

voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding
Wageningen

NN31545.0717

EEN ELECTRISCH MODEL MET EEN
ZICH AUTOMATISCH INSTELLEND
FREATISCH OPPERVLAK

F. Homma ing.

✓ BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW

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.

11 FEB, 1983

JSH 178692-01

I N H O U D

	blz.
I INLEIDING	1
II PROBLEEMSTELLING	1
III MOGELIJKE OPLOSSING MET ELECTRONISCHE SCHAKELING	3
A OPLOSSING MET TRANSISTOREN	3
B OPLOSSING MET VELD-EFFECTTRANSISTOREN	5
IV ENKELE RESULTATEN VAN HET MODEL MET F.E.T.-SCHAKELAARS	7
V ENKELE OPMERKINGEN	8
VI SAMENVATTING	9
VII LITERATUUR	10

I INLEIDING

Electrische modellen kunnen een belangrijk hulpmiddel vormen bij het oplossen van stromingsproblemen. Hierbij heeft men de keuze uit plaatvormige modellen, opgebouwd uit geleidend papier (Teledeltos) of dunne metaalfolie of een netwerk van weerstanden. Bij de eerstgenoemde 2-dimensionale modellen is de potentiaal continu te meten. Voor metaalfolie is de geleidbaarheid groot en daarom zullen grote stroomsterktes nodig zijn om met redelijke nauwkeurigheid potentiaalverschillen te kunnen meten. Van Teledeltospapier kan de geleidbaarheid in verschillende richting en van plaats tot plaats sterk variëren. Met een weerstanden netwerk kunnen zowel 2- als 3-dimensionale problemen worden opgelost. De potentialen kunnen echter alleen op de knooppunten worden gemeten. De opbouw van een dergelijk netwerk is uitvoerig beschreven door o.a. LUTHIN (1953), KARPLUS (1958), VIMOKE en TAYLOR (1962), VAN DER BEKEN (1964).

De moeilijkheid die zich voordoet bij deze weerstandsmodellen is dat bij problemen waarin het freatisch oppervlak niet van te voren bekend is, dit vlak moet worden verkregen door proberenderwijs weerstanden weg te nemen of te veranderen. Om deze moeilijkheid te omzeilen werd een methode ontwikkeld waarbij een automatische instelling van het freatisch niveau wordt verkregen. Bij dit systeem is gebruik gemaakt van de speciale eigenschappen van halfgeleiders. De hierbij gevolgde methode wordt in dit verslag beschreven.

II PROBLEEMSTELLING

Om de moeilijkheden die zich voordoen bij het freatisch oppervlak in een weerstandsmodel duidelijk te maken kan als eenvoudig

voorbeeld het model voor een drainageprobleem dienen.

Stel dat de grond homogeen doorlatend is en de drain op de ondoorlatende laag ligt. De rechthoek gevormd door het maaiveld en de ondoorlatende laag en de beide verticalen resp. door de drain en midden tussen de drains wordt in een aantal vierkanten verdeeld. De grootte van deze vierkanten hangt af van de gewenste nauwkeurigheid. Elk vierkant wordt weergegeven door een gelijke horizontale en verticale weerstand R_0 (fig. 1). Langs de randen zijn de weerstanden dan $2 R_0$. De weerstanden die aansluiten op de drain kunnen berekend worden met de door VIMOKE en TAYLOR (1962) gegeven methode waarbij rekening moet worden gehouden met de diameter van de ideale drain.

Staat water op het maaiveld dan kan de gehele bovenkant van het model worden kortgesloten. Tussen deze kortsluiting en de drain wordt een spanning aangelegd. De potentiaalverdeling in het gebied wordt nu bepaald door in elk knooppunt de spanning te meten. Indien nodig kan door interpolatie het beeld van equipotentiaallijnen worden getekend. Door de kortsluiting te verwijderen en een spanning aan te leggen tussen de rechter zijkant en onderkant van het model als ene pool en de linkerzijkant als andere pool kan op gelijke wijze het stroomlijnenbeeld worden ingemeten en getekend. Voor hetzelfde probleem is ook een analytische oplossing bekend (GUSTAFSSON 1948) zodat controleren van de gevonden oplossing mogelijk is.

De oplossing wordt veel ingewikkelder als geen water meer op het oppervlak staat, maar de invoer zodanig is dat zich een vrije grondwaterspiegel vormt. Omdat langs het maaiveld geen stroming meer optreedt moet de bovenste rij weerstanden verwijderd worden en moet aan elke verticale weerstand die grenst aan het maaiveld een gelijke stroom toegevoerd worden. De twee weerstanden aan de rand van het model krijgen elk de helft van deze stroom toegevoerd omdat ze de helft van een vierkant vertegenwoordigen. Wordt nu in elk knooppunt de potentiaal gemeten dan blijkt in sommige punten deze potentiaal lager te liggen dan overeenkomt met de hoogte van dat punt boven de onderkant van het model. Deze punten liggen boven het freatisch vlak. In deze punten mag geen stroom vloeien naar links of naar rechts en daarom moeten in deze punten de weerstanden in de horizontale rich-

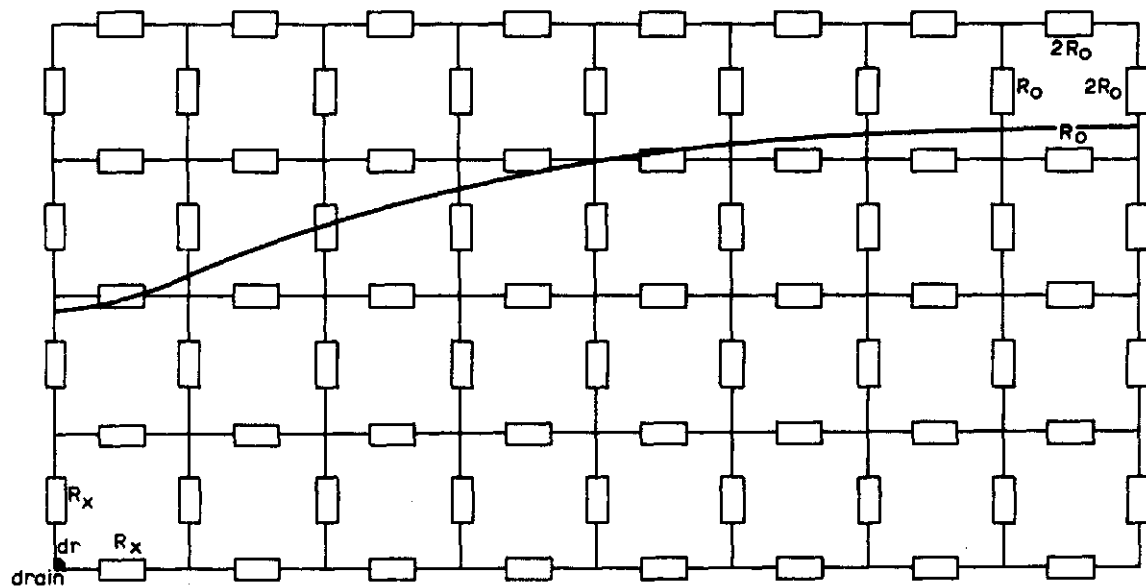


Fig. 1. Weerstandsmodel voor stroming naar een drain

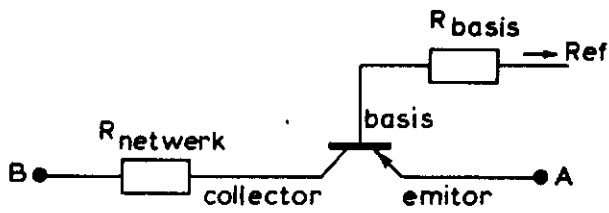


Fig. 2. Transistor als schakelaar

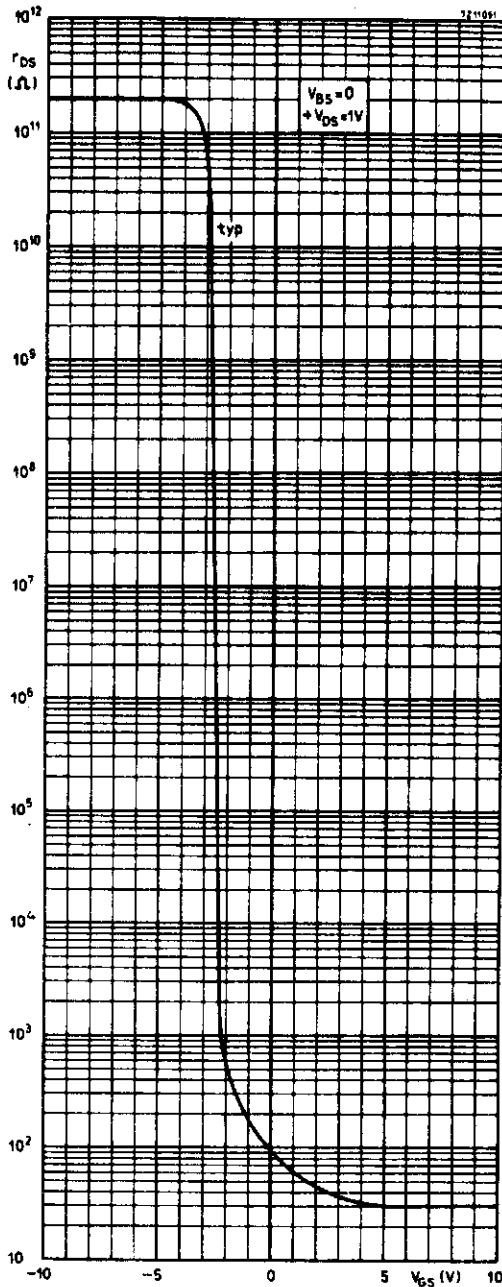


Fig. 5. Weerstand tussen bron en drain (r_{DS}) als functie van de stuurspanning (V_{GS})

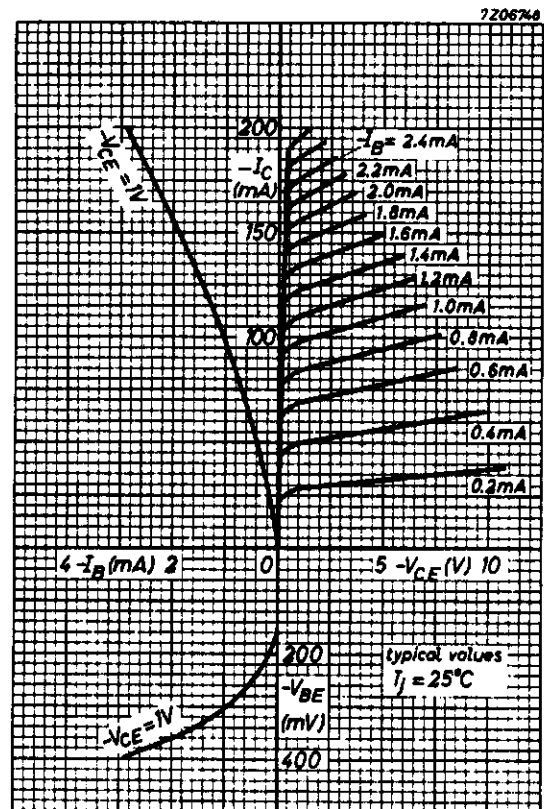


Fig. 3. Karakteristieken van een transistor

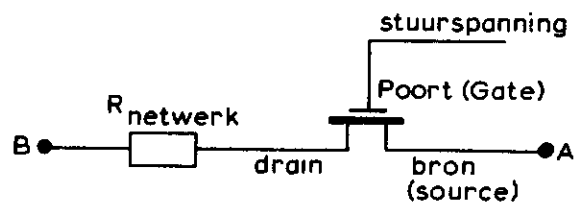


Fig. 4. Veld-effecttransistor als schakelaar

ting verwijderd worden. Als nu opnieuw de potentiaal gemeten wordt kan het voorkomen dat op een punt waar de weerstanden verwijderd zijn nu een hogere potentiaal gemeten wordt dan overeenkomt met de hoogte-
ligging van dat punt. De weerstanden zullen dan weer aangesloten moeten worden. Met enige herhalingen kan het model zo gewijzigd worden dat alle knooppunten van 3 of 4 weerstanden een hogere potentiaal hebben dan overeenkomt met de hoogte-
ligging. Deze liggen dan allemaal beneden het freatisch vlak. In alle punten waar de horizontale weerstanden verwijderd zijn is de potentiaal lager dan overeenkomt met de hoogte. Zij liggen dus boven het freatisch vlak. De grondwaterspiegel is nu begrensd tussen deze twee series knooppunten. Door interpolatie kunnen de plaatsen waar de spanning juist overeenkomt met de stijghoogte bepaald worden. De lijn door deze punten geeft een redelijke benadering voor de grondwaterspiegel.

Een nauwkeurige plaatsbepaling kan gebeuren door de vierkanten langs het freatisch oppervlak te vervangen door aangepaste rechthoeken. Hierbij wordt de grootte van de weerstanden berekend uit de vorm van de rechthoek (VAN DER BEKEN 1964).

III MOGELIJKE OPLOSSING MET ELECTRONISCHE SCHAKELING

De boven omschreven methode geeft slechts een goede oplossing voor bepaalde problemen. Moet de invloed van veranderende randvoorwaarden worden bestudeerd dan is ze te tijdrovend. Om vlot te kunnen meten is het noodzakelijk dat het freatisch oppervlak zich automatisch op de juiste hoogte kan instellen, waarbij gelijktijdig het doorstroomde gebied zich aanpast. Een dergelijke aanpassing is te realiseren door de horizontale weerstanden te laten in- of uitschakelen al naar gelang zij onder of boven het freatisch vlak liggen.

A. O p l o s s i n g m e t t r a n s i s t o r e n

Een dergelijke automatische in- of uitschakeling kan met behulp van transistoren verwezenlijkt worden. Tussen de horizontale weerstand en een knooppunt wordt een transistor aangesloten zoals aange-

geven is in fig. 2. Om de schakelfunctie van deze transistor te verklaren is het noodzakelijk eerst de grafieken van een transistor te bekijken (fig. 3). Links onder is het verband weergegeven tussen de spanning welke bestaat tussen de basis en de emitter en de stroom die door de basis-emittorketen vloeit. Uit de grafiek blijkt dat alleen bij een negatieve spanning groter dan 150 mV een stroom door de basis-emittorketen vloeit. Bij kleinere negatieve of positieve spanning is dit circuit dus gesperd.

Rechts boven in de grafiek wordt het verband tussen de spanning tussen de emitter en collector en de stroom door de collectorketen weergegeven voor verschillende waarden van de basisstroom. Het blijkt dat de collectorstroom tot ongeveer 100 mA zeer weinig afhangt van de spanning tussen de collector en emitter. Uit de grafiek valt af te lezen dat bij een zeer lage spanning tussen collector en emitter bij een geringe basisstroom een vrij grote stroom door de collector vloeit. Voor b.v. een basisstroom van 0,2 mA vloeit er een collectorstroom van 25 mA terwijl de spanning tussen collector en emitter nog praktisch 0 V is. Deze eigenschappen maken de transistor bijzonder geschikt als schakelaar.

In het netwerk wordt de basis op een constante referentie spanning aangesloten. De grote van deze spanning is afhankelijk van de hoogte van het punt A in het netwerk. Zolang de spanning in punt A niet stijgt boven de aangelegde referentiespanning kan geen stroom vloeien in de basis-emittorketen. Omdat er nu ook geen stroom door de collector kan vloeien vinden we tussen de punten A en B een oneindige grote weerstand, d.w.z. de horizontale weerstand is uitgeschakeld. Stijgt nu de spanning in A tot ca. 200 mV boven de referentie spanning op de basis dan zal zoals uit de grafiek blijkt er een zekere stroom van de emitter door de basis gaan. Er vloeit nu ook een stroom door de collector. De grootte van deze stroom wordt alleen bepaald door het spanningsverschil tussen A en B en de waarde van de horizontale weerstand. Immers het spanningsverlies over de transistor en daarmee de weerstand van de transistor is verwaarloosbaar klein. De weerstand is dus nu ingeschakeld. Door voor elk knooppunt die referentiespanning te kiezen welke overeenkomt met de hoogte ligging van dat punt wordt elke weerstand automatisch in- of uit-

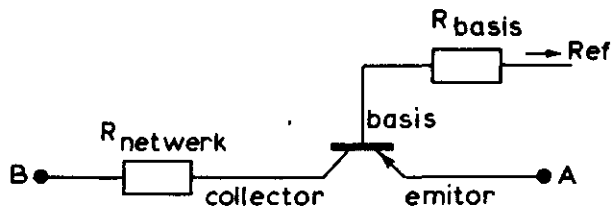


Fig. 2. Transistor als schakelaar

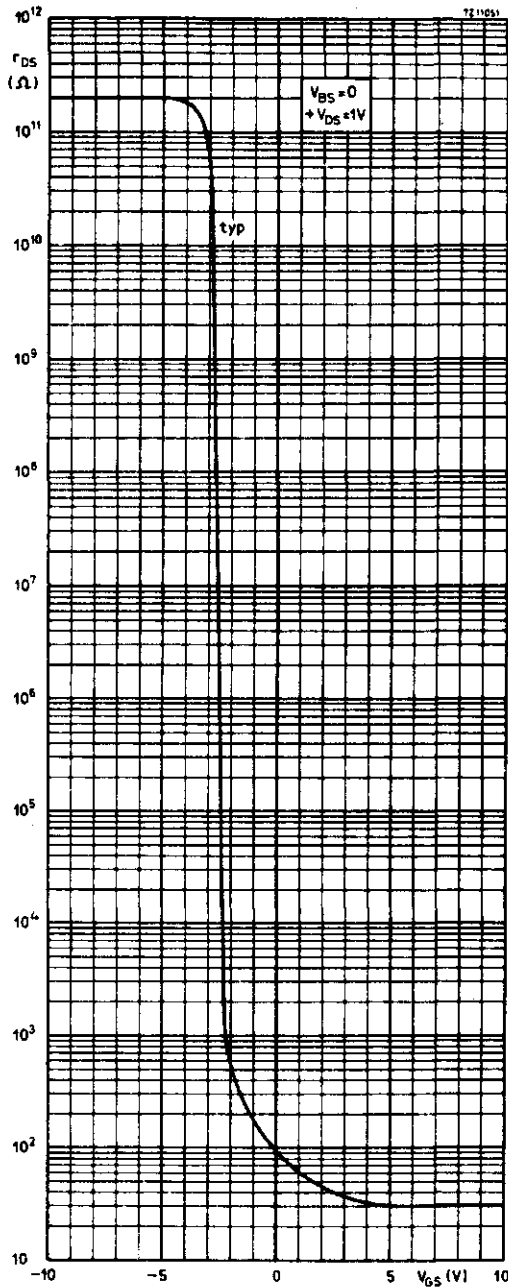


Fig. 5. Weerstand tussen bron en drain (r_{DS}) als functie van de stuurspanning (V_{GS})

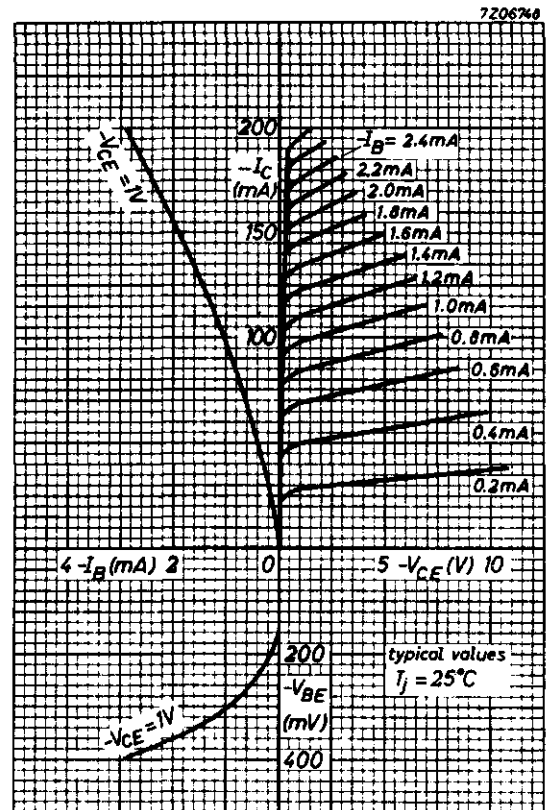


Fig. 3. Karakteristieken van een transistor

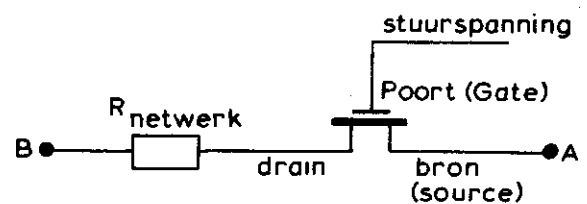


Fig. 4. Veld-effecttransistor als schakelaar

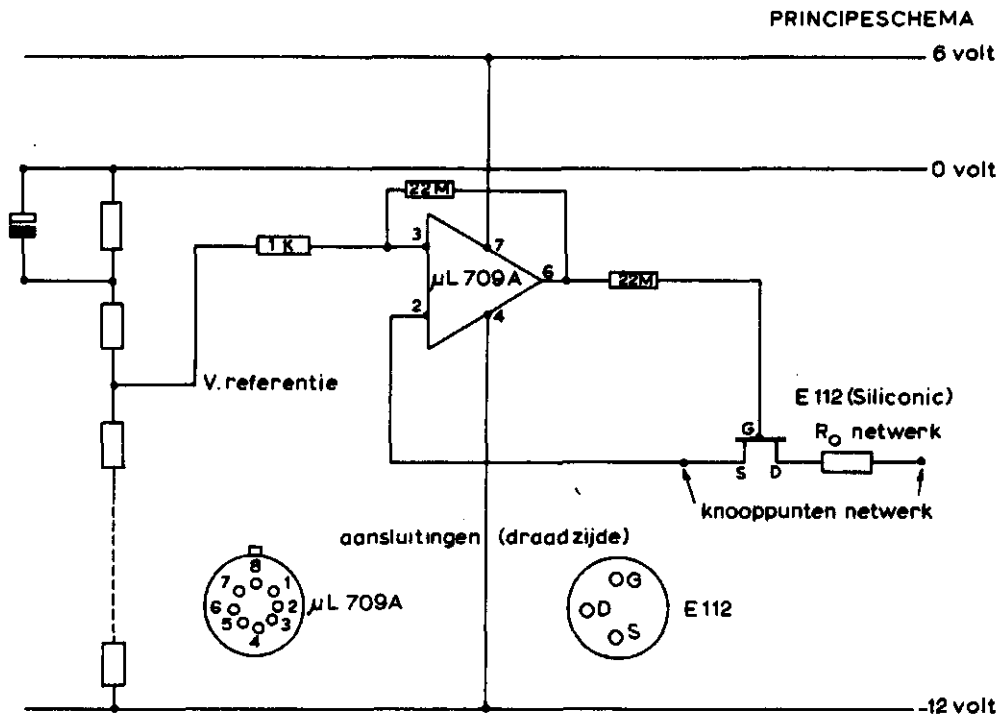


Fig. 6. Schakeling van stuurversterker en veld-effecttransistor

geschakeld, al naar gelang hij onder of boven het freatisch vlak ligt. Door interpolatie tussen de gemeten spanningen is ook hier bij benadering de ligging van de grondwaterspiegel te bepalen.

Een nadeel van deze methode is dat de basis-emittor stroom aan het model wordt onttrokken. Omdat de basis-emittor weerstand van een transistor in de geleidende richting laag is, zal de spanning op de basis slechts weinig lager zijn dan die op de emittor. Is deze potentiaal hoog t.o.v. de referentiespanning dan zal ook een vrij grote stroom door de basis vloeien. Deze stroom wordt aan het model onttrokken en veroorzaakt daarom een fout. Immers in een model waar geen verdamping optreedt moet de totaal ingevoerde stroom door de drain afgevoerd worden. De verliesstroom kan beperkt worden door een grote basisweerstand te gebruiken. De grootte hiervan is echter aan de andere kant beperkt door het feit dat bij kleine potentiaal verschillen een voldoende stroom moet kunnen vloeien om de transistor open te sturen.

B. O p l o s s i n g m e t v e l d - e f f e c t t r a n s i s - t o r e n

Het bezwaar van een te grote stroomonttrekking aan het model door de transistoren kan ondervangen worden door de gewone transistoren te vervangen door z.g. veld-effecttransistoren (F.E.T.). De veld-effecttransistor wordt n.l. gestuurd door een op de poort aangelegde spanning i.p.v. door een stroom door de basis zoals bij de gewone transistor. Deze aangelegde spanning veroorzaakt in het inwendige van de F.E.T. een magnetisch veld en dit veld bepaalt de geleidbaarheid tussen de bron en de drain (fig. 4). In de grafiek (fig. 5) van de F.E.T. is het verband weergegeven tussen de spanning op de poort ten opzichte van de bron en de weerstand tussen de bron en de drain. Bedraagt de negatieve spanning meer dan 5 V dan is de weerstand zeer groot ($2 \times 10^{11} \Omega$). Bij afnemende negatieve spanning daalt de weerstand eerst langzaam en tussen -3 en -2 V treedt een sterke daling op (tot 600Ω). Bij nog verdere stijging van de spanning daalt de weerstand tot 30Ω bij ca. 4V. Omdat de sturing geschiedt door een spanning en de weerstand tussen de poort en de bron zeer groot

is blijft de opgenomen stroom zeer klein. Voor b.v. de BSV 81 (type Philips) is de stroom door de poort kleiner dan 10 pA (Ampere $\times 10^{-12}$). Uit deze gegevens blijkt dat de F.E.T. zeer gunstig is voor schakel doeleinden. Wordt de F.E.T. op dezelfde manier als de transistor in het netwerk opgenomen (fig. 4) dan is in gesperde toestand de weerstand tussen de punten A en B zeer groot ($20 \times 10^{11} \Omega + R$ netwerk). De stroom tussen A en B kan in dit geval verwaarloosd worden t.o.v. de stroom door aangesloten weerstanden (meestal tussen 10^3 en $10^4 \Omega$) van het netwerk. In geopende geleidende toestand is de weerstand zeer klein en mag t.o.v. de netwerkweerstand verwaarloosd worden. Voor zeer nauwkeurige metingen kan ook de waarde van de weerstand aangepast worden zodat de totale horizontale weerstand gelijk is aan de waarde van de verticale weerstanden. Bij gebruik van 5% weerstanden voor het netwerk valt de extra weerstand van de F.E.T. al binnen deze tolerantie.

Om te zorgen dat de schakelaars bij kleine spanningsveranderingen in de knooppunten snel geheel open of dicht gestuurd wordt is een versterker in de schakeling opgenomen (fig. 6). Eén ingang van deze versterker wordt aangesloten op een referentiespanning welke overeenkomt met de hoogte van het punt A (fig 4). Dit punt zelf wordt aangesloten op de andere ingang. Het spanningsverschil op de ingangsklemmen wordt door de z.g. Operationele Amplifier (Op. Amp.) versterkt en via een weerstand doorgegeven aan de poort van de F.E.T. De versterkingsfactor is door de geringe tegenkoppeling ($22 \text{ M} \Omega$) zeer groot (ca. 22000 x) zodat reeds bij een klein spanningsverschil op de ingang de uitgang van de versterker al tot de maximale spanning wordt uitgestuurd. Dit heeft tot gevolg dat wanneer de potentiaal in A stijgt boven of daalt beneden het referentie-niveau de uitgangsspanning van 6 volt ineens omslaat van positief naar negatief of omgekeerd. Hierdoor komen in de schakeling voor de weerstand tussen bron en drain alleen de maximale en minimale waarde voor (fig.5).

Alle weerstanden in het netwerk beneden het freatisch vlak zijn ingeschakeld via de kleine weerstand van de F.E.T. Alle horizontale weerstanden boven de grondwaterspiegel zijn geblokkeerd door de in serie geschakelde hoge weerstand van de F.E.T. Evenals bij het model met transistoren is ook hier het freatisch vlak begrensd door twee

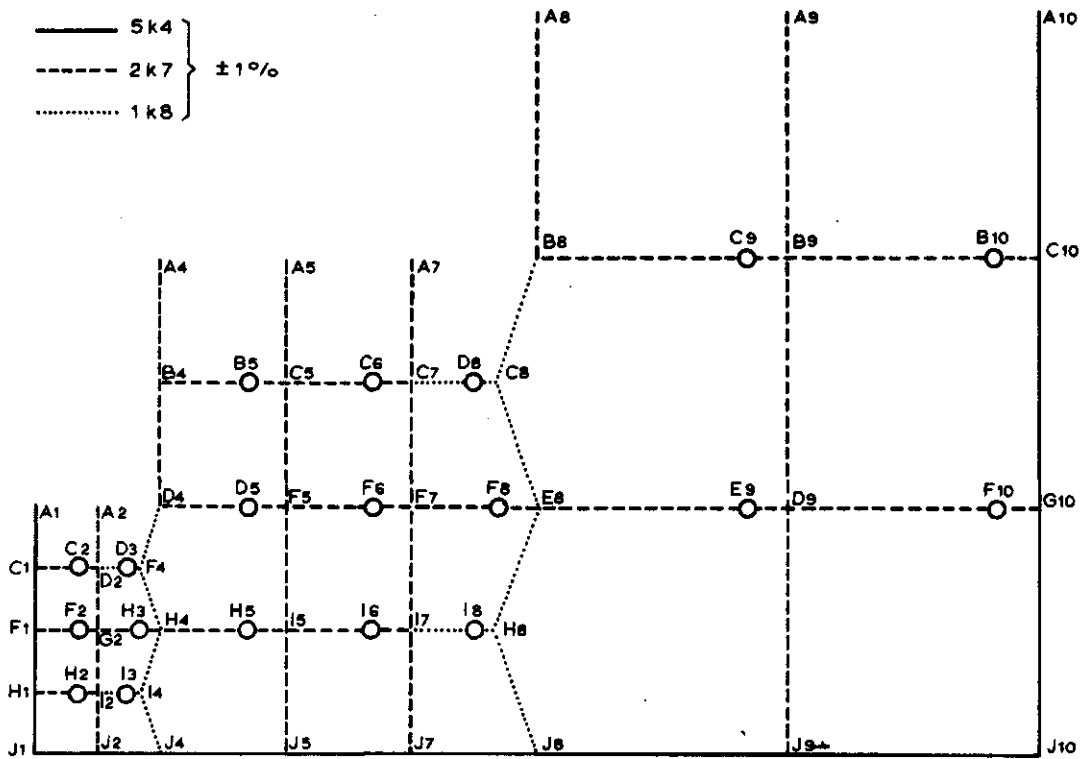


Fig. 7. Schema van het weerstandennetwerk met schakelaars

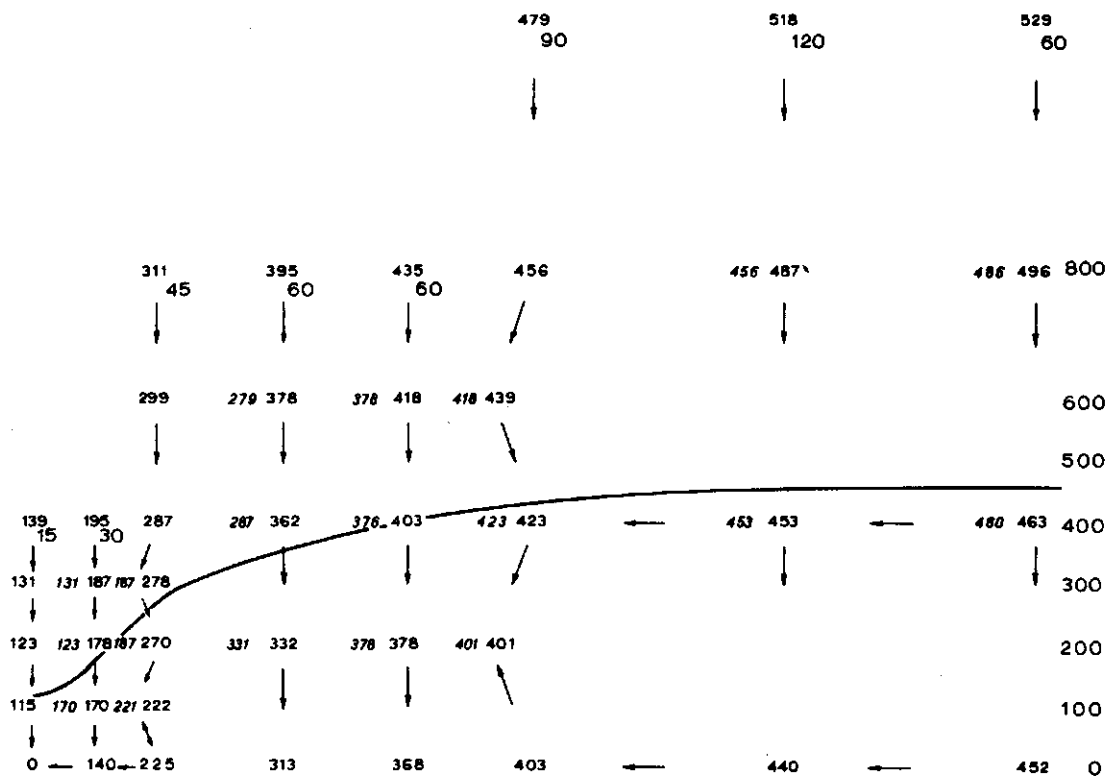


Fig. 8. Potentiaalverdeling in het model bij een totale invoer van 480 μ A

120 = invoer in μ A
 418 439 = gemeten potentialen

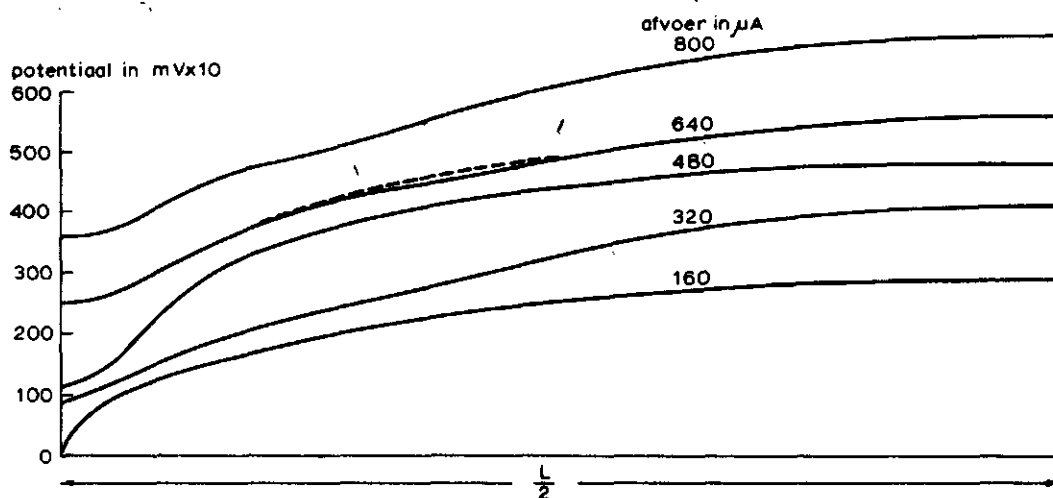


Fig. 9. Freatische oppervlakten bij verschillende invoeren, bepaald door interpolatie

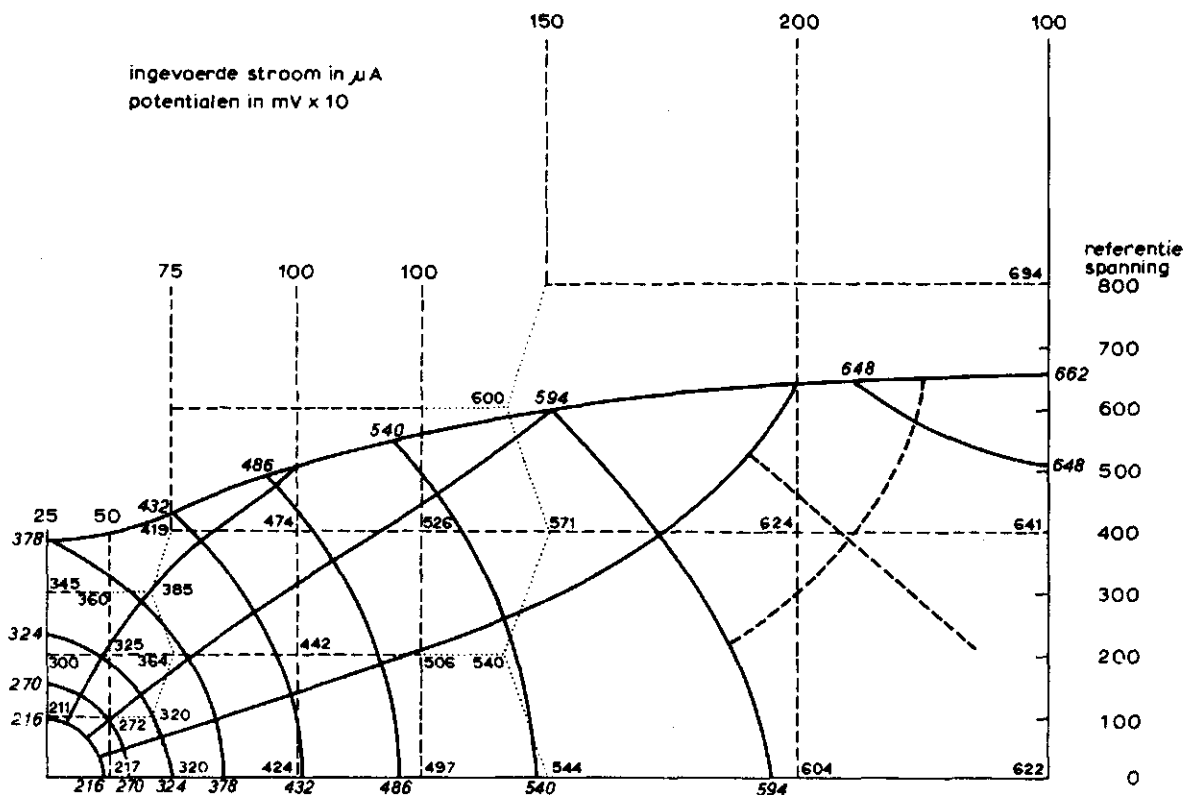


Fig. 10. Gemeten potentialen in een getekend vierkanten netwerk

boven elkaar liggende knooppunten. Een aanpassing van het netwerk langs het freatisch oppervlak vindt ook hier niet plaats.

IV ENKELE RESULTATEN VAN HET MODEL MET F.E.T.-SCHAKELAARS

Om de werking van de boven omschreven schakelingen in een model te controleren zijn enkele metingen uitgevoerd aan een eenvoudig drainagemodel (fig. 7). Voor dit model is uitgegaan van een verticale doorsnede van de grond loodrecht op de drain, die 75 cm onder maai-veld op een ondoorlatende laag ligt. Voor de horizontale afstand is slechts 1 m genomen omdat het hier een testmodel betreft en niet een model om een bepaald drainage probleem te bestuderen. Het model is verdeeld in 3 x 4 vierkanten van elk 25 cm. Om in de omgeving van de drain de potentiaalverdeling beter te kunnen bepalen is tweemaal een onderverdeling aangebracht volgens de door VIMOKÉ en TAYLOR (1962) gegeven methode. De aanwezigheid van de schakelaars staat alleen een verdeling in horizontale richting toe. Met het oog op de te verwachten vorm van de grondwaterspiegel en materiaal besparing zijn de bovenste vierkanten van de onderverdeling weggelaten. Als basisweerstand is gekozen een waarde van 2,7 K Ω zodat langs de randen de waarde 5,4 K Ω is en voor de onderverdeling 1,8 K Ω . Voor dat model zijn de weerstanden uitgezocht met een tolerantie <1%. Voor een juiste werking van de schakelaars is het noodzakelijk dat de stroom bij de drain ingevoerd wordt of dat aan de bovenzijde een negatieve stroom wordt ingevoerd. De invoer per weerstand langs de bovenzijde van het model is zo gekozen dat de verhouding van de stroomsterkte overeenkomt met de verhouding van de breedte van het gebied die door elke weerstand wordt gerepresenteerd. Bij J1 wordt de totale negatieve stroom afgevoerd. De plaats van de schakelaars is in het model aangegeven met cirkels.

Hoewel ook met gewone transistoren een zeer goede benadering van de potentiaal verdeling werd verkregen (Jaarverslag I.C.W. 1971) worden de metingen hier verder buiten beschouwing gelaten, om de reeds eerder vermelde stroomonttrekking door de transistoren.

De referentie spanningen voor de versterkers zijn zo gekozen,

dat een hoogte van 25 cm overeenkomt met 4 volt. De referentie spanning is verkregen door een nauwkeurige spanningsdeler aan te sluiten op een gestabiliseerde spanningsbron (Philips PE 4803). De neg. voeding voor de versterkers is van dezelfde spanningsbron afgenomen. Voor de positieve voeding van 6 volt is gebruik gemaakt van een 6 V NIFE accu. De stroomvoorziening van het model wordt verzorgd door een tien-voudige instelbare constante stroombron met digitale instelling van 0-999 μ A. Deze stroombron met een nauwkeurigheid beter dan 1 μ A is speciaal ontwikkeld en gefabriceerd door het Lab. voor Instrumentele Electronica. De metingen aan het model zijn uitgevoerd met een digitale multimeter (Philips PM 2421) met daarop aangesloten een printer (Kienzle D 4-E).

Bij een totale invoer van -160, -320, -480, -640 en -800 μ A zijn in alle knooppunten de potentialen gemeten. Ook de potentialen tussen de netwerk weerstanden en de schakelaars zijn gemeten ter controle van de werking van deze schakelaar. In open toestand mag over de F.E.T. geen spanning staan en omdat er dan een stroom vloeit treedt wel een spanningsverschil op over de weerstand. In gesperde toestand staat wel spanning over de F.E.T. en geen spanning over de weerstand (fig. 8). Aan de hand van de gemeten potentialen zijn door middel van interpolatie de grondwaterspiegels getekend. Fig. 9 geeft de verschillende grondwaterstanden weer bij de genoemde invoeren. In deze figuur komt de fout duidelijk tot uiting die ontstaat doordat geen aanpassing van de mazen van het net langs het freatisch oppervlak heeft plaats gevonden. Ondanks deze plaatselijke afwijking toont fig. 10 toch een goede overeenkomst tussen het gemeten freatisch oppervlak en het met behulp van de vierkantjes methode bepaalde oppervlak.

V ENKELE OPMERKINGEN

Een betere aanpassing van de weerstandswaarde van de vierkanten direct onder het freatisch oppervlak lijkt wenselijk. Deze zal gezocht moeten worden in een geleidelijk inschakelen van de weerstanden door gebruik te maken van een niet lineaire, niet plotseling om

klappende schakelaar. Hierbij dient er dan tevens voor gezorgd te worden dat zodra de naast hoger liggende weerstand wordt ingeschakeld de onder liggende weerstand gelijk aan R_0 wordt gemaakt. Of deze extra voorzieningen lonend zijn zal uit nadere metingen moeten worden onderzocht. Bovendien hangt het van de gewenste nauwkeurigheid af of deze extra tijd voor opbouw en extra kosten van materiaal verantwoord zijn.

VI SAMENVATTING

Bij een weerstandsmodel kost het bepalen van het freatisch oppervlak zeer veel tijd door de noodzakelijke herhaling van meten en corrigeren. Vooral bij problemen waarbij de invloed van verschillende randvoorwaarden op de hoogte en vorm van het freatisch vlak moeten worden bekeken is deze methode niet geschikt. Daarom is een oplossing gezocht waarbij het freatisch oppervlak en daarmee tevens het doorstroomde gebied zich automatisch aanpassen aan de ingevoerde randvoorwaarden. Door gebruik te maken van de specifieke eigenschappen van halfgeleiders is het mogelijk deze als schakelaars te gebruiken voor het in en uitschakelen van de horizontale weerstanden in het netwerk. Met behulp van een referentiespanning wordt het moment van schakelen zo gekozen dat alle weerstanden onder het freatisch vlak aangesloten zijn. Boven dit vlak zijn de horizontale weerstanden onderbroken. Een eerste model met gewone transistoren voldeed niet aan de eisen omdat de stroom welke door de basis-emitter keten vloeit aan het model wordt onttrokken. Veld-effecttransistoren worden gestuurd door een spanning op de poort waarbij nagenoeg geen stroom door de poort vloeit. Wel moeten deze F.E.T.'s gestuurd worden door een versterker om de spanning tussen het referentieniveau en het betreffende knooppunt zodanig te versterken dat de F.E.T. open of dicht gestuurd wordt. Enkele meetresultaten met deze schakelaar geven een goede overeenkomst te zien met op andere wijze gevonden oplossingen. Een automatische aanpassing van de weerstandswaarden langs het freatisch oppervlak lijkt gewenst.

VII LITERATUUR

- VAN DER BEKEN, A., 1964. Een elektrisch model voor het onderzoek van grondwaterstromingen. Evolution electronique Bruxelles.
13, 124 : 31 - 35
- VAN DER BEKEN en G.A. HEIJNDRIKX, 1966. Een elektrisch netwerk-model voor de studie van grondwaterstromingen. Med. Rijksfac.
Landbouw wetenschappen Gent 1966, XXXI nr. 1
- JAARVERSLAG I.C.W. 1971.
- KARPLUS, 1958. Analog simulation Mc Graw-Hill Book Cie.
- LUTHIN, J.N., 1953. An electrical resistance network solving drainage problems. Soil Sei 75 : 259 - 274
- VIMOKE en TAYLOR, 1962. Simulating Waterflow in soil U.S. Dep. of Agric. ARS 41 - 65.