Delta z K}{\eta_s \hat{\alpha}} \quad (13)$$

met  $\beta_s$  de lineaire uitzettingscoëfficiënt van de stroomstof en  $\hat{\alpha}$  de hybride temperatuurvereffeningscoëfficiënt

Ra is de verhouding van de opwaartse krachten door dichtheidsverschillen en de viskeuze krachten. De hybride temperatuurverrefferingscoëfficiënt die hier in zit ziet er wat vreemd uit:  $\hat{\alpha} = \lambda_{gw} / \rho C_v$ . Dit komt doordat de warmtegeleiding door grond en water gebeurt, terwijl de konvektie juist door de vochtige lucht plaatsvindt. De hoeveelheid warmte die de lucht kan meenemen is dus van bepalend: de warmtecapaciteit van de vochtige lucht  $\rho C_v$  komt hier vandaan. Als er in een onverzadigd medium wordt gewerkt moet Keff worden gebruikt. Bij de gewone permeabiliteit K wordt er van uitgegaan dat slechts een stof in de poriën zit. Meerdere stoffen hinderen elkaar als ze gaan stromen. Bij het gelijktijdig transport van meerdere stoffen wordt de permeabiliteit dus kleiner. In feite is  $\rho g \beta \Delta T = \nabla p$  een drukgradient. Indien deze drukgradient erg groot is ten opzichte van  $\partial(\rho g z) / \partial z$  dan kan met behulp van de wet van Darcy het getal van Rayleigh omschreven worden:

$$Ra = -v_s \Delta z (\rho C)_s / \lambda_{gw} \quad (14)$$

Dit is met (8) om te werken tot:

$$Ra = \{ \lambda^* - \lambda_{gw} + (\partial \lambda_{gw} / \partial z) \Delta z \} / \lambda_{gw} \quad (15)$$

Boven een bepaalde kritieke waarde van het getal van Rayleigh, komt er naast energietransport door geleiding ook energietransport door konvektie voor. Dat komt doordat de opwaartse krachten groter worden dan de viskeuze krachten. De kritieke waarde van Ra hangt af van de vorm van de laag, de randvoorwaarden en de eigenschappen van de poreuze stof. Als er vrije konvektie optreedt zal het totale energietransport toenemen. Om dit verschijnsel aan te tonen kan het getal van Nusselt worden berekend. Hierin is de verhouding van van energietransport door geleiding en door konvektie gegeven.

$$Nu = \frac{Q}{A} \frac{\Delta z}{\lambda_{vg} \Delta T} \quad (16)$$

met A het oppervlak waardoor de warmte gaat.

De theorie omtrent het warmtetransport door vrije konvektie in poreuze media is analoog aan de theorie van de Bénard-cellen [4]. De theorie wordt ook wel Bénard-konvektie in poreuze media genoemd. (Voor een uitgebreide bespreking van de theorie rond Bénard-cellen zie [5].) Voor grote knikers verzadigd met water is theoretisch af te leiden wat de kritieke waarde van van het getal van Rayleigh moet zijn. Dit is experimenteel bevestigd, zie figuur 6 en [4].

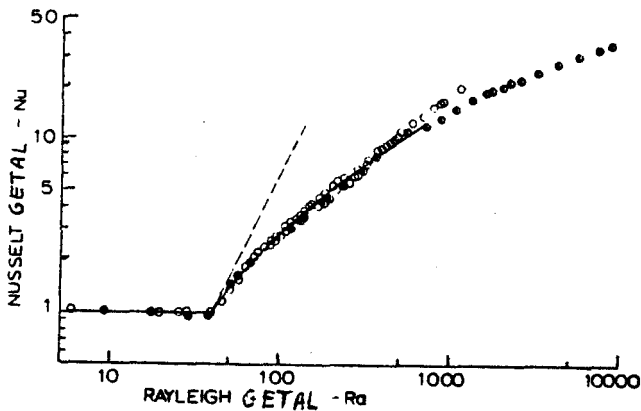


Fig 6 Relatie tussen de getallen van Rayleigh en Nusselt bij een verzadigd poreus medium verwarmd van onderaf. [4]

Kort samengevat geldt: als het getal van Nusselt constant is bij verschillende waarden van het getal van Rayleigh dan treedt alleen geleiding op. En als het getal van Nusselt groter wordt bij verschillende Rayleighgetallen treedt er konvektie op als gevolg van de opwaartse kracht.

### 3.3 HET NIET STATIONAIR METEN VAN DE WARMTEGELEIDING

Een methode om de warmtegeleidingscoëfficiënt  $\lambda$  van een poreus medium te meten, is de stationaire naaldmethode. Deze is reeds lang bekend [10]. Hierbij werd de naald gezien als een lijnbron. Normaal als er geen stroom door de stookdraad loopt is de temperatuur van de naald gelijk aan de omgevingstemperatuur  $T_{om}$ . Op tijdstip  $t=0$  gaat er een konstante stookstroom door de naald, een constant vermogen per lengte-eenheid  $Q_l$  wordt afgegeven. De grond vlakbij de naald zal nu warmer worden.

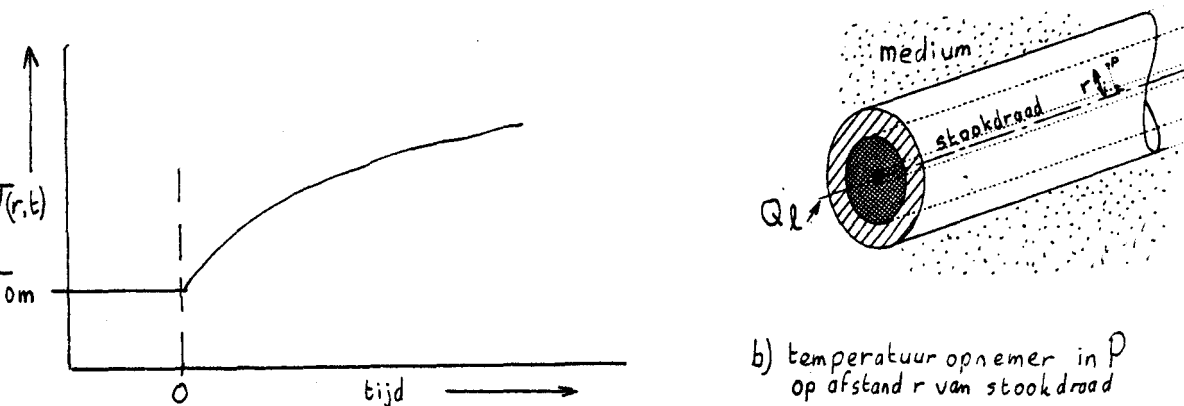


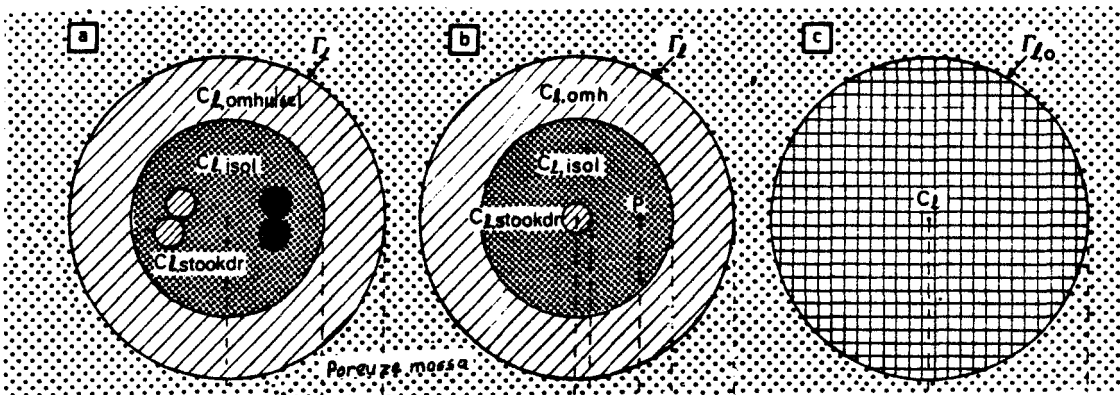
Fig 7a Temperatuurrepons gemeten met lambdanaald, b meetsituatie

Uit deze temperatuurrepons van de grond is de warmtegeleidings-koëfficiënt van de grond te berekenen. De temperatuur, die op afstand  $r$  van de stookdraad gemeten werd, is  $\theta$  hoger dan de omgevingstemperatuur  $T_{om}$ . Na lange tijd  $t \gg r^2/4a$  geldt voor de temperatuurverhoging:

$$T(r,t) - T_{om} = \theta(t) = \frac{Q_f}{4\pi\lambda} \left\{ -C_E - \ln\left(\frac{r^2}{4at}\right) \right\} \quad (17)$$

met  $a$  de temperatuurvereffeningskoëfficiënt van het medium en  $C_E$  de konstante van Euler = 0.5772

Omdat de ~~warmte~~temperatuurvereffeningskoëfficiënt voor een bepaald medium, bij een bepaalde temperatuur konstant is en ook de afstand tussen temperatuuropnemer en stookdraad niet verandert geldt  $\theta(t) = A \cdot \ln(t) + B$ , met  $A$  en  $B$  konstanten. In de praktijk voldoet het ideale lijnmodel niet. Dit komt vooral door de contactweerstand  $\Gamma_f$ , die tussen de naald en het medium optreedt, en de warmtecapaciteit van de naald zelf. Blackwell, Jaeger, de Vries en Peck hebben voor deze meer reële omstandigheden een cilindermodel ontwikkeld [10]. Van Haneghem heeft dit model verder aan de praktijk getoetst en aangepast. Het zogenaamde gemodificeerde Jaegermodel werd ontwikkeld.



- Het meetelement.
- Het geïdealiseerde meetelement (samengestelde cylinder).
- Het vereenvoudigde, geïdealiseerde meetelement (het gemodificeerde Jaegermodel)

Fig 8 Van meetelement tot gemodificeerd Jaegermodel.

Het meetelement met omgeving bestaat warmtetechnisch gezien uit vier delen: de stookdraad van constantaan, een cilindervormig omhulsel van roestvrij staal, isolerende vulstof van siliconen-rubbercompound en de omgeving die uit een poreuze massa bestaat. En elk deel heeft karakteristieke thermische eigenschappen. Deze eigenschappen worden in twee dimensieloze getallen ( $\alpha$  en  $\gamma$ ) en een tijdcorrectie  $t_0$  gevat.  $\gamma$  is de serieschakeling van drie dimensieloze contactweerstand [9]:

$$\gamma = 2\pi \sqrt{t_0} + \frac{\ln(u/r)}{\lambda_{isol}} + \frac{\ln(V/u)}{\lambda_{omh}} \quad (18)$$

met  $u$  de inwendige straal van het roestvrij stalen omhulsel

en  $V$  de uitwendige straal.

$\alpha$  is de dimensieloze verhouding van de warmtecapaciteiten van het medium en de totale warmtecapaciteit van de naald.

$$\alpha = \frac{2 \cdot V^2 \rho C}{r_{stook}^2 \rho C_{stook} + u^2 \rho C_{isol} + (V^2 - u^2) \rho C_{omh}} \quad (19)$$

En de tijdkonstant  $t_0$  is:

$$t_0 = \frac{(\alpha - 2)V^2 \ln(4a/V^2 C^*) + V(-4)}{2\alpha a} \quad \text{met } C^* = e^{C\epsilon} \quad (20)$$

De temperatuurstijging voor grote tijd  $t > V^2/a$  is nu te schrijven als

$$\theta(t) = A \ln(t+t_0) + B + E \ln(t)/t \quad (21)$$

met  $A = Q_l / 4\pi\lambda$

$$B = Q_l / 4\pi\lambda (\ln(4a/V^2 C^*) + 2)$$

$$E = Q_l / 4\pi\lambda (\alpha - 2)V^2 / 2a$$

Het is duidelijk dat uit deze vergelijkingen niet direkt de warmtegeleidingscoëfficiënt en de warmtecapaciteit van grond  $\lambda$  en  $\rho C$  zijn uit te rekenen als de temperatuurrespons  $\theta(t)$  wordt gemeten. Er moet in stappen gerekend gaan worden. Eerst wordt (17) gebruikt om lineaire regressie uit te voeren tussen  $\ln(t)$  en de temperatuurrespons  $\theta(t)$ :  $\theta(t) = AA \ln(t) + BB$ . Een eerste waarde voor de warmtegeleidingscoëfficiënt is  $\lambda = Q_l / 4\pi \cdot AA$ . Dan wordt met een geschatte warmtecapaciteit en de zojuist verkregen  $\lambda$   $E$  uitgerekend. Nu kan  $\theta^*(t) = \theta(t) - E \ln(t)/t$  uitgezet worden tegen  $\ln(t)$ . Uit deze verfijning volgen weer nieuwe regressieconstantes  $AA$  en  $BB$ ; hiermee kan de warmtecapaciteit  $\rho C$  worden berekend.  $\rho C$  kan echter niet rechtstreeks berekend worden. Het kan wel met de iteratiemethode van Newton (zie appendix 6). Vervolgens wordt  $E$  opnieuw uitgerekend en voor de derde keer lineaire regressie uitgevoerd:  $\theta^*(t)$  wordt uitgezet tegen  $\ln(t-t_0)$ . In feite wordt nu pas het volledige model (21) toegepast.  $\lambda$  wordt opnieuw uitgerekend en ook  $t_0$  wordt bepaald. Uit  $t_0$ ,  $\lambda$  en  $\rho C$  volgt uiteindelijk de kontaktweerstand  $\bar{r}$ . Voor een gedetailleerde beschrijving van de analyse van de metingen zie [9: hoofdstuk 4].

Een van de meetfouten waar het zojuist beschreven model geen rekening mee houdt is dat meetnaald niet oneindig lang is. Nauwkeuriger gezegd, dat de axiale afstand  $l$  tussen de temperatuuropnemer en het einde van de stookdraad niet oneindig groot is. Dit heeft als gevolg dat de temperatuurstijging minder groot is dan te verwachten met het model, ofwel de warmtegeleidingscoëfficiënt zal te hoog uitvallen. Blackwell heeft hier in 1956 al onderzoek naar gedaan [3]. Hierbij werd aangenomen dat de temperatuurvoeler halverwege de stookdraad zit. In dit artikel is een schatting van de fout in de regressieconstante  $AA$  gegeven als het eenvoudige model (17) wordt gebruikt:

$$\frac{\Delta AA}{AA} = \exp(-l^2/4at) \left( \frac{4at}{l^2} + \text{korrektie voor dikte van naald} \right) \quad (23)$$

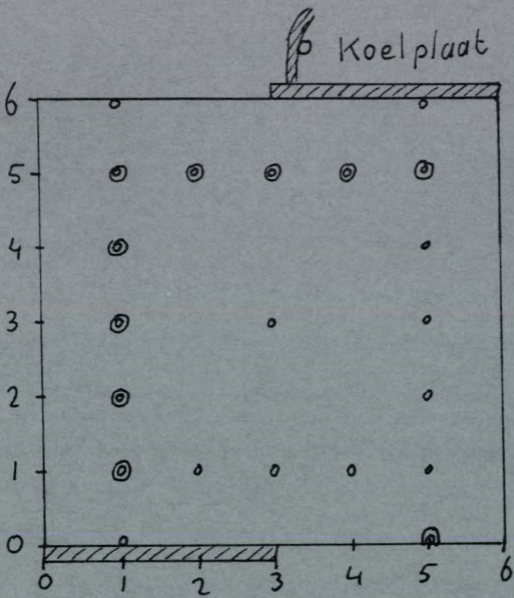
De korrektie voor de dikte van de naald is al in (21) opgenomen, dus hoeft voor dit uitgebreidere model alleen de eerste term van (23) in de korrektie te worden meegenomen.

$$\lambda = \frac{Ql}{4\pi AA} \quad \text{dus} \quad \frac{\lambda}{\lambda_{gem}} = \frac{AA_{gem}}{AA} = \frac{1}{1 - \Delta AA/AA} \quad (24)$$

Om een idee te geven van de fout in de gemeten warmtegeleidingskoëfficiënt zijn enkele waarden voor water met 0.4% uitgerekend. Deze stof wordt vaak gebruikt om ijkmetingen te verrichten: het heeft dezelfde thermische eigenschappen als water. Bovendien kan, indien de gelei op de juiste manier bereid is, de agargel niet stromen. Het grote voordeel van deze stof is dus dat konvektie uitgesloten is. Er wordt aangenomen dat  $t=150$  s, dit is het gemiddelde van het tijdsinterval, waarover  $\lambda$  berekend is.

l(mm)	AA/AA	[%]
8	0.32	47
9	0.24	32
10	0.18	22
11	0.13	15
12	0.09	11
15	0.029	3
20	0.0031	0.3
25	0.0002	0.02

Fig 9 Afwijking in de gemeten warmtegeleidingskoëfficiënt bij ijkmetingen in agargel ( $a=0.15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ).



Stookplaat

o: thermokoppel  
 ⊙: lambdanaald

Rooster met meetsondes

#### 4 MEETMETHODE

-----

##### 4.1 ALGEMENE OPZET

-----

Het doel van het onderzoek is het aantonen van konvektie van het Benard-type aan de rand van een warmteopslag in de grond. Daarvoor moet de meetopstelling tenminste het volgende omvatten:

- Zand met een bekende permeabiliteit en porositeit.
- Verwarming vanaf de onderzijde.
- Mogelijkheden om op verschillende plaatsen temperaturen te meten.
- Mogelijkheden om op verschillende plaatsen vochtigheden te bepalen.

Interessant wordt het onderzoek pas als enkele parameters gevarieerd kunnen worden en metingen reproduceerbaar zijn. Dan komen er enkele eisen bij:

- De eigenschappen van het zand mogen niet te veel variëren. En het zand moet homogeen zijn.
- De temperatuurgradiënt in de grond moet veranderd kunnen worden, er is dus een regelbare verwarming nodig.
- Er mag niet te veel warmte naar de omgeving weglekken.
- Er moet gemeten kunnen worden bij verschillende vochtgehalten en in verschillende grondsoorten.
- Omdat er verschillende stationaire toestanden moeten worden gemeten, mag de insteltijd van zo'n toestand niet te lang duren: ten hoogste een week. Dit stelt weer eisen aan de afmetingen.
- Het theoretische model is tweedimensionaal, alle grootheden mogen dus maar in twee richtingen (hoogte  $z$  en lengte  $x$ ) variëren.
- Tenslotte mag de variatie van de omgevingseigenschappen zoals temperatuur, luchtdruk en relatieve vochtigheid slechts een verwaarloosbare invloed op de metingen hebben.

##### 4.2 ONTWERP EN EIGENSCHAPPEN VAN DE MEETBAK

-----

Het hele pakket van eisen heeft geleid tot het ontwerpen van een modelopstelling waaraan gemeten kan worden: een meetbak, die met zand en water gevuld kan worden. De bak mag niet te groot zijn, wil er in een redelijk korte tijd (bijvoorbeeld 4 dagen) een kwasi-stationaire toestand optreden. Een kwasi-stationaire toestand is een toestand waarin de grootheden nagenoeg in evenwicht zijn. Ofwel wiskundig geformuleerd: de partiële afgeleide naar de tijd moet verwaarloosbaar klein zijn ten opzichte van de overige termen in de vergelijking. Bijvoorbeeld op een bepaalde plaats is de temperatuur na ongeveer 10 uur  $0.1^\circ\text{C}$  gestegen bij een warmtestroom van  $100\text{W/m}^2$ . Het bereiken van volledige evenwichtsituatie (een stationaire toestand) kan in vochtig zand een maand duren. Vaak wordt als criterium voor het bereiken van een kwasi-stationaire toestand gesteld dat het getal van Fourier kleiner dan één moet zijn:

$$Fo = L^2/at$$



met L de belangrijkste afmeting in de meetopstelling  
 a de effectieve temperatuurvereffeningscoëfficiënt van zand  
 t de insteltijd

Met  $a=0.3 \cdot 10^{-6}$  m/s volgt hieruit een karakteristieke afmeting kleiner dan 32 cm. Dit komt overeen met afmetingen van andere opstellingen [7 en 16] die tussen de 15 en 50 cm liggen.

Om zo weinig mogelijk energieverlies te hebben zou de opstelling de vorm van een bol moeten hebben. Een blokvorm is echter eenvoudiger te konstrueren en rekt makkelijker. Daarom is in eerste instantie voor een kubus gekozen met een ribbe r van 30 cm. Linksonderin bevindt zich dan de verwarmingsplaat; en rechtsbovenin bedekt de koelplaat het halve deksel (zie ook figuur 11). Omdat de grond een slechte warmtegeleider is dient er ekstra goede isolatie aangebracht te worden. Voor een eerste benadering voor de vereiste dikte van de isolatie worden enkele vereenvoudigingen aan de temperatuurverdeling aangebracht. De koeltemperatuur boven in de bak wordt gelijkgesteld aan de omgevingstemperatuur, het totale temperatuurverschil tussen onder en boven in de bak is  $\Delta T$  en de temperatuur neemt naar boven lineair af. Als een isolatielaag met dikte d en warmtegeleidingscoëfficiënt  $\lambda_{iso}$  wordt aangebracht is het warmteverlies door de isolatie te berekenen:

$$Q_{verlies} = \frac{\lambda_{iso}}{d} \frac{\Delta T}{2} \frac{11}{2} r^2 \quad (26)$$

Het stookvermogen  $Q_{in}$  is dan:

$$Q_{in} = \frac{\lambda^*}{r} \frac{\Delta T}{2} r^2 \quad (27)$$

Het rendement kan nu gedefinieerd worden als  $(Q_{in} - Q_{verlies})/Q_{in}$ . Indien voor grond de schijnbare warmtegeleidingscoëfficiënt  $\lambda^* = 1.0 \text{ W/mK}$  wordt genomen en voor de isolatie  $\lambda_{iso} = 0.04 \text{ W/mK}$  kan het rendement berekend worden. Bij een isolatiedikte van 10 cm kan een mager rendement van 67% gehaald worden. In de praktijk zal het rendement hoger liggen omdat de temperatuur niet lineair afneemt naar boven toe. De temperatuurgradiënt is het grootst bij de hoogste temperaturen.

Met (27) kan ook worden berekend hoe groot het toegevoerde vermogen  $Q_{in}$  moet zijn. Stel  $10^\circ\text{C} < \Delta T < 40^\circ\text{C}$  en  $0.3 \text{ W/mK} < \lambda^* < 5 \text{ W/mK}$  dan ligt  $Q_{in}$  tussen 0.45 W en 60 W. Het stookvermogen moet dus regelbaar zijn tussen deze twee uiterste standen in. Voor de stookplaat geldt verder dat hij ongeveer  $15 \times 30 \text{ cm}^2$  groot moet zijn en vocht moet kunnen verdragen. Gekozen is voor de schakelkastverwarming van Bartec (zie appendix 2). Het is een plaat met daarin een lange elektrische weerstandsdraad, geïsoleerd in silekonenrubber. De weerstand is konstant  $492 \Omega$  en de stookspanning is met een Variac regelbaar, zodat het stookvermogen tussen de 0 en 100 W ingesteld kan worden. Een nadeel is de afmeting:  $15 \times 20 \text{ cm}^2$ . Daarom is besloten de

eksperimenteerbak niet 30cm maar 20cm breed te maken. Een ander nadeel is het ontbreken van informatie over de homogeniteit van de warmteafgifte.

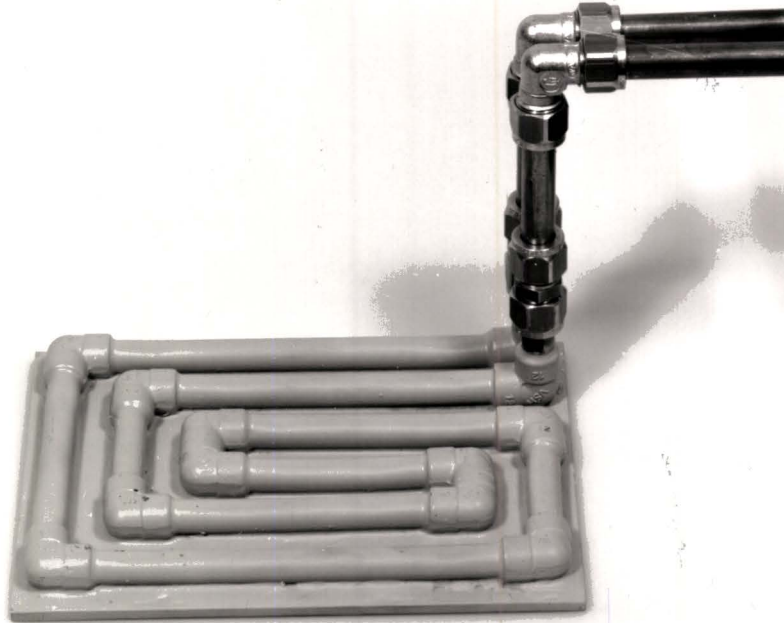


Fig 10 De koelplaat.

De koelplaat is zelf ontworpen. Deze bestaat uit een 5mm dikke koperen plaat met daarop een koperen buis gesoldeerd. De koeling kan via slangen aan het waterleidingnet worden aangesloten. De vorm van de buis is zodanig dat een zo homogeen mogelijke temperatuur in de plaat wordt verkregen.

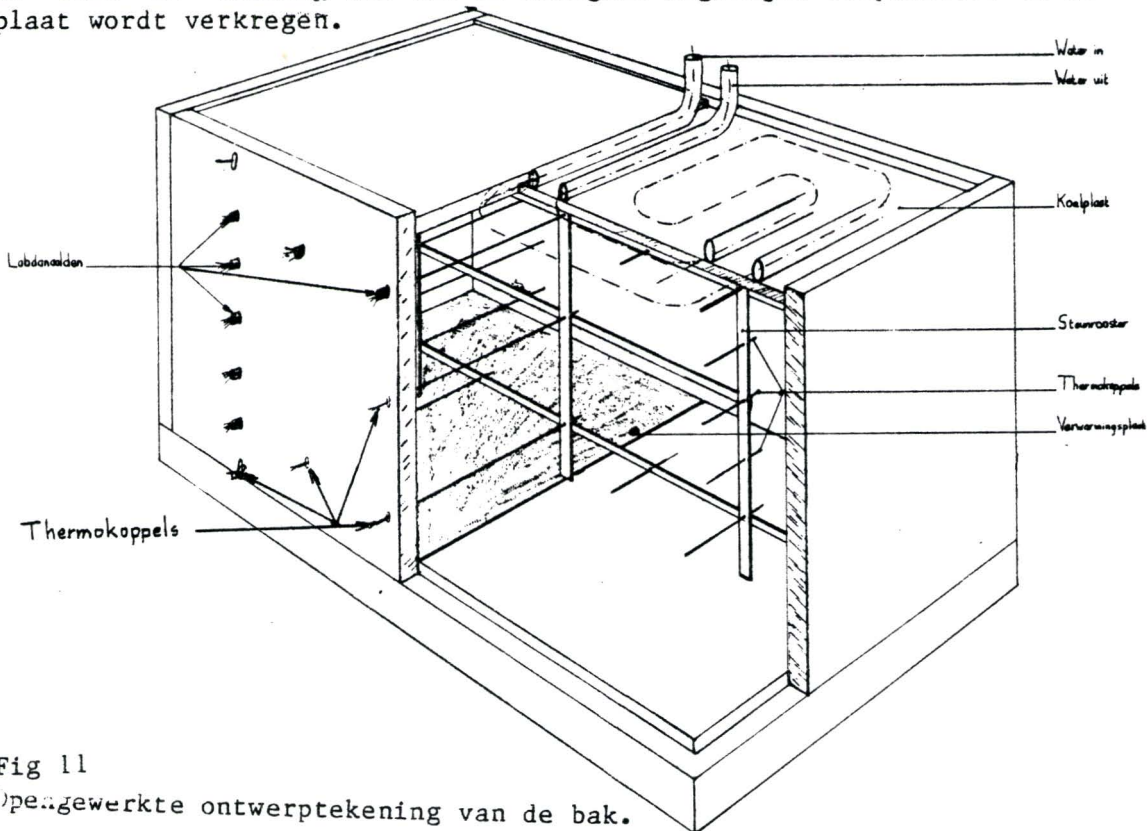


Fig 11  
Opengewerkte ontwerptekening van de bak.

In de bak moet plaats zijn om temperatuur- en vochtmetingen te doen. De temperaturen worden met chromel-alumel thermokoppels van 1mm dik gemeten. De vochtigheid kan indirect via de zogenaamde lambdanaalden gemeten worden (zie §3.3 en §4.3). Beide typen sondes zijn lange, dunne, cilindervormige meetinstrumenten. In de breedte is de variatie in alle grootheden het geringst en het ligt dus voor de hand de lengtes van de thermokoppels en lambdanaalden ook in de breedterichting te plaatsen. Op deze manier wordt zo min mogelijk de normale toestand verstoord. Met doorgangen in de voorwand van de bak en een rooster in de bak worden de meetinstrumenten gefixeerd. Er is gekozen voor een regelmatige rangschikking van de instrumenten in een vierkant rooster met een roosterbasis van 5cm. De plaatsen in dit rooster kunnen eenvoudig met de roosterkoördinaten worden vastgelegd. De oorsprong (0,0) wordt linksonder in de bak gelegd. Vijf centimeter naar rechts bevindt zich (1,0); vijf centimeter naar boven (0,1) enzovoort. De stookplaat strekt zich dus uit tussen de punten (0,0) en (3,0); de koelplaat tussen de punten (3,6) en (6,6).

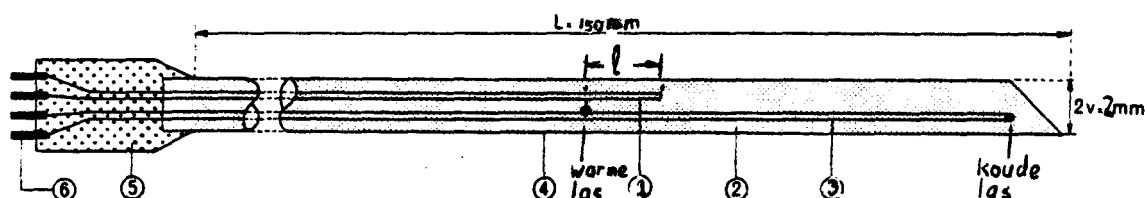
De bak wordt zoals reeds is opgemerkt met zand gevuld. Er is begonnen met één soort zand. Het komt uit het zandwingebied in Groningen en wordt ook door het Laboratorium voor Grondmechanika te Delft gebruikt. Het zand heeft een hoog kwartsgehalte zodat  $\rho = 2.65 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ . Het is verder zeer homogeen zand, dat wil zeggen het heeft een steil korrelverdelingsdiagram (zie appendix 1). De karakteristieke diameter is  $d_{10} = 0.85 \text{ mm}$ . Voor dit soort zand geldt dat de permeabiliteit  $K$  evenredig is met  $(d_{10})^2$ . Uit [7] volgt dan dat  $K = 6.9 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ . De porositeit wordt zeer eenvoudig bepaald: eerst wordt de bak gewogen, dan wordt de bak gevuld met zand, en vervolgens wordt het volume  $V_z$  bepaald dat het zand inneemt:  $V_z = \text{lengte} \cdot \text{breedte} \cdot \text{hoogte}$ . Hier moet het volume van het rooster en de meetinstrumenten van worden afgetrokken ( $49 \text{ cm}^3$ ). De bak stond ook bol: de lange zijde week maximaal 1.5mm uit en de korte zijde 1mm. Er ontstond een extra volume van ongeveer  $69 \text{ cm}^3$ , dat bij  $V_z$  moet worden opgeteld. De porositeit bedraagt dan:

$$n = (\rho_z - m_z / V_z) / \rho_z$$

Het vullen van de bak dient zeer zorgvuldig te geschieden, zodat een losse pakking ontstaat met een porositeit van 43%. Als hierna honderd tot honderdvijftig maal met een rubber hamer tegen alle wanden wordt geklopt, klinkt het zand in zodat een vaste pakking ontstaat. De porositeit is nu 37%. Indien slechts een twintigtal keer op één wand wordt geklopt, is de porositeit 39.9%. Dit is enkele keren herhaald en de reproduceerbaarheid is 0.1%. Deze getallen slaan steeds op de gemiddelde porositeit. Aan de wanden kunnen er flinke afwijkingen optreden. Echter in een gebied verder dan 2cm van de rand zal de porositeit niet meer dan 1% variëren [7].

### 4.3 ONTWERP VAN DE LAMBDA NAALDEN

De lambda-naalden zijn ontworpen naar het model ontwikkeld door van Haneghem [9]. Een belangrijk onderdeel van de naald is een dubbelgevouwen draad van constantaan die als stookdraad dienst doet. Deze komt tot ongeveer tweederde van de naald. Verder bevat het een dubbel thermokoppel van constantaan-manganin. De warme las bevindt zich ongeveer halverwege de stookdraad, de koude las aan het eind van de naald. Er kunnen slechts verschiltemperaturen gemeten worden. Een vulstof van siliconen-rubberpolymer houdt de verschillende draden op zijn plaats en zorgt voor de thermische en elektrische isolatie. Het geheel is omgeven door een cilinder van roestvrij staal. Voor alle eisen die gesteld worden aan het ontwerp wordt verwezen naar [9 hoofdstuk3].



- ①: Verwarmingsdraad (constantaan; diameter 0,1 mm).
- ②: Isolerende en fixerende vulstof (siliconen-rubberpolymer).
- ③: Temperatuurvoeler (thermolas van een manganin-constantaan thermo-element; draaddiameter 0,1 mm).
- ④: Omhulsel (roestvrij staal; wanddikte 0,2 mm).
- ⑤: Kunststof houder (polyvinylchloride).
- ⑥: Aansluitpennen (constantaan en koper).

Fig 12 Doorsnede van een lambda-naald

Een uitbreiding van het meetelement met een extra koppel lijkt op zijn plaats. Er zijn hiervoor twee redenen :

- De temperatuur ter plaatse moet bekend zijn om de koppelspanning van de constantaan-manganin koppels te kunnen berekenen. Indien een thermokoppel vlak naast de lambda-naald in de grond wordt aangebracht, is het cilinder-symmetrische rekenmodel niet meer geldig. De thermische eigenschappen van het koppel verschillen te veel van de eigenschappen van grond.
- Er zijn te weinig gewone thermokoppels in de grond aanwezig om overal in de bak nauwkeurig de temperatuur te weten. Aan de hand van de temperaturen worden overigens ook de warmtestromen uitgerekend.

Door het extra koppel moeten er zes draden in plaats van vier draden in de cilinder van roestvrijstaal passen. Deze passen niet in de lmm

buis, zodat nu een 2mm cilinder genomen wordt. De naald moet ook korter worden. De bak is slechts 20cm breed en het uiteinde van de naald moet in verband met inhomogeniteiten in het zand minstens 2cm van de rand verwijderd blijven. De naald is uiteindelijk 15cm lang geworden. De ligging van de thermokoppels van constantaan-manganin is dus ook veranderd: de warme las ligt nu slechts 10mm van het einde van de stookdraad.

#### 4.4 OPBOUW VAN MEETOPSTELLING MET RANDAPPARATUUR.

Het meten met lambdanaalden moet zeer zorgvuldig gebeuren: er worden zeer kleine temperatuurverschillen gemeten. De maximale temperatuurverhoging is  $0.4^{\circ}\text{C}$  opdat het vochtgehalte ter plaatse niet verandert. De  $\Delta T$  wordt gemeten met een dubbel constantaan-manganin koppel met een thermospanning van  $39\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ . Dus de maximale verschilspanning is  $16\mu\text{V}$ . De meetmethode moet nog verschillen van  $0.2\mu\text{V}$  kunnen onderscheiden. Dit stelt hoge eisen aan randapparatuur en meetomstandigheden. De meetkabels zijn allemaal afgeschermd en getwist om storende elektrische en magnetische velden tegen te gaan. Voorts worden de metingen in een klimaatkamer met een konstante temperatuur gedaan  $T=20.2\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ . Plaatselijke temperatuurveranderingen in de omgeving van de bak dienen ook vermeden te worden. Nadat alles is aangesloten wordt minstens drie minuten gewacht voordat er gemeten gaat worden. De eksperimentator zit daarbij zo ver mogelijk van de opstelling af.

De kleine verschilspanningen worden versterkt door de 148 nanovoltmeter van Keithley. Meestal werd een schaalbereik van  $30\mu\text{V}$  ingesteld. Dit bereik werd versterkt tot 1V. Dit signaal is helaas te sterk voor de ingang van de datalogger. Met een spanningsdeler wordt de 1V verzwakt tot 30mV. De datalogger tenslotte zet het analoge signaal om in een digitaal signaal en dit wordt naar een komputer gestuurd.

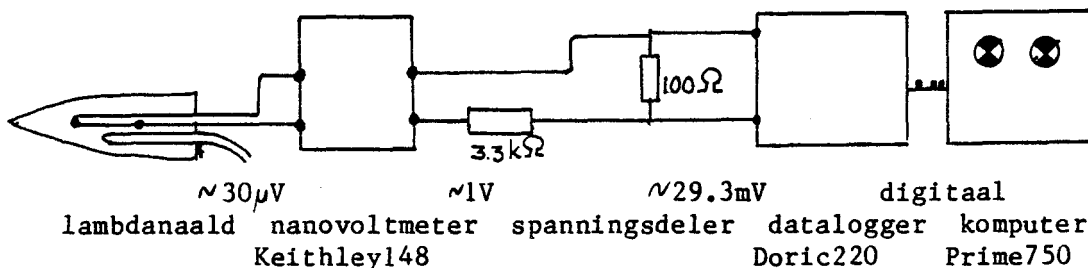
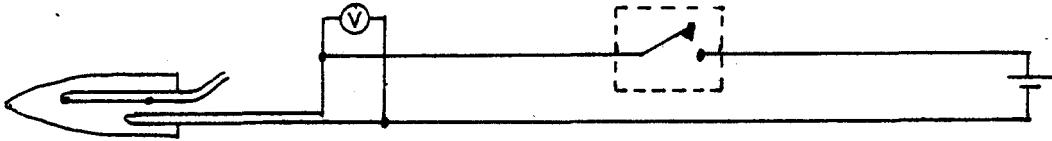


Fig 13 Verwerken van het met de lambdanaald gemeten signaal

Een temperatuurverschil treedt pas op als er stroom door de stookdraad in de lambdanaald loopt. Het aan- en uitschakelen van de stroom gebeurt met een schakelklok. Op de schakelklok kan het tijdsinterval worden ingesteld, waarin de stookstroom gaat lopen (hier is een tijdsinterval van vier minuten genomen). Het begin van het

tijdinterval moet met de hand worden ingeschakeld. De stookstroom is afkomstig van een gelijkspanningsbron. Het stookvermogen wordt berekend uit de weerstand van de stookdraad en de stookspanning. De weerstand is per naald steeds hetzelfde en wordt slechts een keer bepaald. De stookspanning wordt bij iedere meting weer bepaald met een digitale voltmeter.



lambdanaald      digitale voltmeter      schakelklok      gelijkspanningsbron  
SE, SM214                      EberleAZM40                      Delta Electr.D030-3

Fig 14 Het stookcircuit van de lambdanaald.

De temperatuur in de bak wordt gemeten met thermokoppels van Chromel-Alumel. Deze zijn geijkt door de Centrale Technische Dienst van de THE (zie appendiks 3). De afwijking van de koppels kan maximaal 0.29°C bedragen, de standaardafwijking is 0.1°C. De koude las voor de koppels wordt gesimuleerd in de datalogger. De datalogger zet de spanningsverschillen om in temperaturen. Deze temperaturen kunnen worden uitgeprint en/of als digitaal signaal naar de computer worden gestuurd. De absolute temperatuurmetingen in de lambdanaald gebeurt met een thermokoppel van koper- constantaan. Ze werden gemaakt volgens DIN43710. Dat wil zeggen dat de warme las zo werd gemaakt. De koude las compensatie wordt weer gesimuleerd door de datalogger. Hiervoor is echter wel van belang dat de compensatiekabel van de thermokoppels pas begint waar de omgevingstemperatuur gelijk aan de kamertemperatuur is. Het begin van de compensatiekabel dient dus op voldoende afstand van de opstelling te zitten. Helaas is hier onvoldoende op gelet. De compensatiekabel begint al in de dikke isolatielaag rond de bak. De temperaturen die zo gemeten worden zullen zeer onbetrouwbaar zijn.

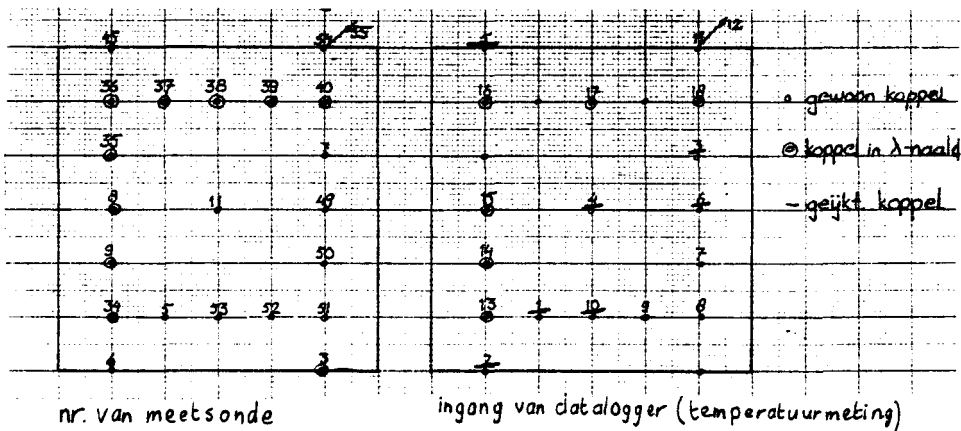


Fig 15 Rooster met meetinstrumenten: • Thermokoppel, ⊙ Lambdanaald

Uiteindelijk is met 12 thermokoppels en 9 lambdanaalden gemeten. De rangschikking is te zien in figuur 15. Er zijn hier 10 lambdanaalden te zien, maar naald 38 bleek tijdens de metingen niet goed te functioneren, zodat hier geen warmtegeleidingskoëfficiënten mee bepaald kunnen worden. Van de thermokoppels valt er ook één af: koppel 56 zit aan de toevoerleiding van de koelplaat. De temperatuur werd dus op elf plaatsen in de bak gemeten en lambda op negen plaatsen. In totaal zijn twaalf (kwasi-) stationaire toestanden doorgemeten, waarvan er zeven een temperatuurgradiënt hebben. Bij elke toestand zijn een tot drie series lambdametingen gedaan en tientallen series temperatuurmetingen. Deze laatsten staan helaas voor het grootste deel alleen op papier en niet op komputerfiles. De (kwasi-) stationaire toestanden met een temperatuurgradiënt zijn het meest interessant voor dit onderzoek. Ze kunnen door twee grootheden worden gekarakteriseerd: het stookvermogen  $Q$  onderin de bak en het gemiddeld watergehalte  $w$  van het zand. De twaalf toestanden met het aantal lambdametingen worden weergegeven in figuur 16. Nadat deze metingen waren gedaan, was er helaas geen tijd meer om in andere zandsorten te meten.

$Q[W]$	$w=0\%$	$w=0.98\%$	$w=3.2\%$	$w=9.4\%$
0	00 (18)	10a (5) 10b (18)	30 (9)	90 (9)
3.2		13 (18)	33 (18)	
4.8	05 (18)	15 (27)	35 (9)	95 (18)
6.2			36 (18)	

Fig 16 Rangschikking van de meetseries naar watergehalte  $w$  en stookvermogen  $Q$  met het aantal metingen van de warmtegeleidingskoëfficiënt tussen haakjes.

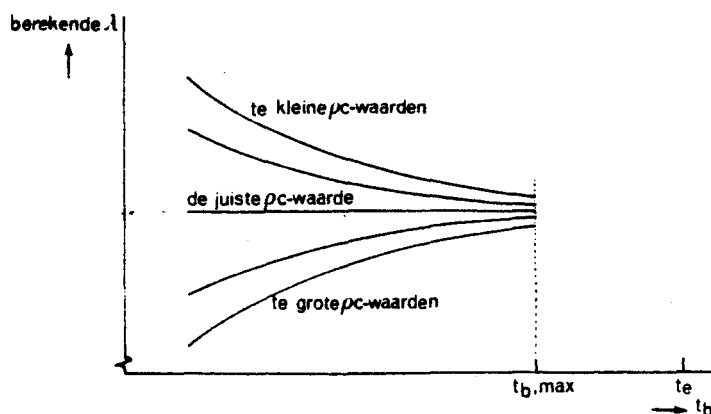
## 5 VERWERKING VAN DE MEETGEGEVENS MET NUMERIEKE MODELLEN

In de volgende paragrafen worden enkele komputerprogramma's omschreven. De namen van deze programma's staan in hoofdletters. Ook namen van procedures of variabelen zullen in hoofdletters worden weergegeven. Er is geprobeerd een soort fonetische weergaven van de afkortingen van de variabelen als programmavariabele aan te houden. Dit heeft als doel de variabelen zo herkenbaar mogelijk te maken.

### 5.1 DE SIMULTANE BEPALING VAN DE THERMISCHE PARAMETERS

Bij de meetmethoden met de  $\lambda$  naalden horen twee rekenmodellen: één om de ijkmetingen in agargel te verwerken en één om de gewone metingen te verwerken. De beschikbare programma's [9] waren echter geschreven in Basic, ze waren slechts geschikt voor 1 mm naalden en nogal omslachtig in gebruik. Daarom zijn de programma's vertaald in Pascal, zodat ze geschikt zijn voor de grote komputer op de TH Eindhoven, de Burroughs7900. Tegelijkertijd zijn de variabelen beter zichtbaar gemaakt en zijn de programma's efficiënter geworden. Dit laatste is vooral mogelijk gemaakt door een procedure te schrijven voor lineaire regressie LINREG. Zo ontstond voor het verwerken van de ijkmetingen het programma IJKNAALDEN.

Voor de verwerking van de simultane metingen van de warmtegeleidingscoëfficiënt  $\lambda$  en warmtecapaciteit  $\rho C$  staat de theorie in 4.6 [9] centraal. Hier wordt verondersteld dat bij de juiste waarde voor  $\rho C$ , de berekende waarde van  $\lambda$  onafhankelijk is van het tijdinterval, waarvoor  $\lambda$  berekend wordt. In onderstaand figuur is de samenhang tussen  $\lambda$ ,  $\rho C$  en de begintijd  $t_b$  van het tijdinterval te zien.



De invloed van de ingevoerde  $\rho C$ -waarde op de berekening van  $\lambda$  in mogelijkheid van het begintijdstip  $t_b$  en bij vastgehouden eindtijdstip  $t_e$ .  
 Fig 17 Relatie tussen berekende  $\lambda$  en gestelde  $\rho C$  [9, §4.6]

Als blijkt dat de helling van de regressierechte tussen  $t_b$  en  $\lambda$  positief is, moet een kleinere waarde van  $\rho C$  genomen worden; is de helling negatief moet  $\rho C$  vergroot worden. Met de nieuwe  $\rho C$  wordt  $\lambda$



weer uitgerekend en zo komt  $\rho C$  steeds dichterbij de juiste waarde. Deze methode is in het programma NAALD1 geautomatiseerd en wat verbeterd.

### 5.1.1 Beschrijving van NAALD1

-----

Dit programma verwerkt de metingen, zoals ze worden gedaan met de naalden uit §4.2. Er wordt ter plaatse een warmtegeleidingscoëfficiënt LABDA, een warmtecapaciteit ROC en een contactweerstand GAMMA uitgerekend met behulp van het gemodificeerde Jaegermodel, zoals beschreven is in .3.3 (in het rekenprogramma is lambda abusievelijk LABDA genoemd). NAALD1 is geschreven in PASCAL, specifiek voor de tien meetelementen, die in de meetopstelling gebruikt zijn. De nummers NR van de naalden zijn 3, 8, 9, 34, 35, 36, 37, 38, 39 en 40. Enkele eigenschappen van de naalden staan in het model vermeld:

- De elektrische weerstand R van de stookdraad. De elektrische weerstand is  $119.3 \Omega/m$ , zodat het stookvermogen per meter is  $Qq=119.3(VIN/R)^2$  met VIN de gemeten stookspanning. Een veelgebruikte grootheid is echter  $Q1=Qq/4\pi (\approx \theta/\ln(t))$ .
- De effectieve straal is een rekengrootheid, het is een maat voor de radiale afstand tussen de temperatuuropnemer en de stookdraad. De effectieve straal bij  $15^\circ C$  is REF, de effectieve straal bij  $50^\circ C$  ligt DREF hoger zodat de effectieve straal bij een willekeurige omgevings temperatuur TOM:  $REFF=REF+DREF(TOM-15)/35$ .
- De buitendiameter van de naald  $V=2mm$ , behalve voor naald3 dan is  $V=1mm$ . De binnendiameter van de mantel is  $U=V-0.4mm$ .
- De totale warmtecapaciteit per meter C1 van de naald is de som van de warmtecapaciteiten van de stookdraad van constantaan, de roestvrij stalen buitenmantel en de vulling van silikonenrubbercompound.
- Tenslotte wordt er van uitgegaan dat de opwarming van de naald volgens (21) gebeurt als  $t > V^2/a$

Centraal staat de gemeten temperatuurrespons die in de file METING staat. Om een andere meetfile te kunnen verwerken, moet deze eerst buiten het programma om gekopieerd worden als METING. De file bestaat uit afwisselend een regel met het tijdstip van de meting: "11 25 39 H" en een regel met kanaalnr 19 met een spanningsverschil: "019-16.684M". Met de procedure LEES kunnen de spanningsverschillen worden gelezen. Ze worden ingelezen als een characterstring en worden later omgezet in een getal. Een eenvoudiger manier van inlezen werkt in dit geval helaas niet. Het tijdsinterval DT tussen de metingen wordt konstant beschouwd. De getallen worden in de array VMEET gezet. Gedurende het eerste deel van de meting loopt er nog geen stroom door de stookdraad; het spanningsverschil zal op wat ruis na konstant zijn. Over dit traject wordt de nulspanning V0 berekend. Het moment dat de opwarmkurve begint wordt bepaald met de boolean variabele NULM. Na dit moment is het spanningsverschil ten opzichte van V0 van belang. Om de echte verschiltemperatuur te kunnen berekenen is verder een

versterkingsfaktor SCHAAL nodig. Het meetbereik van de nanovoltmeter en de spanningsdeler zitten hierin verwerkt. Voor de relatie met de verschiltemperatuur geldt de volgende vergelijking:  $\Delta V_{meet} = A\Delta T + B \cdot (\Delta T)^2$  waarbij A en B van de omgevingstemperatuur TOM afhangen.

Het rekenmodel heeft om te beginnen een startwaarde voor ROC nodig. Ook de eerste stap in  $\rho C$  DROC wordt gevraagd. Voor ROCE[1] wordt voor verschillende waarden van het tijdinterval LABDA uitgerekend. Dit gebeurt door de eindtijd TE konstant te houden en de begintijd H te vergroten met stappen van DH. Het tijdinterval moet nog minstens 40 meetpunten bevatten, anders beginnen de resultaten te onnauwkeurig te worden. Als alle waarden van H zijn doorlopen wordt er lineaire regressie tussen H en LAB uitgevoerd. De HELLING en ASAFSNIJDING worden berekend. In de tweede slag gebeurt hetzelfde maar nu met ROCE[2] = ROC + DROC. Weer wordt HELLING berekend. De twee verschillende hellingen worden met elkaar vergeleken in de grootheid BESLIS en met deze grootheid wordt een nieuwe waarde van ROCE berekend. De set van variabelen van iedere iteratie wordt bewaard in array's en tenslotte afgedrukt.

### 5.1.2 Beschrijving van NAALD3

De opbouw van dit programma is op veel plaatsen gelijk aan NAALD1. Alleen de afwijkingen worden hier beschreven (zie fig 18).

Het blijkt bij het verwerken van de metingen dat de tijdconstante DT van de datalogger nogal varieert (tussen de 0.63 en 0.70s). Dit komt omdat de tijdconstante aan de frekwentie van het elektriciteitsnet gekoppeld is. DT varieert tussen de 0.63 en 0.70 s. Via de procedure LEESTIJD wordt tweemaal een tijdstip ingelezen, en omgezet in het aantal seconden na middernacht. Uit deze twee tijdstippen en het aantal tussenliggende meetpunten wordt DT berekend.

Ook hier wordt een startwaarde voor de warmtecapaciteit ROC gevraagd en het aantal iteraties NLUS. De iteraties gaan echter heel anders. Het rekengedeelte met BLOK 1, BLOK 2 en BLOK 3 zijn hetzelfde. De warmtecapaciteit wordt echter veel direkter berekend. Dit kan met de iteratiemethode van Newton [20]. In de eerste slag wordt de eerste waarde van een uit te rekenen grootheid Y berekend:  $Y_1$  vervolgens  $Y_2$  enzovoort. Voor de n-de berekening geldt:

$$Y_n = \frac{(PY_{n-1}-1)\exp(PY_{n-1})}{P\exp(PY_{n-1})-Q} \quad (29)$$

$$\text{met } P = 2\lambda t_0 + C_l BB / (AA\pi)$$

$$Q = e^{4\lambda} / C^*$$

$$Y = 1 / (V^2 \rho C)$$

Er wordt vier keer  $Y_n$  uitgerekend, dit is voldoende omdat de berekende waarde dan tot vier cijfers hetzelfde blijft. Het probleem van deze methode is dat er vier grootheden inzitten die

uit de metingen volgen:  $\lambda$ ,  $t_0$ , AA en BB. De startwaarde voor de warmtegeleidingscoëfficiënt wordt in BLOK 1 uitgerekend. Voor de tijdconstante wordt de startwaarde 0 genomen, en AA en BB komen uit BLOK 2. Nu kan met de methode van Newton een nieuwe  $\rho C$  worden uitgerekend en hiermee wordt verder gerekend in BLOK 3. In BLOK 3 wordt een nieuwe  $\lambda$  en  $t_0$  berekend. Er kan weer naar BLOK 2 worden gegaan om de cyclus te herhalen. De herhaling gebeurt NLUS keer.

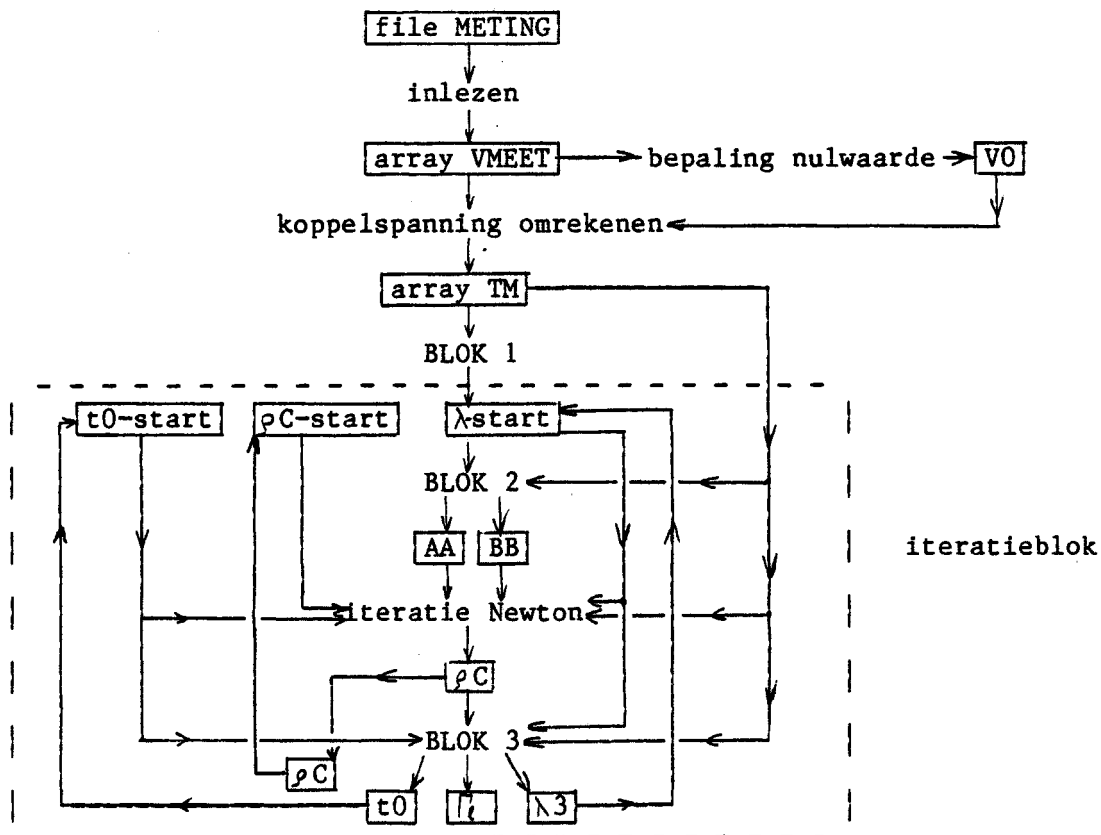


Fig 18 Principeschema van NAALD3

## 5.2 VERWERKING VAN DE TEMPERATUURMETINGEN

Warmtetransport in de grond kan omschreven worden met een schijnbare warmtegeleidingscoëfficiënt (14). De temperatuurverdeling die zo gesimuleerd wordt kan berekend worden met GELEIDING. Het programma is geheel aangepast aan de meetopstelling. Er wordt hierbij rekening gehouden met een inhomogene vochtverdeling en warmteverlies door de isolatie heen. De warmte, die uiteindelijk door de koelplaat wordt afgevoerd, wordt ook berekend. Het zo berekende temperatuurprofiel komt in de file BAK2 terecht. Deze temperaturen worden vergeleken met de gemeten temperaturen en bij de meeste overeenkomst wordt de schijnbare warmtegeleidingscoëfficiënt bepaald.

### 5.2.1 Beschrijving van GELEIDING

---

Dit programma is een numeriek model van de meetopstelling zoals in §4.2 werd beschreven. Het programma rekent met de eindige differentiemethode in twee richtingen een temperatuurverdeling uit. In de derde richting wordt de temperatuur konstant verondersteld. Als eerste worden enkele eigenschappen van de bak met zand omschreven. De afmetingen zijn  $L=0.3\text{m}$ ,  $B=0.2\text{m}$  en  $H=0.3\text{m}$ . Om de bak zit een isolatielaag polystyreen met dikte  $DPUR=0.1\text{m}$  en warmtegeleidingscoëfficiënt  $LPUR=0.036\text{W/mK}$ . De eigenschappen van water en zand zijn terug te vinden in de grootheden: N, ROG, CPG, LABDAG, ROW, CPW en LABDAW. Deze eigenschappen worden volgens (4) en (5) verwerkt tot een effectieve temperatuurvereffeningscoëfficiënt AEFF die van het vochtgehalte ter plaatse afhangt. De file VOCHT bevat het vochtgehalte. Ook kan besloten worden om zelf een effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt in te voeren. Dit gebeurt dan via de file LAMBDA. De bak staat in een klimaatkamer waar een temperatuur TBU van  $20.2^\circ\text{C}$  heerst. Het warmteverlies door de isolatie naar TBU wordt als randvoorwaarde gebruikt. De bak wordt onderin elektrisch verwarmd met stookvermogen  $QIN=I^2R$ . Dit is een ekstra randvoorwaarde linksonder in de bak, De laatste randvoorwaarde is de koelplaat rechtsboven in de bak. Hier wordt gekoeld met een konstante watertemperatuur TWATER.

Voordat het programma echt gaat rekenen wordt gevraagd hoeveel uur de simulatie duurt (UUR) en hoe vaak tussenresultaten van de uitgerekende temperatuur afgedrukt moeten worden (NUIT). Voor de begintemperatuur zijn er twee mogelijkheden: er kan verder gerekend worden met een eerder uitgerekende temperatuurverdeling, of de omgevingstemperatuur kan als beginvoorwaarde gebruikt worden. Daarna worden met de eindige differentiemethode nieuwe temperaturen uitgerekend. Na afloop van het programma bevat BAK2 de eindsituatie. Als er met de resultaten verder gerekend moet worden zit de eindsituatie ook in file BAK. In figuur 19 is het principeschema aangegeven:

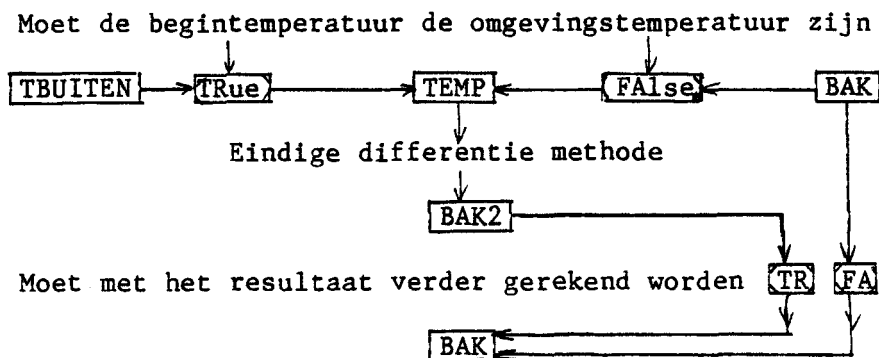


Fig 19 Principeschema van GELEIDING

Uit de temperatuurverdeling bij de koelplaat en de schijnbare warmtegeleidingscoëfficiënt wordt hierna de afgegeven warmte QUIT berekend. Tenslotte worden de tussen- en eindresultaten afgedrukt. De temperatuur wordt afgedrukt als functie van de positie in de bak en ook als functie van het dataloggerkanaal.

Er zijn op 11 plaatsen in de bak temperaturen gemeten. Dit is nogal weinig om overal in de bak de temperatuur te weten. De direkte omgevingstemperatuur is bijvoorbeeld nodig voor het omrekenen van thermokoppelspanningen in de lambdanaalden tot temperatuurverschillen. En als er plaatjes getekend gaan worden, zijn 11 meetpunten ook erg minimaal. Daarom is het wenselijk de temperaturen te extrapoleren naar de rest van de bak. Dit is natuurlijk slechts een benadering en kan enkele graden van de "werkelijkheid" af liggen. Vooral in de buurt van de rand zal de afwijking groot zijn. Voor de extrapolatie is ook een programma geschreven EKSTRA/20TOT51. (Dit staat voor ekstrapoleer proef 20 tot 51.) De zo uitgerekende temperatuurverdeling komt in de file BERG te staan. Voor de gemeten warmtegeleidingscoëfficiënten geldt overigens een zelfde verhaal. Om de 9 gemeten waarden te extrapoleren is EKSTRA/LABDA geschreven; de begerekende verdeling van de warmtegeleidingscoëfficiënten komt in de file LAMBDA te staan.

### 5.2.2 Beschrijving van EKSTRA/20TOT51

-----

Dit rekenmodel ekstrapoleert de temperaturen in de bak als zes meetwaarden gegeven zijn. De vijf overige meetwaarden worden hierop gesuperponeerd. Als eerste worden alle elf meetwaarden gevraagd en ingelezen: T1 t/m T11. De extrapolatie zelf gebeurt met de procedure FUNKTIE, een kwadratische aanpassing aan de meetwaarden:  $FUNKTIE=A+Bx+Cy+Dx^2 +Ey^2 +Fxy$ . Het centrale punt is  $A=T8$  op (5,1). Verder worden de temperaturen T1, T3, T5, T6, T8 en T9 of T10 gebruikt om de coëfficiënten B t/m E uit te rekenen. T10 is tijdens de metingen enkele keren erg hoog, zodat dan T9 gebruikt wordt. Hierop wordt de invloed van de overige koppels gesuperponeerd. De superpositie is toegepast zoals in appendix 9 is aangegeven en is evenredig met (afstand tot het koppel). Na de berekeningen worden de temperaturen in een printerfile gezet. De temperaturen zijn gerangschikt als in de bak en ze worden ook een keer afgedrukt op volgorde van dataloggeringang. Tenslotte kunnen de uitgerekende temperaturen in de file BERG worden gezet.

### 5.2.3 Beschrijving van EKSTRA/LAMBDA

-----

Dit programma is eigenlijk gelijk aan het vorige programma. Nu moeten echter zes lambdawaarden worden gegeven: L3, L8, L34, L36, L37 en L40. Er wordt rond naald 36 op plaats (1,5) geëkstrapoleerd. De uitgerekende warmtegeleidingscoëfficiënten komen weer in een printerfile en in de file LAMBDA.

### 5.3 HET REKENPROGRAMMA "TEKEN"

---

Grafieken en tekeningen maken de presentatie van meetgegevens vaak een stuk duidelijker. Tegenwoordig bestaat er een uitgebreide procedure bibliotheek van grafische procedures voor de meeste computersystemen. Hier is dan ook gebruik van gemaakt in het programma TEKEN. Het biedt drie manieren van tekenen voor elk van de files zoals zijn aangemaakt met de programma's uit §5.2. Het programma is zeer gebruikersvriendelijk. Dit in tegenstelling tot de meeste standaardprocedures.

#### 5.3.1 Beschrijving van TEKEN

---

Het programma TEKEN verwerkt gegevens uit een 7x7array zo, dat er drie soorten plaatjes getekend kunnen worden.

- Dwarsdoorsneden met MULTIPOLYDRAW
- Een driedimensionele weergave met SURFACE2
- Hoogtelijnenkaarten met CONTOUR1

In de array staan dus 49 gegevens. Om een mooi plaatje te krijgen zijn meer gegevens gewenst. De eerste vraag is dan ook hoeveel tussenpunten er berekend moeten worden. Dit kan door middel ekstrapolatie verkregen worden. De plaatjes zelf worden getekend met behulp van gelijknamige grafische procedures van het Rekencentrum van de TH Eindhoven [15]. Daarna wordt gevraagd in welke file de gegevens staan waarvan een plaatje moet worden getekend. Er zijn vijf mogelijkheden:

- 1 BAK met de temperaturen zoals ze zijn uitgerekend met GELEIDING
- 2 LAMBDA de file met de warmtegeleidingscoëfficiënten.
- 3 VOCHT de file waarin de vochtgehalten zitten.
- 4 BERG met de geëstrapoleerde temperatuurmetingen
- 5 BAK2 als BAK

Rond de 49 oorspronkelijke punten met coördinaten (I,J) is het mogelijk met een taylorreeksontwikkeling een tweedimensionale functie te omschrijven (zie ook appendiks 11):

$f(x,y) = F_{i,j} + FX_{i,j} x + FY_{i,j} y + FX2_{i,j} x^2 + FY2_{i,j} y^2 + FXY_{i,j} xy$ . De konstanten  $F_{i,j}$ ,  $FX_{i,j}$ , enz volgen uit de naburige punten van  $F_{i,j}$ . Deze naburige punten zijn bijvoorbeeld  $F_{i+1,j}$  en  $F_{i,j-1}$ . Aan de rand is nog één ekstra gegeven nodig. Hier is gekozen voor de randvoorwaarde dat de afgeleide nul is. Bij temperatuurprofielen betekent dit dat er geen warmte naar buiten stroomt. Een nieuw uit te rekenen tussenpunt ligt echter altijd tussen vier roosterpunten en elk roosterpunt heeft zijn eigen reeksontwikkeling.

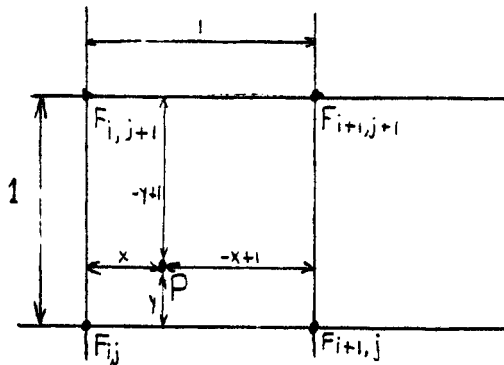


Fig 20 Ligging van een tussenpunt  $P(x,y)$

Het is dus van belang te weten hoe het punt ligt ten opzichte van de vier naburige roosterpunten. Dit gebeurt in de procedure ZOEK. Daarnaast moet gewogen worden hoe zwaar elk van de functies meeweegt. Er is voor de volgende oplossing gekozen:

$$f(x,y) = (1-x)\{(1-y)F_{i,j}(x,y) + yF_{i,j+1}(x,y-1)\} \\ + x\{(1-y)F_{i+1,j}(x-1,y) + yF_{i+1,j+1}(x-1,y-1)\}. \quad (30)$$

De zo uitgerekenende waarden worden in verschillende arrays gezet zodat ze te gebruiken zijn als invoer voor de standaard tekenprocedures.

Om de plaatjes te kunnen tekenen wordt voor de procedure SURFACE2 nog een vraag gesteld: de coördinaten van het zichtpunt. SURFACE2 is een driedimensionaal model, die vanuit een bepaalde richting bekeken wordt. Als nu een denkbeeldige lijn van het zichtpunt naar de oorsprong wordt getrokken, dan is dat de richting van waaruit op het model wordt gekeken. Dit geeft dan weer een tweedimensionale afbeelding (zie appendix 18.5 en 18.6). Een nadeel van deze plaatjes is, dat de schaalverdeling erg onduidelijk is. De waarde van de temperatuur kan slechts met grote moeite worden afgelezen. De vorm van het temperatuurveld is daarentegen wel zeer duidelijk.

## 6 RESULTATEN EN VERDERE BEREKENINGEN

### 6.1 BEREKENINGEN VOLGENS DE WAGENINGSE METHODE

Bij het verwerken van de meetgegevens van de lambdanaalden zijn veel moeilijkheden ondervonden. Omdat deze bij verder onderzoek van belang kunnen zijn wordt in deze paragraaf de weg beschreven, waarlangs uiteindelijk een redelijk betrouwbare verwerkingsmethode is verkregen, wat uitvoeriger omschreven.

De eerste metingen die zijn gedaan, zijn de ijkmetingen van de lambdanaalden. De ijking vond plaats in gezeleerd water. Met een geringe concentratie agar (0.4 massaprocent) heeft de substantie dezelfde  $\lambda$  en  $\rho C$  als water. Daarbij is de contactweerstand tussen de gel en de naald gelijk aan nul. Er kan echter geen stroming optreden. Er zijn twee grootheden die bij de ijking bepaald moeten worden: de effectieve straal  $R_{eff}$  en de warmtegeleidingscoëfficiënt  $\lambda$ .  $R_{eff}$  is de effectieve, radiële afstand tussen de stookdraad en de warme las van het thermokoppel.  $R_{eff}$  is nodig bij de bepaling van de contactweerstand (zie §5.1). En de warmtegeleidingscoëfficiënt is nodig om te controleren in hoeverre de gemeten  $\lambda$  overeenkomt met de werkelijke waarde.

De resultaten van de ijkmetingen staan in appendix 13. Het voornaamste resultaat is dat de ijkwaarde van de warmtegeleidingscoëfficiënt een lineaire functie van de temperatuur is. Voor elk van de naalden is het wel een iets andere functie. Naald 3, 8, 34 t/m 40 lijken erg op elkaar. Naald 9 wijkt hier duidelijk van af. De warmtegeleidingscoëfficiënt uit de literatuur ligt echter nog een stuk lager: rond de 0.60 W/mK [18].

T[°C]	$\lambda_{lit}$	$\lambda_{naald9}$	$\lambda_{gen}/\lambda_{lit}$	$\lambda_{overig}$	$\lambda_{gen}/\lambda_{lit}$
15	0.59	0.63	7%	0.70	19%
30	0.61	0.66	9%	0.75	23%
50	0.64	0.71	11%	0.82	28%

Figuur 21 Vergelijking  $\lambda$  [W/mK] verkregen uit de ijkmetingen met literatuurwaarde [18].

De afwijking in  $\lambda$  kan verklaard worden met de correctie van Blackwell (23). Hierin wordt gesteld dat de afwijking een functie is van  $\xi = l^2/4at$ . Voor naald 9 moet dan een axiale afstand tussen het einde van de stookdraad en de warme las  $l=12\text{mm}$  genomen worden en voor de overige naalden  $l=10\text{mm}$ . Dit onder de aanname dat  $t=150\text{s}$ , de gemiddelde waarde van het tijdinterval, waarin de ijking is gedaan. Dat de relatieve afwijking per naald toeneemt bij hogere temperatuur, komt doordat de temperatuurvereffeningscoëfficiënt van water afneemt. De correctie  $(\pi\xi)^{-1/2} \exp(-\xi)$  in vergelijking (24) neemt dus ook sterk



toe.

Vervolgens is met de lambdanaalden in droog zand gemeten. Enkele van deze metingen zijn met NAALD1 verwerkt. De resultaten zijn echter niet naar verwachting. Het iteratieproces zoekt bij iedere stap een kleinere waarde voor  $\rho C$ . Ook als deze veel keer lager wordt dan de literatuurwaarde. Dit komt doordat de HELLING van de regressierechte steeds positief blijft, er is geen omslagpunt. De lineaire regressie wordt hier overigens uitgerekend tussen de begintijd T1 van het tijdsinterval en de berekende waarde voor de warmtegeleidingscoëfficiënt LAMBDA uit het numerieke model.

WS20 (meetnummer)

Omgevingstemperatuur = 25.00°C Naalddikte = 2.0E+00 mm  
 Stookspanning = 0.5975 V Naaldnr = 34  
 Het stookvermogen per meter is 1.999E-01 W  
 Beginspanning = -1.802E+01 Nauwkeurigheid = 5.6E-01 Aantal nulmetingen: 53

TS	TE	TO	GAMMA	REFF	LAMBDA	KORR. KOEFF	MIDD.FOUT IN RECHTE
100.1	220.1	-3.037	-0.01111	3.314E-04	0.4515	0.9990	5.167E-05
120.1	220.1	-3.057	-0.01108	3.314E-04	0.4537	0.9984	6.689E-05
140.1	220.1	-3.086	-0.01103	3.314E-04	0.4570	0.9971	1.070E-04
160.1	220.1	-3.106	-0.01100	3.314E-04	0.4593	0.9936	1.300E-04
180.1	220.1	-3.203	-0.01083	3.314E-04	0.4708	0.9816	2.004E-04
200.1	220.1	-3.110	-0.01099	3.314E-04	0.4599	0.9164	1.614E-04

ITERATIE - LUS = 10

ITERATIE-LUS	ROCE	LAMBDA	HELLING	ASAFSN.	KORR.	MIDD.FOUT
1	8.00E+05	0.452	1.6E-04	0.426	0.8049	7.0E-03
2	1.00E+06	0.450	1.7E-04	0.422	0.8154	7.1E-03
3	8.08E+05	0.452	1.6E-04	0.425	0.8053	7.0E-03
4	6.22E+05	0.454	1.5E-04	0.429	0.7942	7.0E-03
5	4.44E+05	0.456	1.5E-04	0.432	0.7818	7.0E-03
6	2.74E+05	0.458	1.4E-04	0.436	0.7678	6.9E-03
7	1.11E+05	0.461	1.3E-04	0.439	0.7509	6.9E-03
8	1.00E+04	0.462	1.3E-04	0.442	0.7366	6.8E-03
9	1.00E+04	0.462	1.3E-04	0.442	0.7366	6.8E-03
10	1.58E+05	0.460	1.4E-04	0.438	0.7362	6.9E-03

Fig 22 Een voorbeeld van de uitvoer van NAALD1 bij metingen in droog zand.

Het is duidelijk dat het model niet voldoet. Er zijn hiervoor twee oorzaken mogelijk:

- De gemeten temperatuurverhoging wijkt te veel van het model af doordat  $l=10\text{mm}$ ; het model gaat dus niet op.
- Het model zelf is nog te geïdealiseerd.

Het model is verder onderzocht door metingen in glasparel, welke gedaan waren voor [9] te verwerken. Dat wil zeggen met een aangepaste versie van NAALD1, die rekening houdt met de meetopstelling in Wageningen. De lambdanaalden van deze metingen voldoen aan het model, want  $l=90\text{mm}$ , zodat de gemeten waarde van de warmtegeleidingscoëfficiënt volgens de Blackwell aanpassing minder dan 1% zal afwijken (zie §3.3).

Er is echter weer hetzelfde beeld te zien als bij de Eindhovense naalden HELLING blijft positief, zodat een steeds kleinere waarde voor de warmtekapaciteit geprobeerd wordt (zie appendiks 14) Uiteindelijk wordt weer een te kleine waarde gevonden; de verwachte warmtekapaciteit is 1.2MJ/m<sup>3</sup>K. Een omslagpunt in de helling wordt ook hier niet gevonden. Dit geeft twijfels aan de aannames zoals vermeld in §5.1. De juistheid van het model kan niet bevestigd worden.

## 6.2 BEREKENINGEN MET NAALD3

Omdat het model NAALD1 geen bevredigende resultaten geeft is een nieuw model NAALD3 opgesteld. Dit model is ook getest voor de Wageningse metingen. De resultaten bereikt met NAALD3 zijn weer niet juist. De berekende warmtegeleidingscoëfficiënt ligt 6 tot 7% te laag en de berekende warmtekapaciteit is een faktor 2.7 tot 3 keer te hoog (zie fig 23). Dit is echter wel een konsekwente afwijking als met het tweenaalden systeem gemeten wordt. Zowel in agargel als in glasparels worden deze afwijkingen gevonden. Voor het eennaald systeem zijn de afwijkingen kleiner, maar zijn de berekende waarden niet zo stabiel. In het tweenaalden systeem zijn de warme en de koude las van de thermokoppel gesplitst. De warme las bevindt zich met de stookdraad in een naald, de koude las is apart in een andere naald gemonteerd. Dit is op zich een nauwkeuriger meetmethode. De ongestoorde toestand in zand wordt met de koude las gemeten en is zo beter te bepalen. Bovendien is in Wageningen bij tweenaalden systeem nauwkeuriger verwerkingsapparatuur gebruikt. Het eennaald systeem is beschreven in §4.3. Hierbij moet opgemerkt worden dat het Eindhovense verwerkingscircuit (fig 13) vergelijkbaar is met het Wageningse verwerkingscircuit voor het tweenaalden systeem.

medium	T[°C]	1-naaldsysteem				2-naaldsysteem			
		$\rho C$ [MJ/m <sup>3</sup> K]	faktor [-]	$\lambda$ [W/mK]	afw [%]	$\rho C$ [MJ/m <sup>3</sup> K]	faktor [-]	$\lambda$ [W/mK]	afw [%]
agargel	10	3.519	0.84	0.5855	-0.4	11.65	2.8	0.5695	-3
agargel	10	3.219	0.77	0.6023	2	12.20	2.9	0.5512	-6
agargel	20	3.889	0.93	0.5976	-0.7	12.23	2.9	0.5667	-6
B7-glasparel	20					3.24	2.7	0.1854	-6
B7-glasparel	20					3.31	2.8	0.1844	-6
B4-glasparel	20					3.63	3.0	0.1667	-7
B4-glasparel	20					3.63	3.0	0.1667	-7

Fig 23 Wageningse metingen verwerkt met NAALD 3

De waarden in fig 23 zijn verkregen door vier keer te itereren met als startwaarde  $\rho C=4\text{MJ/m}^3\text{K}$ . Voor de eerste meting in B7-glasparels zijn verschillende startwaarden voor de warmtekapaciteit geprobeerd:  
 - Voor  $\rho C\text{-start}=0.1\text{MJ/m}^3\text{K}$  is  $\lambda$  8% te laag en  $\rho C$  4.0 keer te hoog.

Voor  $\rho C$ -start  $4.0 \text{ MJ/m}^3 \text{K}$  is  $\lambda$  4% te laag en  $\rho C$  2.0 keer te hoog. De zeer verschillende startwaarden van de warmtecapaciteit (een faktor 40 verschil) geven dus eindwaarden die een stuk dichter bij elkaar liggen: een faktor 2 verschil. Hoewel de methode niet de goede eindresultaten geeft, zijn de eindresultaten wel goed reproduceerbaar en geven redelijk overeenkomende resultaten voor sterk verschillende startwaarden van de iteratie. Bij meer dan vier keer itereren groeien de eindwaarden niet verder naar elkaar toe. Daarom is besloten niet meer dan vier keer te itereren. Van Haneghem vindt overigens ook een grote ongevoeligheid voor  $\rho C$  in de berekeningsmethode.

Daarom is besloten met model NAALD3 de Eindhovense metingen in droog zand te verwerken. Hierbij kan de berekende waarde van de warmtecapaciteit echter niet als representatief worden gezien. De waarden van  $\rho C$  worden wel in in appendiks 16 weergegeven. Voor de acht meetpunten, die zich niet aan de rand van de bak bevinden, geldt voor de berekende warmtecapaciteit  $\rho C = 2.5 \pm 0.5 \text{ MJ/m}^3 \text{K}$ . Per naald is de spreiding over de vier metingen niet meer dan 4%, zie fig 24. De waarden voor  $\lambda$  en  $\rho C$  worden eerst "direkt berekend" met NAALD3 en vervolgens gecorrigeerd met de Blackwell-korrektie (24).

Proef	t	plaats	(5,0)	(1,1)	(1,2)	(1,3)	(1,4)	(1,5)	(2,5)	(4,5)	(5,5)
05	75	di-	0.44	0.47	0.37	0.42	0.42	0.45	0.47	0.46	0.46
05	94	rekt	0.42	0.46	0.36	0.41	0.44	0.46	0.47	0.44	0.46
00	21	bere-	0.41	0.43	0.36	0.40	0.42	0.46	0.46	0.45	0.47
00	48	kend	0.42	0.43	0.35	0.40	0.42	0.44	0.46	0.45	0.47
05	75	kor-	0.31	0.32	0.29	0.30	0.30	0.30	0.32	0.31	0.31
05	94	rek-	0.30	0.31	0.29	0.29	0.31	0.31	0.32	0.30	0.31
00	21	tie	0.29	0.30	0.29	0.29	0.30	0.31	0.31	0.30	0.32
00	48	(24)	0.30	0.30	0.28	0.29	0.30	0.30	0.31	0.30	0.32

Fig 24 Bepaling van warmtegeleidingscoëfficiënt [W/mK] in droog zand N.B. Het nummer van elke meting bestaat uit twee cijfers: het eerste komt overeen met het watergehalte en het tweede cijfer staat voor het stookvermogen in W. Om de warmtestroom te verkrijgen dient gedeeld te worden door het oppervlak van de stookplaat:  $0.03 \text{ m}^2$ . De tijd t is het aantal uren na het begin van de proef.

Voor de gecorrigeerde warmtegeleidingscoëfficiënt gelden zeer reproduceerbare resultaten:  $\lambda = 0.30 \pm 0.02 \text{ W/mK}$ . Dit geldt voor alle 36 metingen die in het droge zand verricht zijn. De spreiding per naald is  $0.01 \text{ W/mK}$ ; dit is 3%. Als er nu geen systematische fout wordt gemaakt kan gesteld worden dat  $\lambda = 0.30 \text{ W/mK}$ . Deze waarde komt overeen met waarden uit de literatuur:  $0.25 \text{ W/mK}$  voor grof rivierzand [7] en  $0.35 \text{ W/mK}$  voor zilverzand [9]. Met NAALD3 en de Blackwell-korrektie zijn daarna ook de metingen in vochtig zand verwerkt. Een kort overzicht voor de kwasi-stationaire toestanden wordt voor  $w > 3\%$  gegeven in figuur 25.1 t/m 25.4 en verder in appendiks 16.

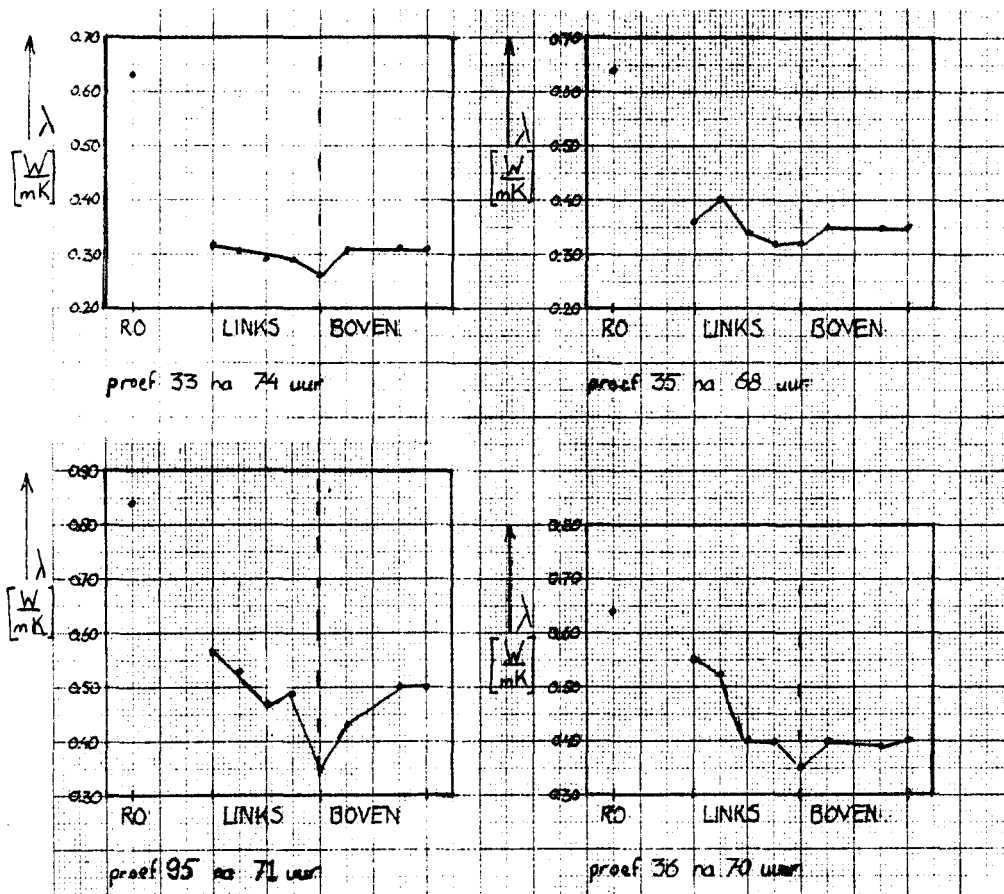


Fig 25.1 t/m 4 Warmtegeleidingscoëfficiënt gemeten in vochtig zand als functie van de plaats in de bak.

N.B. RO is Rechtsonder (5,0), LINKS is van (1,1) tot (1,5) en BOVEN is van (1,5) tot (5,5).

Voor alle stationaire toestanden geldt ongeveer hetzelfde:

- Op plaats (5,0) is warmtegeleidingscoëfficiënt en dus het watergehalte het grootst.
- Naar boven toe via de linkerzijde van de bak wordt  $\lambda$  steeds kleiner, dit gebeurt min of meer lineair. Het vochtgehalte neemt dus af van onder naar boven.

- Links boven in de bak (1,5) is  $\lambda$  het kleinst, kleiner dan bij de drie andere meetpunten bovenin.
- Voor  $w=3\%$  geldt dat  $\lambda$  op de plaatsen (2,5), (4,5) en (5,5) hetzelfde is.
- Voor  $w=9\%$  is er een duidelijke gradiënt in  $\lambda$  boven in de bak; bij de koelplaat is het vochtgehalte het grootst.
- Het verticale verschil in  $\lambda$  is links is anders dan rechts. Dit wordt in de volgende tabel verduidelijkt. Er wordt hierbij van uitgegaan dat  $\lambda_{\text{maks}}=0.54\text{W/mK}$ , hetgeen de warmtegeleidingskoëfficiënt van met water verzadigde grond is.

proef	$-\Delta\lambda/\Delta z$ zlinks	$-\Delta\lambda/\Delta z$ zrechts	" $\oint \nabla\lambda \cdot d\vec{s}$ "
05	0	-0.01	0
13	-0.03	0	-0.01
15	0.13	0.11	0.01
33	0.36	0.30	0.03
35	0.29	0.25	0.02
36	0.25	0.19	0.03
95	0.26	0.11	0.07
S.D.	0.01	0.01	0.02

Fig 26 gradiënten in de warmtegeleidingskoëfficiënt [W/mK] gedefinieerd als  $\nabla\lambda = (\lambda_{\text{boven}} - \lambda_{\text{onder}}) / \Delta z$ .

S.D. is een schatting van de standaarddeviatie van de verschillende grootheden, uitgaande van de meetnauwkeurigheid.

De gradiënten zijn uitgerekend ten opzichte van  $\lambda$  op de bodem. Er is hierbij van uitgegaan dat de maximale waarde van  $\lambda$  gelijk is aan  $\lambda$  bij met water verzadigde grond. Een gradient in  $\lambda$  wil een concentratieverschil in water zeggen. Dit concentratieverschil zorgt voor een diffusie van water (damp). Het valt op dat bij proef 13 de vereenvoudigde kringintegraal negatief is. Deze "kringintegraal" wordt verkregen door uit te gaan van celkonvekcie en te integreren over een vereenvoudigde stroomlijn:  $\oint = \int (-\nabla\lambda_{\text{links}} + \nabla\lambda_{\text{rechts}}) dz$ . De diffusie van waterdamp zal in dit geval tegengesteld van richting zijn ten opzichte van de overige metingen. De berekende waarde van de gradienten van proef 05 zijn in feite een gevolg van de meetnauwkeurigheden: er zit behalve hygroscopisch water geen vocht in de bak.

### 6.3 DE TEMPERATUURMETINGEN

Vele tientallen keren zijn in de bak temperatuurmetingen verricht met de thermokoppels 1 t/m 11 (zie §4.4), om te controleren of er al een kwasi-stationaire toestand is bereikt. Als de temperatuur in de bak minder dan  $0.1^\circ\text{C}$  per 8 uur verandert, wordt deze toestand aangenomen. Dit is gelijk aan de verwachte meetnauwkeurigheid van de koppels.  $0.1^\circ\text{C}$ . Dit onderzoek beperkt zich tot de kwasi-stationaire toestanden, zodat slechts zeven series metingen van belang zijn. Deze

zijn in de volgende tabel weergegeven.

proef	(1,0)	(3,3)	(1,6)	(2,1)	(3,1)	(4,1)	(5,1)	(5,2)	(5,3)	(5,4)	(5,6)
05	52.5	39.1	34.1	47.2	48.9	41.4	39.0	37.7	36.1	34.3	20.1
13	36.7	30.9	28.5	34.7	35.3	32.5	31.4	30.6	29.7	28.8	21.2
15	54.5	33.6	27.5	47.6	44.9	40.2	36.9	34.3	31.2	27.7	20.9
33	38.2	27.0	23.7	35.1	33.7	31.2	29.5	27.7	25.9	24.1	20.6
35	49.1	32.0	26.1	44.5	42.5	38.2	35.5	32.9	29.9	26.5	20.6
36	55.5	35.0	27.7	49.3	46.8	41.9	38.5	35.7	31.9	27.6	19.9
95	42.8	30.1	25.3	39.9	38.1	35.4	33.4	31.2	27.9	24.8	19.4

Fig 27 Gemeten stationaire temperatuurverdelingen[ $^{\circ}\text{C}$ ]

Enkele globale, voor de hand liggende effecten zijn hier al uit op te maken:

- De temperatuur neemt toe bij konstant gemiddeld vochtgehalte als het stookvermogen  $Q$  toeneemt (vergelijk proeven 33, 35 en 36 met  $w=3\%$ )
- De temperatuur neemt af bij toenemende afstand tot de stookplaat. De temperatuur neemt bij konstante  $Q$  af als het watergehalte toeneemt

Bij proef 05 en 13 zijn uitzonderingen op deze trends aan te wijzen. Bij proef 05 wordt in droog zand gemeten en het stookvermogen van de stookplaat is 4.8W. Bij proef 13 is het vochtgehalte 0.98% en het stookvermogen 3.2W. De temperatuur is op plaats (3,1) hoger dan op plaats (2,1); (2,1) ligt bijna midden boven de stookplaat en (3,1) ligt boven de rand van de stookplaat, beiden op 5 cm hoogte. Ook de meetpunten (1,0), gelegen tegen de stookplaat aan, en (2,1) vertonen nog afwijkingen. Bij proef 05 zijn de temperaturen lager dan bij proef 15 en ook bij proef 13 zijn de twee temperaturen lager dan bij proef 33. Er wordt in deze gevallen ondanks een hogere gemiddelde vochtigheid en een lagere gemiddelde temperatuurvereffeningskoëfficiënt, toch een hogere temperatuur gemeten.

De gemeten temperaturen zijn met (10) om te rekenen tot virtuele temperaturen. Voor deze berekeningen is de dampdruk nodig (zie (10)). Bij proef 05 is hiervoor 0.55 Pverz gebruikt, omdat de relatieve vochtigheid in de klimaatkamer 55% bedroeg tijdens het vullen van de bak. Voor de overige metingen is de dampdruk gelijk aan de verzadigingsdruk gesteld. Gegevens van water en damp zijn uit [18] gehaald. De virtuele temperatuur wordt in (11) gebruikt om een drukgradient uit te rekenen. Met behulp van van de virtuele temperaturen op plaatsen (1,0), (1,6), (5,1) en (5,6) zijn links en rechts in de bak de drukgradiënten uitgerekend.

proef	links		rechts		$\Delta \nabla p [N/m^3]$
	$T_{vi}[K]$	$-\nabla p [N/m^3]$	$T_{vi}[K]$	$-\nabla p [N/m^3]$	
05	25	530	21	660	-130
13	10	260	13	420	-160
15	42	910	20	650	260
33	19	480	11	380	100
35	34	760	18	580	180
36	43	920	19	630	290
95	24	580	15	500	80
S.D.	0.5	15	0.5	15	30

Fig 28 Virtuele temperatuurverschillen en drukgradiënten

In de meeste gevallen is de drukgradient links groter dan de drukgradient rechts. Opmerkelijk is dat bij proef 05 en 13 het tegengestelde het geval is. Als er uitgegaan wordt van een enkelvoudige konvectiecel, dan gaat de (vochtige) luchtstroom aan de linkerzijde van de bak omhoog en bij de rechterzijde naar beneden. Indien verder wordt gesteld dat het verschil van de twee drukgradiënten bepalend is voor de konvectiestroom geldt voor de snelheid:  $v_s = (-\nabla p_{links} - (-\nabla p_{rechts})) K_{eff} / \eta_s$  (positief als de stroom rechtsom gaat, met de wijzers van de klok mee). Deze verwachte stroomrichting geldt voor meting 15 t/m 95. Bij meting 05 en 13 is de de snelheid negatief: de stroom gaat linksom!

#### 6.4 BEREKENINGEN MET HET REKENMODEL GELEIDING

Met het rekenmodel GELEIDING kunnen temperatuurprofielen worden uitgerekend die zich instellen indien met een schijnbare warmtegeleidingscoëfficiënt wordt gerekend (zie §5.2.1). Het model houdt rekening met warmteverliezen door de isolatie heen en houdt ook rekening met een kleine gradient in  $\theta$  als gevolg van een inhomogene vochtverdeling in de bak. De zo uitgerekende modeltemperatuur kan vergeleken worden met de gemeten temperatuur uit §6.3. Het verschil  $\theta = T_{gemeten} - T_{model}$  moet gemiddeld over de bak zo klein mogelijk zijn. Om tot de juiste schijnbare warmtegeleidingscoëfficiënt en dus de juiste temperatuurverdeling te komen is het volgende criterium genomen:  $\theta^2(1,0) + \theta^2(3,3) + \theta^2(5,6)$  moet geminimaliseerd worden.

Omdat het rekenmodel GELEIDING het warmtetransport beschouwt als een soort warmtegeleiding en de gemeten temperaturen het resultaat zijn van geleiding en konvectie geeft het verschil tussen beide temperaturen ( $\theta$  dus) een aanwijzing over de konvectie. Alle temperatuurverschillen  $T_{gemeten} - T_{model}$  zijn berekend en uitgezet tegen  $T_{model}$ . De resultaten zijn te vinden in appendix 20 en in de volgende figuur.

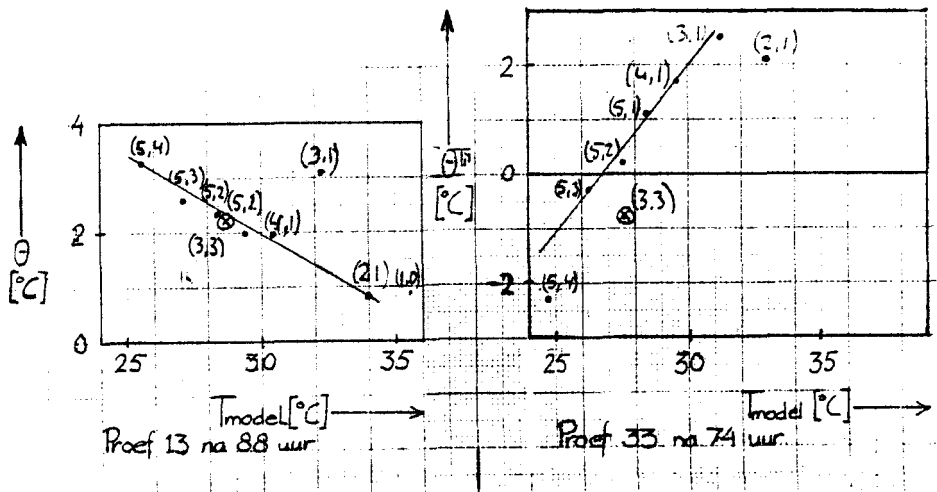


Fig 29.1  $\theta$  als functie van  $T_{model}$  29.2  $\theta$  als functie van  $T_{model}$  met  $\theta = T_{gemeten} - T_{model}$ , getallen tussen haakjes zijn de meetposities

Figuur 29.1 is karakteristiek voor proef 05 en 13; figuur 29.2 voor de overige proeven. Er is weer een duidelijke tweedeling te onderscheiden. Wat onmiddellijk opvalt in Fig 29.1 is dat vijf punten  $\{(5,4) \text{ t/m } (5,1) \text{ plus } (4,1) \text{ \& } (2,1)\}$  op een rechte lijn liggen met een positieve helling. Andere punten  $\{(3,3) \text{ en } (1,0)\}$  liggen er ook min of meer op. In fig 29.2 liggen zes punten  $\{(5,4) \text{ t/m } (3,1) \text{ via } (5,1)\}$  op een lijn met een negatieve helling. Voor de rechte geldt  $d\theta/dT$  is konstant. Dit is als volgt te interpreteren: de punten die op een lijn liggen, liggen als van enkelvoudige celkonvektie wordt uitgegaan ook op een stroomlijn. En de punten die vlak naast de lijn liggen, liggen in de bak op een naburige stroomlijn. De helling in fig 29  $AA = d\theta/dT$  is bepalend voor de stuwende kracht werkzaam in die stroomlijn:  $1/T = \beta_l$  is de lineaire uitzettingscoëfficiënt van lucht en  $\theta = \Delta T$  is het temperatuurverschil bij een roosterafstand  $d$  van 5 cm. De drukgradiënt is dan  $\nabla p = \rho g AA/d$ . De waarden van  $\nabla p$  liggen in dezelfde grootte orde als de  $\nabla p$  berekend met  $T_{vi}$ . Ook hier zijn bij meting 05 en 13 negatieve waarden voor de drukgradiënt gevonden, zodat de luchtstroom linksom draait. Bij de overige metingen draait de luchtstroom gewoon rechtsom.



meting	AA[-]	$ \nabla p[N/m^3] $	$\lambda^*$ [W/mK]	$\lambda_l^*$ [W/mK]	Quit[W]	Quit/Qin[%]
05	-0.38	-90	0.96	0.66	3.57	73
13	-0.25	-60	1.20	0.86	2.27	72
15	0.45	100	0.96	0.63	3.35	73
33	0.70	160	1.09	0.76	1.94	60
35	0.55	130	1.03	0.71	2.97	62
36	0.50	120	1.09	0.76	3.88	63
95	0.86	200	0.92	0.55	1.96	41
S.D.	0.03	5	0.05	0.08	0.05	2

Fig 30 Enkele grootheden die volgen uit GELEIDING met geschatte standaarddeviatie S.D.

Met het rekenmodel GELEIDING zijn naast temperaturen ook de schijnbare warmtegeleidingscoëfficiënt  $\lambda^*$  en het afgegeven vermogen Quit berekend. In  $\lambda^*$  zijn alle warmtetransportmechanismen tesamen genomen: de warmtegeleiding in de poreuse stof, de warmtegeleiding van water, de konvektie van water, de konvektie van vochtige lucht en het eventuele warmtepijpeffekt. De warmtegeleiding van lucht valt hierbij in het niet. Enkele grootheden zijn al bekend:

- De effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt van grond is bepaald met de lambdanaalden:  $\lambda_g(1-n)=0.30\text{W/mK}$
- De effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt van water  $\lambda_w=n_w \cdot 0.6$  [W/mK].
- De konvektie van water is te verwaarlozen als  $w < 80\%$ , dit is altijd het geval behalve misschien in de onderste 5cm in de bak in proef 95 ( $w=9\%$ ).

Gesteld kan worden dat  $\lambda^* = \lambda_{g\text{eff}} + \lambda_{w\text{eff}} + \lambda_l^* + \frac{6}{9} \nabla \lambda ds$  (zie afleiding van (9)). Waarbij  $\lambda_l^*$  schijnbare warmtegeleidingscoëfficiënt van lucht is, zowel veroorzaakt door gewone vrije konvektie als door het eventuele warmtepijpeffekt. Voor kringintegraal wordt dan de sterk vereenvoudigde vorm van (9) genomen. De schijnbare warmtegeleidingscoëfficiënt van lucht, berekend als sluitpost voor  $\lambda^*$ , is vrij konstant op twee uitzonderingen na. In proef 13, waar de lucht linksom draait, is  $\lambda_l^*$  erg hoog. En in proef 95 is de schijnbare warmtegeleidingscoëfficiënt van lucht erg laag. Dit laatste komt door het hoge watergehalte. De diffusie van lucht ondervindt blijkbaar hinder door de vloeistof in de poriën. Er kan hier een lage  $K_{\text{eff}}$  verwacht worden. De schijnbare warmtegeleidingscoëfficiënt vertoont geen samenhang met het rendement gedefiniëerd als  $Quit/Q_{in}$ .

Het rendement is voor lage watergehaltes ongeveer gelijk aan wat bij het ontwerpen (§4.2) is berekend: circa 70%. Dit is erg laag: door de wanden gaat dus veel warmte verloren. Het is in principe mogelijk dat bij de relatief koude wanden condensatie optreedt, en aan de verticale wand een warmtepijpeffekt aanwezig is. Dit effect kan echter slechts minimaal zijn, omdat de schijnbare warmtegeleidingscoëfficiënt nooit groter dan 1.1W/mK is. Om zoveel mogelijk de

randeffekten in de metingen te vermijden is steeds in het midden van de breedterichting gemeten. De temperatuurgradiënten in de breedterichting zijn overigens met de nulspanning van de lambdanaalden te bepalen (§3.3). In de breedte zijn de gradiënten in het algemeen niet groter dan 2K/m, (slechts direct boven de stookplaat is er bij hogere vochtgehaltes een gradiënt van 10K/m), terwijl in de hoogterichting de gradiënt 50 tot 100K/m bedraagt. De warmteverliezen door de verticale wanden kunnen dus niet ekstreem hoog zijn.

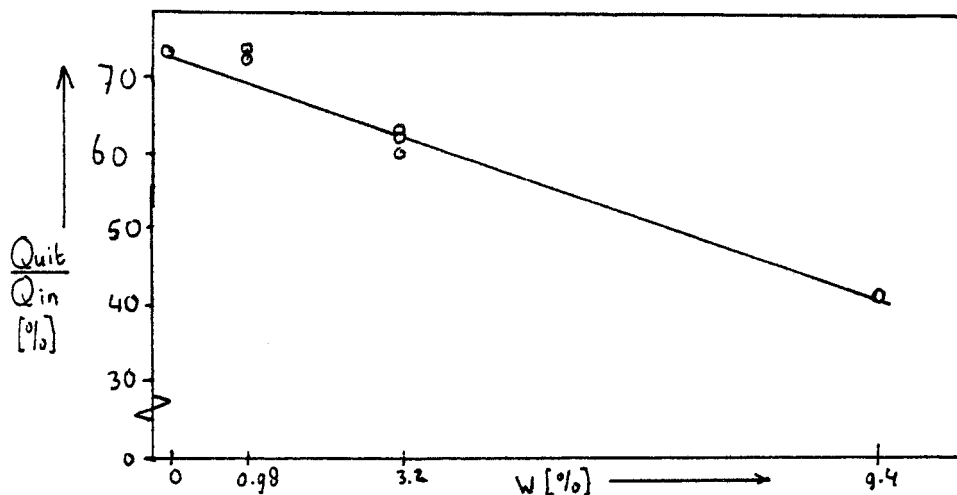


Fig 31 De relatie tussen watergehalte en rendement van de bak

Het rendement van de meetbak lijkt samen te hangen met het watergehalte (zie fig 31). Dit is als volgt te verklaren: het rendement is evenredig met de effectieve temperatuurvereffeningskoëfficiënt. Want bij een min of meer konstante  $\lambda^*$  is aeff slechts afhankelijk van de effectieve warmtecapaciteit.  $aeff = \lambda^* / (\rho C)_{eff} = \lambda^* / \{(\rho C)_g(1-n) + n w (\rho C)_w\}$ . Ofwel voor een kleine waarde van het watergehalte  $w$ :  $aeff = AA - BB \cdot w$ . Het rendement neemt lineair af bij toenemend watergehalte. Er is nog een tweede aanwijzing dat het rendement samenhangt met de effectieve warmtecapaciteit van water. Indien het stookvermogen  $Q_{in}$  onderin de bak hoger wordt, dan wordt de gemiddelde temperatuur in de bak hoger. Bij een hogere temperatuur neemt de warmtecapaciteit van water af, zodat het rendement toeneemt. Dit laatste is te zien in proefserie 33, 35 en 36 in fig 30.

Uit de schijnbare warmtegeleidingskoëfficiënt van lucht kan met (9) de verticale snelheid van lucht  $v_z$  berekend worden. Met deze poriën-snelheid en de heersende drukgradiënt kan de effectieve permeabiliteit berekend worden. De drukgradiënt is echter op twee manieren berekend: met behulp van de virtuele temperaturen  $\nabla p_1$  en uit het verschil tussen de gemeten temperatuur en de temperatuur berekend met het numerieke model  $\nabla p_2$ . Met beide resultaten zal worden gerekend. Hierbij moet wel worden opgemerkt, dat de berekening met

$\nabla p_1$  erg onnauwkeurig is door de vele vereenvoudigingen in het model (afwijkingen tot 75%). Er moeten twee keer in de berekeningen getallen in dezelfde orde grootte van elkaar worden afgetrokken: twee virtuele temperaturen en twee drukgradiënten. Voor het berekenen van een permeabiliteit is het nog een akseptabele berekeningsmethode. Permeabiliteiten worden vaak op een factor twee nauwkeurig gegeven. De berekening van  $\nabla p_1$  is gebaseerd op vier meetpunten.  $\nabla p_2$  is gebaseerd op zes tot acht meetpunten en wordt veel direkter berekend. Deze berekening is dus veel nauwkeuriger (geschatte afwijkingen tot 20%). De verschillende eigenschappen van water, lucht en damp zijn weer ontleend aan [20].

meting	$\lambda_p^*$ [W/mK]	$v_z$ [mm/s]	$-\nabla p_1$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$K_{eff1}$ [m <sup>2</sup> ]	$-\nabla p_2$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$K_{eff2}$ [m <sup>2</sup> ]
05	0.66	-4.6	-0.13	$0.7 \cdot 10^{-9}$	-0.09	$0.9 \cdot 10^{-9}$
13	0.86	-5.9	-0.16	$0.7 \cdot 10^{-9}$	-0.06	$1.9 \cdot 10^{-9}$
15	0.63	4.3	0.26	$0.3 \cdot 10^{-9}$	0.10	$0.8 \cdot 10^{-9}$
33	0.76	5.3	0.10	$1.0 \cdot 10^{-9}$	0.16	$0.6 \cdot 10^{-9}$
35	0.71	4.8	0.18	$0.5 \cdot 10^{-9}$	0.13	$0.7 \cdot 10^{-9}$
36	0.76	5.3	0.28	$0.4 \cdot 10^{-9}$	0.12	$0.8 \cdot 10^{-9}$
95	0.55	4.2	0.08	$1.0 \cdot 10^{-9}$	0.20	$0.4 \cdot 10^{-9}$
S.D.	0.08	0.6	0.06	30 à 80%	0.01	20 à 30%

Fig 32 Poriënsnelheid en effectieve permeabiliteit

De berekende drukgradiënten zijn nogal verschillend, dus schelen de effectieve permeabiliteiten ook sterk. Hoewel  $K_{eff1}$  erg onnauwkeurig is ligt de waarde toch in de orde van permeabiliteit  $K$  zoals berekend met d10. ( $K=0.69 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ ). Dit is tevens de maximale waarde voor  $K_{eff}$ . Voor de metingen 05, 15, 33, 35 en 36 is  $K_{eff}$  ongeveer gelijk aan  $K$ . Het vochtgehalte heeft kennelijk nauwelijks invloed op de konvektie van lucht. Bij meting 95 is  $K_{eff}$  ongeveer de helft van  $K$ ; zoals verwacht is het gemiddelde vochtgehalte van 9.4% reeds een belemmerende faktor voor de vrije konvektie. Vreemd is de hoge waarde voor  $K_{eff2}$  bij meting 13: een faktor twee tot drie hoger dan  $K$ . Dit is niet mogelijk. Voor deze proef met een watergehalte van 0.98% en een warmtestroom van  $106 \text{ W/m}^2$  wordt de berekening omgedraaid. De permeabiliteit wordt  $0.7 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$  gesteld, zodat de konvektiesnelheid  $2.2 \text{ mm/s}$  is. De schijnbare warmtegeleidingskoëfficiënt door konvektie wordt nu  $0.32 \text{ W/mK}$ . Er moet nog een ander warmtetransportmechanisme een rol spelen. Een warmtestroom van  $\{\lambda_p^* - \lambda_{e,konv}\} / \lambda_p^* \cdot Q_{uit}/A$  blijft over. Dit is ongeveer  $37 \text{ W/m}^2$ . Een mogelijke verklaring is het warmtepijpeffekt: onder in de bak op het verdampingsfront  $Z_w$  verdampt water, waterdamp gaat met  $v=2.2 \text{ mm/s}$  naar boven, boven bij de koelplaat kondenseert de damp en het vloeibare water sijpelt naar beneden. In grof, homogeen zand kan het verdampingsfront op grondwaternivo gesteld worden. Voor de getransporteerde warmte geldt volgens Menenti [14,p93] de volgende formule:

$$L_d = \frac{Q}{A} = \frac{L}{C} \frac{\tilde{r}}{Z_w} (\lambda_{\tilde{r}} - \lambda_{l, \text{konv}}) \quad (31)$$

met  $L=2.44$  MJ/kg de verdampingsenthalpie van water

$C$  = de warmtecapaciteit van damp  $1.8 \text{ kJ/kg/K}$

$\tilde{r}$  = de dimensieloze uitwisselingcoëfficiënt, het deel van de damp dat kondenseert

$Z_w = 3 \text{ mm}$  hierbij wordt gesteld dat bijna al het water op de bodem van de bak ligt.

Hieruit volgt dat  $L_d = 244000 \times \tilde{r}$ . Als gesteld wordt dat de ontbrekende warmtestroom gelijk is aan  $L_d$ , dan is de uitwisselingscoëfficiënt  $0.15 \cdot 10^{-5}$ . Ofwel  $0.15\%$  van de damp in de konvektieve stroom kondenseert bij de koelplaat.

Indien wordt uitgenomen dat aan de verticale wand van de bak ook een warmtepijpeffekt optreedt, worden de konvektiesnelheden een stuk kleiner. Stel  $1.5\%$  van de damp uit de konvektiestroom kondenseert tegen de verticale wand en loopt als vloeistof naar beneden terug, dan wordt  $\lambda_{l, \text{konv}}$  ongeveer tien keer zo klein. Bij de andere proeven gelden vergelijkbare verminderingen van  $\lambda_{l, \text{konv}}$ . Het resultaat is dat de konvektiesnelheid en ook de effectieve permeabiliteit een factor tien kleiner wordt. Dit laatste lijkt onwaarschijnlijk: bij lage watergehalten  $w < 3\%$  moet  $K_{\text{eff}}$  zoals ook in fig 32 is aangegeven. Deze hypothese kan dus verworpen worden.

Als laatste worden ter controle nog enkele dimensieloze getallen nagerekend. Het getal van Reynolds is om aan te tonen of de wet van Darcy terecht gebruikt is.  $Re$  kan op twee manieren worden berekend: ten eerste met de lengtemaat  $d_{10}$  (2) en ten tweede met de lengtemaat  $\sqrt{K/n}$  (12). Uit (2) volgt  $Re < 0.32$  en uit (12) volgt  $Re < 0.016$ . Aan het criterium  $Re < 2$  wordt voor beide formules dus ruimschoots voldaan. De wet van Darcy is terecht toegepast.

Het getal van Rayleigh wordt met (15) berekend en het getal van Nusselt met (16). Als de bij elkaar horende waarden in een grafiek worden uitgezet, blijken ze op een rechte lijn te liggen met een positieve helling. Hiermee is bewezen dat  $Ra$  boven een kritieke waarde ligt. De kritieke waarde is overigens niet dezelfde als wat normaal wordt aangehouden. In het standaardgeval wordt de gehele onderzijde van een poreuze laag verwarmd en van deze configuratie is de kritieke waarde van het Rayleigh-getal bekend. In de opstelling, zoals omschreven staat in §4.2, wordt slechts de halve onderzijde verwarmd. Dit om een enkelvoudige celkonvektie te forceren. De kritieke waarde voor het getal van Rayleigh zal voor deze afwijkende randvoorwaarde dus anders zijn. Ook uit deze evaluatie blijkt dat de vrije konvektie een rol speelt in het warmtetransport.

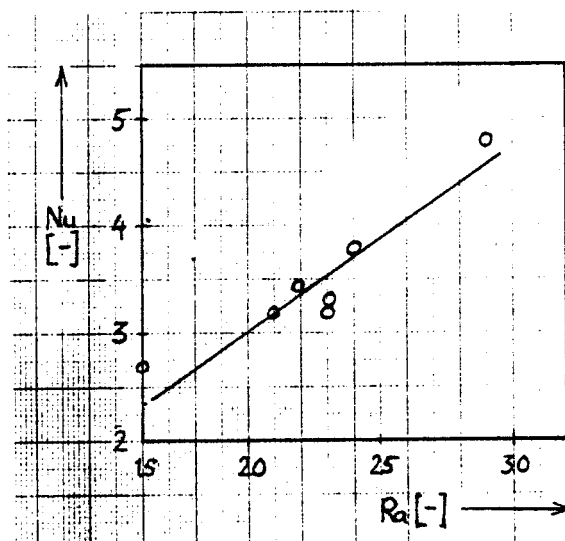


Fig 33 De relatie tussen de getallen van Rayleigh en Nusselt.

## 7 VERGELIJKING MET DE LITERATUUR

---

De berekeningen in dit hoofdstuk zijn slechts kwalitatief van aard. Er zijn te weinig gegevens om harde uitspraken omtrent de verschillende mechanismen te kunnen doen.

### 7.1 EEN ZONNEVIJVER IN ALICE SPRINGS

---

Als eerste zal het warmtetransport aan de rand van een zonnevijver in de Australische woestijn worden bekeken [6]. In de zonnevijver wordt zonnewarmte vooral op de bodem opgevangen. Door een zoutconcentratiegradient in het water zal er zeer weinig konvektief warmtetransport in de vijver optreden, want ook bij hoge temperaturen blijft de dichtheid van het water onderin het hoogst. Temperaturen tot 82°C zijn in Alice Springs gehaald. Totdat het begon te regenen: toen zakte de temperatuur tot 50°C en later zelfs tot 40°C.

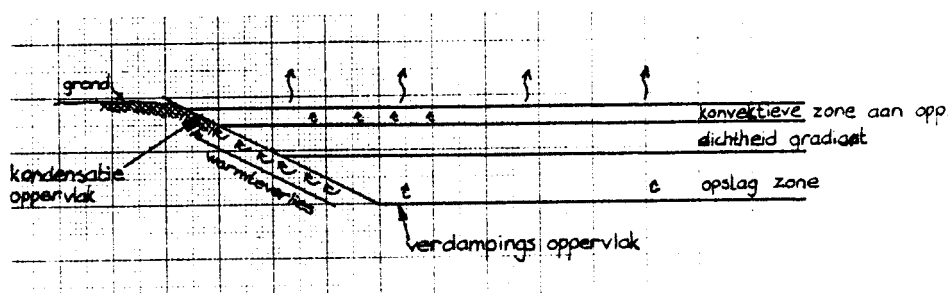


Fig 34 Warmteverlies in de zonnevijver

Er treden door het water in de grond drie effecten op:

- De effectieve warmtegeleiding wordt groter met  $n$ . Indien voor woestijnzand ongeveer dezelfde thermische eigenschappen gelden als voor het zand in de bak is  $\lambda_g = 0.30 \text{ W/mK}$  en  $\lambda_w = 0.06 \text{ W/mK}$  bij een gemiddeld watergehalte  $w = 16\%$ .
- Het virtuele temperatuurverschil neemt toe. In de droge grond is de virtuele temperatuur gelijk aan de grondtemperatuur, bij met waterdamp verzadigde lucht wordt de virtuele temperatuur bij 80°C  $T_{vi} = 416 \text{ K}$ . Met (11) kan de drukgradient van de opwaartse kracht worden berekend. Voor droge grond geldt  $\nabla p = 1.4 \text{ kN/m}^3$  en bij natte grond  $\nabla p = 3.0 \text{ kN/m}^3$ . De opwaartse kracht wordt dus meer dan twee keer zo groot. Nemen wij voor de permeabiliteit  $K = 0.5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$  en stellen wij deze konstant tot aan het grondwater-nivo, dan volgt uit de wet van Darcy dat een poriënsnelheid 2.2 mm/s voor droge grond en 4.9 mm/s voor natte grond. De dikte van de laag is 2 m, dit is veel groter is dan in de proefopstelling. De rest van de omstandigheden is met de proefopstelling vergelijkbaar; het warmtetransport door vrije konvektie zal dus erg groot zijn.

Er kan nu een schijnbare warmtegeleidingscoëfficiënt uitgerekend worden.  $\lambda^* = \lambda_{g,eff} + \left\{ \frac{1}{2} (\partial \lambda / \partial z) + v \rho C n (1-w) \right\} \Delta z$ . In natte grond is

$\lambda^* = 4.6 \text{ W/mK}$ . Dit bedrag is 15 keer zo groot als de  $\lambda_g = 0.30 \text{ W/mK}$ . Dit komt overeen met wat in het artikel wordt genoemd: "een warmtetransport 10-15 keer hoger dan verwacht door normale thermische geleiding". Echter in droge grond is de schijnbare warmtegeleidingskoëfficiënt  $\lambda^*$  reeds 8 keer zo hoog als  $\lambda_g$ :  $\lambda^* = 2.4 \text{ W/mK}$ . Als van een andere permeabiliteit wordt uitgegaan verandert de poriensnelheid en dus de schijnbare warmtegeleidingskoëfficiënt. Het warmtetransport is dan niet langer 10 tot 15 keer zo groot als door pure geleiding. De permeabiliteit lijkt dus goed gekozen.

Bij de nu volgende berekeningen wordt er van uit uitgegaan dat de hoeveelheid warmte die de zonnevijver per dag opvangt ongeveer konstant is. Bij een stationaire toestand is het warmteverlies aan de rand ook konstant:  $Q/A = \lambda^* dT/dz = 72 \text{ W/m}^2$ . Als de schijnbare warmtegeleidingskoëfficiënt twee maal zo groot wordt moet het temperatuurverschil tussen vijver en omgeving twee maal zo klein worden. Met een omgevingstemperatuur van  $20^\circ\text{C}$  zakt de temperatuur van  $80^\circ\text{C}$  tot  $50^\circ\text{C}$ . Dit is precies wat er gedurende het eerste jaar is opgetreden. Het temperatuurverschil halveerde. Dit kan dus verklaard worden met de toename van het virtuele temperatuurverschil in de poriën.

Het verder inzakken van de temperatuur tot  $40^\circ\text{C}$  kan zo echter niet verklaard worden: er ontbreekt een warmtestroom van  $24 \text{ W/m}^2$ . Met een warmtepijpeffekt zoals ook in [6] omschreven wordt kan het wel verklaard worden. Indien wordt aangenomen dat het vloeibare water onderin bij de bodem van de vijver zit dan volgt bij een watergehalte  $w=16\%$  dat het grondwater-nivo  $0.32 \text{ m}$  boven het nivo  $z=0$  zit. Deze aanname kan ingevuld worden in (31). Er volgt dan een uitwisselingskoëfficiënt  $r = 2\%$ . Ondanks de grote onnauwkeurigheden in de aannames is het een aannemelijk resultaat: ongeveer 2% de damp in de konvektiestroom zal boven kondenseren en als water teruglopen. Een verder teruglopen van de temperatuur is in principe mogelijk indien  $r$  groter wordt: ofwel indien meer waterdamp uit de konvektiestroom aan de bovenzijde zal kondenseren.

## 7.2 EEN SEIZOENSOPSLAG IN GRONINGEN

---

De opslag in Groningen is van het type zoals omschreven is in het voorwoord. Gedurende de zomer wordt er warmte in de grond opgeslagen en gedurende de winter wordt de warmte weer aan de grond onttrokken. Er treden ook hier grote warmteverliezen aan de bovenzijde van de opslag op. De opslag is afgedekt met enkele zandlagen en twee isolatielagen. De zandlagen zijn in totaal ongeveer  $1.2 \text{ m}$  dik en hebben een schijnbare warmtegeleidingskoëfficiënt van  $1.0 \text{ W/mK}$ . Er is een isolatielaag van  $10 \text{ cm}$  dik bestaande uit platen foamglas met  $\lambda = 0.045 \text{ W/mK}$  en een isolatielaag van geëxpandeerde kleikorrels, Argexkorrels geheten [21]. De Argexkorrels hebben een diameter van  $4$  tot  $10 \text{ mm}$ , zodat de permeabiliteit van dit medium zeer hoog is:  $18.10 \text{ m}$ . De verschillende lagen  $i$  moeten samen een  $k$ -waarde van minder dan  $0.15 \text{ W/mK}$  hebben. De  $k$ -waarde ofwel warmtedoorgangs-

koëfficiënt is een grootte afkomstig uit de bouwkunde en stelt een soort gemiddelde warmtegeleidingskoëfficiënt per lengte-eenheid voor:  $1/k = \int \Delta z / \lambda_i$ . Uit het ontwerp volgde een k-waarde van 0.14 W/mK. Tijdens de metingen bleek  $0.15 < k < 0.19 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Hieruit is de schijnbare warmtegeleidingskoëfficiënt van de Argexkorrels te berekenen. Deze is groter dan 0.11 W/mK, wat de gewone warmtegeleidingskoëfficiënt is. Een mogelijke verklaring is het optreden van vrije konvektie. De benodigde snelheid van de stroomstof (vochtige lucht) is overigens nog bescheiden: minder dan 1 mm/s. Bij de zeer hoge permeabiliteit van de laag met korrels zijn theoretisch snelheden tot 0.3 m/s mogelijk. Bij deze snelheid geldt de wet van Darcy niet meer: de stroming is niet meer laminair. Het getal van Reynolds ligt tussen 1 en 10 dat wil zeggen dat de stroming in het overgangsgebied tussen laminair en turbulent zit. Een eksperimentele wet om toch de snelheid te kunnen berekenen geeft [1, p66]:

$$\nabla p = \eta v / K + 0.55 v^2 / \sqrt{K} \quad (32)$$

Met (32) zijn de maxima van de konvektieneligheden te berekenen en hieruit volgt dan weer een maximum voor de k-waarde zie fig 31. De k-waarde kan dus nog bijna twee keer zo groot worden. Dat wil zeggen dat het verlies door de bovenzijde van de opslag nog twee keer zo groot zou kunnen worden. De relatief kleine snelheid in de poriën betekent een lage effectieve permeabiliteit. Dit kan een aanwijzing zijn dat er naast lucht nog iets tussen de korrels zit: waarschijnlijk zand. De kans op "zandinspoeling" tussen de Argexkorrels wordt ook in [21] genoemd.

grootte	r= 5m	r=10m	r=20m
k [W/mK]	0.16	0.15	0.19
$\lambda^*$ [W/mK]	0.14	0.12	0.22
v [mm/s]	0.15	0.15	0.55
$v_{maks}$ [mm/s]	290	280	100
$k_{maks}$ [W/mK]	0.31	0.31	0.31

Fig 31 Berekening van maximale poriënsnelheden en k-waarden bij seizoensopslag in Groningen op 5, 10 en 20 m afstand van het midden.

Een andere verklaring voor de grotere warmtegeleiding door de korrels is het binnendringen van water. Het verschil tussen en wordt dan veroorzaakt door de warmtegeleidingskoëfficiënt van water. Dit zou een watergehalte van 4 tot 12% betekenen. Bij een dergelijk laag watergehalte wordt Keff echter nauwelijks lager (hoogstens een faktor 2 tot 10), zodat de konvektie van lucht een zeer belangrijke rol zal blijven spelen. Er zou een schijnbare warmtegeleidingskoëfficiënt van meer dan 5 W/mK ontstaan. Dit is duidelijk te hoog, dus bevindt er zich waarschijnlijk geen of zeer weinig water tussen de korrels ( $w < 1\%$ ). Het warmtepijpeffekt lijkt hier ook niet waarschijnlijk. Als het toch mocht optreden, dan is het effect verwaarloosbaar ten opzichte van het warmtetransport door gewone konvektie.



## 8 KONKLUSIES EN AANBEVELINGEN

-----

In het verslag zijn al heel wat konklusies vermeld, hier wordt alles nog eens op een rijtje gezet en uitgebreid met wat aanbevelingen. Alles zal per onderwerp behandeld worden.

### De meetopstelling

- De hoogte van de bak voldeed aan de eis dat er na drie dagen een stationaire temperatuurverdeling moest zijn.
- De dikte van de isolatie van 10cm rond de bak voldeed aan de verwachtingen zoals bij het ontwerp was uitgerekend. Ook het stookvermogen was in het juiste gebied instelbaar. De warmteverliezen door de isolatie waren echter wel hoog: 30% van de totale warmtestroom. Het verlies kan worden verminderd door de bak een grotere lengte en breedte te geven. Het is ook mogelijk beter isolatiemateriaal te gebruiken.
- Er zijn geen aanwijzingen voor grote inhomogeniteiten in de eigenschappen van het gestrooide zand. De manier van strooien en aantrillen van de zandpakking voldeed.
- De stookplaat verhit niet homogeen. In het midden kan de temperatuur 0.5 tot 1°C hoger zijn dan aan de rand. Dit is gemeten met de nulspanning van de lambdanaald op plaats (1,1). (Tijdens de nulspanning loopt er nog geen stookstroom door de lambdanaald, een gemeten temperatuurverschil wordt dan veroorzaakt door oorzaken buiten de naald) De stookplaat heeft ook een beveiliging: bij 70°C slaat de stookspanning automatisch af. Dit heeft al konsekventies bij temperaturen boven de 50°C. Droog zand of bijna droog zand heeft een hoge contactweerstand, zodat er een temperatuursprong tussen de stookplaat en het zand ontstaat. De stookplaat slaat dan vrij snel af. Een mogelijke oplossing voor de inhomogene temperatuur is het bevestigen van een koperen plaat. Om de contactweerstand te verminderen zouden er eerst wat zandkorrels op de plaat gelijmd kunnen worden en vlak bij de plaat eerst wat fijner zand gestrooid kunnen worden.
- Uit de nulspanning van de lambdanaald op plaats (5,5) blijkt dat de koelplaat wel een homogene temperatuur had. De rand week niet meer dan 0.1°C af van het midden. Dit kwam doordat de koelplaat van goed geleidend geelkoper van 0.5mm dik was gemaakt.
- De absolute temperatuurmetingen met de ekstra thermokoppels in de lambdanaalden zijn mislukt. Dit komt doordat de kompensatiedraad van koper op slechts enkele centimeters buiten de bak aan de koppeldraad was gesoldeerd. Deze overgang werkt ook als thermokoppel, zodat slechts het temperatuurverschil tussen een plaats in de bak en een plaats ergens in de isolatie wordt gemeten. Indien de kompensatiedraad aan de koppeldraad wordt gesoldeerd daar waar de omgevingstemperatuur gelijk is aan de kamertemperatuur, kan met de nulpuntskompensatie in de datalogger de juiste temperatuur worden gemeten.
- De afstand l tussen het einde van de stookdraad en de warme las van de thermokoppel in de lambdanaald is erg kort. De meting wordt hierdoor een stuk onnauwkeuriger, bovendien is de warmtecapaciteit

van het zand dan niet te bepalen.  $l$  dient een minimale waarde van 25mm te hebben.

De numerieke modellen en het testen met ijkmetingen.

- Het model GELEIDING is geschikt om de temperaturen en warmtestromen in de bak te beschrijven.
- Uit de ijkmetingen van de lambdanaalden in agargel volgt dat de gemeten warmtegeleidingscoëfficiënt te hoog is. Deze kan echter gekorrigeerd worden met het Blackwell-model. Met een aksiale afstand  $l$  tussen de warme las van het thermokoppel en het uiteinde van de stookdraad van 10mm worden goede resultaten bereikt. Er is een uitzondering, voor naald9 moet  $l=12\text{mm}$  genomen worden.
- Model NAALD1 is voor de Eindhovense naalden niet bruikbaar. Ook voor de Wageningse metingen kan het model niet bevestigd worden.
- Met de iteratiemethode van Newton in NAALD3 kan de warmtecapaciteit in principe snel berekend worden. In de praktijk is de zo berekende waarde ongeveer drie keer te hoog. Daarbij komt dat de berekende warmtegeleidingscoëfficiënt 6 tot 7% te laag is. De eindresultaten zijn echter wel goed reproduceerbaar. Ze zijn ook reproduceerbaar bij verschillende startwaarden van het iteratieproces.
- De reproduceerbaarheid van NAALD3 wordt bevestigd door de metingen in droog zand: de warmtecapaciteit  $=2.5\pm\text{MJ}/\text{m}^3\text{K}$  voor alle 32 metingen op enkele centimeters afstand van de rand van de bak. Voor de warmtegeleidingscoëfficiënt gekorrigeerd met het Blackwell-model geldt:  $\lambda=0.30\pm0.02\text{W}/\text{mK}$ . Deze laatste waarde komt bovendien goed overeen met literatuurwaarden [7] en [9].

De metingen in vochtig zand

- Uit de metingen met lambdanaalden bleek dat onderin de bak het meeste vocht te zitten. De verticale plaatsafgeleide van de warmtegeleidingscoëfficiënt is links anders dan rechts. Uit deze verdeling is af te leiden dat de konvektieve stroom in proef 13 anders van richting is dan in proef 15 t/m 95.
- Uit de drukgradiënten die berekend zijn met de virtuele temperatuurverschillen volgt dat de konvektie in meting 15 t/m 95 rechtsom gaat, hetgeen te verwachten is. De konvektie van meting 05 en 13 gaat echter linksom.
- Uit de evaluatie van het verschil tussen de gemeten temperatuur en de temperatuur zoals berekend met het model GELEIDING is ook een drukgradiënt te berekenen. Uit deze drukgradiënt volgt ook dat de konvektiestroom van meting 05 en 13 linksom draait, terwijl hij bij de overige metingen rechtom draait.
- Het rendement van de warmtestroom in de bak, gedefinieerd als  $Q_{\text{out}}/Q_{\text{in}}$ , hangt lineair af van de effectieve warmtecapaciteit van water.
- De effectieve permeabiliteit van het zand is bij lage vochtgehalten (proef 05 t/m 36) gelijk aan de permeabiliteit zelf. Bij een gemiddeld watergehalte van 9.4% wordt het de helft:  $K_{\text{eff}}=0.5K$ .
- De grote warmtestroom in proef 13, met een watergehalte van 0.98% en een warmtestroom van  $106\text{W}/\text{m}^2$ , kan verklaard worden door aan te nemen dat 0.15% van de damp bij de koelplaat kondenseert, zodat een warmtestroom van  $35\text{W}/\text{m}^2$  door het warmtepijpeffekt veroorzaakt wordt.

- Een warmtepijpeffekt langs de relatief koude, verticale wanden van de bak lijkt onwaarschijnlijk. In dit geval zou de relatieve permeabiliteit sterk afnemen. Bij lage watergehaltenes dient de effectieve permeabiliteit echter gelijk te zijn aan de permeabiliteit zelf.
- De stromingen in de poriën is laminair want het getal van Reynolds  $Re < 0.32$ . De wet van Darcy is terecht toegepast.
- Uit de evaluatie van de getallen van Nusselt en Rayleigh blijkt Ra duidelijk boven een kritieke waarde te liggen. Hiermee wordt nog eens bevestigd dat vrije konvektie optreedt.

Vergelijkingen met de literatuur en algemene aanbevelingen.

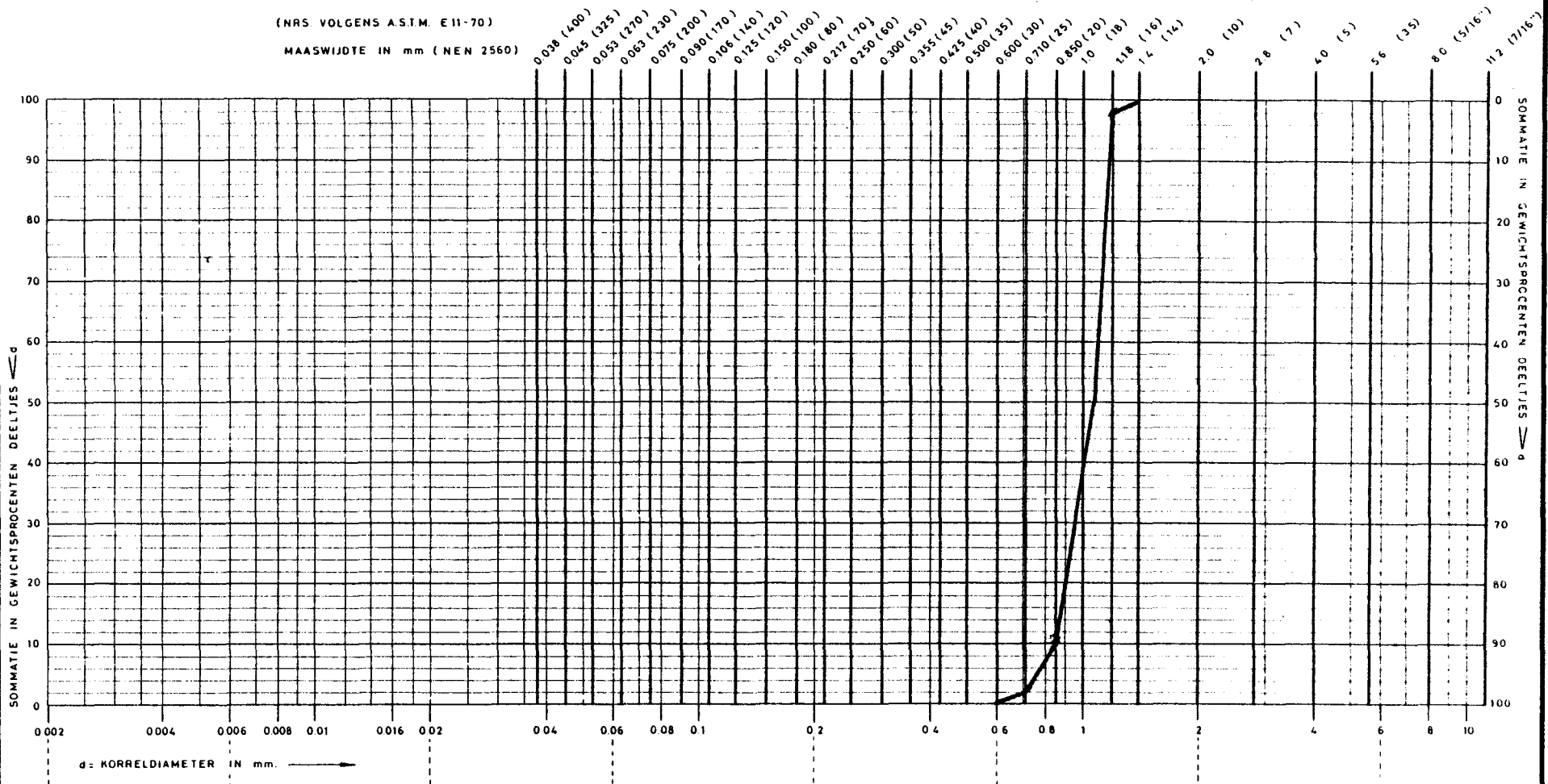
- Het energieverlies bij de zonnevijver in Alice Springs [6] wordt voornamelijk veroorzaakt door vrije konvektie van vochtige lucht. De temperatuurdaling van  $80^{\circ}\text{C}$  naar  $50^{\circ}\text{C}$  kan zo verklaard worden. Voor de temperatuurdaling tot  $40^{\circ}\text{C}$  is een aanvullend warmtetransportmechanisme nodig. Indien een warmtepijpeffekt wordt verondersteld is het nodig dat 2% van de damp nabij het aardoppervlak kondenseert.
- Het ekstra energieverlies bij de warmteopslag in de grond in Groningen [22] kan verklaard worden met de vrije konvektie van vochtige lucht in de laag met Argex korrels. De poriënsnelheid is echter nog klein voor de grote permeabiliteit van de laag. Theoretisch, met een tweedimensionaal model zoals in de meetbak is gebruikt, zijn honderd keer zo grote konvektiesnelheden mogelijk. De totale warmtestroom door isolatielagen zal onder die omstandigheden verdubbelen. De lage snelheden zijn het gevolg van een kleine effectieve permeabiliteit. Waarschijnlijk wordt die veroorzaakt door het inspoelen van zand.
- De theorie van Menenti [14] voor de correctie voor de luchtdruk met behulp van een virtuele temperatuur is hier met succes toegepast. Ook de de theorie voor de verdampingswarmte (26) geeft aannemelijke resultaten.
- Het is aan te bevelen meer stationaire toestanden in de buurt van proef 13 te onderzoeken. Dat wil zeggen toestanden met een gemiddeld watergehalte van 1% en een warmtestroom van  $106\text{W/m}^2$ . De vraag omtrent de richting van de konvektieve stroom verdient nader onderzoek, vooral de mogelijke relatie tussen het warmtepijpeffekt en het linksomdraaien van de konvektiestroom.
- Ook de relatie tussen gemiddeld watergehalte, stookvermogen en schijnbare warmtegeleidingscoëfficiënt dient uitgediept te worden.
- Tenslotte moeten meer praktijkvoorbeelden met de theorie van Menenti doorgerekend worden.

## INHOUDSOPGAVE VAN DE APPENDICES

1	Korrelverdelingsdiagram.....	A1
2	Schakelkastverwarming.....	A2
3	IJking van thermokoppels.....	A3
4	Listing NAALD1.(5blz).....	A4
5	Afleiding iteratiemethode van Newton.(2blz).....	A5
6	Listing NAALD3.(5blz).....	A6
7	Afleiding differentieschema GELEIDING.(2blz).....	A7
8	Listing GELEIDING.(3blz).....	A8
9	Afleiding EKSTRA.....	A9
10	Listing EKSTRA/20TOT51.(2blz).....	A10
11	Afleiding procedures in TEKEN.....	A11
12	Listing TEKEN.(3blz).....	A12
13	IJkmetingen in agargel.....	A13
14	Metingen in glasparels verwerkt met NAALD1.....	A14
15	IJkgrafiek voor Blackwellkorrektie voor l=10mm.....	A15
16	Uitvoer NAALD3 wartmtegel.koëff. en -kapaciteit.(4blz)...	A16
17	Warmtegel.koëff. als funktie van de plaats.(2blz).....	A17
18	Temperatuur als funktie van de plaats.(6 blz).....	A18
19	Uitvoer GELEIDING.(3blz).....	A19
20	Verskil gemeten en modeltemperatuur.(2blz).....	A20
21	Eigenschappen van lucht, water en damp.(2blz).....	A21

Appendiks 1

(NRS VOLGENS A.S.T.M. E11-70)  
 MAASWIJDTE IN mm (NEN 2560)



LUTUM	FIJN	MIDDEL	GROF	FIJN	MIDDEL	GROF	FIJN	MIDDEL
	SILT			ZAND			GRIND	

Grof rivierzand uit zandwingebied Groningen

A1

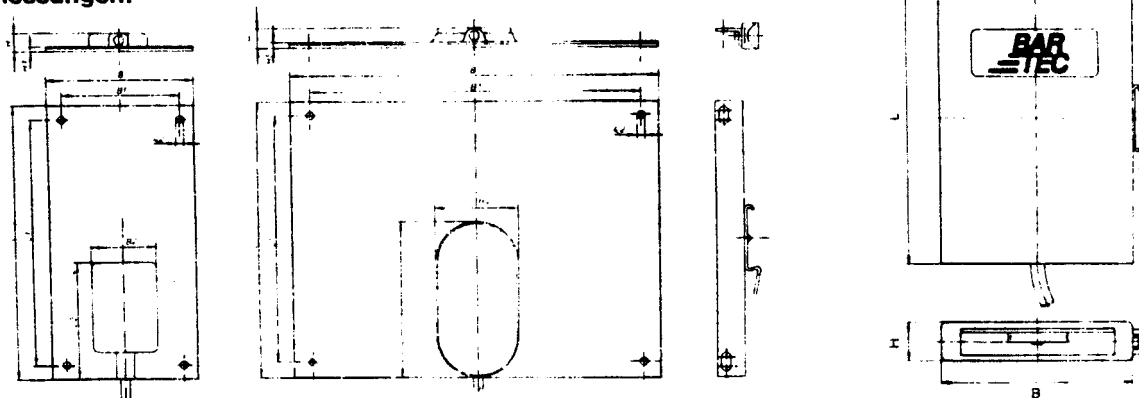
CO -	p. d.
gac.	get.

### Bestellangaben, - Auswahlrichtwerte - Maße (mm)

Heizleistung	Plattentemperatur	Bestellangaben		
		Heizplatte	Befestigungswinkel für Hut-Schiene TS 35	Befestigungswinkel für C-Schiene TS 32
40 W	+70°C fest eingestellt	27-0212-1704	05-0010-0056	05-0010-0058
100 W	+70°C fest eingestellt	27-0212-2710	05-0010-0056	05-0010-0058
100 W	+70°C fest eingestellt	27-0212-5710	standardmäßig eingebaut	-
100 W	30 bis 150°C stufenlos regelbar	27-0222-2710	05-0010-0056	05-0010-0058
250 W	+70°C fest eingestellt	27-0212-3725	05-0010-0057	05-0010-0059
250 W	30 bis 150°C stufenlos regelbar	27-0222-3725	05-0010-0057	05-0010-0059

Wärme-Bedarfsermittlung	Gehäuseinhalt in Liter	Standort des Schaltschranks		
		in Innenräumen		im Freien
<p>Die Ermittlung des Wärmebedarfs (Watt) und die Auswahl der geeigneten Heizplatte hängt von verschiedenen Faktoren ab wie: Schrankgröße, Schrankmaterial, Aufstellungsort, relative Luftfeuchte, Verlustleistung (Eigenerwärmung) der Einbaugeräte etc.</p> <p>Als Richtwerte gelten nachstehende Angaben, die wir zur einfacheren Handhabung ermittelt haben.</p>	bis 20 Liter	geheizt	ungeheizt	
	30	10 W	20 W	40 W
	50	20 W	33 W	55 W
	75	30 W	55 W	90 W
	100	30 W	75 W	130 W
	120	55 W	90 W	150 W
	160	55 W	90 W	150 W
	240	55 W	130 W	180 W
	300	90 W	180 W	235 W
	420	90 W	180 W	275 W
	500	90 W	180 W	310 W
	600	90 W	240 W	360 W
	800	90 W	280 W	415 W
1000	130 W	280 W	630 W	
1200	130 W	280 W	810 W	
	1200	150 W	360 W	1300 W

### Abmessungen:



Typ	L (mm)	L1 (mm)	L2 (mm)	B (mm)	B1 (mm)	B2 (mm)	H (mm)	H1 (mm)	Gewicht
27-0212-1704	150	134	35	80	64	30	10	2,5	95 g
27-0212-2710	150	130	85	200	180	45	11	3,5	330 g
27-0212-5710	150	-	-	100	-	-	20	-	350 g
27-0222-2710	150	130	85	200	180	45	49	3,5	350 g



# Rapport

## Appendiks 3 Yking van de Thermokoppels

Technische Hogeschool Eindhoven  
Stafgroep Instrumentatie C.T.D.

Referentienr.: 850332

Meetobject: Thermokoppels Chr/Al

Opdrachtgever: A.E.A.C. van Huygevoort  
Afd./dienst: Afdeling Werktuigbouwkunde  
Groep: WOP

Procedure: De thermokoppels zijn in een waterthermostaat bij toenemende temperatuur, vergeleken met de platina weerstandsthermometer (Q 0542 C) en een normaalweerstand van 100  $\Omega$  (CY 0063).

Resultaten: De in de meetwaardentabel vermelde thermospanningen zijn de gemiddelde waarden uit series van 40 metingen per nominale temperatuur.

Nauwkeurigheid: De thermospanningen zijn bepaald met een onzekerheid van 11,9  $\mu\text{V}$ ; hetgeen overeenkomt met een onzekerheid van 0,29  $^{\circ}\text{C}$  in de temperatuur.

De onzekerheden zijn bepaald op basis van een kans van 0,3 % dat de vermelde waarde meer van de werkelijke waarde afwijkt dan de gegeven onzekerheid.

Opmerking: Koppel nr. 4 bleek defect te zijn.

### MEETWAARDENTABEL

t ( $^{\circ}\text{C}$ )	Thermospanningen in mV van koppel nummer:						
	5	6	7	8	11	45	53
15,40	0,6119	0,6124	0,6117	0,6124	0,6124	0,6117	0,6123
20,51	0,8180	0,8181	0,8174	0,8182	0,8179	0,8176	0,8180
30,16	1,2112	1,2110	1,2102	1,2110	1,2104	1,2108	1,2104
40,02	1,6174	1,6167	1,6161	1,6165	1,6157	1,6168	1,6156
50,24	2,0413	2,0400	2,0394	2,0396	2,0385	2,0406	2,0384
59,78	2,4396	2,4379	2,4372	2,4371	2,4356	2,4388	2,4356
69,84	2,8619	2,8594	2,8588	2,8579	2,8567	2,8610	2,8565
16,50	0,6555	0,6560	0,6553	0,6560	0,6560	0,6553	0,6560

Rapportering:

P.H. Cappon  
1985-03-27

Stafgroep Instrumentatie:

ing. F.A. Venmans.

# Appendiks 4: Listing Naald1

A4.1

WILKO/NAALD

DATE & TIME PRINTED: WEDNESDAY, NOVEMBER 20, 1985 @ 15:12:32.

```

100  {%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
200  %%%
300  %%% Dit programma verwerkt de metingen, zoals gedaan %%%
400  %%% worden met de in Wageningen ontwikkelde lambda- %%%
500  %%% naalden. Er wordt ter plaatse een warmtegeleidings- %%%
600  %%% koeficient, een warmtecapaciteit en een kontakt- %%%
700  %%% weerstand uitgerekend met behulp van het gemodifi- %%%
800  %%% ceerde Jaegermodel. %%%
900  %%% %%%
1000 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
1100 PROGRAM BASIS (INPUT,OUTPUT,
1200 METING : FILE <KIND = DISK ,
1300 NEWFILE = FALSE >,
1400 UIT : FILE <KIND = PRINTER >);
1500 CONST AO =37.691;
1600 BO =0.0445;
1700 CO =0.00037;
1800 DT =0.667;
1900 TYPE GROOT =ARRAY [1..684] OF REAL;
2000 KLEIN =ARRAY [1..350] OF REAL;
2100 ARR =ARRAY [-1..15] OF REAL;
2200 NAALR =ARRAY [3..40] OF REAL;
2300 WOORD =PACKED ARRAY [1..14] OF CHAR;
2400 VAR NULM : BOOLEAN;
2500 H,DH,I,IO,J,K,L,M,N,NR,W,LUS,NIT : INTEGER;
2600 A1,AA,BB,ATO,BTO,MID,CORRE,VARI,
2700 ALFA,LABDA,LABDA2,GAMMA,GAMMA1,GAMMA2,
2800 E,E1,Q1,Q3,CL,TO,VO,VO2,DVO,PI,TE,
2900 ROC,DROC,
3000 REFF,SCHAAL,TOM,U,V,VIN,WLI,
3100 BESLIS : REAL;
3200 NAAM,IETS : WOORD;
3300 VMEET : GROOT;
3400 TM : KLEIN;
3450 TNUL,GAMM,
3500 A,B,DG,LA,LAB,TB,ROCE,DROCE,CORR,MI : ARR;
3600 R,REF,DREF : NAALR;
3700 METING : TEXT;
3800 UIT : TEXT;
3900 {-----}
4000 %%% PROCEDURE LINREG
4100 -----}
4200 PROCEDURE LINREG( F,G,
4300 K,L : INTEGER;
4400 E : REAL;
4500 VAR CORRE : REAL; {KORRELATIE KOEF}
4600 VAR AA : REAL; {HELLING}
4700 VAR BB : REAL; {ASAFSNIJDING}
4800 VAR MID : REAL); {MIDD FOUT}
4900 VAR SOMX,SOMY,SOM2X,SOM2Y,
5000 SOMXY,VARI,X,Y : REAL;
5100 I : INTEGER;
5200 BEGIN
5300 SOMX:=0; SOMY:=0; SOM2X:=0; SOM2Y:=0; SOMXY:=0; MID:= 0;
5400 FOR I:=K TO L DO
5500 BEGIN

```



```

5800          2: X:=TM[I]-E*LN(I*DT)/I;
5900          3: X:=LAB[I];
6000          END;
6100          CASE G OF
6200            1: Y:=LN(I*DT);
6300            2: Y:=LN(I*DT+T0);
6400            3: Y:=TB[I];
6500          END;
6600          SOMX:= SOMX + X;
6700          SOMY:= SOMY + Y;
6800          SOM2X:=SOM2X+X*X;
6900          SOM2Y:=SOM2Y+Y*Y;
7000          SOMXY:=SOMXY+X*Y
7100          END;
7200          L:=L-K+1; { L IS NU HET AANTAL PUNTEN }
7300          VARI:=L*SOM2Y-SOMY*SOMY;
7400          AA:=(L*SOMXY-SOMX*SOMY)/VARI;
7500          BB:=(SOM2Y*SOMX-SOMY*SOMXY)/VARI;
7600          CORRE:=AA*AA*VARI/(SOM2X*L-SOMX*SOMX);
7700          CORRE:=SQRT(ABS(CORRE));
7800          FOR I:=K TO K+L-1 DO
7900            MID:= MID + SQR(X- (AA*Y + BB));
8000            MID:= SQRT(MID/(L-2));
8100          END; {EINDE LINREG }
8200          {-----}
8300          %%%      LEESPROCEDURE : LEES
8400          {-----}
8500          PROCEDURE LEES( VAR MEET : REAL);
8600                        VAR IETS :WOORD;
8700                        TEKEN,
8800                        I,K :INTEGER;
8900                        GETAL:REAL;
9000          BEGIN READLN(METING,IETS);
9100            WHILE (IETS[4]<>'9') AND NOT(EOF(METING))
9200              DO READLN(METING,IETS);
9300              IF IETS[5]='-' THEN TEKEN:=-1 ELSE TEKEN:=1;
9400              K:=ORD('0'); GETAL:=0;
9500              FOR I:=6 TO 11 DO
9600                IF I<>8 THEN GETAL:=GETAL*10+ ORD(IETS[I])-K;
9700                GETAL:=TEKEN*GETAL/1000;
9800                IF EOF(METING) THEN GETAL:=99999;
9900                MEET:=GETAL
10000          END;
10100          BEGIN
10200          {-----}
10300          %%%      BEGIN PROGRAMMA:  INITIALISATIE VAN DE PARAMETERS
10400          {-----}
10500          R[ 3]:=13.7;          R[36]:=15.87;
10600          R[ 8]:=15.0;          R[37]:=13.83;      {R = ELEKTRISCHE WEERSTAND }
10700          R[ 9]:=15.8;          R[38]:=19.17;      {  VAN DE STOOKDRAAD   }
10800          R[34]:=14.6;          R[39]:=15.67;
10900          R[35]:=15.13;         R[40]:=14.57;
11000          REF[ 3]:=0.19;        DREF[ 3]:=0.01;
11100          REF[ 8]:=0.29;        DREF[ 8]:=0.015; {REF = EFFEKTIEVE STRAAL }
11200          REF[ 9]:=0.40;        DREF[ 9]:=0.035; {  VAN DE LABDANAALD   }
11300          REF[34]:=0.32;        DREF[34]:=0.04 ; { [mm]                  }
11400          REF[35]:=0.32;        DREF[35]:=0.01 ; {DREF= D REF/ D TEMP    }
11500          REF[36]:=0.18;        DREF[36]:=0.025; { [mm/°C]               }
11600          REF[37]:=0.17;        DREF[37]:=0.02 ;
11700          REF[38]:=0.17;        DREF[38]:=0.02 ; {DIT IS NIET GEMETEN  }
11800          REF[39]:=0.18;        DREF[39]:=0.02 ;
11900          REF[40]:=0.15;        DREF[40]:=0.02 ;

```

```

12000      AA:=0; BB:=0; CORRE:=0; MID:=0;
12100      V0:=0; V02:=0;
12200      PI:=4*ARCTAN(1);
12300      {% AO IN MIKROVOLTS PER GRAAD CELCIUS; DE METING IS *1067 mV
12400      % DUS DE SCHAAL IS 1.067      }
12500      SCHAAL:=1.067;
12600      WRITELN('Welke file wil je lezen? Zet een punt achter de naam');
12700      READLN(NAAM);
12800      { REPLACE METING.TITLE BY NAAM; }
12900      RESET(METING);
13000      REWRITE(UIT);
13100      {-----}
13200      %%      INLEZEN VAN DE MEETGEGEVENS
13300      {-----}
13400      WRITELN(UIT,NAAM);
13500      WRITELN('Naaldnummer');
13600      READLN(NR);
13700      WRITELN('Omgevingstemperatuur ='C');
13800      READLN(TOM);
13900      IF NR=3 THEN V:=1 ELSE V:=2;
14000      WRITELN(UIT,'Omgevingstemperatuur =',TOM:6:2,'C      Naalddikte =',
14100      V:2,' mm');
14200      WRITELN('Stookspanning [V]');
14300      READLN (VIN);
14400      WRITELN(UIT,'Stookspanning      = ',VIN:7:4,' V      Naaldnr =',
14500      NR);
14510      WRITELN('Is de 100 MUVolt-schaal gebruikt?      (1=JA/0=NEE)');
14530      READLN(W);
14540      IF W=1 THEN SCHAAL:=SCHAAL*0.3;
14600      LEES(VMEET[1]); I:=1;
14700      WHILE NOT EOF(METING) DO BEGIN I:=I+1;
14800      LEES(VMEET[I]);
14900      END;
15000      WRITELN('Aantal iteraties in ROCE, ROCE-start [E6 J/m3/K] en');
15100      WRITELN('delta-ROCE-start [E6 J/m3/K]');
15200      READLN(NIT,ROC,DROC);
15300      WRITELN('AANTAL MEETWAARDEN = ',I);
15400      {-----}
15500      %%%      REKENDEEL
15600      {-----}
15700      REFF:=REF[NR]+DREF[NR]*(TOM-15)/35; REFF:=REFF/1000;
15800      IF NR=3 THEN V:=1 ELSE V:=2; {NAALDDIAMETER IN mm}
15900      V:=V*0.5E-3; U:=V-2E-4;
16000      E1:=LN(4/V/V/1.78107);
16100      Q1:=119.333* SQR(VIN/R[NR]) /4/PI;
16200      NULM:=TRUE;
16300      ROCE[1]:=ROC*1E6; DROCE[2]:=DROC*1E6; ROCE[2]:=(ROC+DROC)*1E6;
16400      WRITELN(UIT,'Het stookvermogen per meter is ',Q1*4*PI:10,' W');
16500      { BEPALING VAN DE "NUL"-SPANNING}
16600      IO:=1;
16700      WHILE NULM DO
16800      BEGIN
16900      IO:=IO+1;
17000      NULM:=((VMEET[IO]-VMEET[IO-1])<0.5);
17100      IF NULM THEN VO:=VO+VMEET[IO];
17200      IF NULM THEN VO2:=VO2+SQR(VMEET[IO])
17300      END;
17400      IO:=IO-1;
17500      IF IO>120 THEN WRITELN('TE VEEL NULMETINGEN: MEETFILE VERKLEI',
17600      'NEN');
18200      VO:=VO/IO;
18300      DVO:=-VO*VO+VO2/IO;

```

```

18400      DVO:=ABS(DVO);
18500      IF IO=1 THEN DVO:=0 ELSE DVO:=SQRT(DVO/(IO-1));
18600
18700      WRITELN(UIT,'Beginspanning= ',VO:10,'      Nauwkeurigheid= ',DVO:8,
18800          '      Aantal nulmetingen: ',IO:3);
18900      WRITELN(UIT,' ');
19000      { REKEN GEMETEN SPANNING OM IN TEMPERATUURVERSCHILLEN }
19100      ATO:=AO + 2*BO*TOM + 3*CO*TOM*TOM;
19200      BTO:=BO + 3*CO*TOM;
19300      FOR I:=IO+1 TO IO+333 DO
19400          BEGIN
19500              VMEET[I]:=(VMEET[I]-VO)/SCHAAL;
19600              TM[I-IO]:=(-ATO+SQRT(ATO*ATO+4*BTO*VMEET[I]))/2/BTO
19700          END;
19800      {-----}
19900      %%% BLOK1      : TEMP= B + A LN[t] %%%
20000      {-----}
20100      E:=0;
20200      LINREG(1,1,160,330,E,CORRE,AA,BB,MID);
20300      LABDA:=Q1/AA;
20400      {-----}
20500      %%% BLOK2      : TEMP MET LN[t]/t KORREKTIE %%%
20600      {-----}
20700      IF V=1E-3 THEN CL:=5.054 ELSE CL:=1.997;
20800      { CL:=PI*((V*V-U*U)*CRVS+U*U*CVUL+0.05*0.05*CSTOOK }
20850      IF NIT>12 THEN NIT:=12;
20900      FOR LUS:=1 TO NIT DO BEGIN
21000          { CASE LUS OF
21100              1,2,3,4 : DH:=60;
21200              5,6,7,8 : DH:=30;
21300              9,10  : DH:=20;
21400          END; }
21500      DH:=30;
21600      IF LUS>2 THEN BEGIN BESLIS:=A[LUS-1]/A[LUS-2];
21700          IF ABS(BESLIS)>1 THEN
21800              IF BESLIS<0 THEN BESLIS:=1/BESLIS
21900                  ELSE BESLIS:=-1/BESLIS;
22000
22100          DROCE[LUS]:=BESLIS*DROCE[LUS-1];
22200          ROCE[LUS]:=ROCE[LUS-1]+DROCE[LUS];
22300          IF ROCE[LUS]<0 THEN ROCE[LUS]:=1E4;
22400      END;
22500      ALFA:= 2*PI*V*V*ROCE[LUS]/CL;
22600      E:=(ALFA-2)*ROCE[LUS]*Q1*V*V/2/LABDA/LABDA/ALFA/DT;
22700      LINREG(2,1,160,330,E,CORRE,AA,BB,MID);
22800      LABDA2:=Q1/AA;
22900      WRITELN(UIT,'LABDA2 = ',LABDA2:8:3,' MIDD. FOUT IN RECHTE ',
23100          '      MID:7);
23200      IF LUS>NIT-2 THEN BEGIN
23300          WRITELN(UIT,' ');
23400          WRITELN(UIT,' T1      T2      TO      GAMMA
23500              'REFF      LABDA      KORR KOEFF ',
23600              'MIDD FOUT IN RECHTE');
23700          WRITELN(UIT,' ');
23800      END;
23900      {-----}
24000      %%% BLOK3      : TEMP MET LN(t)/t EN LN(t-t0) KORREKTIE
24100      {-----}
24200      J:=((330-150) DIV DH)-1;
24300      FOR N:=0 TO J DO
24400          BEGIN H:=N*DH+150;
24500              FOR M:=1 TO 3 DO          { 3 ITERATIES }

```

```

24600 BEGIN LABDA:=LABDA2: A1:=LABDA/ROCE[LUS]:
24650 ALFA:=2*PI*v*v*ROCE[LUS]/CL:
24670 E:=(ALFA-2)*ROCE[LUS]*Q1*v*v/2/LABDA/LABDA/ALFA/DT:
24700 Q3:=((ALFA-2)*(E1+LN(A1))+ALFA)/4:
24800 FOR W:=-1 TO 1 DO IF W<>0 THEN
24900 BEGIN TO:=W:
25100 LINREG(2,2,H,330,E,CORRE,AA,BB,MID):
25200 GAMMA1:=Q3-0.500*ALFA*A1*TO/V/V:
25300 GAMMA2:=0.500*((BB/AA)-LN(A1)-E1):
25400 DG[W]:=GAMMA1-GAMMA2:
25500 END:
25600 TO:=-((DG[1]+DG[-1]))/(DG[1]-DG[-1]):
25800 LINREG(2,2,H,330,E,CORRE,AA,BB,MID):
25900 LABDA2:=Q1/AA
26000 END: {EIND VAN DE DRIE ITERATIES IN LABDA: EINDE M-STAP}
26100 A1:=LABDA2/ROCE[LUS]:
26200 LAB[N]:=LABDA2: TB[N]:=H*DT: TE:=330*DT:
26300 GAMMA1:=Q3-0.500*ALFA*A1*TO/V/V:
26400 GAMMA2:=0.500*((BB/AA)-LN(A1)-E1):
26500 GAMMA:=(GAMMA1+GAMMA2)/2:
26600 WLI:=(LN(U/REFF)/0.190+LN(V/U)/16.3)/2/PI:
26700 GAMMA:=GAMMA/2/PI/LABDA2-WLI:
26800 {%% UITVOER %%}
26900 IF LUS>NIT-2 THEN
27000 WRITELN(UIT,TB[N]:5:1, ,TE:5:1, ,TO:7:3,GAMMA:14:5,
27100 ,REFF:10, ,LABDA:7:4,CORRE:11:4, ,MID:10):
27200 END: { H-STAP OF N-STAP}
27300 LINREG(3,3,0,J,E,CORRE,AA,BB,MID):
27400 A[LUS]:=AA: B[LUS]:=BB: CORR[LUS]:=CORRE:
27500 LA[LUS]:=LAB[J]: MI[LUS]:=MID: TNUL[LUS]:=TO: GAMM[LUS]:=GAMMA:
27600 END: { LUS-STAP }
27700 WRITELN(UIT, );
27800 WRITELN(UIT, LUS ROCE LABDA HELLING ASAFSN. ,
27900 , KORR MIDD.FOUT TNUL GAMMA );
28000 WRITELN(UIT, );
28100 FOR LUS:=1 TO NIT DO
28200 WRITELN(UIT,LUS:2, ,ROCE[LUS]:9, ,LA[LUS]:7:3, ,A[LUS]:8.
28300 ,B[LUS]:7:3, ,CORR[LUS]:8:4, ,MI[LUS]:7,
28350 ,TNUL[LUS]:4:2, ,GAMM[LUS]:8):
28400 CLOSE(UIT,SAVE);
28500 END.

```

## Appendiks 5

## Afleiding iteratie methode van Newton

Er wordt uitgegaan van de volgende drie vergelijkingen:

$$\gamma_1 = \left\{ BB/AA - \ln(4a/V^2 C_E^*) \right\} / 2 \quad (21) \text{ omgewerkt}$$

$$\gamma_2 = \left\{ (\alpha - 2)V^2 \ln(4a/V^2 C_E^*) + V^2 \alpha - 2\alpha a t_0 \right\} / 4V^2 \quad (20) \text{ omgewerkt}$$

$$\alpha = 2\pi V^2 \rho C / C_l \quad (19)$$

nu is  $2\gamma_1 = 2\gamma_2$

$$BB/AA - \ln(4a/V^2 C_E^*) = \left(\frac{\alpha}{2} - 1\right) \ln(4a/V^2 C_E^*) + \frac{1}{2}\alpha - \alpha a t_0 / V^2$$

$$BB/AA = \frac{\alpha}{2} \left\{ \ln(4a/V^2 C_E^*) + 1 - 2at_0/V^2 \right\}$$

$$\alpha = 2 BB/AA \left\{ \ln(4a/V^2 C_E^*) + 1 - 2at_0/V^2 \right\}^{-1} = 2\pi V^2 \rho C / C_l$$

$$\rho C = C_l BB / \left\{ AA \pi V^2 \left[ \ln(4a/V^2 C_E^*) + 1 - 2at_0/V^2 \right] \right\} \quad (40)$$

echter  $a = \lambda / \rho C$

$$\ln(4\lambda / C_E^* \rho C V^2) + 1 - 2\lambda t_0 / \rho C V^2 = C_l BB / AA \pi \rho C V^2$$

Stel nu  $\gamma = 1 / \rho C V^2$  en  $P = e \cdot 4\lambda / C_E^* \rho C V^2$

$$\text{Dan is } \ln(P\gamma) = \gamma \left\{ C_l BB / AA \pi + 2\lambda t_0 \right\}$$

noem vervolgens  $Q = C_l BB / AA \pi + 2\lambda t_0$ ,  $P, Q$  en  $\gamma > 0$

$$\text{dan ontstaat de volgende functie } f(\gamma) = \ln(P\gamma) - Q\gamma = 0 \quad (41)$$

Een voorwaarde is dat  $f(y)$ ,  $f'(y)$  en  $f''(y) > 0$  zijn

Dit geldt niet voor (41). Daarom wordt een tweede vergelijking opgesteld

$$\begin{aligned} f_2(y) &= e^{py} - Qy & (42) \\ f_2'(y) &= pe^{py} - Q \end{aligned} \quad f_2'(y) > 0 \text{ mits } y > \frac{1}{p} \ln(Q/p)$$

Nu geldt volgens Newton de volgende iteratieve methode [ ]:

$$y_n = \frac{-f_2(y_{n-1})}{f_2'(y_{n-1})} + y_{n-1} \quad \text{met } n \text{ de opeenvolgende iteratiestap}$$

ofwel

$$y_n = \frac{(py_{n-1} - 1) e^{py_{n-1}}}{p e^{py_{n-1}} - Q} \quad (29)$$

# Appendiks b : Listing NAALD3

A6.1

WILKO/NAALD3

DATE & TIME PRINTED: WEDNESDAY, NOVEMBER 20, 1985 @ 15:17:40.

```

100 {%%%%%%%%%%
200 %%%
300 %%% Dit programma verwerkt de metingen, zoals gedaan %%%
400 %%% worden met de in Wageningen ontwikkelde lambda- %%%
500 %%% naalden. Er wordt ter plaatse een warmtegeleidings- %%%
600 %%% koëfficiënt, een warmtecapaciteit en een kontakt- %%%
700 %%% weerstand uitgerekend met behulp van het gemodifi- %%%
800 %%% ceerde Jaegermodel. %%%
900 %%%
1000 %%%}
1100 PROGRAM BASIS (INPUT,OUTPUT,
1200 METING : FILE <KIND = DISK ,
1300 NEWFILE = FALSE >,
1400 UIT : FILE <KIND = PRINTER >);
1500 CONST A0 =37.691;
1600 B0 =0.0445;
1700 C0 =0.00037;
1800 TYPE GROOT =ARRAY [1..684] OF REAL;
1900 KLEIN =ARRAY [1..350] OF REAL;
2000 ARR =ARRAY [-1..50] OF REAL;
2100 NAALR =ARRAY [3..40] OF REAL;
2200 WOORD =PACKED ARRAY [1..14] OF CHAR;
2300 VAR NULM :BOOLEAN;
2400 I, IO, LUS, NLUS, NIT, NR, M, W :INTEGER;
2500 A1, AA, BB, ATO, BTO, MID, CORRE, VARI,
2600 ALFA, LABDA, LABDA2, GAMMA, GAMMA1, GAMMA2,
2700 E, E1, Q1, Q3, CL, TO, VO, VO2, DVO, PI, TE,
2800 TB, DT, ROC, P, Q, Y, YN,
2900 REFF, SCHAAL, TOM, U, V, VIN, WLI, LAY :REAL;
3000 NAAM, IETS :WOORD;
3100 VMEET :GROOT;
3200 TM :KLEIN;
3300 DG, ROCE :ARR;
3400 R, REF, DREF, LAYK, DLAYK :NAALR;
3500 METING :TEXT;
3600 UIT :TEXT;
3700 {-----}
3800 %%% PROCEDURE LINREG
3900 -----}
4000 PROCEDURE LINREG( F, G,
4100 K, L :INTEGER;
4200 E :REAL;
4300 VAR CORRE :REAL; {KORRELATIE KOEF}
4400 VAR AA :REAL; {HELLING}
4500 VAR BB :REAL; {ASAFSNIJDING}
4600 VAR MID :REAL; {MIDD FOUT}
4700 VAR SOMX, SOMY, SOM2X, SOM2Y,
4800 SOMXY, VARI, X, Y :REAL;
4900 I :INTEGER;
5000 BEGIN
5100 SOMX:=0; SOMY:=0; SOM2X:=0; SOM2Y:=0; SOMXY:=0; MID:= 0;
5200 FOR I:=K TO L DO
5300 BEGIN
5400 CASE F OF
5500 1: X:=TM[I];
5600 2: X:=TM[I]-E*LN(I*DT)/I;
5700 END;
5800 CASE G OF

```

```

5900         1: Y:=LN(I*DT):
6000         2: Y:=LN(I*DT+T0):
6100         END:
6200         SOMX:= SOMX + X;
6300         SOMY:= SOMY + Y;
6400         SOM2X:=SOM2X+X*X;
6500         SOM2Y:=SOM2Y+Y*Y;
6600         SOMXY:=SOMXY+X*Y
6700         END;
6800         L:=L-K+1: { L IS NU HET AANTAL PUNTEN }
6900         VARI:=L*SOM2Y-SOMY*SOMY;
7000         AA:=(L*SOMXY-SOMX*SOMY)/VARI;
7100         BB:=(SOM2Y*SOMX-SOMY*SOMXY)/VARI;
7200         CORRE:=AA*AA*VARI/(SOM2X*L-SOMX*SOMX);
7300         CORRE:=SQRT(ABS(CORRE));
7400         FOR I:=K TO K+L-1 DO
7500             MID:= MID + SQR(X- (AA*Y + BB));
7600             MID:= SQRT(MID/(L-2));
7700         END: {EINDE LINREG }
7800         {-----}
7900         %%%      LEESPROCEDURE : LEES
8000         {-----}
8100         PROCEDURE LEES( VAR MEET : REAL);
8200             VAR IETS :WOORD;
8300                 TEKEN,
8400                 L,K :INTEGER;
8500                 GETAL:REAL;
8600         BEGIN READLN(METING,IETS);
8700             WHILE (IETS[12]<>'M') AND NOT(EOF(METING))
8800                 DO READLN(METING,IETS);
8900             IF IETS[5]='-' THEN TEKEN:=-1 ELSE TEKEN:=1;
9000             K:=ORD('0'); GETAL:=0;
9100             FOR L:=6 TO 11 DO
9200                 IF L<>8 THEN GETAL:=GETAL*10+ ORD(IETS[L])-K;
9300             GETAL:=TEKEN*GETAL/1000;
9400             IF EOF(METING) THEN GETAL:=99999;
9500             MEET:=GETAL
9600         END;
9700         {-----}
9800         %%%      LEESPROCEDURE : LEESTIJD
9900         {-----}
10000        PROCEDURE LEESTIJD(VAR TIJD:REAL);
10100            VAR IETS:WOORD;
10200                L,K:INTEGER;
10300                GETAL:REAL;
10400        BEGIN READLN(METING,IETS);
10500            K:=ORD('0'); GETAL:=0;
10600            FOR L:=1 TO 3 DO BEGIN GETAL:=GETAL* 6+ORD(IETS[3*L])-K;
10700                GETAL:=GETAL*10+ORD(IETS[3*L+1])-K END;
10800            TIJD:=GETAL
10900        END;
11000        BEGIN
11100            {-----}
11200            %%%      BEGIN PROGRAMMA: INITIALISATIE VAN DE PARAMETERS
11300            {-----}
11400            R[ 3]:=13.7;           R[36]:=15.87;
11500            R[ 8]:=15.0;           R[37]:=13.83;   {R = ELEKTRISCHE WEERSTAND }
11600            R[ 9]:=15.8;           R[38]:=19.17;   {   VAN DE STOOKDRAAD   }
11700            R[34]:=14.6;           R[39]:=15.67;
11800            R[35]:=15.13;          R[40]:=14.57;
11900            REF[ 3]:=0.19;         DREF[ 3]:=0.01;
12000            REF[ 8]:=0.29;         DREF[ 8]:=0.015; {REF = EFFEKTIEVE STRAAL }

```



```

12100      REF[ 9]:=0.40:      DREF[ 9]:=0.035: {      VAN DE LABDANAALD      }
12200      REF[34]:=0.32:      DREF[34]:=0.04 : {      [mm]      }
12300      REF[35]:=0.32:      DREF[35]:=0.01 : {DREF= D REF/ D TEMP      }
12400      REF[36]:=0.18:      DREF[36]:=0.025: {      [mm/°C]      }
12500      REF[37]:=0.17:      DREF[37]:=0.02 ;
12600      REF[38]:=0.17:      DREF[38]:=0.02 : {DIT IS NIET GEMETEN      }
12700      REF[39]:=0.18:      DREF[39]:=0.02 ;
12800      REF[40]:=0.15:      DREF[40]:=0.02 ;
12900      LAYK[ 3]:=0.70:      DLAYK[ 3]:=0.10 ;
13000      LAYK[ 8]:=0.705:     DLAYK[ 8]:=0.115;
13100      LAYK[ 9]:=0.635:     DLAYK[ 9]:=0.075;
13200      LAYK[34]:=0.73 ;     DLAYK[34]:=0.11 ;
13300      LAYK[35]:=0.725:     DLAYK[35]:=0.105;
13400      LAYK[36]:=0.73 ;     DLAYK[36]:=0.10 ;
13500      LAYK[37]:=0.695:     DLAYK[37]:=0.115;
13600      LAYK[38]:=0.000:     DLAYK[38]:=0.000;
13700      LAYK[39]:=0.71 :     DLAYK[39]:=0.11 ;
13800      LAYK[40]:=0.75 ;     DLAYK[40]:=0.10 ;
13900      AA:=0; BB:=0; CORRE:=0; MID:=0;
14000      VO:=0; VO2:=0;
14100      PI:=4*ARCTAN(1);
14200      { AO IN MIKROVOLTS PER GRAAD CELCIUS; DE METING IS *1067 mV
14300      DUS DE SCHAAL IS 1.067
14400      SCHAAL:=1.067;
14500      WRITELN('Welke file wil je lezen? ');
14600      READLN(NAAM);
14700      RESET(METING);
14800      REWRITE(UIT);
14900      {-----
15000      %%%      INLEZEN VAN DE MEETGEGEVENS
15100      -----}
15200      WRITELN(UIT,NAAM);
15300      WRITELN('Naaldnummer');
15400      READLN(NR);
15500      WRITELN('Omgevingstemperatuur =°C');
15600      READLN(TOM);
15700      IF NR=3 THEN V:=1 ELSE V:=2;
15800      WRITELN(UIT,'Omgevingstemperatuur =',TOM:6:2,'°C      Naalddikte =',
15900      V:2,' mm');
16000      WRITELN('Stookspanning [V]');
16100      READLN (VIN);
16200      WRITELN(UIT,'Stookspanning      = ',VIN:7:4,' V      Naaldnr =',
16300      NR);
16400      WRITELN('Is de 100 MUVolt-schaal gebruikt?      (1=JA/0=NEE)');
16500      READLN(W);
16600      IF W=1 THEN SCHAAL:=SCHAAL*0.3;
16700      LEES(VMEET[1]); I:=1;
16800      WHILE NOT EOF(METING) DO BEGIN I:=I+1;
16900      IF I=30 THEN LEESTIJD(TB);
17000      IF I=330 THEN LEESTIJD(TE);
17100      LEES(VMEET[I])
17200      END;
17300      WRITELN(' ROCE-start [E6 J/m3/K]',
17400      ' en aantal lussen');
17500      READLN(ROC,NLUS);
17600      WRITELN('AANTAL MEETWAARDEN = ',I);
17700      {-----
17800      %%%      REKENDEEL
17900      -----}
18000      DT:=(TE-TB)/300;
18100      REFF:=REF[NR]+DREF[NR]*(TOM-15)/35; REFF:=REFF/1000;
18200      LAY:=LAYK[NR]+DLAYK[NR]*(TOM-20)/30;

```

```

18300 IF NR=3 THEN V:=1 ELSE V:=2: {NAALDDIAMETER IN mm}
18400 V:=V*0.5E-3; U:=V-2E-4;
18500 E1:=LN(4/V/V/1.78107); {KONSTANTE VAN EULER =1.78107}
18600 Q1:=119.333* SQR(VIN/R[ NR]) /4/PI; { Q1=R*I*I/4PI}
18700 NULM:=TRUE;
18800 ROC:=ROC*1E6; ROCE[0]:=ROC;
18900 WRITELN(UIT, 'Het stookvermogen per meter is ', Q1*4*PI:10, ' W');
19000 { BEPALING VAN DE "NUL"-SPANNING}
19100 IO:=1;
19200 WHILE NULM DO
19300 BEGIN
19400 IO:=IO+1;
19500 NULM:=((VMEET[ IO]-VMEET[ IO-1])<0.5);
19600 IF NULM THEN VO:=VO+VMEET[ IO];
19700 IF NULM THEN VO2:=VO2+SQR(VMEET[ IO])
19800 END;
19900 IO:=IO-1;
20000 IF IO>120 THEN WRITELN('TE VEEL NULMETINGEN: MEETFILE VERKLEI',
20100 'NEN');
20200 VO:=VO/IO;
20300 DVO:=-VO*VO+VO2/IO;
20400 DVO:=ABS(DVO)*1E6;
20500 IF IO=1 THEN DVO:=0 ELSE DVO:=SQR(DVO/(IO-1))/1000;
20600
20700 WRITELN(UIT, 'Beginspanning= ', VO:10, ' Nauwkeurigheid= ', DVO:8,
20800 ' Aantal nulmetingen: ', IO:3);
20900 WRITELN(UIT, ' ');
21000 { REKEN GEMETEN SPANNING OM IN TEMPERATUURVERSCHILLEN }
21100 ATO:=AO + 2*BO*TOM + 3*CO*TOM*TOM;
21200 BTO:=BO + 3*CO*TOM;
21300 FOR I:=IO+1 TO IO+333 DO
21400 BEGIN
21500 VMEET[ I]:=(VMEET[ I]-VO)/SCHAAL;
21600 TM[ I-IO]:=(-ATO+SQR(ATO*ATO+4*BTO*VMEET[ I]))/2/BTO
21700 END;
21800 {-----}
21900 %%% BLOK1 : TEMP= B + A LN[t] %%%
22000 {-----}
22100 E:=0;
22200 LINREG(1,1,160,330,E,CORRE,AA,BB,MID);
22300 LABDA:=Q1/AA;
22400 {-----}
22500 %%% BLOK2 : TEMP MET LN[t]/t KORREKTIE %%%
22600 {-----}
22700 IF V=1E-3 THEN CL:=5.054 ELSE CL:=1.997;
22800 { CL:=PI*((V*V-U*U)*CRVS+U*U*CVUL+0.05*0.05* CSTOOK }
22900 IF NLUS>20 THEN NLUS:=20;
23000 WRITELN(UIT, ' ');
23100 WRITELN(UIT, ' T1 T2 TO GAMMA ',
23200 ' ROCE LABDA KORR KOEFF ',
23300 ' MIDD FOUT IN LIJN HELLING ASAFSN YKFAKTOR');
23400 WRITELN(UIT, ' ');
23500 LUS:=1;
23600 TO:=0;
23700 FOR LUS:=1 TO NLUS DO BEGIN {NLUS ITERATIES OVER DE GEHELE}
23800 ALFA:= 2*PI*V*V*ROCE[ LUS-1]/CL;
23900 E:=(ALFA-2)*ROCE[ LUS-1]*Q1*V*V/2/LABDA/LABDA/ALFA/DT;
24000 LINREG(2,1,160,330,E,CORRE,AA,BB,MID);
24100 WRITELN('AA=', AA:10, ' BB=', BB:10);
24200 LABDA2:=Q1/AA; A1:=LABDA2/ROCE[ LUS-1];
24300 NIT:=4;
24400 P:=2*LABDA*TO+CL*BB/AA/PI;

```

```

24500      Q:=4*LABDA/1.78107; O:=Q*EXP(1);
24600      Y:=1/V/V/ROC;
24700      WRITELN('^'):
24800      FOR M:=1 TO NIT DO BEGIN          { NIT ITERATIES OVER ROCE }
24900          YN:=(Y*P-1)*EXP(P*Y)/(P*EXP(P*Y)-Q); Y:=YN;
25000          ROC:=1/V/V/Y;
25100          WRITE('ROCit=',ROC:10,' ');
25200      END;
25250      ROC:=ABS(ROC);
25300      WRITELN('^'):
25400      {-----}
25500      %%%      BLOK3      : TEMP MET LN(t)/t EN LN(t-t0) KORREKTIE
25600      {-----}
25700      FOR M:=1 TO 3 DO BEGIN              { 3 ITERATIES OVER LABDA }
25800          LABDA:=LABDA2; A1:=LABDA/ROC;
25900          ALFA:=2*PI*V*V*ROC/CL;
26000          E:=(ALFA-2)*ROC*Q1*V*V/2/LABDA/LABDA/ALFA/DT;
26100          Q3:=((ALFA-2)*(E1+LN(A1))+ALFA)/4;
26200          FOR W:=-1 TO 1 DO IF W<>0 THEN
26300              BEGIN TO:=W;
26400                  LINREG(2,2, 160,330,E,CORRE,AA,BB,MID);
26500                  GAMMA1:=Q3-0.500*ALFA*A1*TO/V/V;
26600                  GAMMA2:=0.500*((BB/AA)-LN(A1)-E1);
26700                  DG[W]:=GAMMA1-GAMMA2;
26800              END;
26900              TO:=-((DG[1]+DG[-1])/(DG[1]-DG[-1])); {DG(TO)=0}
27000              LINREG(2,2, 160,330,E,CORRE,AA,BB,MID);
27100              LABDA2:=Q1/AA; A1:=LABDA2/ROC;
27200              WRITE('L2= ',LABDA2:7:4,' ');
27300          END; {M-STAP}
27400          LABDA:=LABDA2;
27500          TE:=330*DT;
27600          ROCE[LUS]:=ROC;
27700          GAMMA1:=Q3-0.500*ALFA*A1*TO/V/V;
27800          GAMMA2:=0.500*((BB/AA)-LN(A1)-E1);
27900          GAMMA:=(GAMMA1+GAMMA2)/2;
28000          WLI:=(LN(U/REFF)/0.190+LN(V/U)/16.3)/2/PI;
28100          GAMMA:=GAMMA/2/PI/LABDA-WLI;
28200          {-----}
28300          %%%      UITVOER      %%%
28400          {-----}
28500          WRITELN(UIT,150*DT:5:1,' ',TE:5:1,' ',TO:5:1,GAMMA:13:2,
28600                  ' ',ROC:9,' ',LABDA:7:3,CORRE:11:4,' ',MID:9,
28700                  ' ',AA:9,' ',BB:8,LABDA/LAY:10:3);
28800      END; { LUS-STAP }
28900      CLOSE(UIT,SAVE);
29000  END.

```

# App 7.1 Afleiding differentieschema GELEIDING A3.1

Uitgegaan wordt van de vergelijking

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(a(\nabla T)) + \iint \frac{\phi}{\rho C \Delta V} dA$$

met  $\phi$  een warmtestroom [ $W/m^2$ ]

$V$  een volume element

$A$  het oppervlak

$\rho C$  de effectieve warmtecapaciteit

$x$  de breedte coördinaat

$y$  de hoogte coördinaat (in de overige  $\delta\delta$  z-richting)

Omdat in  $y$  richting de grootste verschillen in de warmtevereffeningscoëfficiënt worden verwacht, houdt het differentieschema slechts rekening met verschillen in verticale richting.  $a$  is overigens wel plaatsafhankelijk  $a(x,y)$

$$\frac{T_{x,y,t} - T_{x,y,t-1}}{\Delta t} = a(x,y) \left\{ \frac{T_{x-1,y,t-1} - 2T_{x,y,t-1} + T_{x+1,y,t-1}}{2\Delta x^2} \right\}$$

$$+ \frac{a(x,y-1)T_{x,y-1,t} - 2a(x,y)T_{x,y,t} + a(x,y+1)T_{x,y+1,t}}{2(\Delta y)^2}$$

$$+ \frac{\phi \Delta A}{\rho C \cdot Br \Delta x \Delta y}$$

met  $Br$  de breedte van de buik

$\Delta A$  het oppervlak waar de warmte doorstraamt

ofwel

$$\frac{\Delta t}{2\Delta y^2} \left\{ [a(x,y-1) - a(x,y) + a(x,y+1)] T_{x,y-1,t} + [1 - 2a(x,y)] T_{x,y,t} \right.$$

$$\left. + [a(x,y-1) - a(x,y) - a(x,y+1)] T_{x,y+1,t} \right\} =$$

$$\frac{a(x,y) \Delta t}{2(\Delta x)^2} \left\{ T_{x-1,y,t-1} - 2T_{x,y,t-1} + T_{x+1,y,t-1} \right\} + \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} T_{x,y,t-1}$$

$$+ \frac{\phi \Delta A}{\rho C \cdot Br \Delta x \Delta y}$$

ook te schrijven als

$$A(x,y) T_{x,y-1,t} + B(x,y) T_{x,y,t} + C(x,y) T_{x,y+1,t} = D(x,y)$$

Dit vormt een stelsel vergelijkingen, die gerangschikt kunnen worden in een tri-diagonaal matrix, hetgeen opgelost kan worden met de Thomas algoritme [12]

Het warmte verlies  $\dot{Q}$  dit door de voor- en achterkant van de balk is

$$\dot{Q} dA = \frac{-\lambda_{iso}}{d_{iso}} (T_{x,y,t=1} - T_{buiten}) z \, dx \, dy$$

met  $d_{iso}$  de dikte van de isolatie laag en

$\lambda_{iso}$  de warmtegeleidingscoëfficiënt hiervan.

Voor de linker- en bovenzijde is het verlies oppervlakte voor één element

$$dA = z \, dx \, dy + dx \cdot Br$$

Voor de linker- en rechter zijde

$$dA = z \, dx \, dy + dy \cdot Br$$

Voor de stookplaat ( $0 \leq x \leq Nx/2, y=0$ ) komt er nog een randvoorwaarde bij; er is een extra warmte stroom  $Q_{in} / \frac{1}{2} L \cdot Br$

(de stookplaat beslaat de halve lengte  $L$  van de balk, en de gehele breedte)

Tenslotte de randvoorwaarde bij de koelplaat ( $\frac{1}{2} Nx \leq x \leq Nx, y=0$ ).

Deze is een stuk eenvoudiger:  $T = T_{BOUTEN}$ .

```

100      %%%%%%%%%%%
200      %%%
300      %%% WILKO/GELEIDING
400      %%% DIT PROGRAMMA REKENT DE TEMPERATUUR IN ONVERZADIGDE %%%
500      %%% GROND UIT ALS GEVOLG VAN VERWARMING VAN ONDEREN EN %%%
600      %%% VARIABELE VOCHTIGHEID. ER WORDT HIERBIJ NIET IN %%%
700      %%% DE Z-RICHTING (BREEDTE) GEREKEND %%%
800      %%%
900      %%%%%%%%%%%
1000     BEGIN
1100     BOOLEAN BTEMP:
1200     INTEGER DT,NT,T,NX,X,NY,Y,UUR,NUIT,TBEGIN,NR:
1300     REAL A1,CPW,CPG,N,L,LPUR,DPUR,H,BR,
1400     PHI,PI,TBOVEN,TBU,QIN,QUIT,DX,DY,ROW,ROG,LABDAG,LABDAW;
1500     FILE REM(KIND=REMOTE,MYUSE=IO),
1600     UIT2(KIND=PRINTER),
1700     VOCHT(KIND=DISK,MAXRECSIZE=15,MYUSE=IO,FILETYPE=7,NEWFILE=FALSE),
1800     LAMBDA(KIND=DISK,MAXRECSIZE=15,MYUSE=IO,FILETYPE=7,NEWFILE=FALSE),
1900     BAK(KIND=DISK,MAXRECSIZE=15,MYUSE=IO,FILETYPE=7,NEWFILE=FALSE),
2000     BAK2(KIND=DISK,MAXRECSIZE=15,MYUSE=IO,FILETYPE=7,NEWFILE=FALSE);
2100     WRITE(REM,<"Proefnummer, Begintijd [uur] ">);
2200     READ(REM,/ ,NR,TBEGIN);
2300     WRITE(UIT2,<"Proefnummer ",I2,X4,"Begintijd ",I2>,NR,TBEGIN);
2400     WRITE(REM,<"Tijdsduur=.uur",/,
2500     "Er wordt niet in de breedte gerekend">);
2600     READ(REM,/ ,NT);
2700     NX:=6; NY:=6;
2800     BEGIN REAL ARRAY AEFF,ROCE[0:NX,-1:NY+1];
2900     REAL ARRAY AA,BB,CC,D[0:NY];
3000     REAL ARRAY TEM[0:20];
3100     REAL ARRAY A,B,C,LAB,TEMP,HULP,HUM[0:NX,0:NY];
3200     %-----
3300     %%% PROCEDURES
3400     %-----
3500     REAL PROCEDURE THOMAS(I,J,A,B,C,D,TEM):
3600     VALUE I,J: INTEGER I,J:
3700     REAL ARRAY A,B,C,D,TEM[*]:
3800     BEGIN INTEGER K; REAL F; REAL ARRAY P,Q[I:J];
3900     P[I]:=B[I]; Q[I]:=D[I];
4000     FOR K:=I+1 STEP 1 UNTIL J DO
4100     BEGIN F:=A[K]/P[K-1];
4200     P[K]:=B[K]-F*C[K-1];Q[K]:=D[K]-F*Q[K-1]
4300     END;
4400     TEM[J]:=Q[J]/P[J];
4500     FOR K:=J-1 STEP -1 UNTIL I DO TEM[K]:=(Q[K]-C[K]*TEM[K+1])/P[K]
4600     END THOMAS;
4700     %-----
4800     %%% INITIALISATIE VAN DE PARAMETERS %%%
4900     %-----
5000     DT:=15*60;
5100     L:=.3; BR:=.2; H:=.3;
5200     NT:=NT*3600/DT;
5300     DX:=L/NX; DY:=H/NY;
5400     PI:=4*ARCTAN(1);
5500     CPW:=4200; CPG:=850; ROG:=2.67@3; ROW:=1@3;
5600     LABDAW:=5.0; LPUR:=.036; DPUR:=.10;
5700     N:=40; TBU:=20.2;
5800     FOR X:=0 STEP 1 UNTIL 6 DO READ(VOCHT,/ ,HUM[X,*]);

```

```

5900   FOR X:=0 STEP 1 UNTIL 6 DO READ(LAMBDA./,LAB[X.*]):
6000   WRITE(REM,<"Moet de begintemperatuur de omgevingstemperatuur",
6100     "zijn (TRue/FALse)">):
6200   READ(REM,/ ,BTEMP):
6300   IF NOT BTEMP THEN FOR X:=0 STEP 1 UNTIL 6 DO READ(BAK./,TEMP[X.*]):
6400   FOR X:=0 STEP 1 UNTIL 6 DO FOR Y:=0 STEP 1 UNTIL 6 DO
6500     IF BTEMP THEN TEMP[X,Y]:=TBU:
6600     WRITE(REM,<"Moet de as. begintemperatuur aansluiten op de eindtem-",
6700       /,"peratuur van deze laatste berekening? (TRue/FALse)">):
6800     READ(REM,/ ,BTEMP):
6900     WRITE(REM,<"Stookstroom [mA], Tkoelwater, aantal uitvoer?">):
7000     READ(REM./,QIN,TBOVEN,NUIT): QIN:=482*(QIN/1000)**2;
7100     WRITE(REM,<"Labda van de droge grond? [W/mK]",/,"Indien een 0 wordt",
7200       " ingetikt wordt de FILE LAMBDA gebruikt als labda-eff.">):
7300     READ(REM,/ ,LABDAG):
7400     WRITE(UIT2,<"POROSITEIT= ".F6.1,"% WIN= ".F6.1," W",
7500       " Labda grond= ".F5.1,/ ,N,QIN,LABDAG):
7600     N:=N/100:
7700     FOR X:=0 STEP 1 UNTIL NX DO
7800     FOR Y:=0 STEP 1 UNTIL NY DO
7900       BEGIN
7950         IF LABDAG=0 THEN HUM[X,Y]:=(LAB[X,Y]-(1-N)*0.82)/N/0.62;
7960         % DE ECHE GELEIDINGSKOEFF VAN WATER IS 0.62, DE EFFEKTIEVE
7966         % WAARDE KAN GROTER ZIJN
7970         IF HUM[X,Y]>0.8 THEN HUM[X,Y]:=0.8:
7980         IF HUM[X,Y]<0 THEN HUM[X,Y]:=0:
8000         ROCE[X,Y]:=(1-N)*ROG*CPG+N*HUM[X,Y]*ROW*CPW:
8100         AEFF[X,Y]:=((1-N)*LABDAG+N*HUM[X,Y]*LABDAW)/ROCE[X,Y]:
8200         IF LABDAG =0 THEN AEFF[X,Y]:=LAB[X,Y]/ROCE[X,Y]:
8300       END:
8400     FOR Y:=0 STEP 1 UNTIL NY DO
8500     FOR X:=0 STEP 1 UNTIL NX DO BEGIN
8600       A[X,Y]:=(-AEFF[X,Y-1]-AEFF[X,Y]+AEFF[X,Y+1])*DT/DY/DY:
8700       B[X,Y]:=1+2*AEFF[X,Y]*DT/DY/DY;
8800       C[X,Y]:=(AEFF[X,Y-1]-AEFF[X,Y]-AEFF[X,Y+1])*DT/DY/DY
8900     END:
9000     FOR X:=0 STEP 1 UNTIL NX DO C[X,0]:=C[X,0]+A[X,0]:
9100     FOR X:=0 STEP 1 UNTIL NX/2 DO A[X,NY]:=A[X,NY]+C[X,NY]:
9200     FOR X:=NX/2+1 STEP 1 UNTIL NX DO
9300       BEGIN A[X,NY]:=0; B[X,NY]:=1 END:
9400     %-----
9500     %%% REKENDEEL
9600     %-----
9700     FOR T:=1 STEP 1 UNTIL NT DO
9800       BEGIN QUIT:=BR*DY*AEFF[2,NY]*ROCE[2,NY]*DT*(TEMP[NX/2-1,NY]
9900         -TBOVEN)/DX/2;
10000    FOR X:=0 STEP 1 UNTIL NX DO
10100      BEGIN FOR Y:=0 STEP 1 UNTIL NY DO
10200        BEGIN A1:=AEFF[X,Y]*DT/DX/DX:
10300        PHI:=-LPUR*DT*(TEMP[X,Y]-TBU)/DPUR/ROCE[X,Y];
10400        IF (X NEQ 0 AND X NEQ NX) THEN D[Y]:=A1*TEMP[X+1,Y]
10500          +(1-2*A1)*TEMP[X,Y]+A1*TEMP[X-1,Y]+PHI*2/BR:
10600        IF (X=0) THEN D[Y]:=2*A1*TEMP[X+1,Y]
10700          +(1-2*A1)*TEMP[X,Y]+PHI*(2/BR+1/DX):
10800        IF(X=NX) THEN D[Y]:=(1-2*A1)*TEMP[X,Y]
10900          +2*A1*TEMP[X-1,Y]+PHI*(2/BR+1/DX):
11000        IF Y=0 OR Y=NY THEN D[Y]:=D[Y]+PHI/DY:
11100        IF Y=0 AND X<=NX/2 THEN IF X=NX/2
11200          THEN D[Y]:=D[Y]+2*QIN*DT/ROCE[X,Y]/L/DY/BR
11300          ELSE D[Y]:=D[Y]+4*QIN*DT/ROCE[X,Y]/L/DY/BR:
11400        IF Y=NY AND X>NX/2
11500          THEN BEGIN D[Y]:=TBOVEN:

```

```

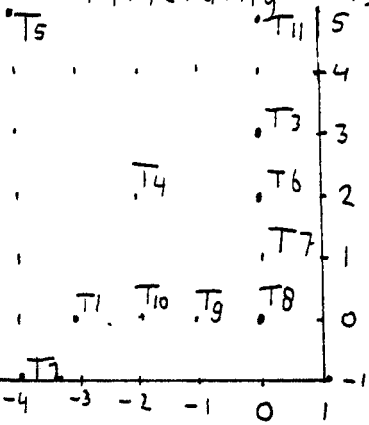
11600          QUIT:=QUIT+BR*DX*AEFF[X,Y]*ROCE[X,Y]*DT
11700          *(TEMP[X,NY-2]-TBOVEN)/DY/2
11800          END;
11900
12000          AA[Y]:=A[X,Y]: BB[Y]:=B[X,Y]: CC[Y]:=C[X,Y]:
12100          END;
12200          THOMAS(O,NY,AA,BB,CC,D,TEM): IF X=NX THEN TEM[NY]:=(TEM[NY]
12300          +TBOVEN)/2;
12400          FOR Y:=0 STEP 1 UNTIL NY DO HULP[X,Y]:=TEM[Y]
12500          END; %9100, X-STAP
12600          FOR X:=0 STEP 1 UNTIL NX DO
12700          FOR Y:=0 STEP 1 UNTIL NY DO TEMP[X,Y]:=HULP[X,Y]:
12800          %-----
12900          %%%%      UITVOER
13000          %-----
13100          IF(NUIT*T MOD NT) =0 THEN
13200          BEGIN WRITE(UIT2,</>): FOR Y:=NY STEP -1 UNTIL 0 DO
13300          WRITE(UIT2,<7(F8.3,X5)>,TEMP[0,Y],TEMP[1,Y],TEMP[2,Y],
13400          TEMP[3,Y],TEMP[4,Y],TEMP[5,Y],TEMP[6,Y]):
13500          WRITE(UIT2,</"Wuit= ",E10.3," W Tboven=",F5.1,"^C Tbuiten="
13600          F5.1,"^C tijd=",F6.2,"uur",/>,QUIT/DT,TBOVEN,
13700          TBU,T*DT/3600):
13800          TEM[1]:=TEMP[2,1];
13900          TEM[2]:=TEMP[1,0];
14000          TEM[3]:=TEMP[5,4];
14100          TEM[4]:=TEMP[3,3];
14200          TEM[5]:=TEMP[1,6];
14300          TEM[6]:=TEMP[5,3];
14400          TEM[7]:=TEMP[5,2];
14500          TEM[8]:=TEMP[5,1]; %
14600          TEM[9]:=TEMP[4,1]; % PLAATS DATALOGGERKANAAL WORDT AANGEPAST
14700          TEM[10]:=TEMP[3,1]; % AAN PLAATS THERMOKOPPEL IN DE BAK
14800          TEM[11]:=TEMP[5,6]; %
14900          TEM[12]:=18 ;
15000          TEM[13]:=TEMP[1,1];
15100          TEM[14]:=TEMP[1,2];
15200          TEM[15]:=TEMP[1,3];
15300          TEM[16]:=TEMP[1,5];
15400          TEM[17]:=TEMP[3,5];
15500          TEM[18]:=TEMP[5,5];
15600          FOR N:=6 STEP -1 UNTIL 1 DO
15700          WRITE(UIT2,<3(I2,X3,F5.2,X22)>,N+12,TEM[N+12],N+6 ,TEM[N+6],N,
15800          TEM[N]):
15900          WRITE(UIT2,<///>):
16000          END; % EINDE UITVOER
16100          END; % EINDE T-STAP
16200          %-----
16300          %%%% LAATST UITGEREKENDE TEMPERATUUR KOMT IN BAK2
16400          %-----
16500          LOCK(BAK,CRUNCH);
16600          REWIND(BAK2);
16700          FOR X:=0 STEP 1 UNTIL NX DO
16800          WRITE(BAK2,<7(F9.3,"")>,HULP[X,*]);
16900          IF BTEMP THEN FOR X:=0 STEP 1 UNTIL 6 DO WRITE(BAK,<7(F9.3,"")>,
17000          HULP[X,*]);
17100          LOCK(BAK2,CRUNCH);
17200          END
17300          END.

```



# Appendiks 9 afleiding EKSTRA

## Afleiding extrapolatie /20 tot 51



Centraal in het schema staat  $T_8$  op  $(0,0)$

Er geldt:  $T(x,y) = A + Bx + Cy + Dx^2 + Ey^2 + Fxy$

Van de volgende relaties wordt uitgegaan:

$$T_8 = A$$

$$T_{10} = A - 2B + 4D$$

$$T_1 = A - 3B + 9D$$

$$T_6 = A + 2C + 4E$$

$$T_3 = A + 3C + 9E$$

$$T_5 = A - 4B + 5C + 16D + 25E - 20F$$

dus  $A = T_8$

$$B = (4T_1 - 9T_{10} + 5T_8) / 6$$

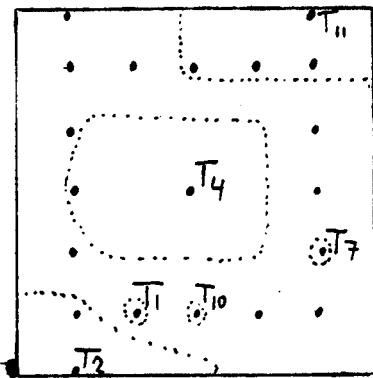
$$C = (-4T_3 + 9T_6 - 5T_8) / 6$$

$$D = (2T_1 - 3T_{10} + T_8) / 6$$

$$E = (2T_3 - 3T_6 + T_8) / 6$$

$$F = (8T_1 + 15T_3 - 3T_5 - 15T_6 + 6T_{10}) / 60$$

Voor de extrapolatie met  $T_9$  i.p.v.  $T_{10}$  geldt een overeenkomstig schema.



De overige temperatuurpunten worden op  $T(x,y)$  gesuperponeerd, b.v.  $T(3,3) = T_4$ . Verder hebben de 5 ekstra temperaturen invloed op het gebied binnen de stippellijn; in gebied  $\approx \frac{1}{2}$

bijvoorbeeld:

$$T(3,4) = T_{xy}(3,4) + (T_4 - T_{xy}(3,4)) / 2$$

$$T(1,3) = T_{xy}(1,3) + (T_4 - T_{xy}(1,3)) / 4$$

# Appendiks 10 Listing EKSTRA/20TOT51

A 10.1

WILKO/EKSTRA/20TOT51

DATE & TIME PRINTED: WEDNESDAY, NOVEMBER 20, 1985 @ 15:17:13.

```

100      %%%%%%%%%%
200      %%%
300      %%% W/EKSTRA. DIT PROGRAMMA EKSTRAPOLEERT KWADRA- %%%
400      %%% TISCH DE TEMPERATUUR IN DE BAK ALS ZES MEET- %%%
500      %%% WAARDEN WORDEN GEGEVEN. %%%
600      %%%
700      %%%%%%%%%%
800      BEGIN
900      BOOLEAN OPSLAAN;
1000     INTEGER X,Y,NX,NY,N,UUR,NAAM;
1100     REAL A,B,C,D,E,F,A2,A4,T1,T2,T3,T4,T5,T6,T8,T7,T9,T10,T11;
1200     REAL ARRAY T[0:6,0:6];
1300     REAL ARRAY TEM[1:39];
1400     FILE BERG(KIND=DISK,NEWFILE=FALSE, FILETYPE=7);
1500     FILE REM(KIND=REMOTE, MYUSE=IO),
1600         UIT(KIND=PRINTER);
1700     REAL PROCEDURE FUNKTIE(X,Y);
1800         VALUE X,Y: INTEGER X,Y;
1900         BEGIN REAL FU;
2000             FU:=A +B*X +C*Y +D*X*X +E*Y*Y +F*X*Y;
2100             FUNKTIE:=FU;
2200         END FUNKTIE;
2300     WRITE(REM,<"Metingnummer en na hoeveel uur?">);
2400     READ(REM,/,NAAM,UUR);
2500     WRITE(UIT,<"Meting",I2," na ",I2," Uur",/>,NAAM,UUR);
2600     WRITE(REM,<"Wil je met T10 werken? [TR/FA]">); READ(REM,/,OPSLAAN);
2700     WRITE(REM,<"Geef de gemeten temperaturen T1,T2,T3,...,T11">);
2800     READ(REM,/,T1,T2,T3,T4,T5,T6,T7,T8,T9,T10,T11);
2900     IF OPSLAAN THEN BEGIN
3000         A:=          T8          ;
3100         B:=( 4*T1          +5*T8 -9*T10          )/6;
3200         C:=(-4*T3 +9*T6 -5*T8          )/6;
3300         D:=( 2*T1          + T8 -3*T10          )/6;
3400         E:=( 2*T3 -3*T6 + T8          )/6;
3500         F:=( 8*T1 +15*T3 -3*T5-15*T6 +T8 -6*T10)/60 END
3600     ELSE BEGIN
3700         A:=          T8          ;
3800         B:=( T1          +8*T8 -9*T9          )/6;
3900         C:=(-4*T3 +9*T6 -5*T8          )/6;
4000         D:=( T1          +2*T8 -3*T9          )/6;
4100         E:=( 2*T3 -3*T6 + T8          )/6;
4200         F:=( 2*T1 +5*T3 -T5 -5*T6 +T8 -2*T9)/20 END;
4300     FOR X:=0 STEP 1 UNTIL 6 DO FOR Y:=0 STEP 1 UNTIL 6 DO
4400         T[X,Y]:=FUNKTIE(X-5,Y-1);
4500     T[5,2]:=T7; T[4,1]:=T9; T[3,1]:=T10;
4600     T[4,6]:=T[5,6] :=T[6,6]:=T11; % KOELPLAAT
4700     T[3,6]:=(T5+T11)/2; % INVLOED T11
4800     T[2,6]:=(3*T5+T11)/4; % "
4900     FOR X:=2 STEP 1 UNTIL 6 DO T[X,5]:=(2*T[X,4]+T[X,6])/3; % "
5000     A2:=T2-T[1,0]; A4:=T4-T[3,3]; % KORREKTIES
5100     T[0,0]:=T[0,0]+A2; T[2,0]:=T[2,0]+A2; T[1,0]:=T2; % STOOKPLAAT
5200     T[3,0]:=T[3,0]+A2/4; T[0,2]:=T[0,2]+A2/4; % INVLOED T2
5300     T[0,1]:=T[0,1]+A2/2; T[1,1]:=T[1,1]+A2/2; % "
5400     T[2,2]:=T[2,2]+A4/3; T[3,2]:=T[3,2]+A4/2; % INVLOED T4
5500     T[4,2]:=T[4,2]+A4/3; T[2,3]:=T[2,3]+A4/2; T[3,3]:=T4; % "
5600     T[4,3]:=T[4,3]+A4/2; T[2,4]:=T[2,4]+A4/3; % "
5700     T[3,4]:=T[3,4]+A4/2; T[4,4]:=T[4,4]+A4/3; % "
5800     T[1,2]:=T[1,2]+A4/4+A2/4; % " (&T2

```

```

5900 T[1,3]:=T[1,3]+A4/4: T[1,4]:=T[1,4]+A4/4: % "
6000 FOR Y:=6 STEP -1 UNTIL 0 DO WRITE(UIT,<7(F8.3,X5)>,T[0,Y],
6100 T[1,Y],T[2,Y],T[3,Y],T[4,Y],T[5,Y],T[6,Y]):
6200 TEM[1]:=T[2,1]:
6300 TEM[2]:=T[1,0]:
6400 TEM[3]:=T[5,4]:
6500 TEM[4]:=T[3,3]:
6600 TEM[5]:=T[1,6]:
6700 TEM[6]:=T[5,3]:
6800 TEM[7]:=T[5,2]:
6900 TEM[8]:=T[5,1]:
7000 TEM[9]:=T[4,1]:
7100 TEM[10]:=T[3,1]:
7200 TEM[11]:=T[5,6]:
7300 TEM[12]:=18 ;
7400 TEM[13]:=T[1,1]:
7500 TEM[14]:=T[1,2]:
7600 TEM[15]:=T[1,3]:
7700 TEM[16]:=T[1,5]:
7800 TEM[17]:=T[3,5]:
7900 TEM[18]:=T[5,5]:
8000 WRITE(UIT,</,"KANAAL MET TEMPERATUUR",/>):
8100 FOR N:=6 STEP -1 UNTIL 1 DO
8200 WRITE(UIT,<3(I2,X1,F5.2,X18)>,N+12,TEM[N+12],N+6,TEM[N+6],
8300 N,TEM[N]):
8400 WRITE(REM,<"Moet de uitgerekende waarde in FILE BERG? (TRue/FAlse)">):
8500 READ(REM,/,OPSLAAN):
8600 IF OPSLAAN THEN FOR X:=0 STEP 1 UNTIL 6 DO WRITE(BERG,<7(F8.3," ,")>,
8700 T[X,*]):
8800 END.

```

## Appendiks 11 : Afleiding procedures in TEKEN

In TEKEN worden tussenpunten uitgerekend; dit gebeurt met een tweede orde Taylorreeks ontwikkeling. Rond roosterpunt  $(i, j)$  met funktiewaarde  $F(i, j)$  zit funktie  $F_{ij} = F(i, j) + x \cdot F_x(i, j) + y \cdot F_y(i, j) + x^2 \cdot F_{x2}(i, j) + y^2 \cdot F_{y2}(i, j)$  reg. 4200-4900

De coëfficiënten van deze funktie moeten nog bepaald worden. Stel  $\Delta x = \Delta y = 1$  dan

$$F: F(i, j) = F(i, j)$$

$$\partial F / \partial x: F_x(i, j) = \{F(i+1, j) - F(i-1, j)\} / 2$$

$$\partial F / \partial y: F_y(i, j) = \{F(i, j+1) - F(i, j-1)\} / 2$$

$$\partial^2 F / \partial x^2: F_{x2}(i, j) = F(i+1, j) / 2 - F(i, j) + F(i-1, j) / 2$$

$$\partial^2 F / \partial y^2: F_{y2}(i, j) = F(i, j+1) / 2 - F(i, j) + F(i, j-1) / 2 \quad (\text{regel } 3400-3700)$$

Als randvoorwaarde is gekozen  $\nabla F = 0$ , zodat voor  $i=0$  of  $i=6$  de voorwaarde  $F_x(i, j) = 0$  wordt ingevuld. Voor  $j=0$  of  $j=6$  wordt de voorwaarde  $F_y(i, j) = 0$  gebruikt. (regel 8800-9500)

Met de procedure ZOEK wordt de plaats van een tussenpunt t.o.v. de vier omringende roosterpunten bepaald. Een belangrijk gegeven hiervoor is het aantal tussenpunten in de x-richting  $X1$  en in de y-richting  $Y1$ . Met de integer standaardfunctie DIV wordt het voorafgaande roosterpunt bepaald:  $I = X \text{ DIV } X1$  en

$J = Y \text{ DIV } Y1$ . Met de standaardfunctie MOD, die de rest van de deling bepaald, wordt de plaats van het tussenpunt t.o.v.  $(I, J)$  bepaald  $x = X \text{ MOD } X1$  en  $y = Y \text{ MOD } Y1$ .

Het tussenpunt  $(X, Y)$  ligt echter tussen vier roosterpunten  $(I, J)$ ,  $(I+1, J)$ ,  $(I, J+1)$  en  $(I+1, J+1)$ . Dezen hebben elk een eigen reeksontwikkeling. De vier funkties worden gewogen met de afstand van  $(X, Y)$  tot een roosterpunt. De definitieve funktiewaarde staat in (30).

# Appendiks 12: Listing TEKEN

A12.1

WILKO/TEKEN

DATE & TIME PRINTED: WEDNESDAY, NOVEMBER 20, 1985 @ 15:15:40.

```

100      %%%%%%%%%%
200      %%%
300      %%% WILKO/TEKEN
400      %%% DIT PROGRAMMA TEKENT DE TEMPERATUURPROFIELEN IN DE
500      %%% GROND ZOALS BIJVOORBEELD ZIJN UITGEREKEND MET
600      %%% W/GELEIDING. HET ROOSTER WORDT VERFIJND EN MET EEN
700      %%% TWEDEGRAADSPOLYNOOM WORDT EEN TWEEDIMENSIONAAL
800      %%% PLAATJE GETEKEND.
900      %%%
1000     %%%%%%%%%%
1100     BEGIN
1200     $ INCLUDE "PLOTTER/ALGOL/DECLARATION ON APPL"
1300     $ INCLUDE "PLOTTER/ALGOL/ALLPROCS ON APPL"
1400     INTEGER I,J,T,NX,X,NY,Y,F,FILENR,OBJ,NDEEL,DEEL;
1500     REAL A1,K,N,H,BR,LE,
1600     PHI,PI,DX,DY,DT,ANY,BNY;
1700     FILE IN(KIND=REMOTE), UIT(KIND=REMOTE),
1800     UIT2(KIND=PRINTER), TEKEN(KIND=PREVIEWER),
1900     BERG(KIND=DISK,NEWFILE=FALSE,FILETYPE=7),
2000     LAMBDA(KIND=DISK,NEWFILE=FALSE,FILETYPE=7),
2100     VOCHT(KIND=DISK,NEWFILE=FALSE,FILETYPE=7),
2200     BAK2(KIND=DISK,NEWFILE=FALSE,FILETYPE=7),
2300     BAK(KIND=DISK,NEWFILE=FALSE,FILETYPE=7);
2400     WRITE(UIT,<"NX, NY (aantal tussenpunten)">);
2500     READ(IN,/,NX,NY);
2600     WRITE(UIT,<"welke file wil je lezen? 1= BAK",/,X28,
2700     "2= LAMBDA",/,X28,"3= VOCHT",/,X28,"4= BERG",/,X28,"5= BAK2">);
2800     READ(IN,/,FILENR): NX:=NX*6; NY:=NY*6;
2900     LE:=0.3; H:=0.3;
3000     DX:=LE/NX; DY:=H/NY;
3100     BEGIN
3200     INTEGER ARRAY NPUNT,PSOORT[1:10];
3300     REAL ARRAY TEM,YY[0:NY];
3400     REAL ARRAY XARR[0:NX];
3500     REAL ARRAY L[5:55];
3600     REAL ARRAY FX,FY,FX2,FY2,TEMO[-1:7,-1:7];
3700     REAL ARRAY TEMP,XA,YA[0:NX,0:NY];
3800     REAL ARRAY HULP[0:6,0:6];
3900     REAL ARRAY YARR[0:NY,0:NX];
4000     REAL ARRAY XISO,YISO[1:10,1:180];
4100     %-----
4200     % PROCEDURES
4300     %-----
4400     REAL PROCEDURE FUNKTIE(I,J,X,Y):
4500     VALUE I,J,X,Y;
4600     REAL X,Y; INTEGER I,J;
4700     BEGIN REAL FU;
4800     FU:=TEMO[I,J]+FX[I,J]*X+FY[I,J]*Y
4900     +FX2[I,J]*X*X+FY2[I,J]*Y*Y;
5000     FUNKTIE:=FU;
5100     END FUNKTIE;
5200     REAL PROCEDURE ZOEK(WAT,X,Y,NX,NY):
5300     VALUE X,Y,NX,NY: INTEGER X,Y,NX,NY;
5400     REAL ARRAY WAT[*,*];
5500     BEGIN REAL TE,MOX,MOY: INTEGER X1,Y1,DIX,DIY;
5600     X1:=NX/6; Y1:=NY/6; DIX:=X DIV X1; MOX:=X MOD X1;
5700     DIY:=Y DIV Y1; MOY:=Y MOD Y1;
5800     MOX:=MOX/X1; MOY:=MOY/Y1;

```

```

5900      TE:=(1-MOY)*((1-MOX)*FUNKTIE(DIX,DIY,MOX,MOY)+(MOX)
6000      *FUNKTIE(DIX+1,DIY,MOX-1,MOY))+(MOY)*((1-MOX)
6100      *FUNKTIE(DIX,DIY+1,MOX,MOY-1)+(MOX)
6200      *FUNKTIE(DIX+1,DIY+1,MOX-1,MOY-1)):
6300      ZOEK:=TE
6400      END ZOEK;
6500      %-----
6600      %%%%  INITIALISATIE VAN DE PARAMETERS  %%%%
6700      %-----
6800      FOR Y:=0 STEP 1 UNTIL NY DO BEGIN YY[Y]:=Y*DY*100;
6900          FOR X:=0 STEP 1 UNTIL NX DO BEGIN
7000              YA[X,Y]:=YY[Y];
7100              YARR[Y,X]:=Y*DY*100;
7200              XA[X,Y]:=X*DX*100
7300          END
7400      END;
7500      FOR X:=0 STEP 1 UNTIL NX DO XARR[X]:=X*DX*100;
7600      FOR I:=0 STEP 1 UNTIL 6 DO BEGIN
7700          IF FILENR=1 THEN READ(BAK,/,HULP[I,*]);
7800          IF FILENR=2 THEN READ(LAMBDA,/,HULP[I,*]);
7900          IF FILENR=3 THEN READ(VOCHT,/,HULP[I,*]);
8000          IF FILENR=4 THEN READ(BERG,/,HULP[I,*]);
8100          IF FILENR=5 THEN READ(BAK2,/,HULP[I,*]);
8200      END;
8300      FOR I:=0 STEP 1 UNTIL 6 DO FOR J:=0 STEP 1 UNTIL 6 DO
8400          TEMO[I,J]:=HULP[I,J];
8500      FOR I:=0 STEP 1 UNTIL 6 DO
8600          FOR J:=0 STEP 1 UNTIL 6 DO
8700              BEGIN FX[I,J]:=(TEMO[I+1,J]-TEMO[I-1,J])/2;
8800                  FY[I,J]:=(TEMO[I,J+1]-TEMO[I,J-1])/2;
8900                  FX2[I,J]:=TEMO[I+1,J]/2-TEMO[I,J]+TEMO[I-1,J]/2;
9000                  FY2[I,J]:=TEMO[I,J+1]/2-TEMO[I,J]+TEMO[I,J-1]/2;
9100                  IF I=6 THEN BEGIN FX[I,J]:=0;
9200                      FX2[I,J]:=TEMO[I-1,J]-TEMO[I,J] END;
9300                  IF I=0 THEN BEGIN FX[I,J]:=0;
9400                      FX2[I,J]:=TEMO[I+1,J]-TEMO[I,J] END;
9500                  IF J=6 THEN BEGIN FY[I,J]:=0;
9600                      FY2[I,J]:=TEMO[I,J-1]-TEMO[I,J] END;
9700                  IF J=0 THEN BEGIN FY[I,J]:=0;
9800                      FY2[I,J]:=TEMO[I,J+1]-TEMO[I,J] END;
9900              END;
10000      % EKSTRAPOLEER DE TUSSENLIJGENDE WAARDEN VAN TEMP, LG , HUM OF BERG
10100      FOR Y:=0 STEP 1 UNTIL NY DO
10200          FOR X:=0 STEP 1 UNTIL NX DO
10300              TEMP[X,Y]:=ZOEK(TEMO,X,Y,NX,NY);
10400          %-----
10500          %%%%  UITVOER TABELLEN  %%%%
10600          %-----
10700          % WRITE(UIT2,</>); FOR Y:=NY STEP -1 UNTIL 0 DO
10800          % WRITE(UIT2,<7(F8.3,X5)>,TEMP[0,Y],TEMP[1,Y],TEMP[2,Y],
10900          % TEMP[3,Y],TEMP[4,Y],TEMP[5,Y],TEMP[NY,Y]);
11000          %-----
11100          %%%%  TEKEN VAN DE EINDSITUATIE PLAATJES  %%%%
11200          %-----
11300          WRITE(UIT,<"Welk plaatje wil je tekenen? 1 Multipolydraw",/
11400              ,X30,"2 Surface2",/,X30,"3 Contour">);
11500          READ (IN,/,F);
11600          IF F=1 THEN BEGIN
11700              MULTIPOLYDRAW(TEKEN,0,0,15,15,0,NX,0,NY,XARR,YARR,FALSE,FALSE);
11800              SKIPPAPER(TEKEN);
11900              WRITE(UIT,<"Wil je alsnog Surface2, type dan 2">);
12000              READ(IN,/,F);

```

```

12100      END;
12200      IF F=2 THEN BEGIN
12300      WRITE(UIT,<"Koordinaten zichtpunt: x,y,z (integers)">);
12400          READ(IN,/,I,J,T);
12500          NEWOBJECT(OBJ);
12600          SURFACE2(OBJ,0,0,30,30,0,NX,0,NY,XARR,YY,TEMP,I,J,T);
12700          DRAWOBJECT(TEKEN,OBJ,0,0,30,30);
12800          DISPOSEOBJECT(OBJ);
12900          SKIPPAPER(TEKEN);
13000      WRITE(UIT,<"Wil je alsnog Contouren tekenen, type dan een 3">);
13100      READ(IN,/,F);
13200      END;
13300      IF F=3 THEN BEGIN
13400          NEWOBJECT(OBJ);
13500          BASICAXIS(OBJ,0,0,0,30,6,0,.5);
13600          BASICAXIS(OBJ,0,30,30,30,6,0,.5);
13700          BASICAXIS(OBJ,30,30,30,0,6,0,.5);
13800          BASICAXIS(OBJ,30,0,0,0,6,0,.5);
13900          MAPANDDRAWOBJECT1(TEKEN,OBJ,0,0,17,17,0,0,0,30,30,0,1,1,1,16,
14000                                16,1);
14100          DISPOSEOBJECT(OBJ);
14200          IF FILENR=2 THEN BEGIN
14300              L[15]:=0.33; L[20]:=0.36; L[25]:=0.4; L[30]:=0.45; L[35]:=0.5;
14400              L[40]:=0.6; L[45]:=0.8; L[50]:=1.0; L[55]:=2.0; END;
14500          FOR A1:=15 STEP 5 UNTIL 55 DO
14600              BEGIN NEWOBJECT(OBJ);
14700                  IF FILENR=2
14800                      THEN CONTOUR1(L[A1],0,30,0,30,XA,YA,TEMP,1,NDEEL,
14900                                  NPUNT,PSOORT,XISO,YISO)
15000                      ELSE CONTOUR1(A1,0,30,0,30,XA,YA,TEMP,1,NDEEL,
15100                                  NPUNT,PSOORT,XISO,YISO);
15200                  FOR DEEL:=1 STEP 1 UNTIL NDEEL DO
15300                      BEGIN POLYGON(OBJ,I,1,NPUNT[DEEL],XISO[DEEL,I],YISO[DEEL,I],
15400                                      1);
15500                      IF PSOORT[DEEL]=1 THEN STRAIGHTLINEPIECE(OBJ,
15600                                                                XISO[DEEL,NPUNT[DEEL]],
15700                                                                YISO[DEEL,NPUNT[DEEL]],
15800                                                                XISO[DEEL,1],YISO[DEEL,1],1)
15900                  END;
16000              MAPANDDRAWOBJECT1(TEKEN,OBJ,0,0,17,17,0,0,0,30,30,0,1,1,
16100                                1,16,16,1);
16200          DISPOSEOBJECT(OBJ)
16300      END % REGEL 14600
16400      END % REGEL 13300
16500      END % REGEL 3100
16600      END.      %1100

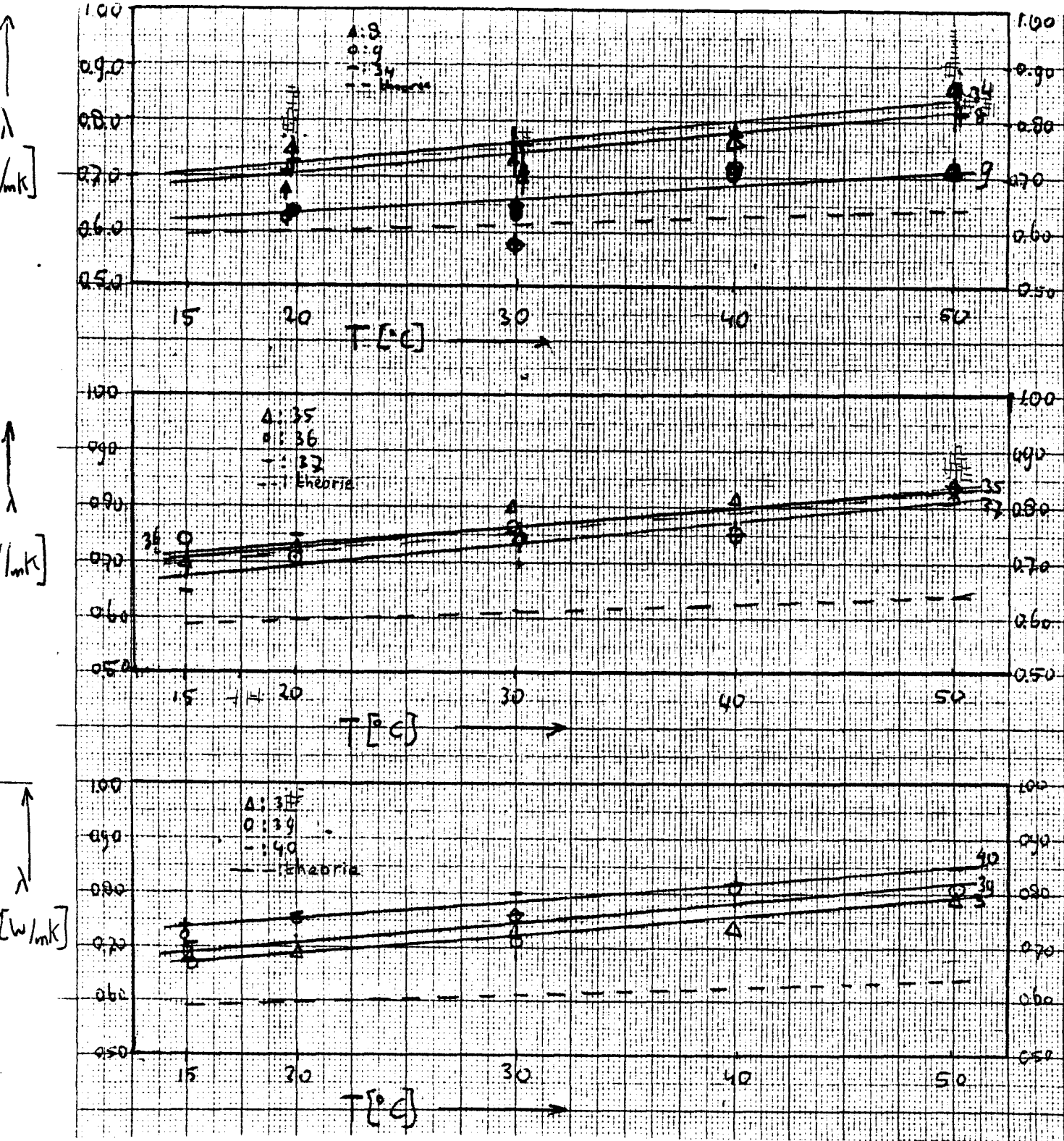
```

# Appendiks 13: Ukmetingen in agargel

A13

De gemeten warmtegeleidingscoëfficiënt als functie van de temperatuur van de gel. Lambdanuuden 8, 9 & 35, 35, 36 & 37 en 3, 39 & 40.

Ukopstelling van Natuur- & Weerkunde, L.H. Wageningen





# Appendiks 14: Metingen in glasparels verwerkt met NAALD1

U8472

Omgevingstemperatuur = 19.24°C Naalddikte = 1.0E+00 mm effectieve straal = 0.26 mm  
 Stookstroom = 0.066000 A Naaldnr = 8  
 Het stookvermogen per meter is 5.198E-01 W

T1	T2	T0	GAMMA	REFF	LABDA	KORR KOEFF	MIDD FOUT IN RECHTE
80.0	200	-0.185	0.29336	2.620E-04	0.1902	1.0000	2.699E-04
100.0	200	-0.207	0.29771	2.620E-04	0.1907	1.0000	4.040E-04
120.0	200	-0.213	0.29896	2.620E-04	0.1909	0.9999	4.358E-04
140.0	200	-0.227	0.30168	2.620E-04	0.1912	0.9999	4.823E-04
160.0	200	-0.247	0.30567	2.620E-04	0.1917	0.9997	5.224E-04
180.0	200	-0.278	0.31196	2.620E-04	0.1924	0.9986	5.647E-04

LUS = 9

T1	T2	T0	GAMMA	REFF	LABDA	KORR KOEFF	MIDD FOUT IN RECHTE
80.0	200	-0.206	0.25526	2.620E-04	0.1911	1.0000	3.113E-04
100.0	200	-0.225	0.25910	2.620E-04	0.1916	1.0000	4.271E-04
120.0	200	-0.229	0.25989	2.620E-04	0.1916	0.9999	4.483E-04
140.0	200	-0.241	0.26229	2.620E-04	0.1919	0.9999	4.882E-04
160.0	200	-0.260	0.26604	2.620E-04	0.1923	0.9997	5.247E-04
180.0	200	-0.290	0.27219	2.620E-04	0.1930	0.9986	5.651E-04

LUS = 7

LUS	ROCE	LABDA	HELLING	ASAFSN.	KORR	MIDD.FOUT	TNUL	GAMMA
1	3.00E+06	0.190	2.552E-05	0.185	0.9929	1.7E-05	-0.38	4.3E-01
2	3.50E+06	0.189	3.035E-05	0.183	0.9939	8.2E-06	-0.53	4.8E-01
3	3.08E+06	0.190	2.630E-05	0.185	0.9932	1.3E-05	-0.40	4.4E-01
4	2.72E+06	0.191	2.268E-05	0.186	0.9919	3.2E-05	-0.32	3.9E-01
5	2.40E+06	0.192	1.945E-05	0.188	0.9898	5.0E-05	-0.29	3.5E-01
6	2.13E+06	0.192	1.660E-05	0.189	0.9864	6.5E-05	-0.28	3.1E-01
7	1.90E+06	0.193	1.409E-05	0.190	0.9812	7.8E-05	-0.29	2.7E-01

W8482

Omgevingstemperatuur = 19.25°C Naalddikte = 1.0E+00 mm effectieve straal = 0.27 mm  
 Stookstroom = 0.064295 A Naaldnr = 9  
 Het stookvermogen per meter is 4.933E-01 W

T1	T2	T0	GAMMA	REFF	LABDA	KORR KOEFF	MIDD FOUT IN RECHTE
80.0	200	-0.375	-0.08693	2.668E-04	0.1787	1.0000	4.849E-05
100.0	200	-0.378	-0.08619	2.668E-04	0.1788	1.0000	2.914E-05
120.0	200	-0.384	-0.08479	2.668E-04	0.1789	1.0000	1.449E-05
140.0	200	-0.394	-0.08264	2.668E-04	0.1791	1.0000	2.651E-06
160.0	200	-0.383	-0.08506	2.668E-04	0.1789	0.9999	4.342E-06
180.0	200	-0.388	-0.08394	2.668E-04	0.1790	0.9994	5.267E-06

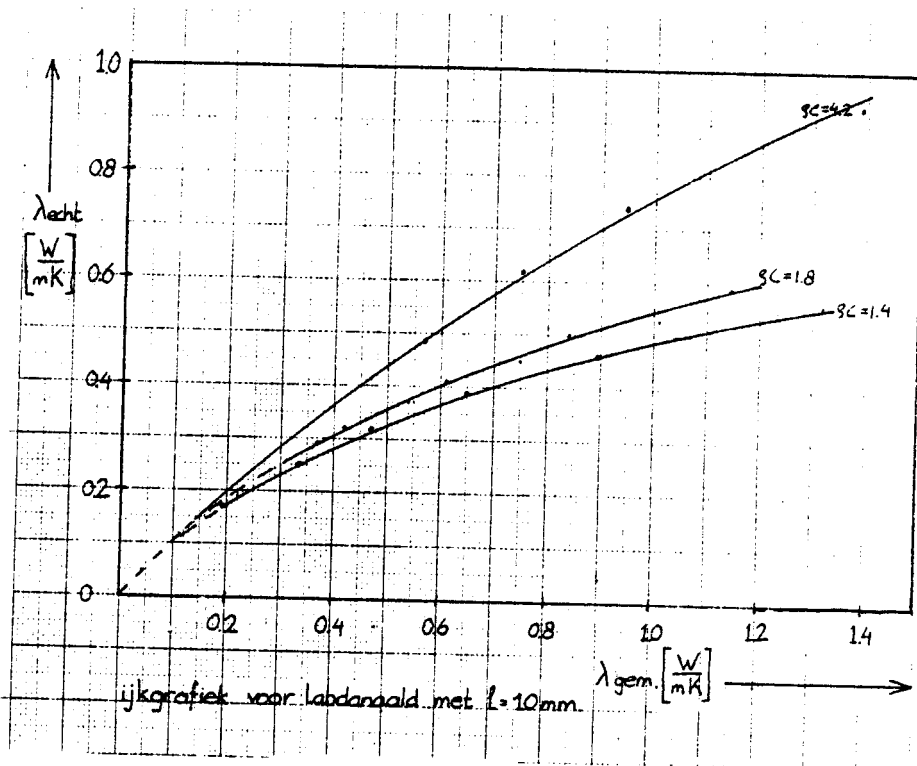
LUS = 9

T1	T2	T0	GAMMA	REFF	LABDA	KORR KOEFF	MIDD FOUT IN RECHTE
80.0	200	-0.417	-0.11427	2.668E-04	0.1790	1.0000	3.542E-05
100.0	200	-0.420	-0.11375	2.668E-04	0.1790	1.0000	2.183E-05
120.0	200	-0.425	-0.11252	2.668E-04	0.1791	1.0000	2.410E-06
140.0	200	-0.434	-0.11050	2.668E-04	0.1793	1.0000	2.837E-05
160.0	200	-0.423	-0.11306	2.668E-04	0.1791	0.9992	5.080E-06
180.0	200	-0.427	-0.11204	2.668E-04	0.1792	0.9993	5.426E-06

LUS = 7

LUS	ROCE	LABDA	HELLING	ASAFSN.	KORR	MIDD.FOUT	TNUL	GAMMA
1	1.00E+06	0.178	5.792E-06	0.177	0.8726	1.6E-04	-0.26	9.5E-03
2	1.20E+06	0.178	8.251E-06	0.176	0.9223	1.8E-04	-0.17	8.2E-02
3	1.06E+06	0.178	6.535E-06	0.177	0.8924	1.7E-04	-0.23	3.3E-02
4	9.48E+05	0.178	5.138E-06	0.178	0.8498	1.6E-04	-0.29	-1.2E-02
5	8.61E+05	0.179	4.013E-06	0.178	0.7917	1.5E-04	-0.34	-5.1E-02
6	7.93E+05	0.179	3.117E-06	0.179	0.7172	1.5E-04	-0.39	-8.4E-02
7	7.40E+05	0.179	2.409E-06	0.179	0.6292	1.5E-04	-0.43	-1.1E-01

# Appendiks 15: Ukgrafiek voor Blackwellcorrectie van Lambdanaalden met $l = 10 \text{ mm}$ .



App. 16.1: uitvoer NAALD3 warmtegeleidingscoëfficiënt  $\lambda$  en warmtecapaciteit  $\rho C$  en  $\lambda_B$  gecorrigeerd met Blackwell correctie

nr.	Meeiserie	50	51	52	53	60	61
	Proefnr., tijd	05 na 75	05 na 94	00 na 21	00 na 48	10 na 2	13 na 20
	Grootheid	uur	uur	uur	uur	uur	uur
0)	$\lambda$ [W/mK]	0.44	0.42	0.41	0.42	0.46	
	$\lambda_B$ [W/mK]	0.31	0.30	0.29	0.30	0.31	-
	$\rho C$ [MJ/m <sup>3</sup> K]	11.5	11.8	10.7	10.9	12.4	
1)	$\lambda$	0.42	0.41	0.40	0.40	0.40	0.41
	$\lambda_B$	0.30	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
	$\rho C$	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
2)	$\lambda$	0.37	0.36	0.36	0.35	0.35	0.34
	$\lambda_B$	0.29	0.29	0.29	0.28	0.28	0.27
	$\rho C$	3.0	3.1	3.1	3.5	3.5	4.5
3)	$\lambda$	0.47	0.46	0.43	0.43	0.44	0.44
	$\lambda_B$	0.32	0.31	0.30	0.30	0.30	0.30
	$\rho C$	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
4)	$\lambda$	0.42	0.44	0.42	0.42		0.42
	$\lambda_B$	0.30	0.31	0.30	0.30	-	0.30
	$\rho C$	2.5	2.6	2.5	2.6		2.5
5)	$\lambda$	0.45	0.46	0.46	0.44		0.46
	$\lambda_B$	0.30	0.31	0.31	0.30	-	0.31
	$\rho C$	2.3	2.8	2.8	2.7		2.8
6)	$\lambda$	0.47	0.47	0.46	0.46		0.46
	$\lambda_B$	0.32	0.32	0.31	0.31	-	0.31
	$\rho C$	2.2	2.3	2.2	2.2		2.2
7)	$\lambda$	0.46	0.44	0.45	0.45	0.40	0.46
	$\lambda_B$	0.31	0.30	0.30	0.30	0.31	0.31
	$\rho C$	2.9	2.6	2.6	2.8	2.8	2.8
8)	$\lambda$	0.46	0.46	0.47	0.47		0.47
	$\lambda_B$	0.31	0.31	0.32	0.32	-	0.32
	$\rho C$	2.4	2.9	2.9	3.0		3.0

App. 16.2 Uitvoer NAALD3: warmtegeleidingscoëff.  $\lambda$  en warmtecapaciteit  $\rho C$   
 en  $\lambda_B$  gekorrigeerd met Blackwell model

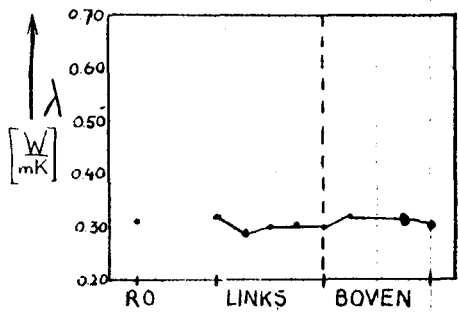
nr	Meetserie	62	63	64	65	66	67
	Proefnr, tyd	13 na 88 uur	15 na 24 uur	15 na 51 uur	15 na 71 uur	106 na 1 uur	106 na 74 uur
	Grootheid						
	$\lambda$ [W/mK]	0.45	0.48	0.57	0.66	0.54	0.54
	$\lambda_B$ [W/mK]	0.31	0.32	0.36	0.40	0.35	0.35
	$\rho C$ [MJ/m <sup>3</sup> K]	11.4	12.3	14.4	17.6	13.7	13.3
	$\lambda$	0.42	0.40	0.43	0.45	0.42	0.40
	$\lambda_B$	0.30	0.29	0.30	0.31	0.30	0.29
	$\rho C$	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	$\lambda$	0.36	0.35	0.37	0.39	0.41	0.36
	$\lambda_B$	0.29	0.29	0.29	0.30	0.31	0.29
	$\rho C$	3.4	4.0	3.4	2.8	2.4	2.9
	$\lambda$	0.44	0.46	0.49	0.50	1.22	0.46
	$\lambda_B$	0.30	0.31	0.33	0.33	0.59	0.31
	$\rho C$	2.0	2.0	2.0	2.1	7.7	2.0
	$\lambda$	0.43	0.40	0.42	0.43	0.44	0.38
	$\lambda_B$	0.30	0.29	0.30	0.30	0.31	0.28
	$\rho C$	2.6	2.3	2.2	2.3	2.3	2.1
	$\lambda$	0.48	0.48	0.46	0.40	0.36	0.44
	$\lambda_B$	0.32	0.32	0.31	0.29	0.27	0.30
	$\rho C$	2.9	2.6	2.7	2.2	2.0	2.6
	$\lambda$	0.48	0.48	0.43	0.47	0.48	0.45
	$\lambda_B$	0.32	0.32	0.30	0.32	0.32	0.31
	$\rho C$	2.3	2.3	2.0	2.1	2.1	2.1
	$\lambda$	0.50	0.47	0.43	0.46	0.46	0.44
	$\lambda_B$	0.33	0.32	0.32	0.31	0.31	0.30
	$\rho C$	3.2	2.9	2.4	2.6	2.6	2.5
	$\lambda$	0.46	0.47	0.42	0.46	0.46	0.42
	$\lambda_B$	0.31	0.32	0.30	0.31	0.31	0.30
	$\rho C$	2.9	2.9	2.5	2.7	2.9	2.4

App. 16.3 Uitvoer NAALD3 : warmtegeleidingskoeff.  $\lambda$ , warmtecapaciteit  $\rho C$  en  $\lambda_B$  gekorrigeerd met Blackwell-model

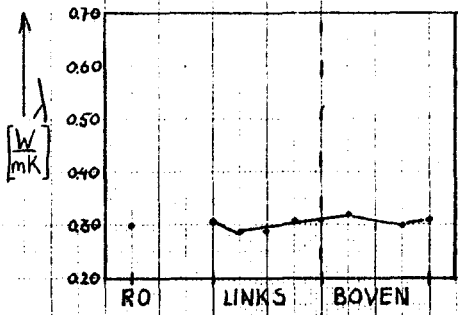
nr	Meetserie	70	71	72	73	75	76
	Proefnr, tijd	30 na 24 uur	33 na 47 uur	33 na 74 uur	35 na 69 uur	36 na 47 uur	36 na 70 uur
	Groottheid						
	$\lambda$ [W/mK]	1.20	1.30	1.39	1.43	1.75	1.44
	$\lambda_B$ [W/mK]	0.59	0.61	0.63	0.64	0.72	0.64
	$\rho C$ [MJ/m <sup>3</sup> K]	31.2	34.1	36.6	37.2	46.3	37.5
	$\lambda$	0.41	0.39	0.40	0.50	0.56	0.64
	$\lambda_B$	0.29	0.28	0.29	0.34	0.36	0.40
	$\rho C$	2.0	2.0	2.1	2.0	3.3	3.9
	$\lambda$	0.36	0.38	0.40	0.56	0.80	0.86
	$\lambda_B$	0.29	0.30	0.31	0.40	0.50	0.52
	$\rho C$	2.9	-	-	-	-	-
	$\lambda$	0.45	0.50	0.47	0.57	0.80	0.98
	$\lambda_B$	0.31	0.33	0.32	0.36	0.45	0.55
	$\rho C$	2.0	-	2.0	3.6	4.8	6.1
	$\lambda$	0.38	0.38	0.39	0.48	0.56	0.63
	$\lambda_B$	0.28	0.28	0.29	0.32	0.36	0.40
	$\rho C$	2.1	2.0	2.1	2.5	3.1	3.5
	$\lambda$	0.45	0.36	0.35	0.47	0.53	0.53
	$\lambda_B$	0.31	0.27	0.26	0.32	0.35	0.35
	$\rho C$	2.6	2.0	2.0	2.5	2.7	2.8
	$\lambda$	0.45	0.45	0.46	0.53	0.60	0.63
	$\lambda_B$	0.31	0.31	0.31	0.35	0.39	0.40
	$\rho C$	2.1	2.0	2.1	2.3	3.6	3.5
	$\lambda$	0.44	0.45	0.46	0.52	0.56	0.60
	$\lambda_B$	0.30	0.31	0.31	0.35	0.37	0.39
	$\rho C$	2.5	2.5	2.6	2.9	3.2	3.6
	$\lambda$	0.43	0.45	0.46	0.53	0.61	0.62
	$\lambda_B$	0.30	0.31	0.31	0.35	0.39	0.40
	$\rho C$	2.5	2.5	2.6	3.0	3.7	3.7

App 16.4 uitvoer NALD3 warmtegeleidingscoëfficiënt  $\lambda$ , warmtecapaciteit  $gC$  en  $\lambda B$  gekorrigeerd met Blackwell-model

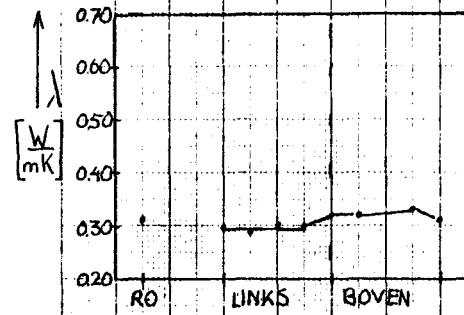
Inr	Meetserie Proefrv. tijd Grootheid	80	81	82
		90 ni 68 uur	95 ni 43 uur	95 ni 71 uur
	$\lambda$ [W/mK]	2.67	2.37	2.65
	$\lambda B$ [W/mK]	0.84	0.79	0.84
	$gC$ [MJ/m <sup>3</sup> K]	-	63	-
	$\lambda$	0.80	0.77	0.77
	$\lambda B$	0.49	0.47	0.47
	$gC$	4.9	4.6	5.0
	$\lambda$	1.18	0.86	0.88
	$\lambda B$	0.63	0.52	0.53
	$gC$	-	-	-
	$\lambda$	0.71	0.42	1.06
	$\lambda B$	0.43	0.52	0.56
	$gC$	4.4	5.7	6.5
	$\lambda$	0.85	0.76	0.80
	$\lambda B$	0.50	0.47	0.49
	$gC$	5.1	5.6	4.7
	$\lambda$	0.46	0.52	0.54
	$\lambda B$	0.31	0.34	0.35
	$gC$	2.3	2.7	2.9
	$\lambda$	0.73	0.69	0.71
	$\lambda B$	0.43	0.42	0.43
	$gC$	4.7	4.0	4.5
	$\lambda$	0.86	0.78	0.85
	$\lambda B$	0.50	0.48	0.50
	$gC$	5.2	4.9	5.3
	$\lambda$	1.00	0.77	0.85
	$\lambda B$	0.55	0.47	0.50
	$gC$	6.4	4.7	5.3



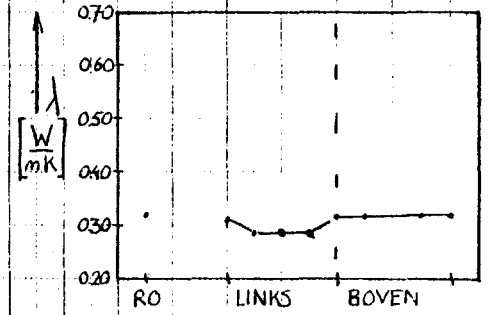
05 na 75 uur



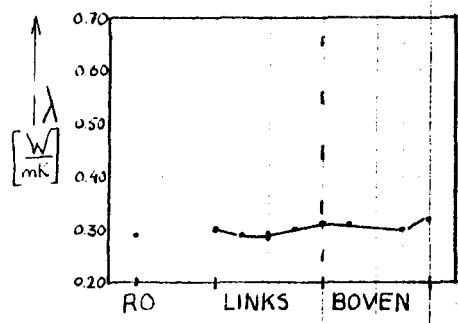
05 na 94 uur



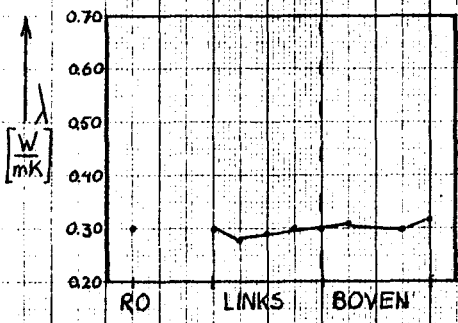
13 na 88 uur



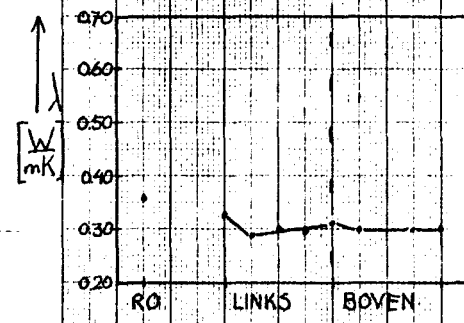
15 na 24 uur



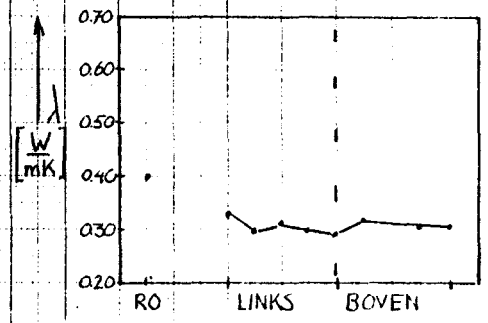
00 na 21 uur



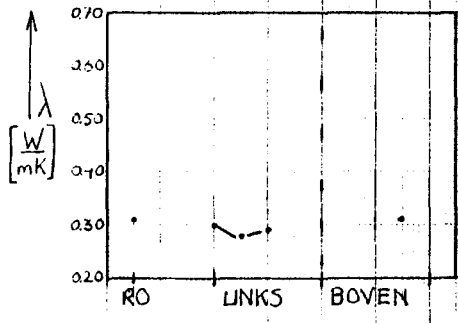
00 na 48 uur



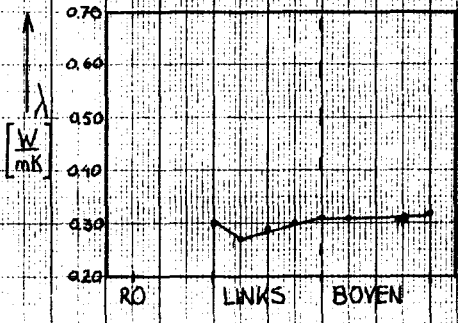
15 na 51 uur



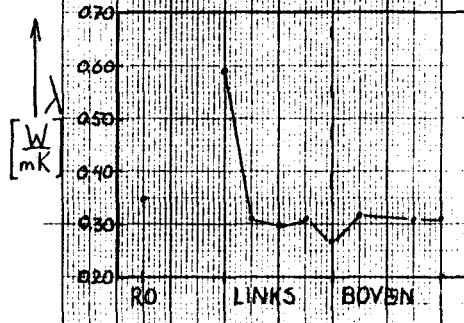
15 na 71 uur



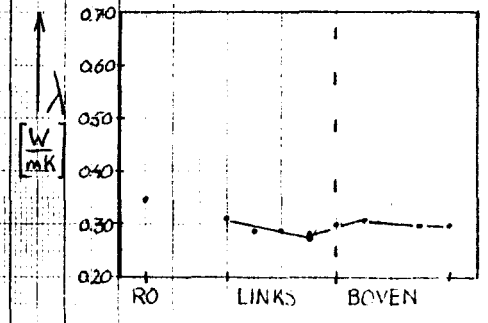
10 na 2 uur



10 na 20 uur



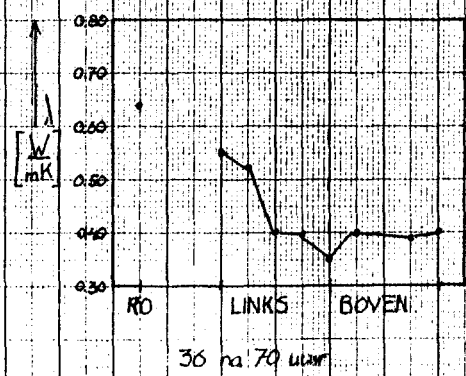
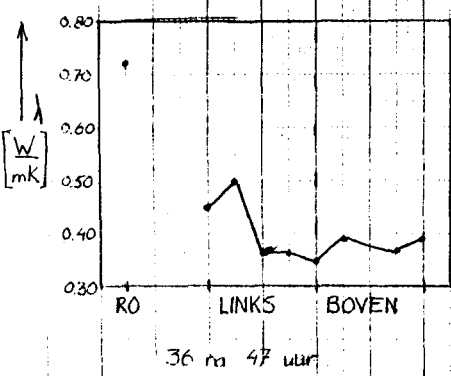
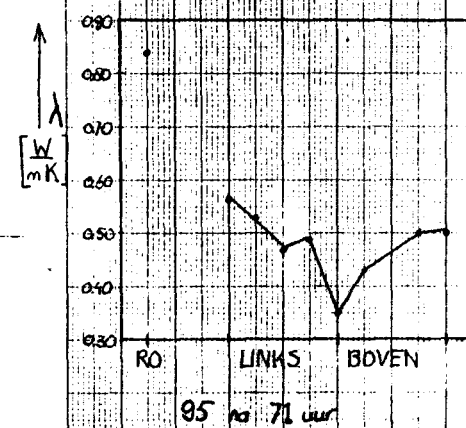
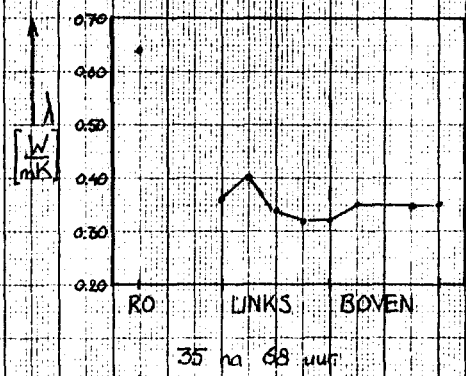
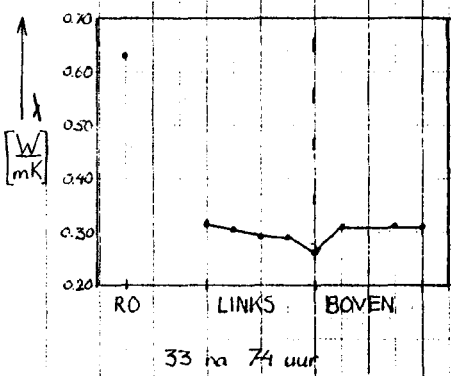
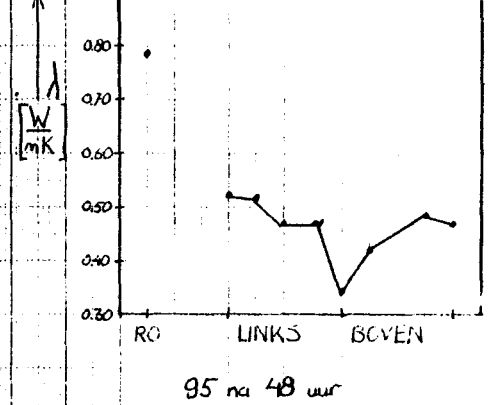
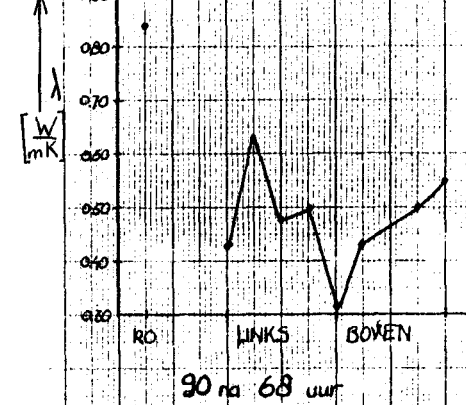
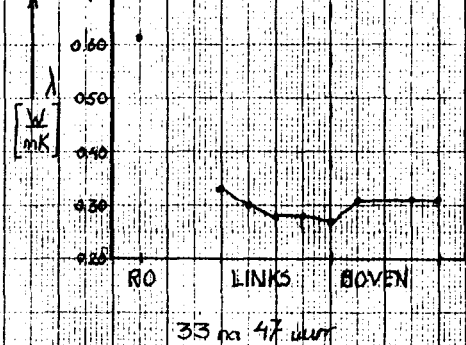
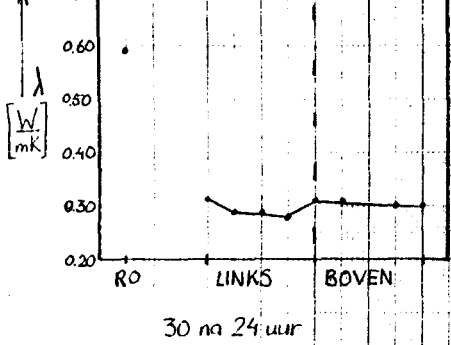
10 na 1 uur



10 na 74 uur

Appendiks 17: Gemeten warmtegeleidingscoëfficiënten  $\lambda$  als functie van positie in de bak:  
 RO: Rechts onder (5,0), LINKS: van (1,1) tot (1,5), RECHTS: van (1,5) tot (5,5)

A17.1



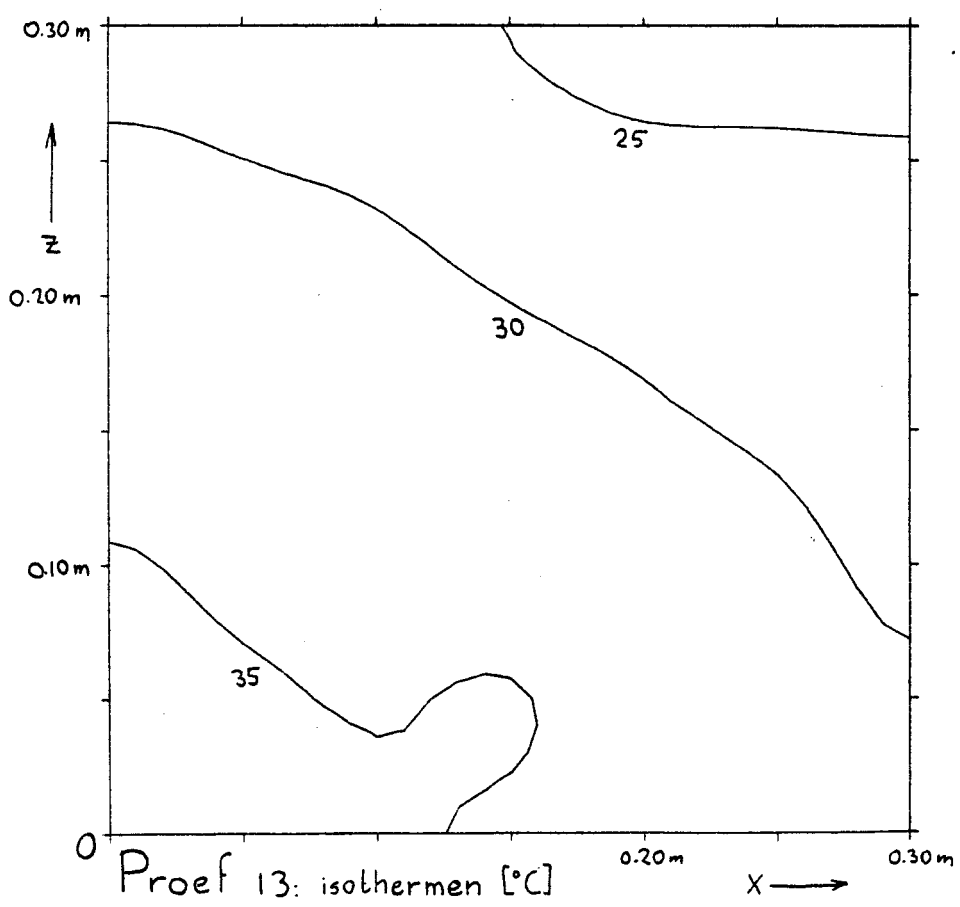
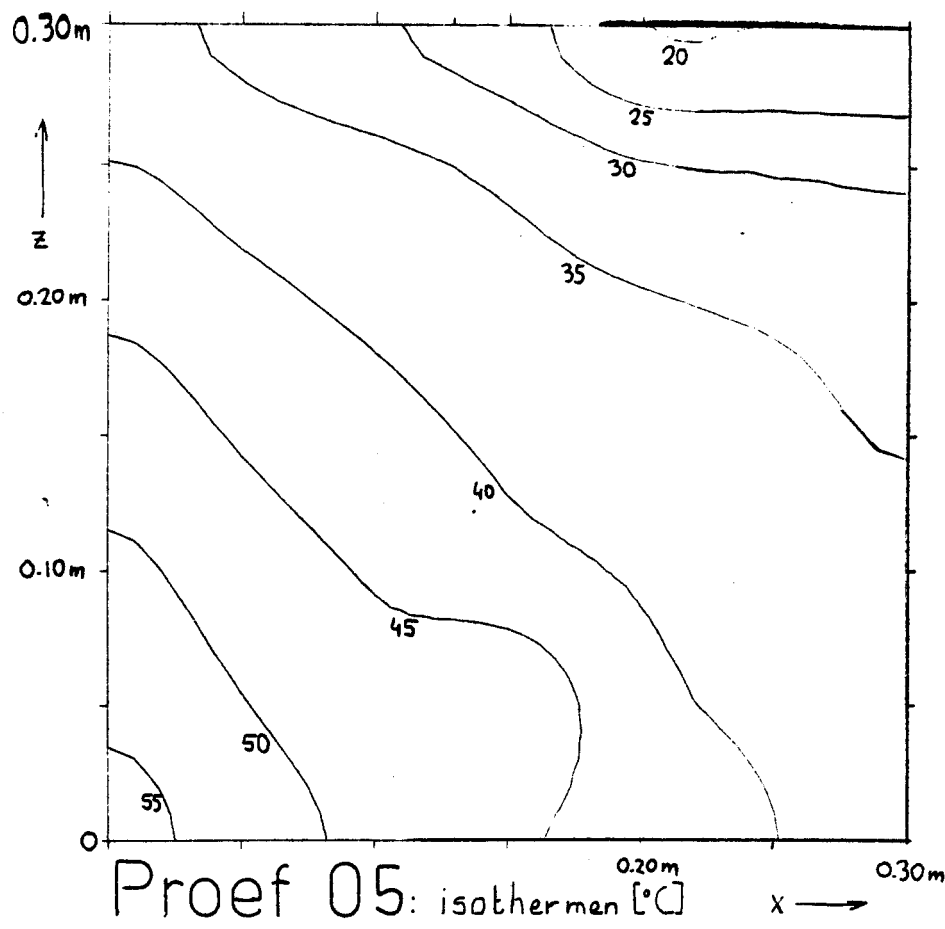
RO: Rechtsonder (5,0)  
 LINKS van (1,1) tot (1,5)  
 BOVEN van (1,5) tot (5,5)

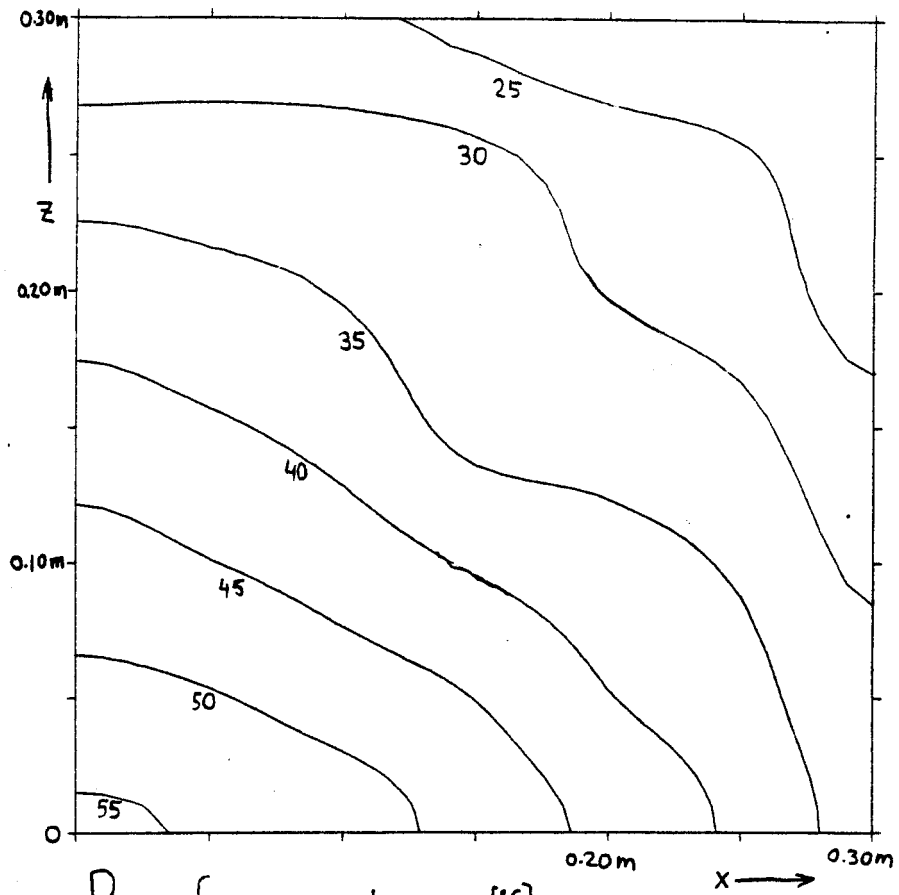
A17.2



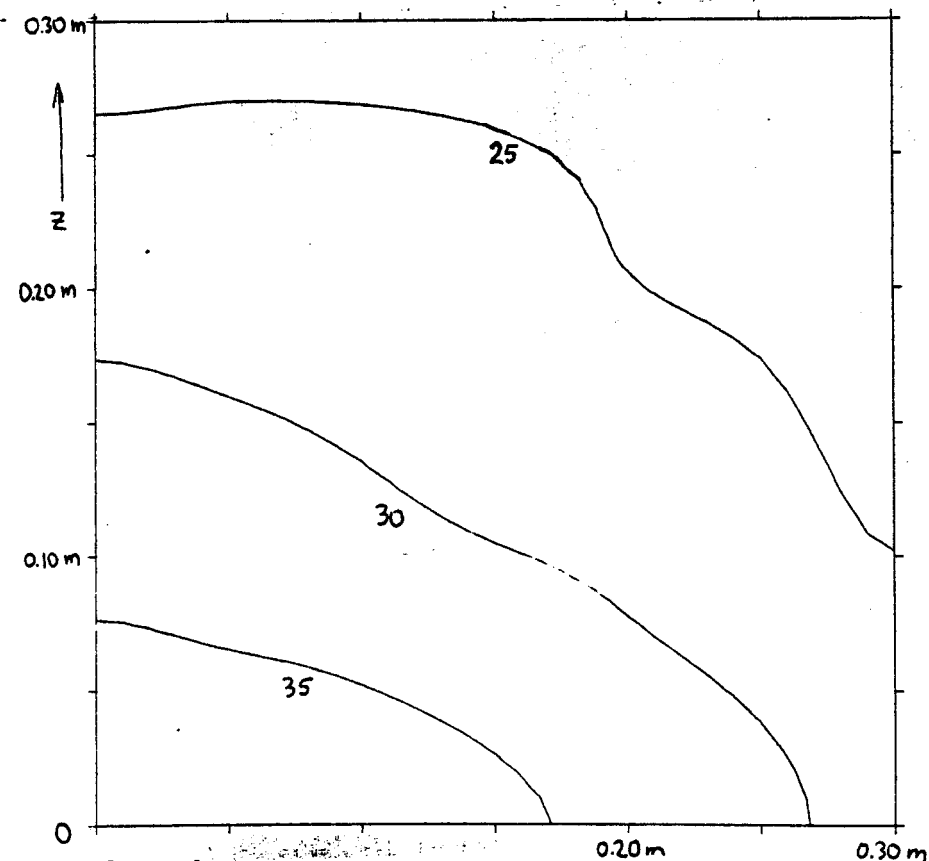


Appendix 18: de gemeten temperatuur als functie van de plaats  
de eerste zeven figuren geven een dwarsdoorsnede A.18.1

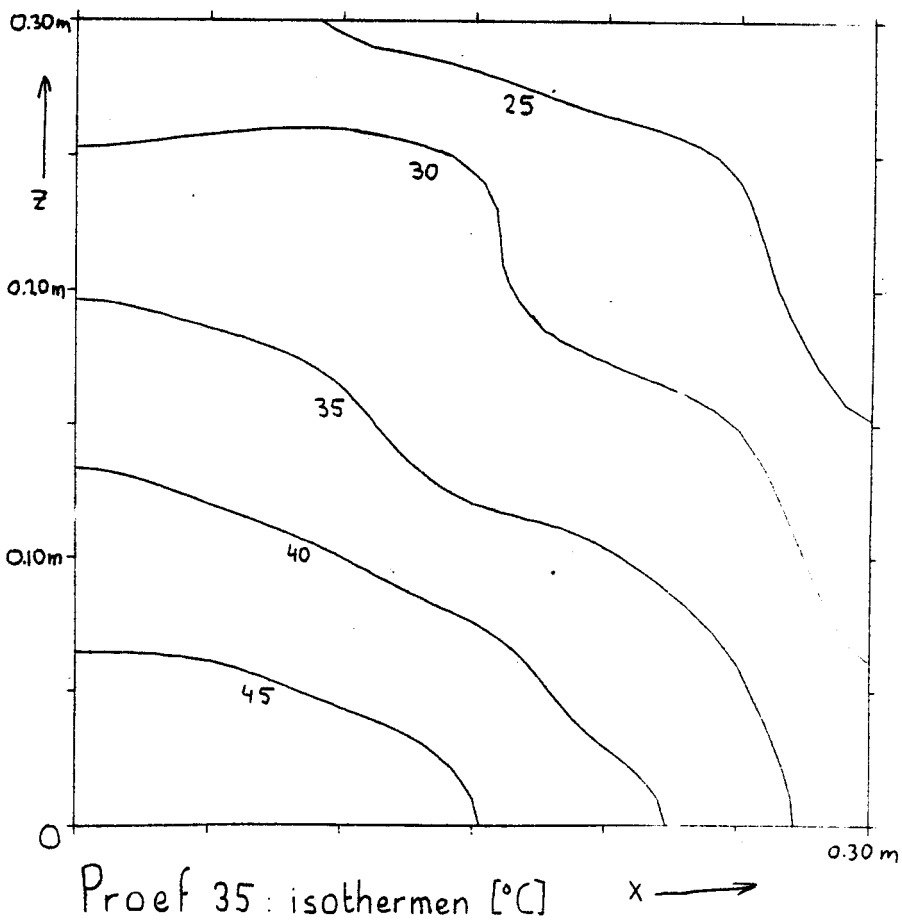
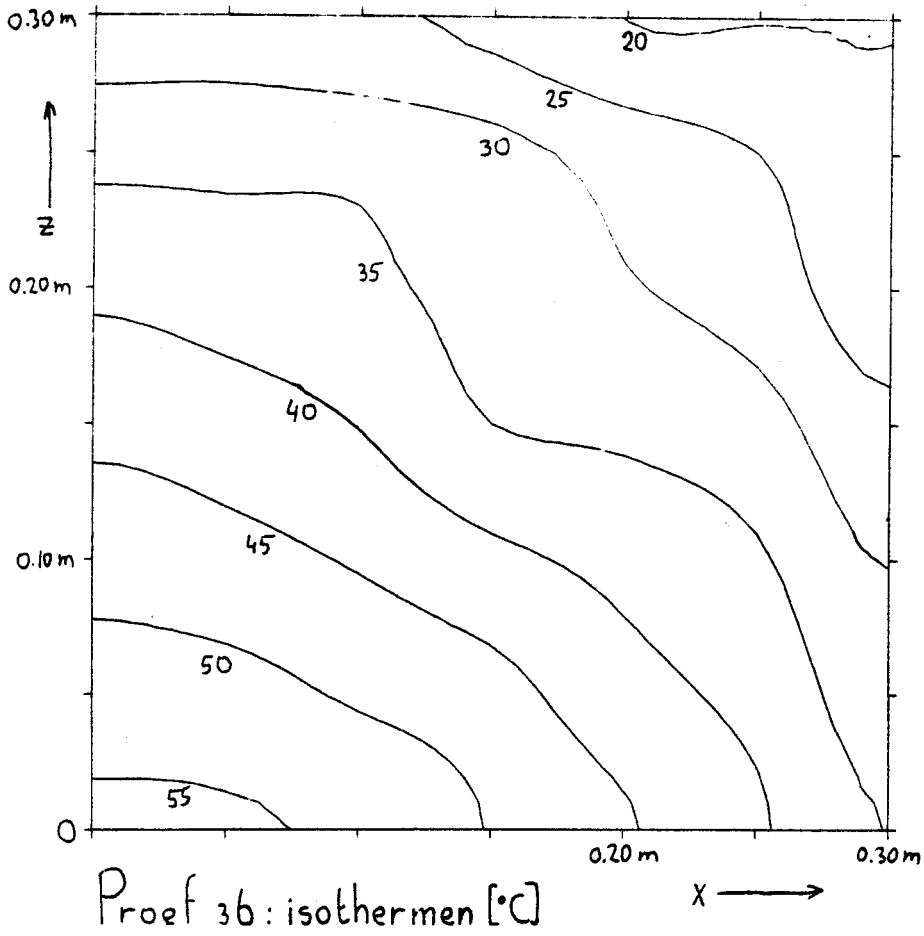




Proef 15: isothermen [°C]



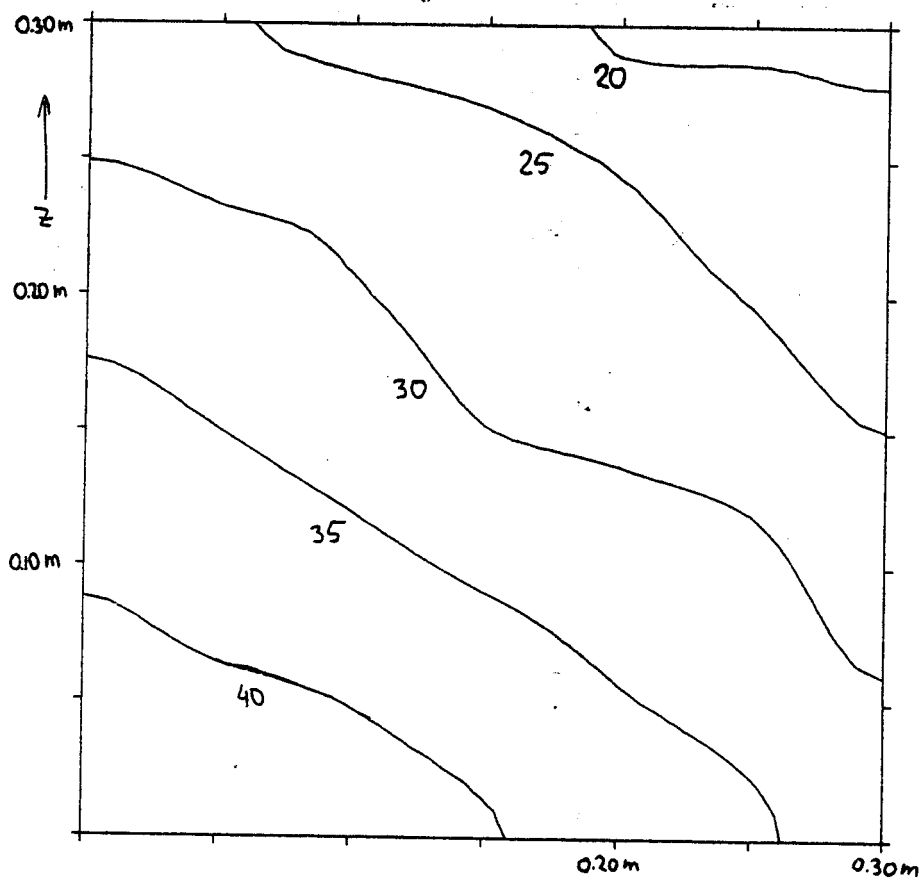
Proef 33: isothermen [°C]



Gemeten temperaturen.

N.B. Eerst is met Ekstra/20 tot 51 een temperatuurverdeling voor het hele vlak uitgerekend. Daarna is met

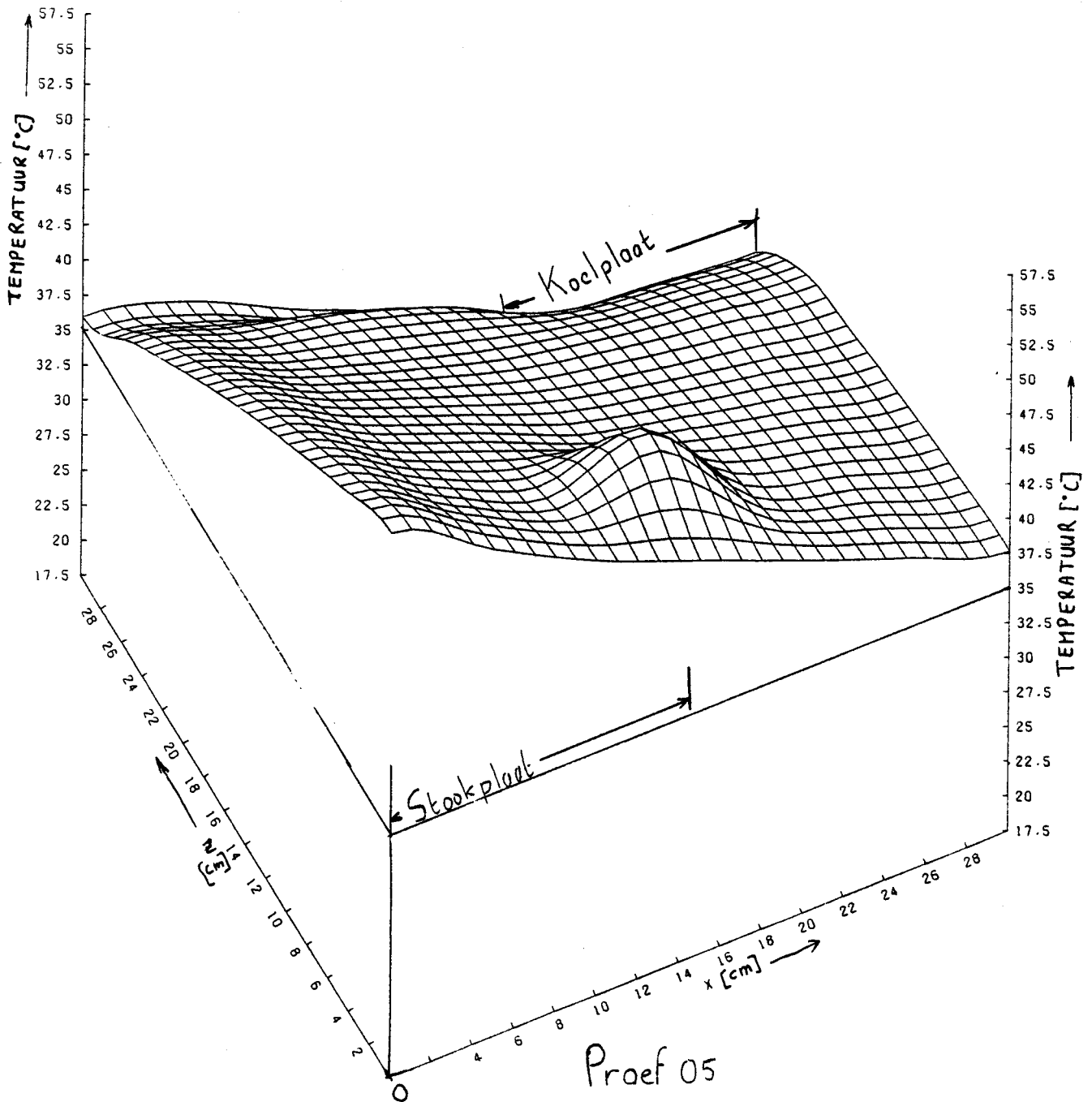
TEKEN Contouren getekend voor proef 05 t/m 95



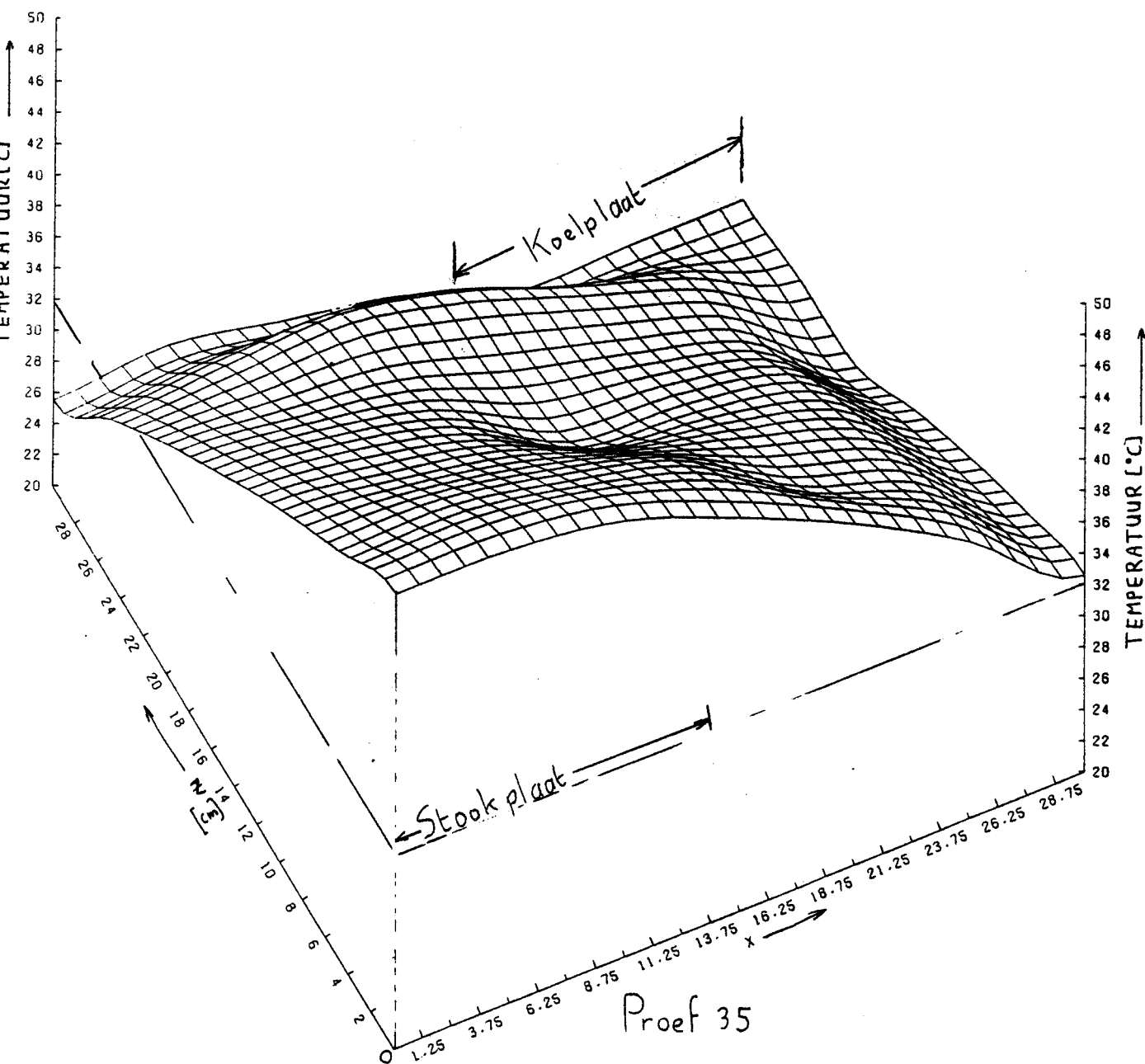
Proef 95: isothermen [°C] x →

# Gemeten temperaturen

NB: de volgende twee tekeningen zijn met TEKEN en plotprocedure SURFACE2 gemaakt



# Gemeten temperaturen



# Appendiks 19: Uitvoer GELEIDING

19.1

De zeven kolommen van zeven getallen stellen de temperatuur in °C voor, als functie van de plaats in de bak.

De drie kolommen die daar op volgen zijn de temperaturen in °C gerangschikt naar datalogger ingang.

## Proef 05

Proefnummer 20 Begintijd 0  
 POROSITEIT= 40.0% WIN= 4.9 W ~~tabde grond=06x1.6 = λ\* - λ<sub>w</sub>~~

27.669	27.404	26.405	24.367	20.100	20.100	20.100
28.246	28.005	27.123	25.610	23.659	22.917	22.700
29.817	29.595	28.786	27.537	26.185	25.346	25.041
32.407	32.161	31.249	29.883	28.473	27.482	27.096
36.157	35.826	34.582	32.655	30.690	29.339	28.821
41.370	40.904	39.073	35.910	32.706	30.747	30.050
48.489	47.917	45.444	39.709	33.929	31.317	30.483

Wuit= 2.147E+00 W Tboven= 20.1°C Tbuiten= 20.2°C tijd: 21.00uur

18	22.92	12	18.00	6	27.48
17	25.61	11	20.10	5	27.40
16	28.00	10	35.91	4	29.88
15	32.16	9	32.71	3	25.35
14	35.83	8	30.75	2	47.92
13	40.90	7	29.34	1	39.07

## Proef 13

Proefnummer 32 Begintijd 0  
 POROSITEIT= 40.0% WIN= 3.2 W ~~tabde grond=06x2.0 = λ\* - λ<sub>w</sub>~~

23.867	23.685	23.039	21.733	19.000	19.000	19.000
24.170	24.005	23.445	22.488	21.255	20.796	20.669
25.003	24.856	24.365	23.614	22.802	22.309	22.139
26.356	26.205	25.689	24.925	24.140	23.594	23.390
28.289	28.098	27.432	26.414	25.381	24.672	24.408
30.962	30.703	29.749	28.122	26.477	25.472	25.120
34.672	34.355	33.069	30.117	27.148	25.805	25.383

Wuit= 1.704E+00 W Tboven= 19.0°C Tbuiten= 20.2°C tijd: 20.00uur

18	20.80	12	18.00	6	23.59
17	22.49	11	19.00	5	23.68
16	24.01	10	28.12	4	24.92
15	26.20	9	26.48	3	22.31
14	28.10	8	25.47	2	34.36
13	30.70	7	24.67	1	29.75

## Proef 15

Proefnummer 32 Begintijd 0  
 POROSITEIT= 40.0% WIN= 4.9 W ~~tabde grond=06x1.6 = λ\* - λ<sub>w</sub>~~

32.713	32.310	30.761	27.575	20.900	20.900	20.900
33.409	33.055	31.729	29.424	26.431	25.315	24.989
35.189	34.898	33.790	32.053	30.155	28.995	28.570
37.982	37.708	36.619	34.968	33.249	32.038	31.550
41.853	41.524	40.190	38.115	35.983	34.493	33.895
47.080	46.634	44.772	41.552	38.274	36.231	35.470
54.210	53.663	51.171	45.404	39.574	36.891	35.996

Wuit= 3.351E+00 W Tboven= 20.9°C Tbuiten= 20.2°C tijd: 72.00uur

18	25.31	12	18.00	6	32.04
17	29.42	11	20.90	5	32.31
16	33.06	10	41.55	4	34.97
15	37.71	9	38.27	3	29.00
14	41.52	8	36.23	2	53.66
13	46.63	7	34.49	1	44.77

Proef 33

Win=3.2W

$1.8 \times 0.6 = \lambda^* - \lambda_w$

20.802	20.429	20.608	20.932	20.800	20.800	20.800
20.766	20.726	20.801	20.879	20.840	20.765	20.872
20.901	20.742	20.856	20.246	20.204	20.800	20.402
20.947	20.825	20.616	20.746	20.843	20.810	20.760
21.082	21.092	20.463	20.303	20.255	20.411	20.108
24.100	23.748	22.747	21.224	20.474	20.391	20.225
26.274	27.981	26.810	25.434	20.225	20.772	26.297

Wuit= 1.942E+00 W Tboven= 20.5°C Tbuiten= 20.2°C tijd: 72.00uur

18	22.77	12	18.00	6	26.21
17	24.90	11	20.30	5	26.42
16	26.80	10	31.22	4	27.75
15	29.20	9	29.47	3	24.65
14	31.20	8	28.39	2	27.98
13	33.95	7	27.48	1	32.95

Proefnummer 35

Begin tijd 0

WUIT= 40.02

WIN= 4.8 W

Lambda grond=

$1.7 \times 0.6 = \lambda^* - \lambda_w$

30.807	30.182	28.855	26.180	20.600	20.600	20.600
31.020	30.774	27.653	27.713	25.202	24.265	25.994
32.122	32.301	31.359	29.890	28.269	27.312	26.958
34.500	34.044	33.724	32.312	30.875	29.073	29.426
38.122	37.007	36.724	34.933	33.120	31.875	31.574
42.696	41.299	40.671	37.717	35.077	33.330	32.708
47.120	46.756	46.072	41.470	36.501	35.057	33.193

Wuit= 2.967E+00 W Tboven= 20.6°C Tbuiten= 20.2°C tijd: 68.00uur

18	24.26	12	18.00	6	29.83
17	27.71	11	20.60	5	30.16
16	30.77	10	37.92	4	32.31
15	34.64	9	35.10	3	27.31
14	37.67	8	35.33	2	48.79
13	42.50	7	31.88	1	40.67

Proef 36

Win=6.2W

$0.6 \times 1.8 = \lambda^* - \lambda_w$

32.481	32.045	30.422	27.110	20.200	20.200	20.200
33.173	32.787	31.396	28.995	25.890	24.734	24.404
34.967	34.645	33.480	31.668	29.696	28.498	28.069
37.804	37.496	36.352	34.633	32.850	31.603	31.112
41.776	41.409	40.011	37.854	35.647	34.113	33.512
47.275	46.780	44.822	41.457	38.039	35.923	35.131
55.250	54.637	51.970	45.768	39.512	36.677	35.755

Wuit= 3.884E+00 W Tboven= 20.2°C Tbuiten= 20.2°C tijd: 72.00uur

18	24.73	12	18.00	6	31.60
17	29.00	11	20.20	5	32.04
16	32.79	10	41.46	4	34.63
15	37.50	9	38.04	3	28.50
14	41.41	8	35.92	2	54.64
13	46.38	7	34.11	1	44.81

Proef 95

Win=4.8W

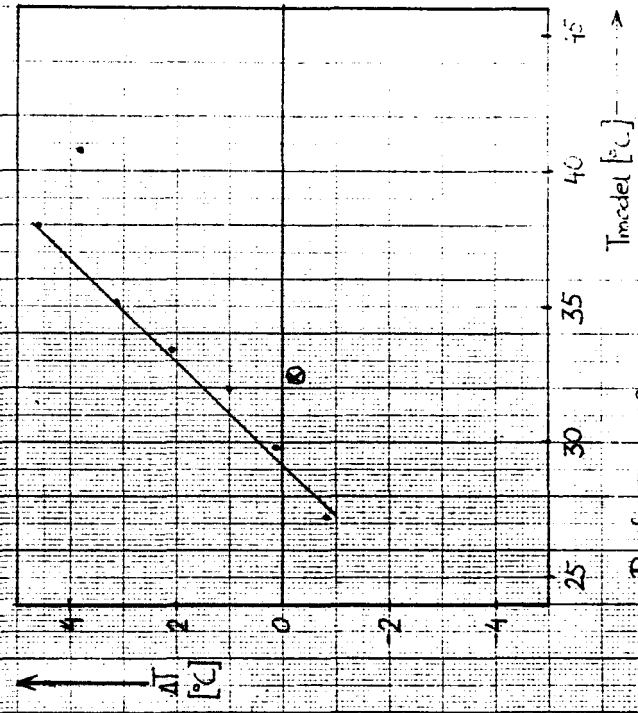
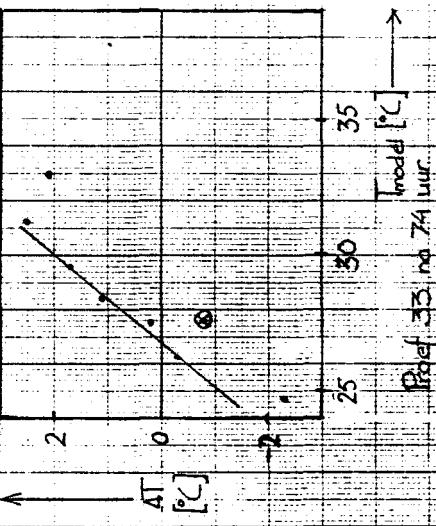
$0.6 \times 1.5 = \lambda^* - \lambda_w$

20.890	20.625	20.625	23.597	19.400	19.400	19.400
20.828	20.670	20.824	24.756	22.821	22.100	21.879
20.980	20.876	27.530	26.373	25.118	24.332	24.079
20.847	20.814	29.300	28.237	27.052	26.224	26.901
20.892	20.846	31.877	30.376	28.841	27.792	27.572
20.887	20.920	33.511	33.034	30.522	28.993	28.446
20.896	44.032	41.733	36.897	31.803	29.608	28.922

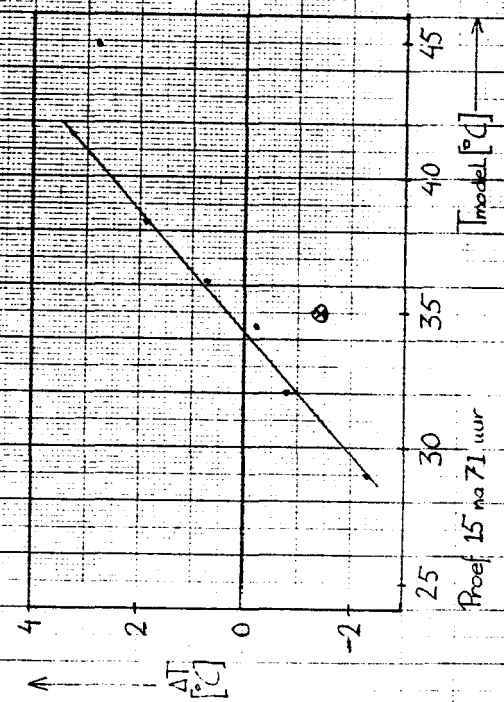
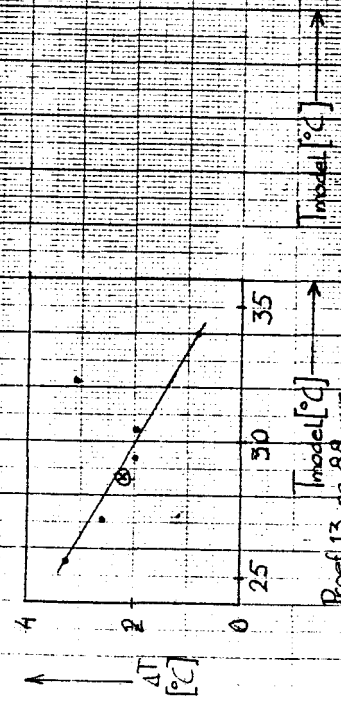
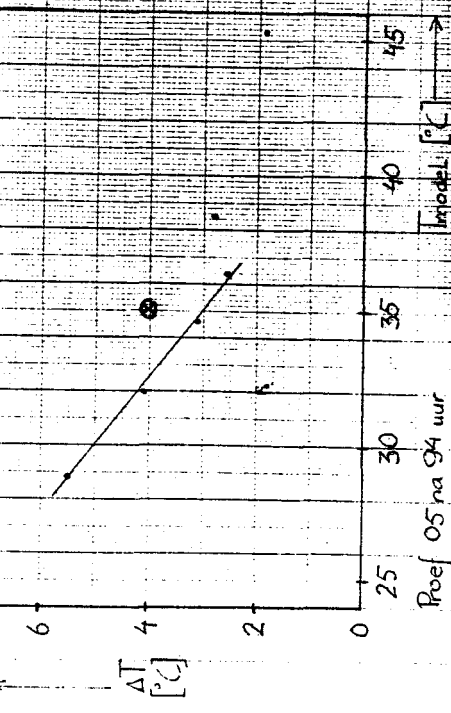
Wuit= 1.928E+00 W Tboven= 19.4°C Tbuiten= 20.2°C tijd: 72.00uur

18	22.10	12	18.00	6	26.22
17	24.74	11	17.40	5	26.61
16	27.07	10	33.03	4	28.24
15	30.14	9	30.52	3	24.50
14	32.65	8	28.99	2	44.03
13	36.93	7	27.78	1	35.51





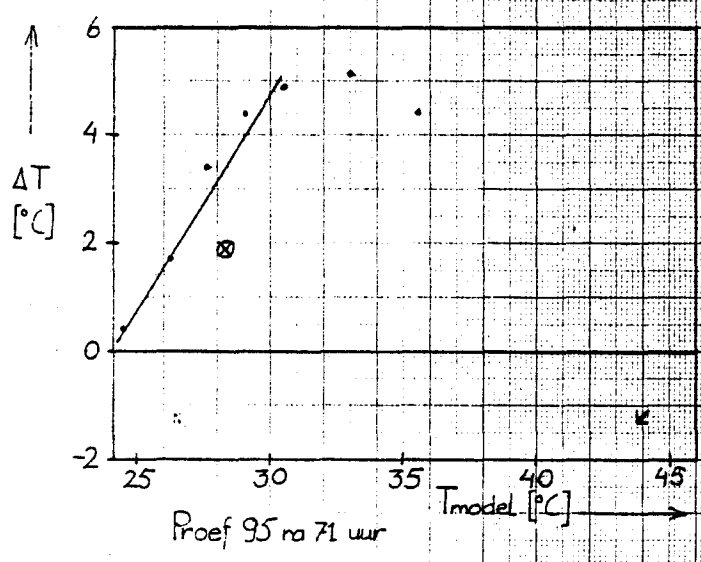
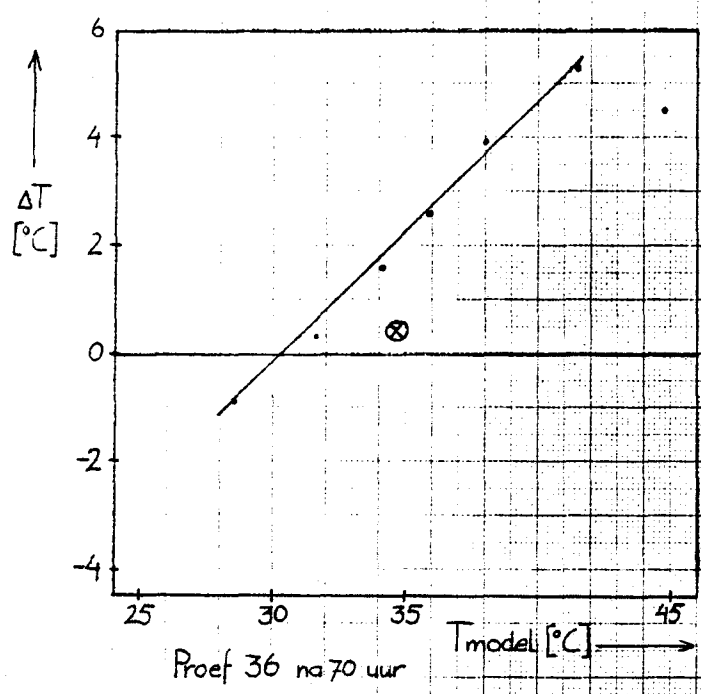
$T_{model}$ : zoals bepaald met GELEIDING  
 $\Delta T = T_{gemeten} - T_{model}$   
 ⊗: Temp.op (3,3)



Verskil gemeten en modeltemperatuur als funktie van de modeltemperatuur

$$\Delta T = T_{\text{gemeten}} - T_{\text{model}}$$

⊗ : Temp. op (3.3)



Kritische Zustandsgrößen:

$$p_c = 37,66 \text{ bar}; \vartheta_c = -140,63 \text{ °C}; T_c = 132,52 \text{ K} \quad \rho_c = 313 \text{ kg/m}^3;$$

$$\text{Molmasse: } \tilde{M} = 28,96 \text{ kg/kmol}$$

Tabelle 14. Stoffwerte von trockener Luft beim Druck  $p = 1 \text{ bar}$

$\vartheta$	Celsius-Temperatur	$\eta$	dynamische Viskosität
$\rho$	Dichte	$\nu$	kinematische Viskosität
$c_p$	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	$a$	Temperaturleitfähigkeit
$\beta$	Wärmeausdehnungskoeffizient	Pr	Prandtlzahl
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit		

$\vartheta$ °C	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$c_p$ kJ/kgK	$\beta$ 10 <sup>-3</sup> /K	$\lambda$ 10 <sup>-3</sup> W/mK	$\eta$ 10 <sup>-6</sup> kg/ms	$\nu$ 10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s	$a$ 10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s	Pr 1
-180	3,8515	1,071	11,701	9,0	6,44	1,67	2,18	0,77
-160	3,1258	1,036	9,320	10,9	7,85	2,51	3,37	0,75
-140	2,6391	1,021	7,758	12,7	9,20	3,48	4,71	0,74
-120	2,2867	1,014	6,659	14,6	10,49	4,587	6,30	0,73
-100	2,0186	1,011	5,846	16,40	11,72	5,806	8,04	0,72
- 80	1,8073	1,009	5,219	18,16	12,89	7,132	9,96	0,72
- 60	1,6364	1,007	4,719	19,83	14,02	8,567	12,0	0,71
- 40	1,4952	1,006	4,304	21,45	15,09	10,09	14,3	0,71
- 20	1,3765	1,006	3,962	23,01	16,15	11,73	16,6	0,71
0	1,2754	1,006	3,671	24,54	17,10	13,41	19,1	0,70
20	1,1881	1,007	3,419	26,03	17,98	15,13	21,8	0,70
40	1,1120	1,008	3,200	27,49	18,81	16,92	24,5	0,69
60	1,0452	1,009	3,007	28,94	19,73	18,88	27,4	0,69
80	0,9859	1,010	2,836	30,38	20,73	21,02	30,5	0,69
100	0,9329	1,012	2,684	31,81	21,60	23,15	33,7	0,69
120	0,8854	1,014	2,547	33,23	22,43	25,33	37,0	0,68
140	0,8425	1,017	2,423	34,66	23,19	27,53	40,5	0,68
160	0,8036	1,020	2,311	36,07	24,01	29,88	44,0	0,68
180	0,7681	1,023	2,209	37,49	24,91	32,43	47,7	0,68
200	0,7356	1,026	2,115	38,91	25,70	34,94	51,6	0,68
250	0,6653	1,035	1,912	42,43	27,40	41,18	61,6	0,67
300	0,6072	1,046	1,745	45,91	29,20	48,09	72,3	0,67
350	0,5585	1,057	1,605	49,31	30,90	55,33	83,5	0,66
400	0,5170	1,069	1,485	52,57	32,55	62,95	95,1	0,66
450	0,4813	1,081	1,383	55,64	34,00	70,64	107	0,66
500	0,4502	1,093	1,293	58,48	35,50	78,86	119	0,66
600	0,3986	1,116	1,145	63,5	38,30	96,08	143	0,67
700	0,3577	1,137	1,027	67,8	40,87	114,3	166	0,69
800	0,3243	1,155	0,932	71,3	43,32	133,6	190	0,70
900	0,2967	1,171	0,852	74,3	45,65	153,9	214	0,72
1000	0,2734	1,185	0,786	76,8	47,88	175,1	237	0,74



LITERATUURLIJST

---

- 1 Bear J. 1979 Hydraulics of groundwater, McGraw-Hill international bookcompany, New York.
2. Beukema K.J. 1971 Heat and mass transfer during cooling and storage of agricultural products as influenced by natural convection, proefschrift LH Wageningen.
- 3 Blackwell J.H. 1956 The axial flow error in the thermal conductivity probe, Canadian J. of Physics 34: 412-417.
- 4 Buretta R.J. & Berman A.S. 1976 Convective heat transfer in liquid saturated porous layer, J. of Applied Mechanics june: 249-253.
- 5 Chandrasekhar S. 1961 Hydrodynamic and hydromagnetic stability, Clarendon Press London.
- 6 Collins R.B. 1983 Alice Spring solar pond project, Solar world congres Perth august(2): 775-779.
- 7 Feyter J.W. de 1980 Modelonderzoek t.b.v. warmteopslag in de grond, Laboratorium voor Grondmechanika Delft, C0143220.
- 8 Hagebeuk H. 1981 Aantekeningen bij het college Computational Physics hoofdstuk 2, TH Eindhoven.
- 9 Haneghem I.A. van 1981 Een niet stationaire naaldmethode (warmtegeleiding, warmtecapaciteit, contactweerstand), Proefschrift LH Wag.
- 10 Jaeger J.C. 1956 Conduction of heat in an infinite region bounded internally by a circular cilinder of a perfect conductor, Austr. J. of Physics 9: 167-179.
- 11 Kooi J. van der 1971 Moisture transport in cellular concrete roofs, Proefschrift TH Eindhoven.
- 12 Loon W.K.P. van 1984, Warmteonttreking aan koude grond, intern rapport WOP-WET 84022, TH Eindhoven.
- 13 Luikov A.V. 1975 Systems of differential equitations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies, Int. J. of Heat and Mass Transfer 18: 1-14.
- 14 Menenti M. 1984 Physical aspects and determination of evaporation in deserts applying remote sensing techniques, Proefschrift LH Wag.
- 15 Rekencentrum informaties 1982 Beschrijvingen van grafische procedures en subroutines, RC PP-6.5.2 TH Eindhoven.
- 16 Shah D., Ramsey W. & Wang M. 1984 An experimental determination of heat and mass transfer coefficients in moist unsaturated soil, Int. J. of Heat and Mass Transfer 27: 1075-1085.
- 17 Smulders P. & Schram P. 1981 Fysische transportverschijnselen, kollegediktaat 3322, TH Eindhoven.
- 18 Verein Deutscher Ingenieure 1977 VDI Wärmeatlas, VDI-Verlag Düsseldorf.
- 19 Vries D.A. de & Philip J.R. 1957 Moisture movement in porous materials under temperature gradients, Tansactions American Geophysical Union 38,2: 222-231.
- 20 Veltkamp G.W. & Geurts A.J. 1980 Numerieke methoden, kollegediktaat 2211, TH Eindhoven.
- 21 Verlaat F.N.J. 1984 Uitvoeringservaringen en evaluatie van de seizoenopslag in Groningen, 5402M, Bredero Energy Systems Bunnik.
- 22 Wijsman A.J.T.M. & Feyter J.W. de 1984 Fieldtest to investigate the performance of an undeeep prototype seasonal heat storage system etc, 303.346, TPD TNO-TH Delft.

## SYMBOLENLIJST

NAAM	EENHEID	
a	Temperatuurvereffeningscoëfficiënt	m <sup>2</sup> /s
A	Koëfficiënt uit model voor lambdanaald (form 21)	K
AA	Grootte van helling bij lineaire regressie	-
B	Koëfficiënt uit model voor lambdanaald (form 21)	K
BB	Asafsnijding bij lineaire regressie	
C	Warmtecapaciteit	J/kg/K
Cp	Warmtecapaciteit bij konstante druk	J/kg/K
CE	Konstante van Euler	-
D	Diffusieconstante	m <sup>2</sup> /s
d10	10 massaprocent van de grond heeft een kleinere diameter dan D10	m
E	Koëfficiënt uit model voor lambdanaald (form 21)	K
Fo	Getal van Fourier	-
g	Zwaartekrachtversnelling	m/s <sup>2</sup>
h	Waterdruk in de poriën	m
I	Roostercoördinaat in de X-richting	-
J	Roostercoördinaat in de Z-richting	-
k	Kapilaire geleidbaarheid van de grond	m/s
K	Permeabiliteit van de grond	m <sup>2</sup>
l	Afstand van warme las thermokoppel tot einde stookdraad in lambdanaald	m
n	Porositeit van de grond=poriënvolume/totaal volume	-
Nu	Getal van Nusselt	-
p	Druk	N/m <sup>2</sup>
Q	Vermogen	W
r	Straal	m
r̄	uitwisselingscoëfficiënt water-waterdamp	-
R	Gaskonstante	J/mol/k
Ra	Getal van Rayleigh	-
Re	Getal van Reynolds	-
t	Tijd	s
T	Temperatuur	K
Tvi	Virtuele temperatuur	K
v	Snelheid	m/s
V	Straal buitenzijde omhulsel Lambdanaald	m
w	Watergehalte=Watervolume/poriënvolume	-
x	Lengtecoördinaat in de bak	m
y	Breedtecoördinaat in de bak	m
z	Hoogtecoördinaat in de bak	m
α	alfa Verhouding warmtecapaciteit omgeving en lambdanaald	-
β	beta Lineaire uitzettingscoëfficiënt	1/K
Γ	gamma Kontaktweerstand tussen naald en medium	m <sup>2</sup> *K/W
γ	gamma Dimensieloze kontaktweerstand	-
Δ	delta Verschil	
η	eta Dynamische viscositeit	kg/m/s

$\theta$	theta	Temperatuurverschil model- eksperiment	K
$\lambda$	lambda	warmtegeleidingscoefficient	W/m/k
$\rho$	rho	Dichtheid	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	sigma	oppervlaktespanning tussen water en lucht	N/m <sup>2</sup>
$\nabla$	nabla	gradient of divergentie	1/m

#### ONDERSCHRIFTEN

d	Damp
eff	Effektief
g	Grond
i,x	In de X-richting
j,z	In de Z-richting
k	Konvektief
l	Per lengte-eenheid
om	Omgeving
s	Stroomstof
vl	Vochtige lucht (dus damp en lucht)
w	Vloeibaar water
ver	Verzadigd (met water of waterdamp)
y	In de Z-richting (bij de computerprogramma's)

#### BOVENSCHRIFTEN

$\rightarrow$	Vektor
*	Schijnbaar
-	Gemiddeld