Jan v. Bakel
ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

NOTA 920

Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding
Wageningen

ELEKTRISCH MODELONDERZOEK NAAR INFILTRATIE VANUIT EVENWIJDIGE WIJKEN

ing. F. Homma

Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatiemiddelen, dus geen officiële publikaties.
Hun inhoud varieert sterk en kan zowel betrekking hebben op een eenvoudige weergave van cijferreeksen, als op een concluderende discussie van onderzoeksresultaten. In de meeste gevallen zullen de conclusies echter van voorlopige aard zijn omdat het onderzoek nog niet is afgesloten.
Bepaalde nota's komen niet voor verspreiding buiten het Instituut in aanmerking

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

I N H O U D

	blz.
I. INLEIDING	1
II. PROEFGEBIED	3
II.1. Ligging	3
II.2. Proefopzet	3
II.3. Waterbalans	7
III.THEORIE	12
IV. BEREKENING HYDROLOGISCHE GROOTHEDEN	16
IV.1. Doorlaatfaktor	16
IV.2. Doorlatend vermogen	18
IV.3. Weerstand wijkbodem	20
V. ELEKTRISCHE MODELLEN	23
V.1. Inleiding	23
V.2. Opzet van een elektrisch model	23
V.3. Eerste perceelsmodel	26
V.4. Aanvullende gegevens	28
V.5. Gebiedsmodel	30
V.5.1. Opbouw van het model	30
V.5.2. Doorlaatfaktoren	32
V.6. Herziene perceelsmodel	36
V.6.1. Opbouw van het model	36
V.6.2. Doorlaatfaktoren	37
V.6.3. Weerstand van de wijkbodem	40

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

blz.

VI. GEWENSTE PEILBEHEERSING 41

VI.1. Beschikbare hoeveelheid vocht 41

VI.2. Realisering optimale vochtvoorziening 44

SAMENVATTING 50

LITERATUUR 52

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

I. INLEIDING

Voor het handhaven van een optimale ontwateringstoestand van de bodem kunnen in het algemeen twee limiterende grondwaterstandsdiepten worden onderscheiden. De bovengrens garandeert een vochtgehalte dat voldoende laag is voor een goede bewerkbaarheid in voor- en najaar en voor een goede lucht- en stikstofhuishouding tijdens het groeiseizoen. De ondergrens wordt gesteld door de eisen aangaande de waterbehoefte van het gewas. De optimale grondwaterstand zal tussen deze twee grenzen moeten liggen.

In het jonge veenkoloniale gebied van het waterschap 'DE RUNDE' (nu de VEENMARKEN) nabij Emmercompascuum zijn in enige wijken de peilen opgezet om water te infiltreren in de tussenliggende percelen. Het doel van deze proef was de invloed vast te stellen van de grondwaterstandsverhoging op de gewasproduktie en daaraan gekoppeld het vaststellen van de optimale grondwaterstand. Het opzetten van de wijkpeilen resulteerde in een grondwaterstandsverhoging tot 130 à 140 cm -mv.

Uit het waterbalans onderzoek gedurende de groeiseizoenen 1972 en 1973 werd gevonden dat deze verhoging weinig of geen invloed heeft gehad op de voor de verdamping beschikbare hoeveelheid water. Alleen voor de tweede helft van de groeiperiode in 1973 was de totale verdamping groter dan de som van de neerslag en de door de onverzadigde grond geleverde hoeveelheid vocht.

Op grond van theoretische berekeningen omtrent de maximale hoeveelheid water die beschikbaar komt voor de verdamping van een gewas gedurende een aantal dagen bij een gegeven kans op neerslag, dikte van de wortelzone, diepte van de grondwaterstand en de hydrologische eigenschappen van de grond, kan zowel een diepst als een hoogst

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

toelaatbare grondwaterstand worden berekend (FEDDES, 1971). Voor bijvoorbeeld aardappelen met een wortelzone van 30 cm en een verdampingsbehoefte van 310 mm liggen deze waarden bij respektievelijk 0,60 m en ongeveer 1 à 1,20 m -mv (VAN DER SPELT, 1974).

De capillaire opstijging naar het gewas mag bij de opgezette grondwaterstanden van 130 à 145 cm -mv vrij klein worden geacht: ± 10 mm over het totale groeiseizoen.

Uit de waterbalansmetingen gedurende 1972 en 1973 waarbij een netto infiltratie vanuit de wijken in rekening is gebracht bleek een afvoer uit het profiel te bestaan. Dit duidde erop dat water naar de ondergrond verdween. Om een beter inzicht in de optredende stromingen te verkrijgen is het huidige elektrische modelonderzoek opgezet. Daarbij is gebruik gemaakt van een model voor het proefperceel en een model van een groter gebied. Door combinatie van veldgegevens en uitkomsten van het modelonderzoek is het mogelijk hydrologische gebiedsconstanten zoals doorlatendheid, doorlatend vermogen en radiale- en wijkweerstanden en stroomsnelheden te berekenen.

In deze nota worden de consequenties besproken van een verhoging van de grondwaterstand met betrekking tot de vereiste wijkpeilen, de hoeveelheid benodigd water en de uitgestrektheid van het gebied.

Om uit te laten komen wat de problemen zijn bij een dergelijk onderzoek en hoe deze zijn op te lossen, is deze nota geschreven in de volgorde zoals het onderzoek heeft plaatsgevonden.

De auteur is veel dank verschuldigd aan:
mevrouw Elkink voor de verwerking van de klimatologische gegevens,
de heer Ernst voor de hydrologische adviezen,
de heer Feddes voor adviezen bij het opstellen van deze nota,
de heer Nijhoff van het waterschap 'De Veenmarken' voor het verzamelen van de gegevens van de veldmetingen,
de heer Pankow voor het vochtonderzoek van de bodem,
de heer van Rees Vellinga voor de verwerking van de boorgegevens tot kD-waarden en
de heer Rietveld voor de verzorging van de figuren.

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

II. PROEFGEBIED

II.1. L i g g i n g

Het proefobject is gelegen ten oosten van Barger-Oosterveld in het Hunze-dal (fig. 1). Het Hunze-dal is ontstaan door het smeltwater van het vroeger voorkomende landijs (RIJKS GEOLOGISCHE DIENST, 1975) hetwelk het dal uitschuurde tot circa 25 m diep. Dit dal is achtereenvolgens opgevuld door grove smeltwaterzanden met grind en stenen, rivierafzettingen met fijnere zanden en kleien, fijne fluviatiele zanden en tenslotte een laag hoogveen. De basis van dit veen is nog als een dunne restlaag aanwezig.

Het deel van het gebied tussen de Catovaart en de Berkenrode en ten zuiden van de Margrietvaart (fig. 2) werd gekozen voor het opzetten van de wijkpeilen. Omdat in dit gebied geen direkte gegevens beschikbaar waren over de profielopbouw is naderhand door het I.C.W. een pulsboring tot 25 m diepte uitgevoerd. Onder de bouwvoor van circa 30 cm bevindt zich een laag grijs venig slibarm matig fijn zand met daaronder zand in verschillende grofheden en samenstelling. De harde humeuze leem die hier bij de boring midden op het perceel werd aangetroffen op circa 20 m diepte is niet gevonden bij latere boringen aan de Berkenrode en Catovaart. Deze boringen zijn uitgevoerd om filters op grotere diepte te kunnen plaatsen teneinde een inzicht te krijgen in de grondwaterstroming in de verschillende diepere lagen.

II.2. P r o e f o p z e t

Het onderzoeksgebied is gelegen in het voormalige waterschap 'De Runde', hetwelk na een reorganisatie is opgenomen in het huidige waterschap 'De Veenmarken'. In fig. 3 is een overzicht gegeven van de grondwaterstandsraaien en de plaats van de twee watermeters. Deze zijn aangebracht in damwanden in de wijk (Z) ten zuiden van het perceel op een onderlinge afstand van 344 meter. Met behulp van deze watermeters kan de hoeveelheid in- of uitstromend water voor die wijk worden bepaald. Daar de percelen in dit gebied een gelijke breedte

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

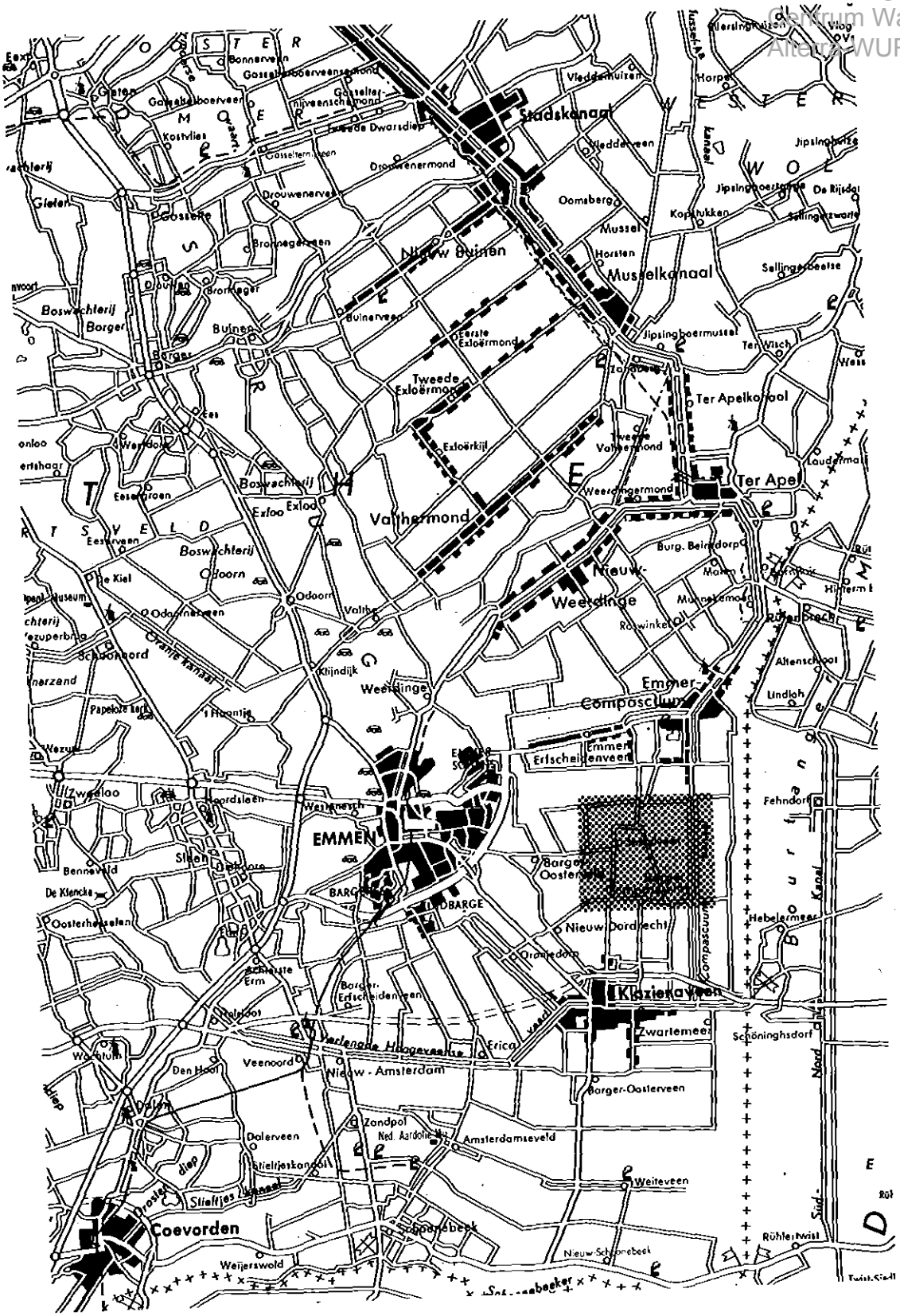


Fig. 1. De ligging van het proefgebied in Z.O. Drente

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

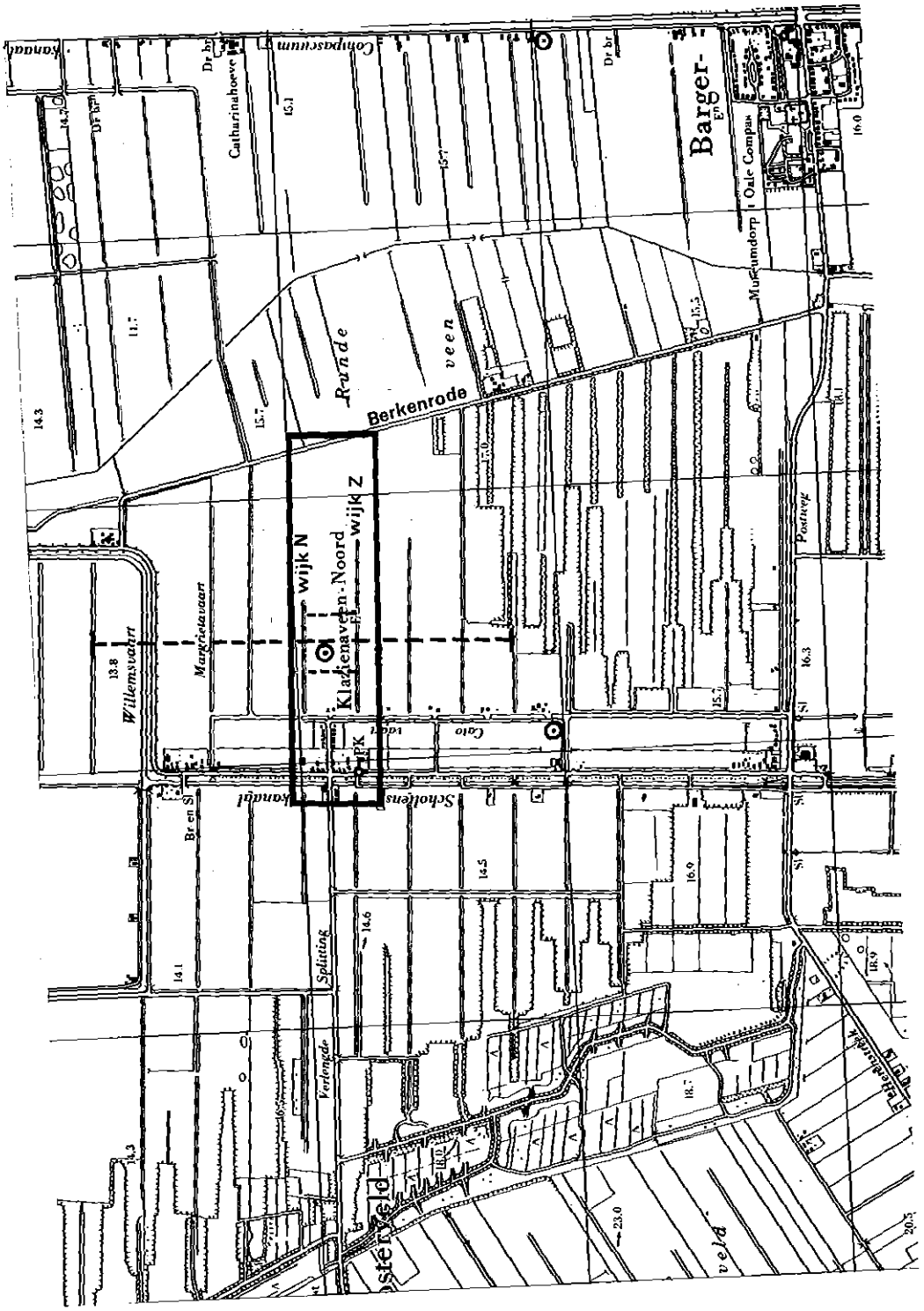


Fig. 2. De ligging van het proefperceel met de voor wateraan- en afvoer zorgende wijken en de uitgevoerde boringen (⊙)

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

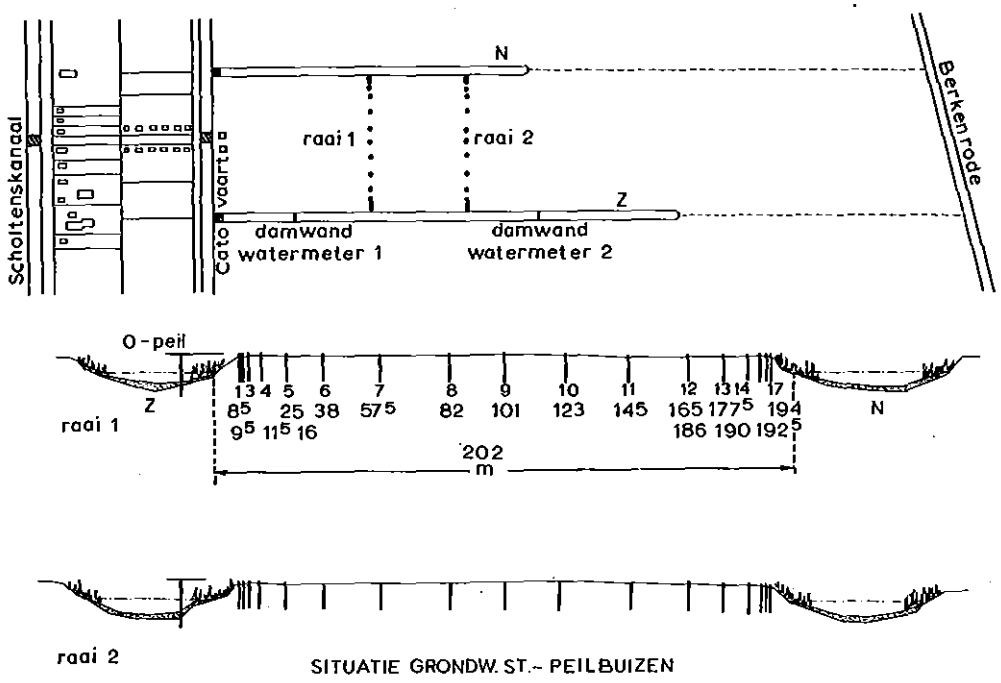


Fig. 3. Plaats van de grondwaterstandsraaien en watermeters en de afstanden van de peilbuizen tot de Zuidelijke wijk

hebben en ook de aangrenzende wijken zijn opgezet zijn de gemeten hoeveelheden water voorlopig betrokken op de gehele breedte van het perceel.

Behalve van de grondwaterstandsbuizen welke dagelijks werden afgelezen zijn ook gegevens bekend van twee zelfregistrerende grondwaterstandsmeters welke geplaatst zijn in het midden van de twee raaien.

De luchttemperatuur, relatieve vochtigheid, neerslag en windsnelheid zijn ter plaatse van het proefobject gemeten. Gegevens over straling en zonneschijnduur werden ontleend aan het K.N.M.I.-station te Eelde. Door ook metingen aan het gewas te doen kon de werkelijke verdamping worden berekend.

Met behulp van gamma-metingen zijn wekelijks op twee plaatsen midden op het perceel de vochtveranderingen van het profiel gemeten

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

tot een diepte van 130 cm. Het droog volume gewicht van de grond werd in het laboratorium bepaald en voor de duur van de proef werd deze constant verondersteld. De natte dichtheden gemeten met de gamma-transmissie zijn een maat voor de hoeveelheid vocht in de grond.

II.3. W a t e r b a l a n s

Uit de verzamelde grondwaterstandswaarnemingen en wijkpeilen zijn voor de groeiperiode van 1972 en 1973 een drietal gemiddelde grondwatercurven berekend (tabel 1, fig. 4). Opvallend is de

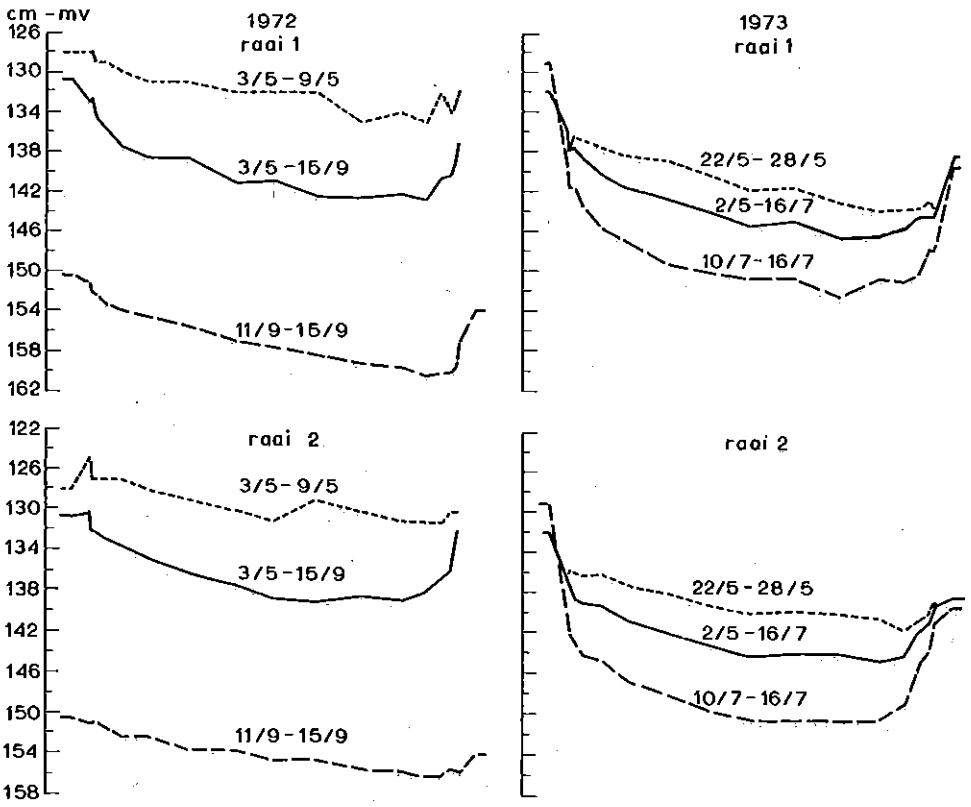


Fig. 4. Gemiddelde grondwaterstand gedurende een aantal geselecteerde perioden tijdens de groeiseizoenen 1972 en 1973

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

Tabel 1. Enkele gemiddelde grondwaterstanden in 1972 en 1973

Periode	Wijkpeilen zuid	noord	Grondwaterstandsbuizen nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	Raai 1	1972	afst.	8,5	9,5	11,5	16	25	38	57,5	82	101	123	145	165	177,5	186	190	192,5	194
3/5- 9/5	130,7			133,0	132,7	134,6	135,6	137,5	138,6	138,7	141,1	140,9	142,4	142,6	142,2	142,8	140,6	140,3	139,0	137,1
11/9-15/9	150,5	153,9		151,2	152,0	152,2	153,2	154,0	154,6	155,6	157,0	157,6	>157	159,2	159,6	160,4	>159	160,0	159,4	157,2
3/5-15/9	128			128	128	129	129	130	131	131	132	132	132	135	134	135	132	134	133	132
	Raai 2	1972																		
3/5- 9/5				130,4	132,1	132,2	132,9	133,6	134,8	136,2	137,3	138,6	138,9	138,4	138,8	138,0	136,6	135,9	133,3	131,9
11/9-15/9	150,5	153,9		151,0	151,0	151,0	151,4	152,4	152,4	153,6	153,6	154,6	154,5	155,4	155,6	156,2	156,2	155,6	155,6	155,8
3/5-15/9	128			125	127	127	127	127	128	129	130	131	129	130	131	131	131	130	130	130
	Raai 1	1973																		
22/5-28/5	133,1	137,2		135,2	137,2	136,7	137,8	139,7	141,0	142,0	143,5	145,0	144,5	146,0	145,7	146,2	145,5	144,7	144,7	144,2
10/7-16/7	129,2	139,4		139,7	141,5	141,5	143,5	145,7	147,0	149,2	150,2	150,7	150,7	152,5	150,7	151,0	149,2	147,7	147,7	146,5
2/5-16/7				136,2	137,7	137,5	138,6	140,2	141,5	142,6	144,1	145,3	145,0	146,5	146,1	146,3	146,6	144,5	144,4	143,8
22/5-18/6	133,1	136,6		134,8	136,4	136,1	137,1	138,5	139,6	140,5	142,2	143,5	143,2	144,7	144,4	144,9	144,4	143,7	143,8	143,5
12/6- 9/7	131,2	139,3		137,1	139,0	138,9	140,4	142,5	143,9	145,1	146,6	147,7	147,4	148,8	148,0	148,1	145,5	145,6	145,1	144,4
	Raai 2	1973																		
22/5-28/5	133,1	137,2		135,8	136,3	137,3	138,3	138,7	140,2	141,3	142,7	143,3	143,3	143,3	144,5	144,2	142,5	141,7	139,5	139,5
10/7-16/7	129,2	139,4		140,7	141,7	142,7	144,2	144,7	146,7	148,0	149,7	150,5	150,5	150,5	150,5	149,0	145,0	143,7	141,0	140,7
2/5-16/7				136,9	137,2	138,6	139,0	139,3	140,7	141,9	143,4	144,2	143,9	144,0	144,7	144,1	141,6	140,9	139,2	138,9

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

toenemende diepte van de grondwaterstand in de richting van wijk N. Ook wijkpeil N zelf ligt lager dan het wijkpeil Z. De oorzaken van dit verschil zijn niet zonder meer duidelijk daar beide wijken op de Catovaart uitkomen. Ook het debiet kan gezien de afmetingen van de wijken en de geringe infiltratie niet als oorzaak worden aangemerkt.

Om een mogelijke oorzaak van deze asymmetrische stroming op te sporen is eerst een waterbalans voor het perceel opgesteld:

$$A = N+I+\Delta W+\Delta B-E \qquad (mm.week^{-1}) \qquad (1)$$

waarin:

A = afvoer uit het perceel en de wijk naar de ondergrond
N = neerslag
I = infiltratie
ΔW = vochtlevering door de grond
ΔB = vrijkomend vocht door grondwaterstandsdaling
E = aktuele verdamping

Hierbij is de term I bepaald door voor de wijk rekening te houden met de neerslag, de open waterverdamping, de bergingsverandering en het verschil tussen de in- en uitvoer via de watermeters. De vochtverandering van de grond is berekend uit de wekelijkse gamma-meting en het vrijkomend vocht tengevolge van de grondwaterstandsdaling door een bergingscoëfficient van 10% aan te nemen (1 cm gr.w.st. daling → 1 mm vocht). De aktuele verdamping is berekend uit de meteorologische waarnemingen en de gewasgegevens. In tabel 2 is een samenvattend overzicht gegeven van de termen van de waterbalans voor de beide groeiseizoenen waarbij 1973 nog eens is opgesplitst in twee periodes die min of meer als stationair mogen worden beschouwd. Uit deze tabel is te berekenen dat de gemiddelde afvoer in de orde van grootte van 1 $mm.dag^{-1}$ ligt. De infiltratie vindt behalve op het proefperceel eveneens plaats op de naastliggende percelen, waar de wijken ook zijn opgezet. Vanuit deze percelen treedt daarom eveneens een afvoer op.

Omdat de dikte van de diepere watervoerende laag niet oneindig groot is moet er een horizontale stroming optreden. Deze horizontale stroming kan een oorzaak zijn van de waargenomen vorm van de grondwaterspiegel.

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

Tabel 2. Waterbalans gedurende de groeiseizoenen 1972 en 1973

Periode		Neerslag	Infiltratie	Vochtlevering	Vocht uit gr.w.st. daling	Verdamping	Afvoer
nr.	datum	mm.week^{-1}	mm.week^{-1}	mm.week^{-1}	mm.week^{-1}	mm.week^{-1}	mm.week^{-1}
		N	I	ΔW	ΔB	E	A
	1972						
22	23/5-29/5	22,8	- 4,1	1,4	- 4	13,4	2,7
23	30/5- 5/6	18,9	3,7	5,1	0	13,6	14,1
24	6/6-12/6	17,3	1,5	3,5	2	14,8	9,5
25	13/6-19/6	13,4	2,7	4,8	4	17,5	7,4
26	20/6-26/6	29,6	4,6	- 4,5	1	19,2	11,5
27	27/6- 3/7	45,3	- 1,5	- 29,3	- 18	16,5	- 20,0
28	4/7-10/7	10,9	- 3,4	7,1	4	20,6	- 2,0
29	11/7-17/7	0,7	0,2	26,1	8	26,8	8,2
30	18/7-24/7	28,4	4,5	8,1	1	29,5	12,5
31	25/7-31/7	14,0	2,7		1	20,0	0,9
32	1/8- 7/8	26,4	- 0,5	9,7	4	22,0	11,1
33	8/8-14/8	14,3	- 0,9		4	26,0	- 5,3
34	15/8-21/8	49,3	1,1	1,5	- 6	19,3	25,8
35	22/8-28/8	2,1	- 3,3		18	14,0	3,6
36	29/8- 4/9	0,3	- 2,4	5,9	5	16,0	- 7,2
37	5/9-11/9	18,0	0,9	- 4,7	3	12,0	7,6
	1973						
74	22/5-28/5	2,5	3,0	9,5	0	10,5	4,5
75	29/5- 4/6	27,5	8,0	- 1,6	- 2	9,4	22,5
76	5/6-11/6	0,1	5,5	10,0	1	10,0	6,6
77	12/6-18/6		8,5	9,0	2	16,4	3,1
78	19/6-25/6		9,9	22,3	3	23,0	12,2
79	26/6- 2/7	14,3	4,3	16,0	4	30,7	7,9
80	3/7- 9/7	0,8	14,1	11,5	- 1	30,3	- 4,9
		aantal mm per periode					
	1972						
	23/5-11/9 (112 dagen)	311,7	5,7	37,0	31,0	301,2	84,2
	1973						
	22/5- 9/7 (49 dagen)	45,2	53,4	76,7	7	130,3	52,0

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

De weersomstandigheden over de groeiperiode 1972 waren zeer wisselvallig, waardoor grote schommelingen in de infiltratie (fig. 5) wijkpeilen, afvoer en grondwaterstanden optraden. Deze waarnemingen lenen zich daarom niet voor een stationaire behandeling.

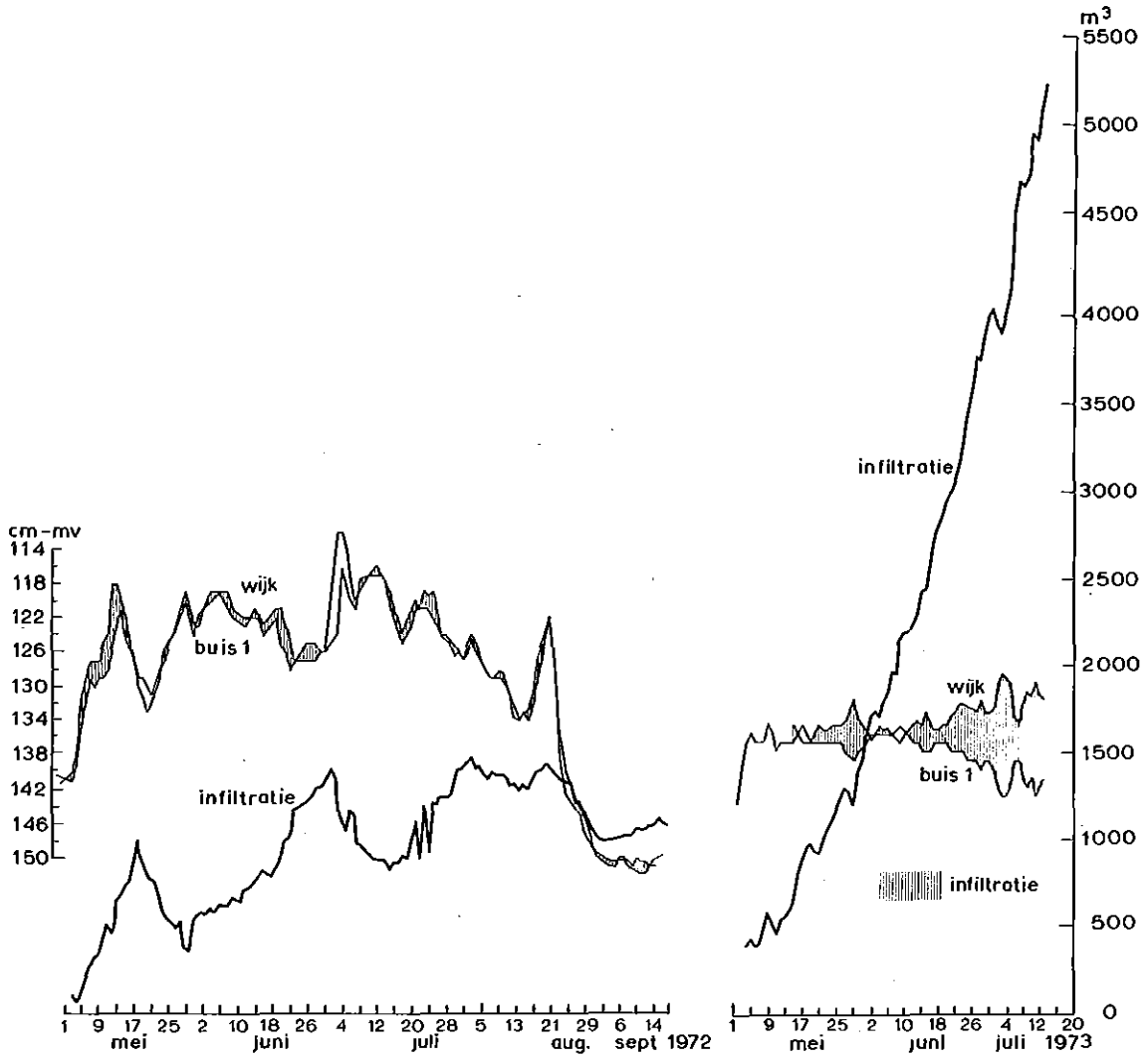


Fig. 5. Peilverschil tussen wijk en eerste grondwaterstandsbuis en de bijbehorende gesommeerde netto infiltratie vanuit de wijk

Voor berekeningen en modelonderzoek is voornamelijk gebruik gemaakt van de gegevens over 1973 waar de infiltratie vrij regelmatig plaatsvindt en groot is ten opzichte van de neerslag (fig.5).

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

Slechts in een paar perioden heeft een afvoer van neerslag naar de wijken plaats gehad.

III. THEORIE

De vorm van de gevonden grondwaterspiegels in fig. 4 komt niet overeen met bekende enkelvoudige stromingspatronen en kan ook niet bij benadering hierdoor worden weergegeven. Daarom moet worden geconcludeerd dat de stroming tussen de twee wijken in het proefperceel is opgebouwd uit verschillende stromingscomponenten. Afhankelijk van de tijd en de omstandigheden zullen deze componenten niet over het hele seizoen gelijk zijn en zal hun onderlinge verhouding variëren.

Het verschil tussen neerslag, verdamping en vochtberging in de grond geeft een vertikale stroming door het freatisch oppervlak. Deze stroming wordt in horizontale richting afgevoerd naar de wijken. Voor het theoretische geval dat de isotrope grond tot grote diepte doorlatend is en de volkomen doorlatende wijken zich uitstukken tot op deze diepte geldt (o.a. ERNST, 1962)

$$h' = \frac{NL^2}{8KD} \quad (m) \qquad (2)$$

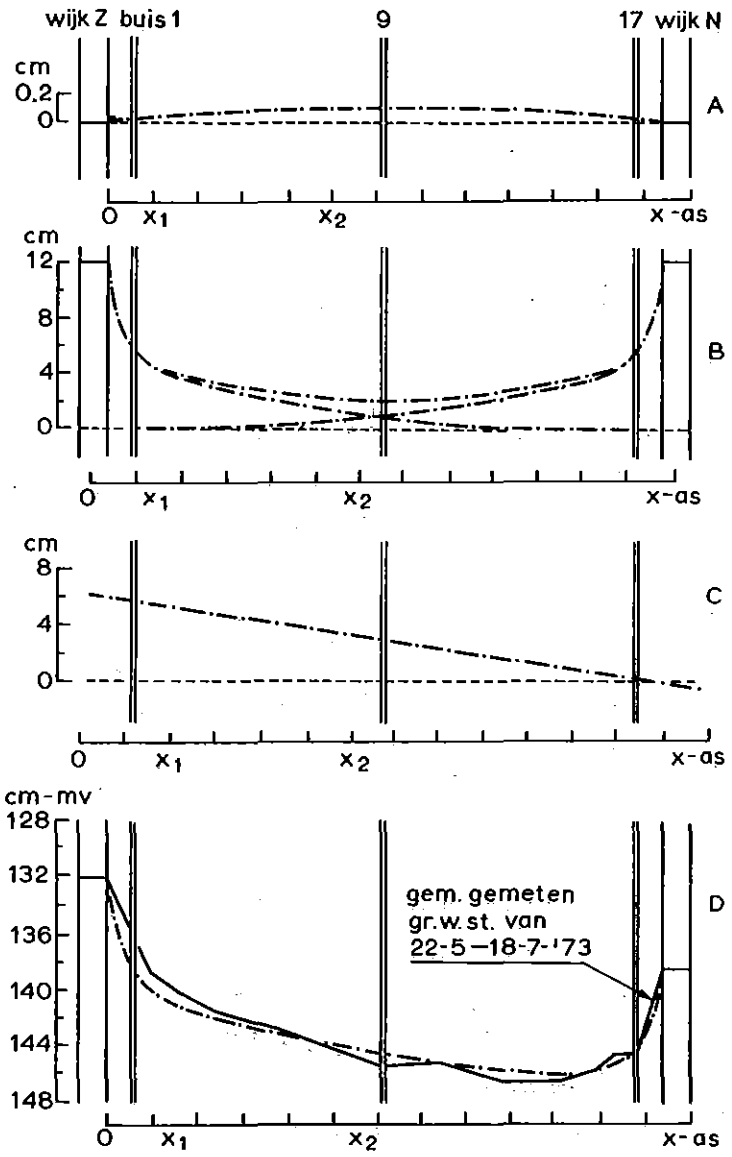
waarin:

- h' = hoogteverschil tussen het freatisch oppervlak midden op het perceel en het peil in de wijk (m)
- N = overtollige neerslag ($m.dag^{-1}$)
- L = afstand tussen de wijken (m)
- K = doorlaatfaktor van de grond ($m.dag^{-1}$)
- D = dikte van het watervoerend pakket (m)

Wordt h' als een hoogteverschil gemeten tussen twee punten op afstanden x_1 en x_2 van de oorsprong van een coördinatenstelsel (fig. 6a) dan gaat (2) over in

$$h'(x_1)-h'(x_2) = \frac{N}{2KD}\,(x_1^2-x_2^2) \quad (m) \qquad (2a)$$

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR



$$h'(x_1) - h'(x_2) = \frac{N}{2kD}(x_1^2 - x_2^2)$$

$$h''(x_1) - h''(x_2) = \frac{Q''}{nK} \ln\left(\frac{x_1 - x_0}{x_2 - x_0}\right) + P$$

$$h'''(x_1) - h'''(x_2) = \frac{Q'''}{kD}(x_2^2 - x_1^2)$$

$$h(x_1) - h(x_2) =$$
$$h'(x_1) - h'(x_2) + h''(x_1) - h''(x_2) + h'''(x_1) - h'''(x_2)$$

Fig. 6. Superpositie van de afzonderlijke stromingen in het proefperceel

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

De infiltraties vanuit de wijken mogen als zuiver radiale stromingen worden beschouwd als voor de isotrope grond weer een grote diepte wordt aangenomen. Deze stroming wordt weergegeven door:

$$h''(r) = \frac{Q''}{\pi K} \ln r + P \qquad (m) \qquad (3)$$

waarin:

$h''(r)$ = hoogteverschil tussen het peil in de wijk en het freatisch vlak op afstand r (m)

Q'' = hoeveelheid water die vanuit de wijk infiltreert $(m^3.m^{-1}.dag^{-1})$

K = doorlaatfaktor van de grond $(m.dag^{-1})$

r = afstand tot het midden van de wijk (m)

Ook hier kan h'' worden gemeten in twee punten op afstanden x_1 en x_2 (fig. 6B) waarbij (3) overgaat in:

$$h''(x_1)-h''(x_2) = \frac{Q''}{K} \ln\left(\frac{x_1-x_o}{x_2-x_o}\right)+P \qquad (m) \qquad (3a)$$

De derde component van de stroming wordt gevormd door de hoeveelheid water die onder de wijken doorstroomt en zich over een groter gebied dan het proefperceel uitstrekt. Deze stroming voldoet aan de wet van Darcy:

$$h''' = \frac{V}{K} x \qquad (4)$$

waarin:

h''' = hoogteverschil in het freatisch oppervlak over een afstand x (m)

V = stroomsnelheid $(m.dag^{-1})$

K = doorlaatfaktor $(m.dag^{-1})$

x = afstand tussen twee gekozen punten (m)

Deze vergelijking kan eveneens als het verschil tussen twee potentialen worden geschreven (fig. 6C) waarbij (4) overgaat in:

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

$$h'''(x_1)-h'''(x_2) = \frac{V}{K}(x_1-x_2) \qquad (4a)$$

Teneinde in de verg. (2a), (3a) en (4a) de stromingshoeveelheden alle uit te drukken in $m^2.dag^{-1}$ wordt voor de neerslag N geschreven:

$$N = \frac{Q'}{x_1-x_2} \qquad (m.dag^{-1})$$

en voor de stroomsnelheid V:

$$V = \frac{Q'''}{D} \qquad (m.dag^{-1})$$

zodat verg. (2a) overgaat in:

$$h'(x_1)-h'(x_2) = \frac{Q'}{2KD}(x_1+x_2) \qquad (m) \qquad (2b)$$

en verg. (4a) in:

$$h'''(x_1)-h'''(x_2) = \frac{Q'''}{KD}(x_2-x_1) \qquad (m) \qquad (4b)$$

Vergelijking (3a) geeft de stroming weer vanuit één wijk. In het veld treedt echter een stroming op vanuit beide wijken, zodat (3a) ook nog een keer gespiegeld bij de oorspronkelijke vergelijking moet worden opgeteld. (fig. 6B). In (3a) komt de constante P voor. Deze kan worden berekend door voor $h''(x_1)-h''(x_2)$ het verschil tussen het wijkpeil (h_o) en de gemiddelde grondwaterstand van de eerste peilbuis (h_1) te nemen.

De som van de afzonderlijke potentiaalverschillen van de drie genoemde componenten (fig. 6D) geeft een beeld van de stroming zo deze theoretisch zou kunnen optreden voor de gegeven situatie in het veld. Op grond van de goede overeenkomst tussen deze theorie en de veldmetingen zijn de drie afzonderlijke componenten gebruikt voor de verdere berekeningen.

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

IV. BEREKENING HYDROLOGISCHE GROOTHEDEN

IV.1. D o o r l a a t f a k t o r

Voor het berekenen van de doorlaatfaktor met behulp van (3a) wordt aangenomen dat het verschil in de niveaus van de wijken onderling alleen wordt veroorzaakt door de stroming in de diepere grondlagen. Het asymmetrische verloop van de grondwaterspiegel wordt gecorrigeerd door het oorspronkelijke peilverschil tussen de wijken evenredig met de afstand op de potentiaalmetingen in mindering te brengen. De op deze wijze verkregen vorm van het freatisch vlak geeft nu met goede benadering de door de infiltratie vanuit de wijken veroorzaakte vorm van de grondwaterspiegel weer. Wordt bovendien nog verondersteld dat de bodem tot een diepte van tenminste de halve wijkafstand homogeen doorlatend is, dan treden hier twee zuiver radiale stromingen op waarvoor (3a) geldt.

De mogelijkheid bestaat dat ten gevolge van slibafzetting en transport van fijne deeltjes de wijkbodem een doorlatendheid heeft die afwijkt van die van de homogene grond. Voor het bepalen van het stijghoogteverschil wordt daarom gebruik gemaakt van de peilen direct naast de wijk (h_1) en in het midden van het perceel (h_9) (fig. 7). Buis h_9 staat onder invloed van de stroming vanuit beide wijken.

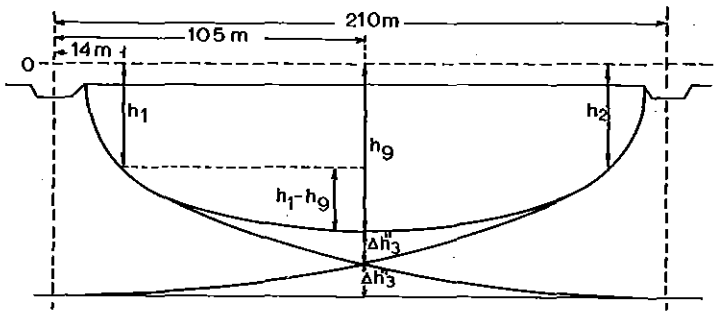


Fig. 7. Optelling van twee gelijktijdig optredende radiale stromingen vanuit de wijken ter weerszijden van het proefperceel

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

Voor de hoogte Δh_3 volgt uit vergelijking (3a) bij het gekozen 0-niveau

$$h''(x_1=105)-h''(x_2=210) = \Delta h''_3 = \frac{-Q''}{\pi k} \ln \frac{105}{210} + P \quad (m) \qquad (5)$$

Het hoogteverschil voor de stroming vanuit één wijk op de afstanden r=14m en r=105m is gelijk aan het hoogteverschil h_1-h_9 vermeerderd met $\Delta h''_3$. Toepassing van (3a) voor deze afstanden geeft

$$(h_1-h_9)+\Delta h''_3 = \frac{-Q''}{\pi k} \ln \frac{14}{105} + P \quad (m) \qquad (6)$$

Combinatie van (5) en (6) levert:

$$h_1-h_9 = \frac{-Q''}{k} (\ln \frac{14}{105} + \ln \frac{105}{210}) \quad (m) \qquad (7)$$

of

$$k = \frac{0,862\ Q''}{h_1-h_9} \qquad (8)$$

Toepassing van (8) op een aantal perioden in 1973 geeft tabel 3:

Tabel 3. Berekening van doorlaatfaktoren volgens (8)

1973 periode	h_1 (cm)	h_9 (cm)	Δh wijken (cm)	h_1-h_9 (cm) gecorr.	Q'' $m^2.dag^{-1}$	K $m.dag^{-1}$
74	- 135,2	- 145,0	4,1	7,9	0,09	0,98
75	- 135,0	- 142,8	4,0	6,0	0,24	3,45
76	- 133,8	- 141,6	3,3	6,3	0,165	2,26
77	- 135,4	- 144,6	2,4	8,1	0,255	2,71
78	- 136,2	- 146,9	6,8	7,6	0,197	3,37
79	- 137,7	- 148,9	10,7	6,3	0,129	1,77
80	- 139,3	- 150,4	13,2	5,1	0,423	7,14

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

Hieruit blijkt $\bar{k}$ = 3,10 m.dag^{-1} te zijn. Wordt (h_1-h_9) bepaald door het gemiddelde te nemen van de veldwaarnemingen (h_1-h_9) en $(h_{17}-h_9)$ wat, vanwege de veronderstelde symmetrie toegestaan is, dan blijkt voor k een ongeveer 20% hogere waarde te worden gevonden. Deze afwijking vindt zijn oorzaak in de veronderstelling, dat de infiltratie uit beide wijken gelijk is. Zoals later uit het elektrisch modelonderzoek zal blijken is deze aanname niet juist.

Een grote spreiding in de k-waarden was te verwachten aangezien in tabel 3 geen rekening is gehouden met bergingsveranderingen in de grond. Perioden met relatief grote hoeveelheden neerslag zullen ook invloed hebben. Bovendien blijkt na grafische zowel als numerieke bewerking van de infiltratie als functie van de stijghoogteverschillen, weinig verband tussen deze grootheden te bestaan. De gevonden waarden mogen daarom alleen gezien worden als een indikatie voor de orde van grootte voor de werkelijke doorlaatfaktor.

Voor 1972 gaat de hierboven toegepaste methode niet op, daar de neerslag groot is in verhouding tot de infiltratie. Tengevolge van de afvoer van de overtollige neerslag ontstaat een opbolling van de grondwaterspiegel, welke hier niet mag worden verwaarloosd ten opzichte van de radiale stroming. In bepaalde perioden is bij een geringe infiltratie de stijghoogte van het freatisch water zelfs hoger dan vlak bij of in de wijken, dit wil zeggen uit deze metingen zou volgen dat de stromingsrichting tegengesteld is aan het potentiaalverval.

IV.2. Doorlatend vermogen

De stroming onder de wijken door kan worden opgevat als een hoofdzakelijk horizontale stroming met als voeding de afvoerterm A van de waterbalans (1). Deze afvoer vanuit de wijken en het perceel naar de ondergrond mag op iets grotere diepte als een gelijke invoer per strekkende meter voor de diepere grondlagen worden beschouwd. Meten we op afstanden x_1 en x_2 de potentialen h' dan geldt (2a) waarbij de afvoer A in plaats van de neerslag N moet worden gebruikt:

$$h'(x_1)-h'(x_2) = \frac{A(x_1^2-x_2^2)}{2kD} \quad (m) \qquad (9)$$

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

In het proefgebied is het wijkpeil opgezet door een stuw in het Scholtenskanaal (fig. 2) waarbij het peilverschil voor en achter de stuw circa 70 cm bedraagt. Op circa 500 m ten noorden van het proefperceel is de grondwaterstand dientengevolge circa 70 cm dieper, zodat kan worden gesteld dat de gezamenlijke afvoer hier plaats vindt om vervolgens verder te worden getransporteerd.

Voor een viertal geselecteerde perioden zijn de gegevens van de waterbalans uit tabel 2 samengevat en opnieuw gerangschikt in tabel 4.

Tabel 4. Samenvatting van de waterbalanstermen van tabel 2

		1972 23/5-12/9 mm/112 dagen	1973 22/5-10/7 mm/49 dagen	1973 22/5-18/6 mm/28 dagen	1973 12/6-9/7 mm/28 dagen	
Neerslag	N	311,7	45,2	30,1	15,2	
Vochtlevering grond	ΔW	37,0	76,7	26,9	58,8	
Bergingsverandering	ΔB	31,0	7,0	- 1,0	8,0	
Aanvoer zonder infiltratie		397,7	128,9	56,0	82,0	+
Aktuele verdamping	E	301,2	130,3	46,3	100,4	-
Overschot		78,5	- 1,4	9,7	-18,4	
Infiltratie	I	5,7	53,4	25,0	36,8	
Afvoer	A	84,2	52,0	34,7	18,4	+
Gemiddelde afvoer	A	0,75 mm.dag^{-1}	1,06 mm.dag^{-1}	1,24 mm.dag^{-1}	0,66 mm.dag^{-1}	

Uit deze tabel blijkt dat $\bar{A}$ = 1,06 mm.dag^{-1} is voor het gemiddelde van het groeiseizoen 1973. De gemiddelde stijghoogtes van de grondwaterstand in de peilbuizen h_1 en h_{17} (fig. 3) op 9 m afstand van de wijken zijn bepaald uit de waarnemingenreeks over dat seizoen. Voor deze buizen is (x_1-x_2)=182m en (x_1+x_2) ≈1200m. Deze waarden ingevuld in (9) geeft:

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

$$kD = 1631\ m^2.dag^{-1}$$

Voor het natte groeiseizoen 1972 zijn uit de beschikbare gegevens eveneens gemiddelde waarden voor de afvoer en de bijbehorende peilverschillen bepaald. Met deze gegevens wordt nu gevonden:

$$kD = 2730\ m^2.dag^{-1}$$

Deze waarschijnlijk veel te hoge waarde ontstaat door de grote schommelingen in de waarnemingen, waardoor het onwaarschijnlijk is dat de berekende gemiddelde afvoer past bij het gemiddelde potentiaal verschil over de gehele periode.

Uit de berekende kD-waarden kan niet zonder meer de laagdikte D worden afgeleid daar over de doorlaatfaktor van de diepere lagen nog geen waarden berekend zijn.

IV.3. Weerstand wijkbodem

Bij de stroming van of naar een drainerende leiding wijken de stroomlijnen af van de horizontale richting. Deze afbuiging geeft een extra weerstand aan de stroming, die vaak wordt aangeduid als radiale weerstand. In de direkte omgeving van een drainerende leiding kan door slibafzetting of inspoeling van fijne deeltjes de doorlatendheid van de grond afnemen. Dit heeft tot gevolg dat de stroming hier nog eens een extra weerstand ondervindt, welke wel wordt aangeduid als intreeweerstand. Het drukverlies wat ontstaat tengevolge van de stroming door deze weerstand moet worden opgeteld bij het drukverlies ten gevolge van de radiale toestroming naar de drainerende leiding. Het totale hoogteverschil tussen open waterpeil in de wijk en een punt van het freatisch vlak op een afstand x_1 vanuit het midden van die wijk is:

$$\Delta h'' = h_o - h(x_1) = \Delta h''_{rad} + \Delta h''_{intr} = Q''(w_r + w_i) \quad (m) \qquad (10)$$

waarin:

Q''	= stroomsterkte	$(m^2.dag^{-1})$
w_r	= radiale weerstand tussen open water en x_1	$(dagen.m^{-1})$
w_i	= weerstand van de wijkbodem	$(dagen.m^{-1})$

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

Voor 1973 kan berekend worden dat $Q'' = 0{,}23\ m^2.dag^{-1}$ en $h_o-h(x_1) \simeq$ 4,5 cm. Substitutie in (10) geeft $w_r+w_i = w \simeq 0{,}2$ dagen.m^{-1}.

Wordt de totale weerstand voor de uitstroming van de wijk uitgedrukt in een weerstandswaarde voor de laag grond rondom de wijk (c-waarde in dagen) dan moet worden vermenigvuldigd met de gemiddelde lengte van deze laag zodat c = 0,2x28 = 5,6 dagen. De doorlaatfaktor voor deze laag volgt met

$$K = \frac{D}{c} = \frac{9{,}1}{5{,}6} = 1{,}62\ m.dag^{-1} \qquad (11)$$

Wordt $h_o-h(x_1)$ bepaald uit een vloeiende grafisch weergegeven grondwaterstandskromme dan is het verschil kleiner. Hieruit volgt dan voor w een kleinere waarde waardoor $k \simeq 2\ m.dag^{-1}$ wordt.

Met behulp van een door WIDMOSER (1962) gegeven afleiding voor een radiale stroming kan de gemiddelde doorlaatfaktor worden berekend voor twee lagen als van de afzonderlijke lagen de dikten en doorlatendheden bekend zijn. In fig. 8 is de situatie zoals deze zich voordoet in het proefgebied schematisch weergegeven, alsmede de betekenis van de gebruikte symbolen.

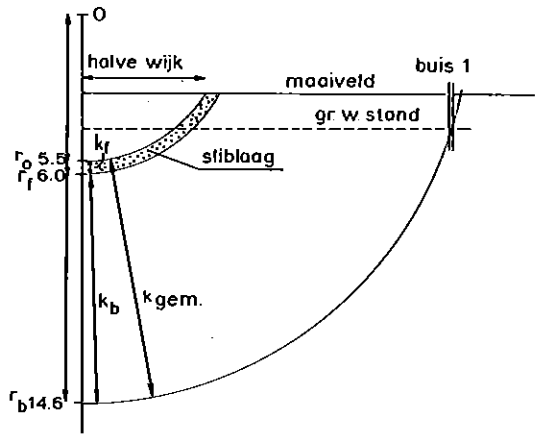


Fig. 8. Schema voor de berekening van de k-faktor en de weerstand van de wijkbodem (naar WIDMOSER, 1968)

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

In de vergelijking

$$k_{gem} = \frac{\ln\frac{r_b}{r_o}}{\frac{\ln\frac{r_b}{r_f}}{k_b} + \frac{\ln\frac{r_f}{r_o}}{k_f}} \qquad (12)$$

kunnen alle waarden behalve k_f worden ingevuld:

$$2{,}0 = \frac{\ln\frac{14{,}6}{5{,}5}}{\frac{\ln\frac{14{,}6}{6{,}0}}{3{,}1} + \frac{\ln\frac{6{,}0}{5{,}5}}{k_f}}$$

Hieruit volgt $k_f = 0{,}43$ m.dag^{-1} en voor de weerstand van de sliblaag $c = 0{,}5/0{,}43 = 1$ dag.

Wordt de voorgaande berekening opgezet voor de eerste en laatste vier weken van de groeiperiode 1973 dan worden voor w de waarden 0,11 en 0,24 dagen.m^{-1} gevonden. De bijbehorende waarden voor k en c voor de laag tot de 1e peilbuis zijn dan respectievelijk 2,14 en 1,31 m.dag^{-1} en 2,97 en 6,48 dagen.

Met behulp van een grafische voorstelling van de gemiddelde grondwaterstand zijn de hiervoor gevonden waarden ook rechtstreeks te berekenen. Wordt de gemiddelde grondwaterstandskromme voor 1973 van raai 1 (fig. 4) gecorrigeerd op het hoogteverschil van de wijken, dan kan een logarithmische kromme zo goed mogelijk worden aangepast bij de potentiaalverdeling in de omgeving van de wijk. Deze logarithmische kromme geeft de potentiaalverdeling weer ten gevolge van de radiale stroming. Het blijkt nu dat het verschil tussen deze kromme bij de wijk en het peil in de wijk ongeveer 3 cm bedraagt. Dit hoogste verschil wordt veroorzaakt door de stroming door de intree-weerstand van de wijkbodem.

Uit $\Delta h = Q\, w_i$ volgt $w_i = 0{,}03/0{,}1877 = 0{,}16$ dagen.m^{-1} voor de gehele wijkomtrek. Per strekkende meter vinden we hieruit $c = 0{,}16 \times 8 =$ $= 1{,}28$ dagen. Wordt deze weerstand weer geconcentreerd gedacht in een 0,5 m dikke wijkbodem dan volgt hieruit $k = D/c = 0{,}5/1{,}28 = 0{,}39$ m.dag^{-1}

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

welke waarde ongeveer overeenkomt met de hiervoor berekende $k_f = 0{,}43$ m.dag^{-1}.

De hiervoor berekende uitkomsten gelden voor stationaire toestanden en kunnen daarom niet als absolute waarden worden gehanteerd, maar geven slechts een indikatie van de orde van grootte.

V. ELEKTRISCHE MODELLEN

V.1. Inleiding

Omdat het moeilijk was met behulp van de beschikbare veldgegevens een inzicht te verkrijgen in het stromingspatroon in het proefgebied is een elektrisch model ontworpen. In een medium waarin een stroming optreedt gelden voor deze stroming bepaalde wetten, die analoog zijn aan andere media. Zo gelden voor een elektrische stroming dezelfde wetten als voor de grondwaterstroming. De voordelen van een elektrisch model zijn de gemakkelijke en snelle manier waarop randvoorwaarden, zoals potentialen en/of invoer aangebracht kunnen worden. Door metingen is dan te controleren of de randvoorwaarden in het model met de gewenste of met de in het veld gemeten potentialen overeenkomen. Is dit niet het geval dan kan via wijziging van de parameters het model net zo lang worden aangepast totdat de vereiste overeenkomst wordt verkregen.

Behalve elektrische modellen kunnen in principe ook andere modellen worden gebruikt. Voor het hier bedoelde onderzoek zijn deze echter minder geschikt daar bijvoorbeeld in zand-, spleet- of thermische modellen een bepaalde kennis van de grond vooraf gewenst is. Veranderingen bijvoorbeeld in de dikte van een watervoerend pakket kunnen dikwijls alleen met relatief veel werk worden aangebracht.

V.2. Opzet van een elektrisch model

Voor een eenvoudige situatie met een homogeen doorlatende grond en afvoer of infiltratie door evenwijdige oneindig lange leidingen kan de stroming in een verticaal vlak loodrecht op die leidingen

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

worden weergegeven. De dikte van dit vlak kiezen we gelijk aan de eenheid waarin wordt gemeten. Verdelen we deze doorsnede in gelijke vierkanten dan is bij homogene grond de weerstand van dat vierkant in horizontale en verticale richting gelijk (fig. 9A). In het elektrisch analogon kan deze weerstand in eenzelfde vierkant worden weergegeven door een weerstand R in horizontale en een weerstand R in verticale richting (fig. 9 B). Vervangen we nu elke weerstand R door twee parallel geschakelde weerstanden 2R die langs de randen van het vierkant gelegd worden dan ontstaat fig. 9C. Door twee tegen elkaar liggende weerstanden 2R te vervangen door één weerstand R ontstaat een netwerk met langs de randen weerstanden 2R en in het midden weerstanden R (fig. 9D).

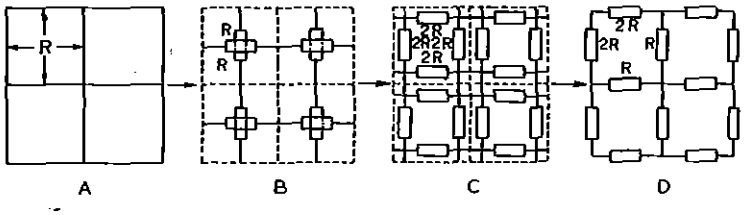


Fig. 9. Schematische weergave van de overgang van een blok grond naar een weerstandsnetwerk

Door het vervangen van een vlak door een weerstandennetwerk kan alleen op knooppunten van het netwerk de potentiaal gemeten worden. Is meer informatie nodig dan kan het netwerk worden onderverdeeld in kleinere mazen waardoor meer meetpunten ter beschikking komen. De problemen die zich voordoen bij de aanpassing van de weerstanden langs de overgang van een grof naar een fijner netwerk evenals langs de randen van het model waar geen volledige vierkanten kunnen worden gevormd vallen buiten de opzet van deze nota.

Bij stromingsproblemen in de grond wordt vaak niet gebruik gemaakt van de weerstand maar van de doorlatendheid. Deze doorlatendheid is onafhankelijk van de grootte van het beschouwde stuk grond

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

evenals in het elektrisch model de weerstand voor elk willekeurig vierkant gelijk is. Er bestaat nu een relatie tussen k en R welke uitgedrukt kan worden als

$$k = \frac{\alpha}{R} = \alpha\rho \qquad (13)$$

k = doorlatendheid	$(m.dag^{-1})$
α = schaalfaktor	$(m.dag^{-1}\ V.\ A^{-1})$
R = weerstand	(ohm)
ρ = geleidbaarheid	$(mho\ of\ ampere.volt^{-1})$

Hier blijkt dat een schaalfaktor een bepaalde dimensie heeft om de verschillende grootheden in elkaar te kunnen omrekenen.

Komen in het terrein plaatsen voor met een afwijkende doorlatendheid zoals direkt om de wijk dan is dit in het elektrisch model weer te geven door hier weerstandswaarden te kiezen die afwijken van de rest van het model. Op eenzelfde wijze kunnen lagen met afwijkende doorlatendheid op verschillende dieptes worden aangebracht.

Een hoeveelheid neerslag, infiltratie, of stroming door diepere lagen wordt in het model ingevoerd als een stroom in amperes. Hiervoor geldt

$$N = \beta I \qquad (14)$$

N = werkelijke invoer	$(m.dag^{-1})$
β = schaalfaktor	$(m.dag^{-1}\ A^{-1})$
I = modelinvoer	(A)

De in het model gemeten potentiaal komt overeen met een bepaalde stijghoogte in meters in het veld.

$$H = \gamma E \qquad (15)$$

H = stijghoogte	(m)
γ = schaalfaktor	$(m.V^{-1})$
E = potentiaal	(V)

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

Voor de afmetingen van het model geldt een dimensieloze schaalfaktor welke geheel vrij gekozen kan worden en alleen afhangt van een gewenste nauwkeurigheid. Hoe groter het aantal weerstanden wordt gekozen des te meer meetpunten worden verkregen en des te nauwkeuriger kan de veldsituatie worden nagebootst.

V.3. Eerste perceelsmodel

Voor het stromingsonderzoek in het perceel werd voor een eerste benadering uitgegaan van een elektrisch vierkanten netwerk met een basisweerstand van 3k3 (3300 Ω). Het model was opgebouwd uit 30 x 7 vierkanten. Bij een wijkafstand van 210 m geeft dit een laagdikte van 7 x 210 /30 = 49 m als voor de lengte en hoogteschaal dezelfde waarde wordt aangehouden.

Voor de in te voeren gegevens werd gebruik gemaakt van de gemiddelde waarden van het groeiseizoen 1973 (tabel 3). De infiltratie werd gesimuleerd door een gelijke stroom in te voeren op de twee bovenste hoekpunten, welke de wijken vertegenwoordigen. Dat gaf zoals te verwachten was een symmetrische grondwaterspiegel bij een afvoer door de onderrand van het model. De gemeten potentiaalverdeling langs de bovenrand van het model bleek bovendien dicht bij de invoerpunten te vlak te zijn, dit wil zeggen de kromming in de nabijheid van de wijken is te klein.

Een eerste conclusie hieruit is dat de radiale weerstand in het model te klein is. Om een helling in de gemeten grondwaterspiegel te verkrijgen blijkt dat de afvoer asymmetrisch moet zijn. Door een verhoging van de weerstandswaarden rondom de invoerpunten (verhoging van de radiale weerstand) werd de juiste kromming bereikt. De asymmetrische afvoer via een van de zijkanten gaf echter niet de gewenste scheve stand van de potentiaalkromme. Ook met een extra stroominvoer langs de tegenoverliggende zijkant van het model kon niet de gewenste gelijkheid met de veldmetingen worden verkregen. Een stroomonttrekking langs de bovenrand van het model ter simulering van de relatief geringe verdamping had weinig invloed op de potentiaalverdeling langs de bovenrand. Met het model in de bestaande vorm blijkt een goede nabootsing niet mogelijk te zijn.

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

Voor een betere benadering moet het watervoerend pakket worden aangepast. Dit kan gebeuren door het pakket op te bouwen uit meerdere goed doorlatende lagen, welke gescheiden zijn door slechter doorlatende. Een tweede mogelijkheid is een homogeen pakket van grotere dikte in he model aan te brengen. De eerste verandering is te realiseren door een rij vertikale weerstanden te vervangen door weerstanden van hogere waarde. Hierdoor wordt de vertikale weerstand van het pakket vergroot, terwijl de horizontale weerstand gelijk blijft.

Bij dezelfde invoergegevens was de potentiaalverdeling langs de bovenrand van het model nu zodanig, dat kon worden geconcludeerd dat de weerstand voor de diepe grondwaterstroming nog te groot bleef.

Door vervolgens onder en boven de genoemde rij vertikale weerstanden de horizontale te vervangen door weerstanden van kleinere waarde verdwijnt de eerder aangebrachte slecht doorlatende laag, terwijl de diepte van het pakket toeneemt. In het op deze wijze verkregen model zijn de radiale weerstanden aangepast door voor 2 x 2 vierkanten bij elk van de bovenste hoekpunten de weerstanden van 3k3 te vervangen door 4k5. Langs de randen is de waarde dan 9k. Hierdoor wordt voor dit gebied de doorlatendheid een faktor 3k3/4k5 maal zo groot. Voor de aanpassing van het watervoerend pakket bleek de vervanging van de weerstanden in de diepere laag overeen te komen met een vervanging van een rij vierkanten door een laag van 36 vierkanten. Het model krijgt hierdoor een diepte van 42x7 = 294 m. Om de in fig. 10 weergegeven goede overeenkomst tussen de modelresultaten en de veldwaarnemingen te verkrijgen was het noodzakelijk de infiltratie vanuit wijk N te verhogen.

Hoewel dit model voldoet aan de te stellen eisen voor de overeenkomst met de stroming in het veld blijven toch nog een aantal vragen open:

- een kD-waarde volgend uit dit model geeft nog geen aanwijzing over de opbouw van het watervoerend pakket
- waarom de infiltratie uit de ene wijk hoger moet zijn dan uit de andere kan uit dit model niet worden afgeleid

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

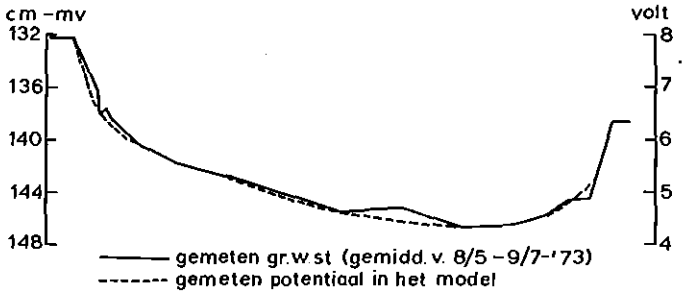


Fig. 10. Overeenkomst van de potentiaalmeting in het eerste perceelsmodel met de in het veld gemeten grondwaterstand, gemiddeld over de periode van 8/5 - 9/7-1973

- de potentiaal op een vertikaal onder de wijk is gelijk. Het is de vraag of dit juist is voor de werkelijk optredende horizontale stroming.

V.4. Aanvullende gegevens

Om op de vorige vragen een antwoord te kunnen geven is het nodig door nader veldonderzoek gegevens te verkrijgen over de profiel opbouw, de invloeden van buiten het proefperceel op de infiltratie en een nader onderzoek naar de horizontale stroming op grotere diepte.

Door het I.C.W. is een boring uitgevoerd midden op het proefperceel tot een diepte van 25 meter (tabel 5). Uit de monsters van deze boring zijn op basis van de granulaire samenstelling van de verschillende lagen de doorlatendheden per laag geschat.

Op grond van deze resultaten kan globaal het profiel opgebouwd worden gedacht uit 2 lagen waarvoor geldt:

$k_1 = 8$ m.dag^{-1} $D_1 = 12$ m $\quad k_1D_1 = 95$ m.dag^{-1}

$k_2 = 37$ m.dag^{-1} $D_2 > 13$ m $\quad k_2D_2 = ?$

Uit onderzoekingen van de Rijks Geologische Dienst (1975) blijkt dat de bovenkant van het tertiair ligt op een diepte van ongeveer 50 m. Deze laag is slecht doorlatend en mag daarom worden beschouwd als begrenzing van het watervoerend pakket.

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

Tabel 5. Pulsboring D 29

Hydrogeologisch onderzoek DE VEENMARKEN nabij Emmercompascuum

Hoogte: 14,74 + N.A.P. Filters: 1: 24-25 m-mv. 2: 14-15 m-mv. 3: 5-6 m-mv.

Diepte m -mv.	Omschrijving	Getaxeerde waarden voor: U	S	slib	k $m.d^{-1}$	kD $m.d^{-1}$
0 - 1,00	grijs venig slibarm matig fijn zand, matig gesorteerd, niet bont, met stukken grofvezelig veen tot 5 cm, enkele houtbrokjes tot 3 cm, enkele harde humeuze fijnzandige leembrokjes, kalkvrij	70	65	0,5	9	9
1,00 - 3,00	lichtbruin slibvrij matig fijn zand, goed gesorteerd, niet bont, met vrij veel fijne veenresten, spoor zeer fijn melkkwartsgrind, kalkvrij	70	70	0	11	22
3,00 - 5,25	bruinig lichtgrijs zeer zwak slibhoudend matig fijn zand, tweetoppig gesorteerd in de fracties matig grof en middelfijn, met een enkele bonte korrel, zwak humeus, spoor zeer fijn melkkwartsgrind, met spoor zeer fijne humeuze resten, kalkvrij	70	40	1½	3	6
5,25 - 12,00	lichtbruinig lichtgrijs zand als vorige laag, slibvrij, mogelijk gemiddeld wat grover, korrels meer helder, kalkvrij	60	50	0	0	56
12,00 - 16,00	lichtbruingrijs slibvrij matig grof zand, zeer slecht gesorteerd, zeer zwak bont, enigszins roestig, met een enkel zeer fijn kwartsgrindje, helder materiaal, kalkvrij	40	55	0	23	90
16,00 - 18,00	lichtgrijsbruin slibvrij matig tot middelgrof zand, matig gesorteerd, zeer zwak bont, met spoor fijne humeuze resten, zwak roestig, kalkvrij	30	65	0	53	110
18,00 - 19,50	lichtbruin slibvrij middelgrof zand, slecht gesorteerd, bont, met weinig fijn en grof grind (grijze en bonte kwartsiet, blauwe vuursteen), in het zand enig gruis van graniet en bruine vuursteen, spoor fijne humeuze resten, spoor glauconiet, met veel helder materiaal, kalkvrij	25	60	0	65	100
19,50 - 21,50	bruinig lichtgrijs slibarm matig fijn tot matig grof zand, tweetoppig gesorteerd, zwak bont (meer roestig), met vrij veel zeer fijne fijnverdeelde veenresten, spoor zeer fijn grind, spoor glimmers, kalkvrij	50	50	0,5	11	22
21,50 - 22,50	donkergrijze stoffige tot fijnzandige harde humeuze leem, plaatselijk roestig, met houtresten tot 1 cm, spoor zeer fijn melkkwarts-grind, kalkvrij Opgave boormeester: met wat plaatveen					
22,50 - 23,00	donkergrijs zwak slibhoudend stoffig matig grof zand, tweetoppig gesorteerd, niet bont, humeus, met enkele fijne humeuze resten, spoor zeer fijn melkkwartsgrind, spoor glauconiet, kalkvrij	40	50	2½	10	5
23,00 - 25,00	donkerbruingrijs slibarm middelgrof zand, goed gesorteerd, zwak bont, humeus, met veen- (hout-) resten tot 3 cm, spoor zeer fijn grind, spoor glauconiet, kalkvrij	25	70	0,5	78	150

naar van REES VELLINGA (1974)

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

Ten behoeve van het onderzoek naar de diepere grondwaterstromingen zijn nog twee boringen geplaatst tot 25 m diepte. In de boorgaten zijn nabij het Verlengde Oosterdiep filters geplaatst op 25, 15, 6 en 2 m diepte en nabij de Catovaart op 25, 15 en 2 m diepte. Met behulp van de waarnemingen van deze filters, de filters midden op het proefperceel en enkele nog bestaande landbouwbuizen zijn isohypsen getekend (HUMBERT, 1976). Door het ontbreken van waarnemingen zijn de peilen van het open water niet opgenomen in de isohypsenkaarten. Uit deze isohypsen volgt voor het grondwater een stromingsrichting tussen Noord en Noord-Oost met een helling van globaal 1 m op 1000 m. Met de in IV berekende kD-waarde van 1631 $m^2.dag^{-1}$ volgt hieruit een stroomsnelheid in het diepe pakket van circa 33 $mm.dag^{-1}$. Voor de stroomsnelheid in de richting loodrecht op de wijken volgt hieruit $v \approx 2{,}5$ $cm.dag^{-1}$.

Teneinde de invloeden van buitenaf op de waterhuishouding van het proefperceel nader te bekijken kon verder alleen gebruik worden gemaakt van een geschatte stuwhoogte in het Scholtens-kanaal. Gegevens over grondwaterstanden en wijkpeilen direkt buiten het proefgebied waren niet beschikbaar. Een beter inzicht in de optredende grondwaterstromingen is in dit geval alleen te verkrijgen door een analoog model waarin ook het gebied buiten het proefperceel is weergegeven.

V.5. G e b i e d s m o d e l

V.5.1. Opbouw van het model

Met behulp van de weinige beschikbare gegevens is een elektrisch model gebouwd voor een vertikale doorsnede over een gebied van vier wijken met verder de Margrietvaart en het Willemskanaal (fig. 11). In fig. 2 is de plaats van deze vertikale doorsnede aangegeven. Uitgaande van de I.C.W.-boring en de gegevens van de R.G.D. is besloten tot een model met twee watervoerende pakketten waarvoor geldt:

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{1}{4{,}75} \qquad \text{en} \qquad \frac{D_1}{D_2} = \frac{12\ m}{38\ m}$$

De uit de I.C.W. boring geschatte k-waarden (tabel 5) zijn nogal hoger dan in paragraaf III en IV zijn berekend. In het model is

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

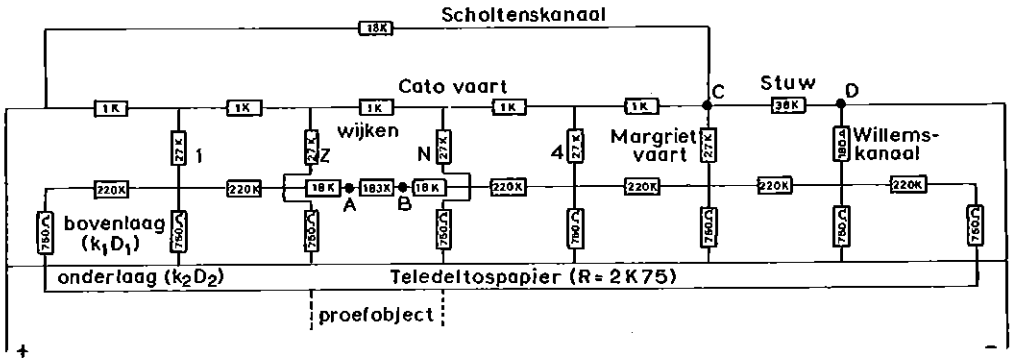


Fig. 11. Elektrisch analogon van de dwarsdoorsnede van het proefperceel en de naaste omgeving: het gebiedsmodel

daarom de absolute waarde als onbekend verondersteld en is alleen gebruik gemaakt van de verhouding k_1/k_2.

Voor de onderste watervoerende laag is een strook Teledeltospapier gekozen met een specifieke weerstand van 2 k75. Het model is 7 percelen of circa 1400 m breed. Bij een modellengte van 58 cm en gelijke schalen voor de lengte en hoogte, moet de hoogte van deze strook 1,6 cm zijn. Uit de verhoudingen tussen de twee lagen volgt dat voor de bovenste laag in het model de vertikale weerstand per perceel 750 Ω en de horizontale 220 k moet zijn.

Uit de geschatte gegevens omtrent de diepte en breedte van de wijk kan de benodigde weerstand worden berekend. Volgens ERNST (1963) kan de radiale weerstand voor een twee-lagenpakket berekend worden met

$$k_1w = k_1w' + \frac{1}{\pi} \ln \frac{r_o'}{r_o} \qquad (16)$$

waarin:

k_1 = doorlaatfaktor bovenste laag ($m.dag^{-1}$)
w = radiale weerstand ($dagen.m^{-1}$)
k_1w' = waarde af te lezen uit fig.7, ERNST (1963)

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

r'_o = één vierde van de dikte van de bovenste laag (m)

r_o = straal van de wijk (m)

Met $k_2/k_1 = 4,75$ en $D_2/D_1 = 3,17$ volgt uit de genoemde figuur $k_1w' = 0,52$. Wordt de wijkbreedte op 10 m gesteld dan is bij $D_1 = 12$ m $k_1w = 0,52-0,16 = 0,36$.

Uit de verhouding:

$$\frac{w_{rad}}{w_{hor}} = \frac{w}{\frac{L}{\Sigma kD}} \qquad (17)$$

volgt $R_{rad} = \frac{0,36}{k_1} k_1 \frac{(12+4,75.38)}{210} R_{hor} = 0,33\ R_{hor}$

Met de gevonden waarde voor $R_{hor} = 220k$ volgt hieruit voor $R_{rad} = 70k$. Wegens de 2-zijdige uitstroming moet in het model een waarde van 35k worden toegepast.

Wordt voorlopig verondersteld dat elke volgende wijk ongeveer 2 x zoveel infiltreert als de voorliggende dan stroomt door de Catovaart 14x zoveel water als door wijk Z. Het potentiaal verschil over dit stuk van de Catovaart is ongeveer de helft van dat voor de radiale stroming vanuit wijk Z. Hieruit volgt dat de weerstand voor de Catovaart tussen elke wijk ongeveer 1k moet zijn.

De hoeveelheid water welke door het Scholtenskanaal wordt aangevoerd naar de Catovaart en de overstorthoogte van de stuw zijn niet bekend. Deze gegevens kunnen worden gevarieerd voor een juiste aanpassing van de potentiaalverdeling in het model.

De hierboven berekende waarden zijn gebruikt voor de opbouw van het gebiedsmodel (fig. 11).

V.5.2. Doorlaatfaktoren

De eerste metingen aan het model hadden ten doel om bij een gegeven stuwhoogte van 70 cm (= 7,0 V in het model) een potentiaal verdeling te vinden voor het proefperceel tussen de wijken die in voldoende overeenstemming is met de gemeten stijghoogteverdeling in het veld. Als vaste meetpunten zijn hiervoor gekozen de wijken Z en N en de punten A en B op 17 m afstand van de wijken. De gewenste

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

potentiaalverschillen zijn afgeleid uit de grafische weergave van de gemiddelde grondwaterstand over de periode van 22/5 - 18/6-1973 (fig. 12).

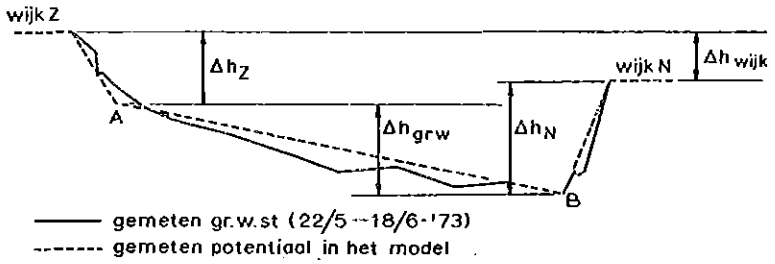


Fig. 12. De potentialen in het gebiedsmodel in vergelijking tot de grondwaterstand in het proefperceel

Deze periode is gekozen omdat hierin redelijk een stationaire toestand wordt benaderd. Met deze vier punten kunnen vier potentiaalverschillen worden bepaald en in het model worden gemeten:

$\Delta h_{wijk} = h_o^Z - h_o^N$ (verval Catovaart)

$\Delta h_N = h_o^N - h(x=210-17)$ (verval radiale stroming wijk N)

$\Delta h_Z = h_o^Z - h(x=17)$ (verval radiale stroming wijk Z)

$\Delta h_{gr.w.} = h(x=17) - h(x=210-17)$ (verval diepe gr.w.stroming)

Nu is Δh_{wijk} afhankelijk van de gekozen weerstand voor het betreffende stuk van de Catovaart en de stroom hierdoor. Deze weerstand is eenvoudig te veranderen en de stroom kan worden beïnvloed door een wijziging in de benedenstroomse toevoer door het Scholtenskanaal of een verandering van de hoeveelheid water die over de stuw stroomt. In het elektrisch model gebeurt dit door aanpassing van de weerstanden voor het Scholtenskanaal of de stuw.

De uitstroming van de wijken wordt in hoofdzaak bepaald door de weerstand van 27k ($R_{wijk} + R_{rad}$) en de geleidbaarheid van het grondpakket. Door een wijziging van de weerstand kan een andere

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

potentiaalverdeling worden verkregen. Uit fig. 12 is direkt af te lezen dat

$$\Delta h_{gr.w.} = \Delta h_{wijk} + \Delta h_N + \Delta h_Z$$

Ieder van de vier grootheden wordt bepaald door de drie andere. Omdat $\Delta h_{gr.w.}$ wordt bepaald door de horizontale stroming en de verhouding van de doorlatendheden in het model (welke berekend zijn uit boorgegevens) is het niet wenselijk hier weerstandswaarden te veranderen. Het is dan namelijk niet meer mogelijk te concluderen welke van de gevonden oplossingen het meest de realiteit benadert. De beste aanpassing van het model aan de metingen in het veld (fig. 12) werd verkregen bij de weerstandswaarden zoals deze in fig. 11 zijn gegeven.

De vorm van de grondwaterspiegel wijkt af omdat de bovenste laag van de grond in het model is weergegeven door één weerstand evenals de extra weerstand voor de radiale stroming. Alleen in een meer gedetailleerd model is ook de vorm nauwkeuriger te benaderen.

Voor het gehele model zijn de potentialen in de wijken, het potentiaalverloop van het freatisch water en de potentialen van het grondwater op de scheiding van de twee lagen weergegeven (fig. 13).

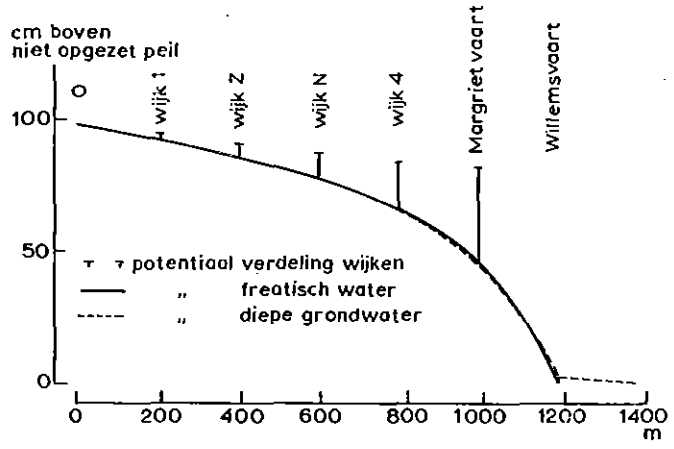


Fig. 13. De potentiaalverdeling in het veld zoals deze is af te leiden uit de modelmetingen

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

Uit dit model blijkt tevens waarom de infiltratie per wijk niet gelijk is en bovendien dat de toestroming vanuit één wijk niet symmetrisch is. Het geringe verschil tussen het freatisch water en het diepe grondwater toont aan dat voor dit gebied gerekend mag worden met een nagenoeg horizontale stroming met uitzondering van de directe omgeving van de wijken.

Uit de meting voor de invoer via wijk Z en de uitvoer door de goeddoorlatende laag aan het eind van het model is de doorlaatfaktor te berekenen. Bij een uitvoer van 25 µA is een potentiaal verschil gemeten van 0,2 V over 48 mm voor dat deel van het model waar de stroming horizontaal is. Bij een dikte van 16 mm van deze laag volgt dat deze 25 µA overeenkomt met 1/3 stroombaan. Eén stroombaan is daarom 75 µA. Hieruit volgt dat de ingevoerde hoeveelheid via wijk Z van 0,480 V/27k = 17,78 µA gelijk is aan 0,237 stroombanen. De werkelijke invoer is 0,1877 $m^2.dag^{-1}$ zodat in het veld één stroombaan overeenkomt met 0,0792 $m^2.dag^{-1}$. Met behulp van de modelschaal waar 0,1 V ≡ 1 cm volgt:

$$k_2 = \frac{\Delta q}{\Delta h} = \frac{0,0792}{0,02} = 39,6 \text{ m.dag}^{-1} \qquad (18)$$

Uit de verhouding $k_2/k_1 = 4,75$ volgt

$$k_1 = 8,4 \text{ m.dag}^{-1}$$

zodat:

$$\Sigma kD = 12x8,4+38x39,6 = 1600 \text{ m}^2.\text{dag}^{-1}$$

Hoewel de uit dit gebiedsmodel gevonden waarde voor de doorlatendheid van de bovenste laag hoger ligt dan de theoretisch berekende in IV ($k = 3,1$ m.dag^{-1}) stemmen de waarden voor het geleidend vermogen goed overeen ($kD = 1630$ $m^2.dag^{-1}$). De doorlatendheden uit het gebiedsmodel bepaald komen beter overeen met de uit de boringen geschatte constanten ($k_1 = 8$ m.dag^{-1} en $k_2 = 37$ m.dag^{-1}).

Uit het gemeten potentiaalverschil op de scheiding van de twee lagen onder de wijken Z en N van 0,81 V en de weerstand van de onderste laag voor dit gebied van 13k75 volgt een stroomsterkte van

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

59 μA. Met behulp van de modelschaal volgt hieruit een flux van 0,62 $m^2.dag^{-1}$ of een snelheid v = 1,64 $cm.dag^{-1}$. Voor het gebied tussen de Margrietvaart en het Willemskanaal wordt op dezelfde wijze een stroomsnelheid gevonden v = 8,6 $cm.dag^{-1}$. Door het opgezette peil wijken de hier gevonden stroomsnelheden af van de door HUMBERT (1976) voor een veel groter gebied gevonden gemiddelde waarde van 2,5 $cm.dag^{-1}$.

V.6. Herziene perceelsmodel

V.6.1. Opbouw van het model

Met behulp van de gegevens verkregen via het gebiedsmodel kon ten behoeve van een meer gedetailleerde meting een gewijzigd perceelsmodel worden samengesteld (fig. 14). De opbouw van het model alsmede de randvoorwaarden liggen nu namelijk vast.

Langs de vertikale randen van het model zijn extra weerstanden aangebracht voor de horizontale stroming. De stroming door de vertikalen onder de wijken geeft nu op deze lijnen een potentiaal die overeenkomt met de metingen in het gebiedsmodel. Langs de bovenrand zijn hoog ohmige weerstanden aangebracht, waardoor het mogelijk is een positief of negatief neerslagoverschot in te voeren. Voor de radiale stroming hoeven geen extra weerstanden te worden ingebouwd, omdat in een fijnmazig netwerk het stromingspatroon gelijk is aan de in het veld optredende stroming. Ter plaatse van de wijken is een extra weerstand van de wijkbodem aan te brengen door een verhoging van de netwerk weerstand.

Door de keuze van de weerstanden in dit model wijkt de verhouding in de doorlatendheid af van de waarde 4,75. Uit metingen aan het gebiedsmodel blijkt echter dat deze afwijking nauwelijks van enige invloed is, daar de totale waarde voor kD nagenoeg niet beïnvloed wordt. Bij een verhouding $k_2/k_1 = 7$ werden in het gebiedsmodel doorlaatfaktoren gevonden van respectievelijk $k_2 = 41$ $m.dag^{-1}$ en $k_1 = 6$ $m.dag^{-1}$.

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

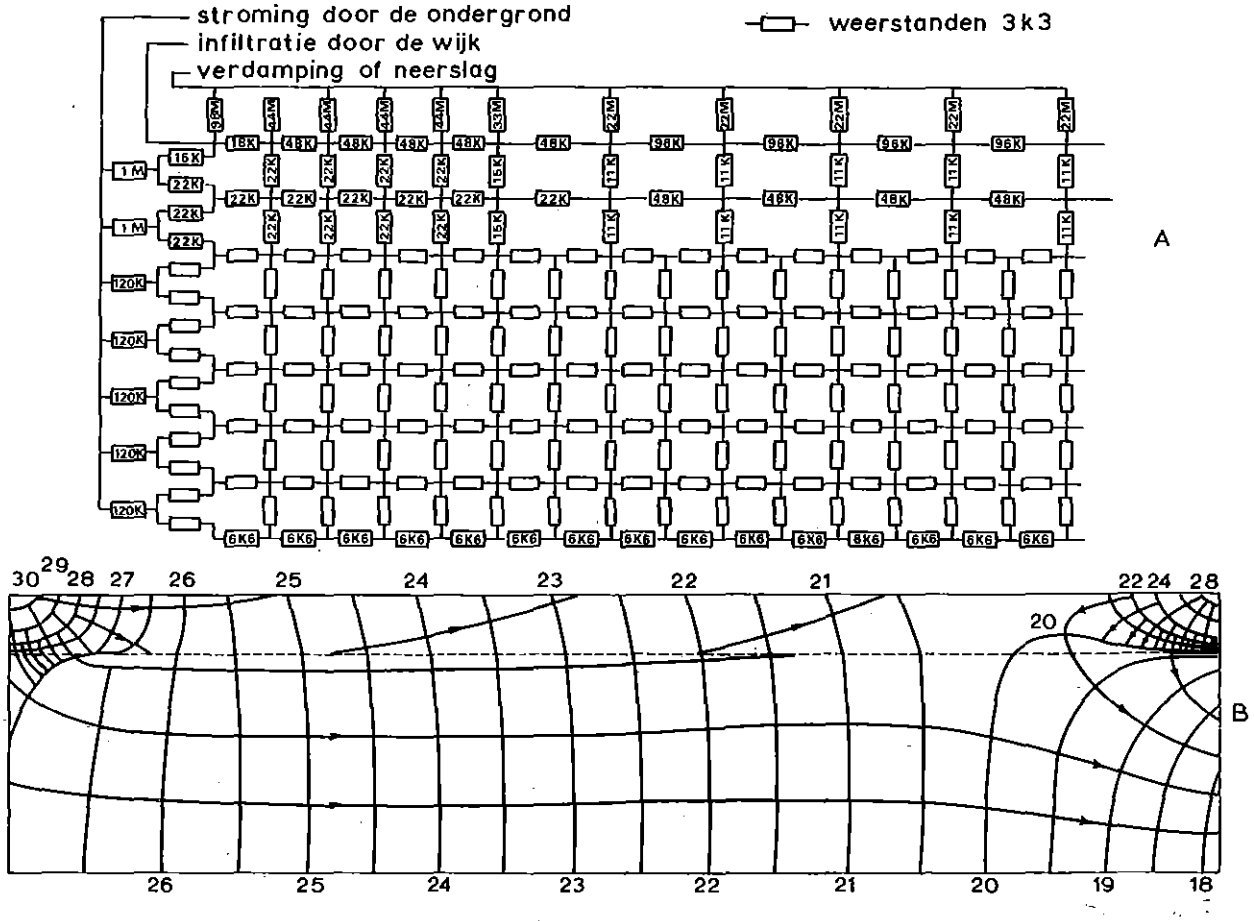


Fig. 14. Het herziene perceelsmodel

A Het weerstanden netwerk

B Vierkantennet van stroom- en potentiaallijnen

V.6.2. Doorlaatfaktoren

Aan het model zijn bij gemiddelde invoeren over twee verschillende perioden (22/5 - 18/6 en 13/6 - 10/7 1973) de potentialen langs de bovenzijde gemeten (fig. 15). Opvallend is dat ook in de laatste periode met een dalende grondwaterspiegel en toenemend verschil in wijkpeilen met dit stationaire perceelsmodel toch een goede overeenkomst wordt verkregen met de veldwaarnemingen (fig.16B).

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

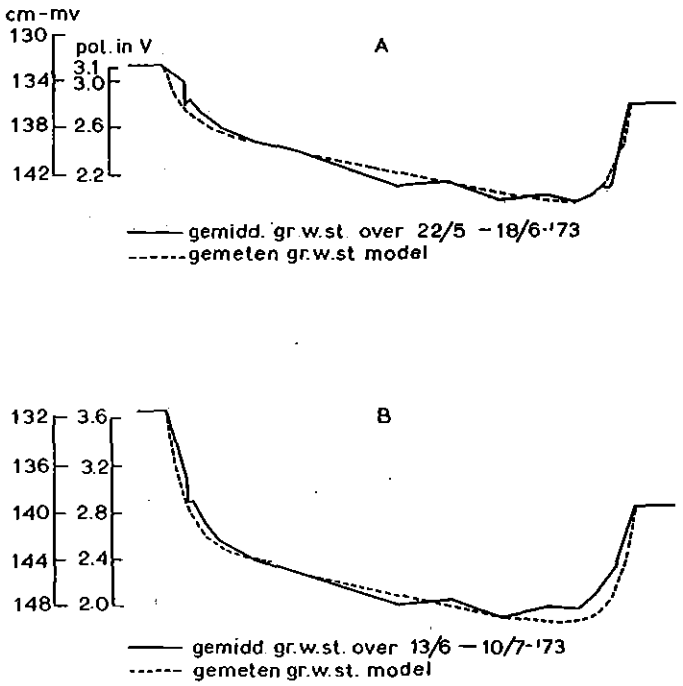


Fig. 15. Overeenkomst van de potentiaalmetingen in het herziene perceelsmodel en de gemiddelde grondwaterstand over twee perioden in 1973

Om voor de eerste periode (fig. 16A) deze overeenkomst te verkrijgen bedroeg de infiltratie uit wijk Z 18,5 µA, uit wijk N 37 µA, de zijdelings ingevoerde stroom 32 µA en de verdamping 7µA. Deze infiltratiehoeveelheden komen goed overeen met de metingen aan het gebiedsmodel waar waarden gemeten zijn van 17,8 µA en 34 µA. De zijdelings ingevoerde hoeveelheid is iets kleiner namelijk 32 in plaats van 54 µA. Dit vindt zijn oorzaak deels in een kleinere kD waarde en deels in de ingevoerde verdamping welke nodig was voor een betere aanpassing aan de vorm van de grondwaterspiegel.

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

In de tweede periode komt het peilverschil in de wijken nagenoeg overeen met de helling van de grondwaterspiegel. Voor beide wijken is het peilverschil tussen open water en grondwaterstand in de dichtstbij liggende buis ongeveer gelijk, maar groter dan in de eerste periode. Hierdoor is de infiltratie vanuit de beide wijken ongeveer even groot maar hoger dan in de eerste periode. In deze tweede periode is door de kleinere neerslag de verdamping groter (26 i.p.v. 7µA) en door de kleinere helling van de grondwaterspiegel de stroming door de diepere lagen kleiner (17 i.p.v. 32 µA). Uit bovenstaande metingen mag worden geconcludeerd dat het model een redelijke weergave van de werkelijke situatie is.

Behalve de potentiaal van de grondwaterspiegel is voor de eerste periode ook de potentiaal gemeten op alle knooppunten in het model. Met behulp van deze metingen is een vierkantenfiguur getekend (fig. 14B). Deze figuur is direkt toepasbaar op de stroming in het veld zodat hieruit eenvoudig de doorlaatfaktor is af te leiden.

De infiltratie van 0,1877 $m^2.dag^{-1}$ vanuit wijk Z is tussen de potentiaallijnen van 28 en 27,5 cm verdeeld over 8,2 stroombanen zodat:

$$k_1 = \frac{\Delta q}{\Delta h} = \frac{0,1877}{8,2x0,005} = 4,58 \text{ m.dag}^{-1}$$

Voor de noordelijke wijk is de infiltratie twee keer zo groot. Tussen de potentiaallijnen van 22 en 23 cm is deze stroom verdeeld over 7,9 stroombanen zodat hier geldt:

$$k_1 = \frac{\Delta q}{\Delta h} = \frac{0,3754}{7,9x0,01} = 4,75 \text{ m.dag}^{-1}$$

Uit de verhoudingen in het model volgt voor de zijdelingse toevoer een waarde 32/18,5x0,1877 $m^2.dag^{-1}$. Bij 0,5 cm potentiaalverschil zijn hier 6,14 stroombanen:

$$k_2 = \frac{\Delta q}{\Delta h} = \frac{0,3246}{6,14x0,005} = 30,34 \text{ m.dag}^{-1}$$

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

Voor de uitstroming geeft fig. 15B

$$k_2 = 29{,}1 \text{ m.dag}^{-1}$$

Met deze waarden voor k komt het totale doorlatend vermogen op

$$\Sigma kD = 1185 \text{ m}^2\text{.dag}^{-1}$$

Voor het rekenkundig gemiddelde van het gebiedsmodel en het perceelsmodel geldt dan:

$k_1 \simeq 6{,}5$ m.dag^{-1}	voor	$0 < D < 12$ m
$k_2 \simeq 35$ m.dag^{-1}	voor	$12 < D < 50$ m
$\Sigma kD \simeq 1400$ m.dag^{-1}	voor	$0 < D < 50$ m

V.6.3. Weerstand van de wijkbodem

Voor de berekening van de extra weerstand die zou kunnen optreden door de wijkbodem wordt de wijk geschematiseerd tot een rechthoek van 9x1,5 m. In het model is elk vierkant een weergave van een stuk van 7x7 m^2. De weerstanden bij de wijk kunnen nu worden berekend

$$R_{hor} = \frac{7-4{,}5}{7} \times 48k = 17k1$$

$$R_{vert} = \frac{7-1{,}5}{7} \times 44k = 34k6$$

Om een zo goed mogelijke aanpassing van de gemeten potentiaal in het model met de potentiaal van het grondwater te krijgen, bleek dat bij de wijk een horizontale weerstand van 18k en een verticale weerstand van 37k het best voldeden. Deze waarden zijn zo weinig hoger dan de boven berekende 17k en 34k6 dat hieruit geconcludeerd mag worden dat de wijkbodem geen extra weerstand geeft, wat ook blijkt uit de volgende berekening.

Zijn de bovengenoemde weerstandswaarden van 18k en 37k juist dan is de doorlaatfaktor voor het vierkant om de wijk 0,95 x die van de omliggende grond van de bovenste laag. Vervangen we nu de

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

natte omtrek van de halve wijk door een kwart cirkel met gelijke omtrek dan kan voor dit gebied verg. (12) worden toegepast waaruit volgt dat de doorlaatfaktor van een strook van 0,5 m rondom de wijk 0,83 x die van de omliggende grond is. Bij een doorlaatfaktor van k = 6,5 $m.dag^{-1}$ vinden we voor de c-waarde van de wijkbodem zonder de extra weerstand c = 0,5/6,5 = 0,08 dagen en met de extra weerstand c = 0,5/(0,83x6,5) = 0,09 dagen. Door een kleine afwijking van de aangenomen afmetingen ten opzichte van de werkelijke kan dit verschil zelfs tot 0 reduceren. Voor de afwijking ten opzichte van de langs theoretische weg berekende c-waarde van 1 dag (III) is geen verklaring gevonden. Een meer uitgebreid onderzoek naar radiale stromingen en in- en uitstromingen van wijken en de hierbij optredende kweloppervlakken, zowel bij stationaire als niet stationaire stromingen is gewenst. Hiertoe zouden theoretische afleidingen en modelonderzoek aan praktijkmetingen getoetst moeten worden.

VI. GEWENSTE PEILBEHEERSING

VI.1. Beschikbare hoeveelheid vocht

Om de hoeveelheid beschikbaar water voor planten te beschrijven, wordt vaak de term veldcapaciteit en verwelkingspunt gebruikt. Veldcapaciteit wordt gebruikt om aan te geven de bovengrens van de opgeslagen hoeveelheid beschikbaar water voor plantengroei en verwelkingspunt wordt gebruikt om de ondergrens aan te geven.

Onder bepaalde voorwaarden kan men de maximale hoeveelheid water, dat beschikbaar komt voor de verdamping van het gewas gedurende een aantal dagen, berekenen als men geïnformeerd is over de neerslag, dikte van de wortelzone, diepte van de grondwaterstand en de hydrologische eigenschappen van de grond (FEDDES, 1971).
De hoeveelheid beschikbaar vocht in de grond is de som van beschikbaar water in de wortelzone plus de hoeveelheid water die geleverd wordt door de opwaartse waterbeweging vanuit de zone onder de beworteling en vanuit de grondwaterspiegel. Het beschikbaar water in de wortelzone wordt vaak gedefiniëerd als de hoeveelheid water tussen

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

de evenwichtssituatie (capillaire opstijging = 0) en ψ = 15000 (pF = 4.2) cm. Het is bekend echter, dat bij toenemende uitdroging van de grond de beschikbaarheid van water voor de plant progressief afneemt. Daarom is het, met de bedoeling een optimale productie te verkrijgen, beter niet toe te staan dat de grond zo ver uitdroogt. FEDDES (1969) concludeert in een overzicht over benodigde vocht hoeveelheden en effecten van vochtspanningen op opbrengst en kwaliteit, dat in het algemeen voor aardappelen de toegestane vochtspanning waarbij de produktie begint af te nemen ongeveer 400 cm (pF = 2,6) is. In de hier toegepaste berekeningen is deze waarde aangenomen als de hoogste uitdrogingsgrens voor de wortelzone. Om de capillaire stijgsnelheid vanuit de grondwaterspiegel te berekenen werd een gemiddelde vochtspanning aangenomen van 224 cm (pF = 2,35) voor de gehele groeiperiode van het gewas (VAN DER SPELT, 1974).

In fig. 16 is verder een overzicht gegeven van de totale hoeveelheid vocht (dus de hoeveelheid vocht uit de wortelzone en de onderliggende laag tot aan de grondwaterspiegel plus de capillaire opstijging), welke ten goede komt aan de plant gedurende een groeiperiode van 100 dagen voor het gewas aardappelen met een wortelzone van respectievelijk 20, 30 en 40 cm.

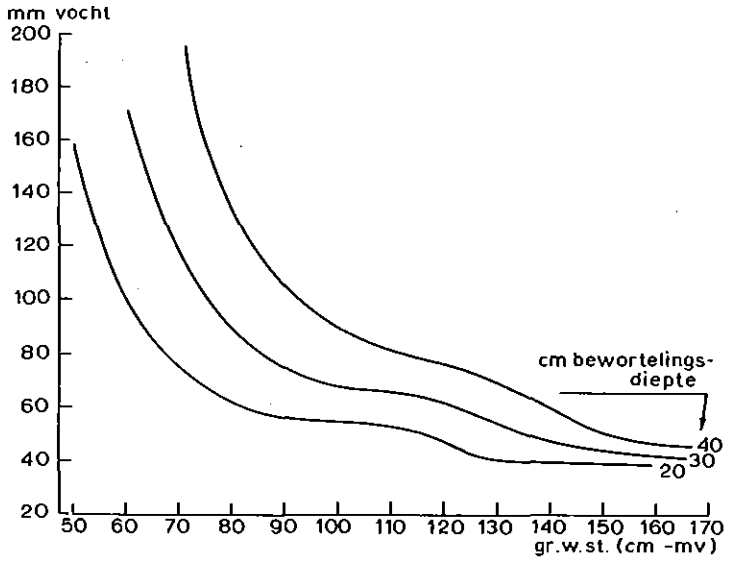


Fig. 16. Beschikbare hoeveelheid vocht uit de wortelzone en de daaronder liggende onverzadigde grond vermeerderd met de capillaire opstijging over een groeiperiode van 100 dagen (VAN DER SPELT, 1976)

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

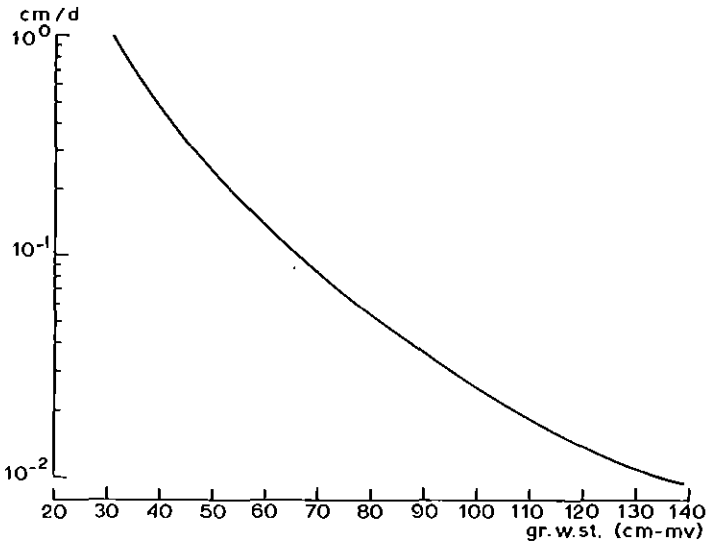


Fig. 17. Capillaire opstijging als functie van de grondwaterstandsdiepte indien aan de onderkant van de wortelzone een pF = 2,35 wordt aangehouden (naar VAN DER SPELT, 1976)

Zo blijkt bijvoorbeeld bij een bewortelingsdiepte van 40 cm en een grondwaterstand van 140 cm -mv. een hoeveelheid vocht beschikbaar te zijn van circa 60 mm. Het tekort (310 - 60 mm) moet door neerslag in de groeiperiode worden aangevuld.

Is omgekeerd uit kansberekeningen bepaald hoeveel neerslag kan worden verwacht over een groeiperiode van 100 dagen dan kan de door de grond noodzakelijk te leveren hoeveelheid vocht worden berekend. Uit fig. 16 is dan af te lezen wat de meest gewenste grondwaterstand is om oogstdepressie te voorkomen. Als bijvoorbeeld zou blijken dat voor een groeiperiode van 100 dagen door de grond niet 60 mm maar 72 mm moet worden geleverd, dan moet de grondwaterstand stijgen van 140 cm -mv. naar 127 cm -mv. Uitgaande van de veronderstelling dat de capillaire opstijging van vocht uit de ondergrond plaats vindt bij een gemiddelde pF-waarde van 2,35, kan men uit fig. 17 aflezen welke capillaire opstijging per dag optreedt bij deze zuigspanning (ψ = 224 cm). De grootte van de capillaire opstijging hangt af van de afstand tussen de onderkant van de wortelzone en het grondwaterniveau. In fig. 17 moet daarom de grondwaterstand in cm -mv. worden verminderd met de dikte van de wortelzone in cm. Voor bijvoorbeeld

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

een grondwaterspiegel van 140 cm -mv. en een bewortelingsdiepte van 40 cm is de gemiddelde capillaire opstijging 0,25 mm.dag^{-1}.

VI.2. Realisering optimale vochtvoorziening

Voor de praktijk is het van belang te weten

- hoe een verhoging van de grondwaterstand in het veld is te realiseren
- hoeveel extra water in de wijken moet worden ingelaten teneinde de wegzijgingsverliezen naar de ondergrond te kunnen compenseren

Een globaal theoretisch antwoord op de eerste vraag kan worden verkregen door de verhoging van het wijkpeil op te splitsen in drie componenten:

a. Een verhoging gelijk aan de verhoging van de grondwaterspiegel
b. Een verhoging tengevolge van het grotere drukverlies door een verhoogde infiltratie ten behoeve van de extra capillaire opstijging
c. Een verhoging als bij b ter compensatie van de grotere wegzijging

De onder b genoemde verhoging kan worden berekend door toepassing van een door ERNST (1962) gegeven vergelijking voor afvoer van overtollige neerslag naar evenzijdige drainerende leidingen.

$$\Delta h = NL \left(\frac{L}{8kD} + W_r + W_i\right) \qquad (19)$$

waarin:

NL	= af te voeren neerslag over breedte van het perceel	(m^2.dag^{-1})
$\frac{L}{8kD}$	= horizontale weerstand	(dagen.m^{-1})
W_r	= radiale weerstand	(dagen.m^{-1})
W_i	= intree weerstand	(dagen.m^{-1})

Voor de infiltratie vanuit de wijken moet in deze vergelijking voor N de capillaire opstijging worden ingevoerd als negatieve neerslag.

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

Voor de berekening van de onder c genoemde verhoging wordt gebruik gemaakt van de gemiddelde toestand in 1973 waar de hoogte van de grondwaterstand ten opzichte van het niet opgezette peil op 700 m afstand 80 cm bleek te zijn. Door een toename van de grondwaterstand zal de gradient dh/dx (4b) toenemen en daarmee ook de hoeveelheid wegzijging Q''' naar de ondergrond. Uit de evenredigheid tussen de uitstroming vanuit de wijk en het hoogteverschil in peilen van de wijk en de grondwaterstand midden op het perceel, kan de extra benodigde hoogte ter compensatie van de wegzijging worden berekend.

Tengevolge van de verhoogde grondwaterstand in het gehele gebied zal een deel van het benodigde vocht voor de capillaire opstijging worden aangevoerd via de horizontale stroming door de diepere lagen. De som van de afzonderlijk berekende stijgingen van het wijkpeil komt daardoor hoger te liggen dan deze in werkelijkheid zal zijn. Een juiste waarde voor de aan te brengen correctie is moeilijk te geven, omdat geen gegevens bekend zijn over de ondergrondse aanvoer naar het gebied.

Als voorbeeld voor de berekening van de benodigde verhoging van het wijkpeil wordt uitgegaan van de situatie tijdens het groeiseizoen 1973. Bij een grondwaterstand van 146 cm -mv. en een bewortelingsdiepte van 35 cm blijkt bij een maximale capillaire opstijging van 0,18 mm.dag^{-1} voor 100 dagen de beschikbare hoeveelheid vocht 50 mm te zijn (fig. 16). Uit tabel 4 volgt echter dat de capillaire opstijging slechts 0,029 mm.dag^{-1} heeft bedragen. Moet nu bij dezelfde bewortelingsdiepte 70 mm water beschikbaar zijn in dezelfde periode, dan moet de grondwaterstand stijgen tot 120 cm -mv. (fig.16) waarbij de maximale capillaire opstijging 0,45 mm.dag^{-1} is (fig.17).

Ten opzichte van 1973 moet ten behoeve van de capillaire opstijging 0,42 mm.dag^{-1} meer geleverd worden. Uit fig. 15B blijkt de infiltratie voor ongeveer 3/4 van de perceelsbreedte door wijk Z verzorgd te worden, zodat in (19) voor L de waarde 300 m moet worden ingevuld. Met de reeds eerder berekende waarden $k_l w_r$ = 0,36 (V.5.1) en c = 1 dag (IV.3) wordt met k_l = 6,5 m.dag^{-1} gevonden w_r = 0,055 dagen.m^{-1}. Bij een natte omtrek van de wijk van 10 m. is w_i = 0,1 dagen.m^{-1}. Bij een kD-waarde van 1400 m^2.dag^{-1} volgt dan uit (19) voor de capillaire vochtlevering een extra verhoging van het wijkpeil Δh = 2,24 cm.

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

Door de verhoging van de grondwaterstand met 26 cm ten opzichte van 1973 zal de gradient voor de diepere horizontale stroming met 26/80 of 32% toenemen. De afstroming naar de ondergrond neemt met eenzelfde percentage toe en daarna ook het verschil tussen wijkpeil en grondwaterstand midden op het perceel. Hieruit volgt een extra wijkpeilverhoging van 0,32 x 9,5 = 3,09 cm.

De totale verhoging is de som van de afzonderlijke verhogingen, zodat het wijkpeil nu 26+2,24+3,09 = 31 cm hoger ligt dan in 1973 en nu 101 cm -mv. moet zijn. Rekening houdend met de toegenomen ondergrondse aanvoer kan dit 1 à 2 cm minder zijn.

Voor verschillende grondwaterstanden zijn bij overigens dezelfde omstandigheden als hiervoor, de maximale capillaire opstijging volgens fig. 17 en de optredende wegzijging berekend (fig. 18).

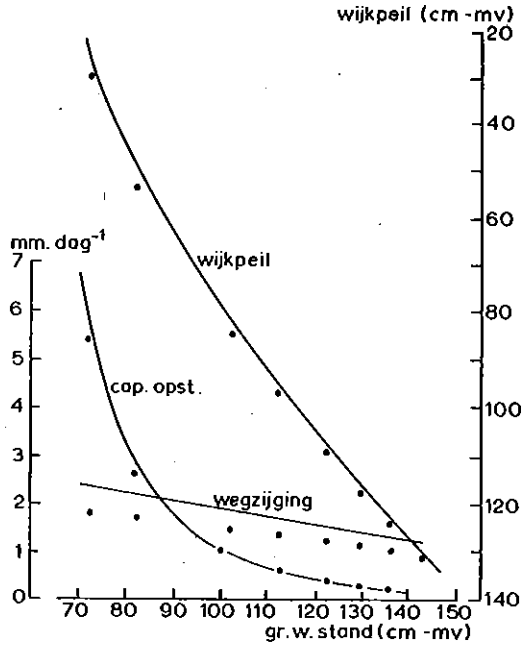


Fig. 18. Het berekende en in het model gemeten benodigde wijkpeil om een gewenste grondwaterstand te realiseren, de hierbij behorende maximaal mogelijke capillaire opstijging en optredende wegzijging naar de ondergrond

Het blijkt dat alleen bij hoge grondwaterstanden (90 cm -mv. en hoger) een aanzienlijk deel van de totale invoer ten goede komt aan de plant. Bij lagere grondwaterstanden heeft het opzetten van de wijkpeilen alleen een grotere ondergrondse afvoer tot gevolg.

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

De wijkpeilen welke nodig zijn om de berekende afvoeren te kunnen realiseren zijn in fig. 19 weergegeven.

Ter controle van bovenstaande berekeningen werden in het elektrisch gebiedsmodel eveneens verschillende grondwaterstanden gesimuleerd.

Uit de meting van de wijkpotentiaal is het drukverlies tengevolge van de ondergrondse afstroming bepaald door de ingestelde grondwaterstand in mindering te brengen op deze potentiaal. Dit berekende potentiaalverschil wordt veroorzaakt door een toenemende wegzijging en een vergroting van de horizontale stroming door de diepere lagen.

Bij de verhoogde grondwaterstand is de bijbehorende maximale capillaire opstijging volgens fig. 17 met behulp van de schaalfaktoren omgerekend in een stroom. Deze stromen werden aan het model onttrokken midden tussen de wijken via passende weerstanden. De hierdoor optredende potentiaalverlaging werd gecompenseerd door de voedingsspanning van het model zodanig te verhogen dat de oorspronkelijk ingestelde grondwaterstand weer was bereikt. De nu gemeten potentialen in de wijken verminderd met die waarbij nog geen verdamping was ingevoerd, geeft de extra verhoging voor de benodigde infiltratie voor de capillaire opstijging.

In fig. 19 zijn de totaalgemeten wijkpeilen, de ingevoerde verdamping en optredende wegzijging weergegeven.

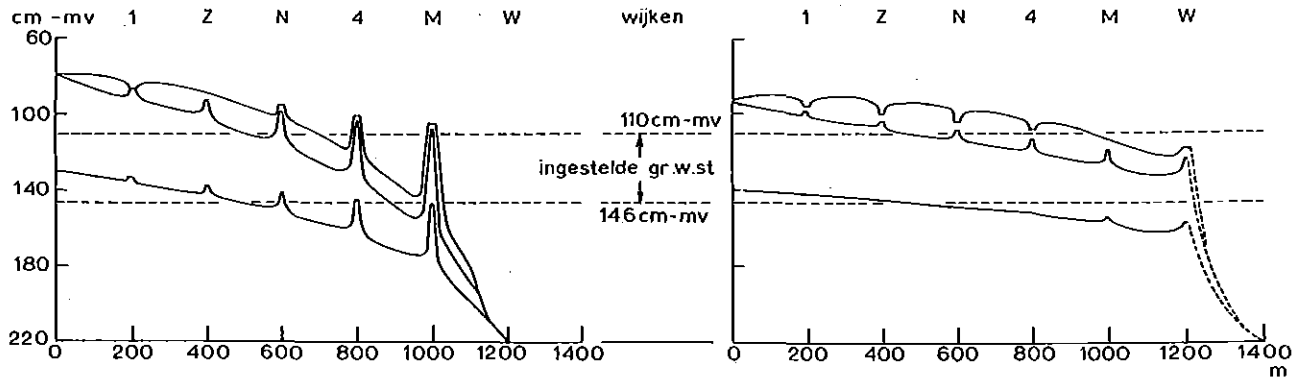


Fig. 19. Grondwaterstanden in het gebied onder verschillende omstandigheden (voor verklaring zie tekst)

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

Bij de berekening van de wegzijging is uitgegaan van de gemiddelde toestand over de eerste periode van 1973. Behalve de afvoer van infiltratiewater vond in deze periode ook nog afvoer van overtollige neerslag plaats. In het model is deze laatste afvoer verwaarloosd, waardoor in het model een kleinere wegzijging is gemeten dan werd berekend. De hiermee samenhangende kleinere drukverliezen geven in het model daarom ook een iets lagere waarde voor de wijkpeilen dan was berekend.

Voor de kennis van de waterhuishouding in het gebied zijn vooral de resultaten van de metingen aan het gebiedsmodel van belang. Uit de metingen aan dit model over de groeiperiode 1973 blijkt uit fig. 19 direkt al de problemen welke zich voordoen bij een verhoging van de grondwaterspiegel over een beperkt gebied. Van de percelen direkt naast het proefperceel is een 7 cm hogere, respectievelijk 10 cm lagere grondwaterstand gemeten dan de op het proefperceel ingestelde (146 cm -mv.). Bij deze lagere grondwaterstand volgt uit fig. 17 dat de capillaire opstijging wordt gereduceerd van 0,15 naar ongeveer 0,12 mm.dag^{-1}. Bij de percelen met nog lagere grondwaterstand is de capillaire opstijging te verwaarlozen. De totale hoeveelheid beschikbaar vocht voor een groeiperiode van 100 dagen ligt dan, afhankelijk van de bewortelingsdiepte, tussen 40 en 50 mm. Een verhoging van de grondwaterstand maakt de onderlinge verschillen tussen de percelen nog groter (fig. 19).

Uit het toenemend hoogteverschil tussen wijkpeilen en grondwaterstand (fig. 19) volgt dat de uitstroming van de wijken toeneemt, terwijl door de toenemende grondwaterstandsdiepte de capillaire opstijging afneemt. Het nuttig effekt van de infiltratie voor deze percelen is daardoor verwaarloosbaar klein. Wordt echter niet alleen het peil in het Scholtenskanaal verhoogd, maar ook in de Willemsvaart dan wordt het infiltratie-effekt groter. Uit fig. 19 blijkt bij een zelfde grondwaterstand als in 1973 (146 cm -mv.) de grondwaterspiegel veel vlakker te liggen. De eerder genoemde verschillen met de naastliggende percelen verminderen tot 4 cm (was 7 cm) hoger en 6 cm (was 10 cm) lager. Bovendien nemen de verschillen tussen de peilen in de wijken en van de grondwaterspiegel af waardoor minder water uit de

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

wijken stroomt bij een gelijke capillaire opstijging.

Bij een verhoging van de grondwaterstand tot 110 cm -mv. worden de verschillen tussen de situaties met niet en wel opgezet peil in de Willemsvaart nog groter. Bovendien neemt het rendement van de infiltratie sterk toe. Bij deze grondwaterstand is in het model bij de niet opgezette Willemsvaart een invoer voor 5 percelen gemeten van 10,95 $m^2.dag^{-1}$ en een maximale capillaire opstijging van 0,68 $m^2.dag^{-1}$. Hieruit blijkt dat slechts 6% van de aanvoer ten goede kan komen aan de plant. Bij een opgezette Willemsvaart is respectievelijk gemeten 9,29 $m^2.dag^{-1}$ en 0,76 $m^2.dag^{-1}$ zodat hier 8% ten goede komt aan de plant. In het eerste geval is de maximale capillaire opstijging zeer slecht verdeeld doordat deze bij de eerste percelen groter en bij de laatste percelen kleiner is dan de gewenste waarde, zoals deze voor het proefperceel is ingesteld. Bij het niet opgezette peil in de Willemsvaart werden per perceel de volgende waarden gemeten:

0,76; 0,70; 0,63; 0,54; 0,41; - ; $mm.dag^{-1}$
en 0,70; 0,67 0,63; 0,59; 0,55; 0,50; $mm.dag^{-1}$

bij het wel opgezette peil.

In fig. 19 is ook nog een situatie weergegeven waarbij een constante afvoer van overtollige neerslag van 3 $mm.dag^{-1}$ plaatsvindt bij een grondwaterstand van 110 cm -mv. Door de grote doorlatendheid treedt bij deze grote afvoer slechts een geringe grondwaterstandsverhoging op.

Uit verdere modelmetingen bleek dat bij nog hogere grondwaterstanden de verschillen in rendement toenemen, terwijl de verdeling van de capillaire opstijging bij het niet verhoogde peil in de Willemsvaart nog ongunstiger wordt.

Ook een kleinere verhoging van het peil in de Willemsvaart heeft reeds een gunstig effekt op het rendement en op de vlakheid van de grondwaterspiegel en daardoor op de verdeling van de maximale capillaire opstijging.

Op theoretische gronden is het ook verklaarbaar dat het rendement van de infiltratie toeneemt naarmate het gebied groter wordt. Immers voor de infiltratie is een verhoging van de wijkpeilen

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

nodig. Deze extra potentiaal veroorzaakt een grotere stroming door de diepere lagen. De weerstand voor deze stroming is L/8kD en omdat de kD-waarde vast ligt is deze weerstand alleen te vergroten door L groter te maken, dit wil zeggen het te infiltreren gebied zo groot mogelijk te kiezen.

SAMENVATTING

Ten behoeve van een onderzoek naar de bestrijding van verdrogingsverschijnselen op de jong veenkoloniale gronden in Z.O. Drente is plaatselijk in enkele wijken het peil opgezet. Naast de waarnemingen van de klimatologische omstandigheden en vochtbepalingen van de bodem zijn op één perceel de grondwaterstanden opgenomen, evenals de in- en uitstromingen van één wijk. Samen met de gegevens over het gewas kon voor dit gebied een waterbalans worden opgesteld. (tabel 4). Hieruit bleek dat per dag ongeveer 1 mm water werd afgevoerd naar diepere grondlagen, terwijl de planten nauwelijks enig profijt hadden van de infiltratie (1972: 0 mm.dag^{-1}, 1973: 0,03 mm.dag^{-1}).

Voor de afvoer van overtollige neerslag, de radiale stroming vanuit de wijken en een horizontale stroming door de diepere lagen zijn de vergelijkingen gegeven (fig. 6). Een superpositie van deze drie stromingen geeft de potentiaal voor de grondwaterspiegel, welke goed overeenkomt met de veldwaarnemingen. Met behulp van dit stromingspatroon zijn een doorlaatfaktor van de grond van ruim 3 m.dag^{-1} en een kD-waarde van 1630 m^2.dag^{-1} berekend. Theoretisch is aangetoond dat de weerstand van de wijkbodem klein is.

Een elektrisch model van het onderzochte perceel gaf een goede benadering van de in het veld gemeten grondwaterstand (fig. 10) maar gaf nog geen informatie omtrent de profielopbouw.

Uit een boring en gegevens van het R.I.D. en de R.G.D. kon worden gesteld dat het profiel is opgebouwd uit meerdere lagen, die echter voor berekeningen mogen worden samengevat als een bovenste laag van 12 m en daaronder een laag van 38 m tot het tertiair. De verhouding in doorlaatfaktoren voor deze lagen is ongeveer k_2/k_1 = 4,75.

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

Met deze gegevens is een elektrisch model gebouwd van een vertikale doorsnede van het gebied tot aan de Willemsvaart. Uit metingen aan dit model volgde voor de onderste laag een doorlaatfaktor k = 40 $m.dag^{-1}$ en voor de bovenste k = 8 $m.dag^{-1}$. Uit een herzien gedetailleerd model van alleen het perceel volgden iets lagere waarden, dan voor het gebiedsmodel.

Door gemiddelden te nemen van de resultaten verkregen met behulp van deze beide modellen werd uiteindelijk gevonden:

k_1	≃	6,5 $m.dag^{-1}$	voor	0 - 12 m
k_2	≃	35 $m.dag^{-1}$	voor	12 - 50 m
ΣkD	≃	1400 $m^2.dag^{-1}$	voor	0 - 50 m

Bij een zekere hoeveelheid neerslag kan de benodigde vochtlevering door de grond voor een optimale plantengroei worden berekend. Hieruit volgt dan de meest gewenste grondwaterstand, de hoogte van de wijkpeilen en de infiltratie. Uit berekeningen en modelmetingen blijkt bij een nog hogere opzetting van de wijkpeilen dan in 1973 de infiltratie sterk toe te nemen door een grotere wegzijging naar de ondergrond. Om deze waterverliezen zoveel mogelijk te beperken is het noodzakelijk de weerstand voor deze stroming zo groot mogelijk te maken. Bij de grote kD voor dit gebied is dit alleen mogelijk door de gewenste peilverhoging over een zo uitgestrekt mogelijk gebied toe te passen (fig. 19).

ICW-nota 920
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR

LITERATUUR

ERNST, L.F., 1962. Grondwaterstromingen in de verzadigde zone en hun berekening bij aanwezigheid van horizontale evenwijdige open leidingen.
Verslagen van Landbouwkundige onderzoekingen nr. 67.15 : 189 pp

_____ 1963. De berekening van grondwaterstromingen tussen evenwijdige open leidingen. Verslagen en mededelingen Comm.Hydr.Ond. T.N.O. no. 8 1963:48-68

FEDDES, R.A., 1969. Beregeningsprogramma's. Mededelingen Dir. Tuinb. 32, 10/11 : 470-453. Verspr. Overdr. I.C.W. 105

_____ , 1971. Water, heat and crop growth. Mededelingen L.H. Wageningen 71-12:184 pp

HOMMA, F., 1973. Enkele principes en gebruiksmogelijkheden van analoge computers. Nota ICW 749 : 20 pp

HUMBERT, H. 1976. Isohypsenkaarten van het Waterschap de Runde (niet gepubliceerd)

RIJKS GEOLOGISCHE DIENST 1975. Inventarisatie Geologische gegevens van Emmen en omgeving. Rapport 10151 : 5 pp

RIJTEMA, P.E., 1965. An analysis of actual evapotranspiration. Centrum voor Landbouwpublikatie en dokumentatie. Pudoc Wageningen: 107 pp

SPELT, T.S.B. VAN DER, 1974. Gewenste grondwaterstand in de jonge veenkoloniën. Nota ICW nr. 911 : 17 pp

VIMOKE, B.S. and TAYLOR, G.S., 1962. Simulating Water Flow in Soil with an electricalresistance network. U.S.Dep. of Agric.Ass. 41-65:51pp

WIDMOSER, P., 1968. Der Einfluss von Zonen geänderter Durchlässigkeit im Bereich von Drain- und Brunnenfilterrohren. Schweizerische Bauzeitung 9, 29 : 12 pp