

NN31545.0749

NOTA 749

juli 1973

Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding
Wageningen

ENKELE PRINCIPES EN GEBRUIKSMOGELIJKHEDEN
VAN ANALOGE COMPUTERS

Ing. F. Homma

BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW

Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatie-
middelen, 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 onder-
zoek nog niet is afgesloten.
Bepaalde nota's komen niet voor verspreiding buiten het Instituut
in aanmerking



1709654

I N H O U D

	Blz.
INLEIDING	1
DIGITALE- EN ANALOGE COMPUTERS	2
ANALOGE REKENMACHINE	3
REKENKUNDIGE BEWERKINGEN	5
In- en uitvoer	5
Vermenigvuldigen	6
Optellen	10
Integreren	12
PASSIEVE MODELLEN	14
ENKELE TOEPASSINGSMOGELIJKHEDEN VAN ANALOGE MODELLEN	17
Bezoek aan een park in de nabijheid van een stad	17
HYDROLOGISCHE PROBLEMEN	18
LITERATUUR	20

INLEIDING

Voor de oorlog kon slechts vanwege de technische moeilijkheden en de hoge kostprijs op zeer beperkte schaal gebruik worden gemaakt van analoge computers. In de jaren 1940-1945 heeft de ontwikkeling een grote voortgang gemaakt door de noodzaak om snel de resultaten van verschillende tactische plannen te kunnen vergelijken. De ontwikkeling van de transistoren sinds 1948 heeft een grote vereenvoudiging in de opbouw van versterkerschakelingen tot gevolg gehad. De hierdoor ontstane mogelijkheid van prijsverlaging maakte de toepassing van computers op grotere schaal mogelijk. De volgende stap tot vereenvoudiging en grotere betrouwbaarheid kwam met de invoering van de zogenaamde geïntegreerde schakelingen, waarbij een groter of kleiner deel van de gehele schakeling als een complete eenheid wordt gefabriceerd (fig. 1). De kostprijs van een eenvoudige versterkerschakeling kon daardoor in de loop der jaren dalen van f 50,- (met buizen) tot f 2,50 (geïntegreerde schakeling).

Het huidige prijspeil en de geringe technische gecompliceerdheid maken het thans mogelijk zonder veel specialistische kennis op het gebied van de electronica, eenvoudige analoge computers te bouwen. Omdat dergelijke computers steeds meer in het onderzoek worden toegepast en verschillende onderzoekers van het ICW hiervoor belangstelling hebben, is in deze nota getracht de principes uiteen te zetten.

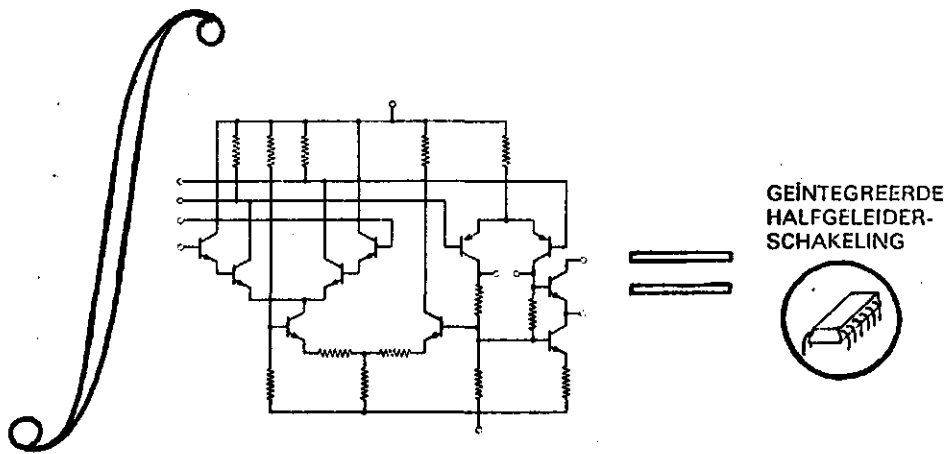


Fig. 1.

DIGITALE- EN ANALOGE COMPUTERS

De digitale computers worden gebruikt voor vraagstukken, waarbij het betreffende probleem eerst wordt beschreven door formules, die zodanig omgezet worden dat een numerieke bewerking mogelijk is. De voordelen van de digitale computer zijn de grote nauwkeurigheid en de snelheid waarmee rekenkundige bewerkingen worden uitgevoerd. Continu variabele grootheden moeten echter als functie of verdeeld in een aantal trappen worden ingevoerd.

Voor al voor problemen die niet of zeer moeilijk in analytische vorm zijn te beschrijven biedt de analoge computer voordelen, waardoor vaak op eenvoudige manier een probleem met veranderende randvoorwaarden snel kan worden doorgerekend. De nauwkeurigheid is echter minder groot dan van de digitale computer als men binnen redelijke bouwkosten wil blijven.

Soms biedt het voordelen bepaalde problemen op te lossen met een combinatie van de twee typen computer. Zij worden dan gekoppeld door middel van analoog naar digitaal en digitaal naar analoog omvormers.

Het geheel van computers en omvormers noemt men dan een hybride systeem.

De invoer kan in beide gevallen onder meer plaatsvinden door ponskaarten, magneetbanden of een omvormer. De toevoer aan de eigenlijke rekeneenheid bij de digitale computer bestaat altijd uit een lage en een hoge spanning op een tevoren vastgesteld niveau (bijv. 0 V en + 5 V of -5 V en 0 V).

De analoge computer daarentegen kan worden gevoed door variabele spanningen of stromen. De uitvoer van de computers hangt af van het doel van de uitkomsten. Zij kunnen worden vastgelegd op kaarten of banden, maar ook worden uitgetypt of getekend. Bij de analoge computers wordt ook veel gebruik gemaakt van lijnschrijvers en voor zeer snelle computers van een oscilloscoop.

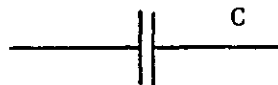
ANALOGE REKENMACHINE

Om een inzicht in de werking van de analoge computers te verkrijgen is het noodzakelijk eerst enkele begrippen uit de elektriciteitsleer en de electronica nader te beschouwen. De drie voornaamste elementen welke gebruikt worden bij deze computers zijn (fig. 2):

weerstand



condensator



operationele versterkers

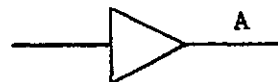


Fig. 2. Schema van de meest gebruikte elementen

De voornaamste eigenschappen van deze elementen zijn:

Weerstand

Voor een weerstand geldt de wet van Ohm

$$E = I \times R \quad (1)$$

dat wil zeggen: De over de weerstand gemeten spanning (E) is gelijk aan het produkt van de door de weerstand vloeiende stroom (I) en de waarde van de weerstand (R).

Condensator

Een stroom door een condensator laadt deze op. De door de condensator vloeiende stroom is evenredig met de spanningsverandering als functie van de tijd

$$I = C \frac{dE}{dt} \quad (2)$$

waarin de constante C de capaciteit van de condensator voorstelt. Ook wordt vaak gebruik gemaakt van het verband tussen spanning en stroom

$$E = \frac{1}{C} \int I dt \quad (3)$$

Operationele versterker

In vaktermen wordt vaak gesproken van 'op-amp', operational amplifier. De eisen waaraan de op-amp moet voldoen zijn:

De ingangsweerstand (R_i) $\rightarrow \infty$

De ingangsstroom (I_i) $\rightarrow 0$

De uitgangsweerstand (R_u) is klein

De versterkingsfactor is zeer groot en onafhankelijk van de spanning en de frequentie in het gebruikte gebied. De uitgangsspanning is 0 als er geen ingangsspanning is. Dat aan bovengestelde eisen redelijk goed voldaan kan worden blijkt uit de vergelijking van de ideale versterker met de zeer goedkope $\mu A709$ en de iets betere TBA242.

Tabel 1.

	Ideaal	$\mu A709$	TBA242
R_i	∞	400 K Ω	1 M Ω
I_i	0	200 nA	30 nA
Versterking	\gg	45 000 x	200 000 x

Bij de behandeling van de rekenkundige bewerking wordt ervan uitgegaan dat de gebruikte onderdelen een te verwaarlozen tolerantie hebben en de constante waarde tijdens het gebruik niet veranderd.

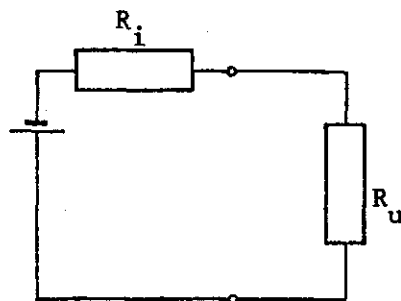
REKENKUNDIGE BEWERKINGEN

In- en uitvoer

Voor de invoer van de gegevens wordt gebruik gemaakt van constante voedingsbronnen waarbij de te leveren stroom of spanning alleen afhangt van de ingestelde (= gewenste) waarde en onafhankelijk is van de aangesloten belasting.

Voor een voedingsbron geldt (fig. 3) dat de stroom door het circuit is:

$$I = \frac{EMK}{R_i + R_u} \quad (4)$$



EMK = onbelaste spanning van de voedingsbron

R_i = inwendige weerstand

R_u = uitwendige belasting

Uit (4) volgt dat de spanning over de uitgangsklemmen is:

$$E = I \times R_u = \frac{EMK \times R_u}{R_i + R_u} = \frac{EMK}{\frac{R_i}{R_u} + 1} \quad (5)$$

Fig. 3. Spanningsbron met in- en uitwendige belasting

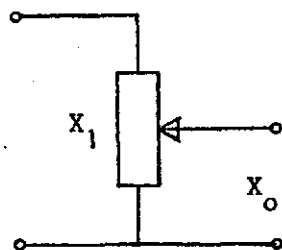
Bij een constante stroombron wordt bij een eenmaal ingestelde waarde R_i zodanig aangepast dat de som van $R_i + R_u$ constant blijft zodat ook I constant blijft.

Bij een constante spanningsbron wordt bij een ingestelde waarde van de spanning R_i zodanig aangepast dat het quotiënt $\frac{R_i}{R_u}$ constant blijft en daarmee ook de ingestelde spanning.

Beide regelingen vinden plaats door sturing van de basisspanning van een transistor waardoor de stroom en daarmee de inwendige weerstand in de voeding geregeld wordt. De op deze wijze verkregen constante stroom of spanning kan worden toegevoerd aan de ingangsklemmen van de analoge rekenmachine. Voor de uitvoer of uitlezing van de uitkomsten wordt van zodanige apparatuur gebruik gemaakt dat deze de werking van de computer niet beïnvloeden. Deze apparatuur mag geen stroom aan het model onttrekken en moet daarom een zeer hoge ingangsweerstand hebben. Voor stroommetingen moet de weerstand zeer laag zijn zodat tussen de meetpunten geen extra potentiaalverlies optreedt. De tegenwoordig verkrijgbare elektronische meetapparatuur (o.a. digitale multimeter, oscilloscoop en lijnschrijvers) voldoen ruimschoots aan de gestelde eisen.

Vermenigvuldigen

De eenvoudigste manier van vermenigvuldigen is die met behulp van een instelbare weerstand, een zogenaamde potentiometer (fig. 4). Wordt



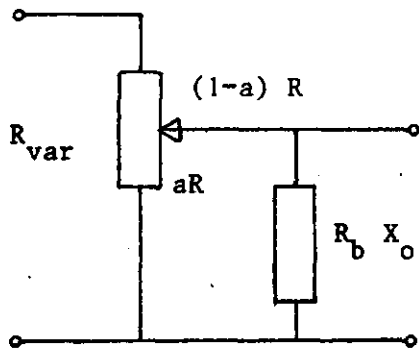
op de ingang een spanning X_1 aangelegd en de looper op een zekere waarde ingesteld dan volgt de spanning tussen looper en aarde direct uit de figuur. De stroom door de potentiometer is voor beide delen gelijk en de spanning is gelijk aan de weerstandsverhouding $(1 - a) : a$ met andere woorden

$$X_0 = aX_1 \quad (6)$$

waarbij $0 < a < 1$

Fig. 4. Potentiometer als vermenigvuldiger

Het bezwaar van deze methode van vermenigvuldiging is dat bij belasting van X_o , door deze bijvoorbeeld als invoer voor een volgende bewerking te gebruiken, vergelijking 6 niet meer geldt. Stel deze belasting R_b die parallel geschakeld is aan aR (fig. 5) dan geldt de volgende berekening voor X_o . De totale weerstand van de schakeling is



$$R_{\text{tot}} = (1 - a) R + \frac{aR \cdot R_b}{aR + R_b} \quad (7)$$

De stroom door de schakeling

$$I = \frac{X_1}{R_{\text{tot}}} = \frac{X_1}{(1 - a) R + \frac{aR \cdot R_b}{aR + R_b}} \quad (8)$$

verdeelt zich over aR en R_b in de verhouding $R_b : aR$. Door R_b gaat een stroom

Fig. 5. Vermenigvuldiger met aangesloten belasting

$$I_{R_b} = I \frac{aR}{aR + R_b} \quad (9)$$

Voor de uitgangsspanning X_o vinden we dan:

$$X_o = I_{R_b} \times R_b = \frac{X_1 \frac{aR \cdot R_b}{aR + R_b}}{(1 - a) R + \frac{aR \cdot R_b}{aR + R_b}} \neq aX_1 \quad (10)$$

Wordt over een potentiometer van $10 \text{ K}\Omega$ een spanning van 10 V aangesloten en a ingesteld op $0,5$ dan is de uitgangsspanning $X_o = 5 \text{ V}$. Door het aanbrengen van een belasting van $5 \text{ K}\Omega$ daalt deze spanning tot $3\frac{1}{3} \text{ V}$.

Alleen als geldt $R_b \gg aR$, mag voor (10) bij benadering vergelijking (6) worden toegepast.

Aan deze voorwaarde kan worden voldaan door tussen de looper en de uitwendige belasting een operationele versterker met een versterkingsfactor gelijk 1 te schakelen. De ingang van de op-amp is immers zeer groot, zodat dan geldt $R_b \gg aR$ omdat nu de versterker de belasting vormt.

Een tweede mogelijkheid tot vermenigvuldigen is toepassing van de wet van Ohm:

$$X_o = I_i \times R \quad (11)$$

waarbij I_i een variabele instelbare maar van de belasting onafhankelijke stroom is. Met deze methode kan eveneens het produkt van twee variabelen worden bepaald door voor R een variabele weerstand te nemen (fig. 6). De waarden van I_i en R worden beide digitaal ingesteld

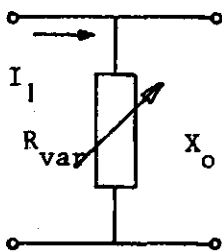


Fig. 6. Vermenigvuldiger met constante stroom

en de uitgangsspanning wordt op een digitale voltmeter (DVM) afgelezen. Ook hier gelden dezelfde beperkingen als voor de vorige methode met betrekking tot het aanbrengen van een belasting.

Een betere methode van vermenigvuldigen geeft het gebruik van een operationele versterker met tegenkoppeling. De werking kan het eenvoudigst worden verklaard door een rekenvoorbeeld. Omdat de ingang van de versterker (A) geen stroom voert moet de stroom door de ingangsweerstand (R_i) en de terugkoppelweerstand (R_f) gelijk zijn (fig. 7).

Wegens de versterking (A) van de op-amp. is de spanning in P gelijk $\frac{X_o}{A}$.

Deze spanning wordt immers AX versterkt zodat dan op de uitgang X_o verschijnt. Met behulp van de wet van Ohm kunnen de stromen door R_i en R_f worden berekend. Bovendien is de som van de stromen in P = 0 waaruit volgt:

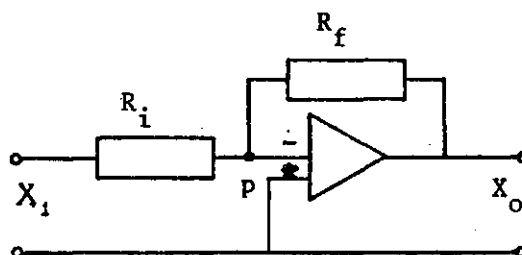


Fig. 7. Vermenigvuldiger met op-amp.

$$(X_1 - \frac{X_0}{A}) \frac{1}{R_i} + (X_0 - \frac{X_0}{A}) \frac{1}{R_F} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{X_1}{R_i} - \frac{X_0}{AR_i} + \frac{X_0}{R_F} - \frac{X_0}{AR_F} = 0$$

$$X_0 = \frac{X_1}{R_i \left(-\frac{1}{AR_i} + \frac{1}{R_F} - \frac{1}{AR_F} \right)} = \frac{X_1}{-\frac{1}{A} + \frac{R_i}{R_F} \left(1 - \frac{1}{A} \right)} \quad (13)$$

Omdat A zeer groot is (tabel 1) mag $\frac{1}{A}$ verwaarloosd worden ten opzichte van 1. Voor R_i/R_F worden vaak waarden gebruikt variërend van 0,1 tot 10 zodat $\frac{1}{A}$ ook verwaarloosd mag worden ten opzichte van R_i/R_F . Mocht deze verwaarlozing in sommige gevallen nog bezwaar opleveren dan kunnen twee versterkers in serie geschakeld worden waardoor A overgaat in A^2 .

Voor de vermenigvuldiging blijft dan de eenvoudige vergelijking:

$$X_0 = \frac{R_F}{R_i} X_1 \quad (14)$$

over waarbij $\frac{R_F}{R_i}$ overeenkomt met de factor a uit (6).

De uitgang van de versterker is laag-ohmig zodat een aan te brengen belasting hier geen invloed op de werking heeft.

Door R_F gelijk aan R_i te kiezen wordt de versterkingsfactor 1 en

hebben we te doen met de reeds eerder genoemde op-amp. om te zorgen dat een aan te brengen belasting de voorgaande schakeling niet beïnvloedt. De meeste op-amp's hebben een inverterende en een niet-inverterende ingang, zodat naar keuze gebruik kan worden gemaakt van een vermenigvuldigingsfactor +1 of -1.

Aan X_1 en aan R_F zijn geen voorwaarden verboden. Hierdoor is het mogelijk het produkt van twee veranderlijke grootheden te bepalen. Is R_F instelbaar met aflezing van de factor R_F/R_i en doorloopt X_i een bepaalde functie dan is het produkt X_o een constante (de ingestelde waarde R_F/R_i) maal deze functie. Ook is het mogelijk R_F in te stellen met behulp van een servomotor, die door een bepaalde functie wordt gestuurd. De uitkomst X_o doorloopt nu een functie die op elk tijdstip gelijk is aan het produkt van de momentele waarden van de functie X_1 en de stuurfunctie voor R_F .

Optellen

Een zeer eenvoudige methode om op te tellen wordt verkregen door een serie schakelingen van instelbare weerstanden. De weerstanden worden op de gewenste getalwaarde ingesteld en een stroom gelijk aan een eenheid van stroomsterkte door deze weerstanden geeft als spanning de gevraagde som (fig. 8):

$$X_o = IR_1 + IR_2 + IR_3 \dots\dots \quad (15)$$

$$X_o = I(R_1 + R_2 + R_3 \dots\dots) \quad (16)$$

Ook in dit geval kan niet zoner meer een belasting worden aangesloten voor verdere bewerking van de som. Een methode die meer algemeen toegepast kan worden, wordt verkregen door gebruik te maken van een tegengekoppelde versterker.

Analoog aan de bij de vermenigvuldiging gegeven afleiding volgt in dat geval (fig. 9):

$$X_o = \frac{R_F}{R_1} X_1 + \frac{R_F}{R_2} X_2 + \frac{R_F}{R_3} X_3 \dots\dots \quad (17)$$

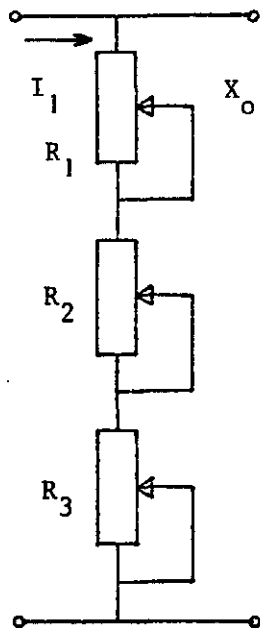


Fig. 8. Optellen met behulp van een constante stroom

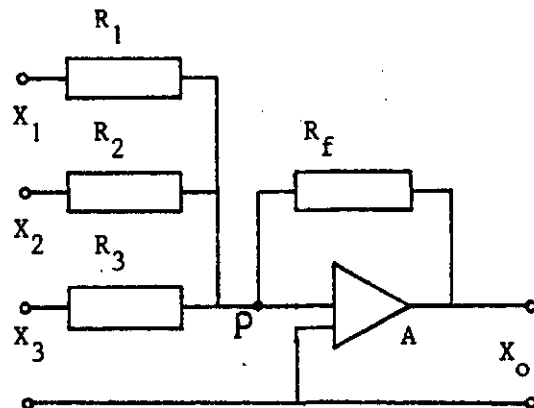


Fig. 9. Vermenigvuldigen en optellen met op-amp.

Door voor R_1 , R_2 en R_3 bepaalde waarden te kiezen is het mogelijk een som te verkrijgen van de vorm:

$$X_o = aX_1 + bX_2 + cX_3 \quad (18)$$

De schakeling voor verg. (18) wordt vaak in vereenvoudigde vorm weergegeven (fig. 10) als deze sommatie versterker een onderdeel is

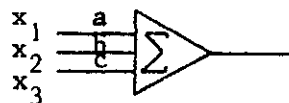


Fig. 10. Schema opteller

van een ingewikkelder systeem. Moet deze som nog met een bepaalde factor worden vermenigvuldigd dan wordt vaak de schematische voorstelling van fig. 11 gebruikt.

Integreren

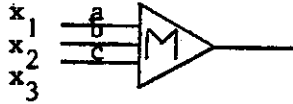


Fig. 11. Schema vermenigvuldiger

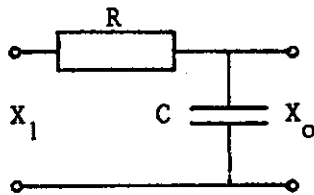


Fig. 12. Integrator

Bij veel problemen moeten differentiaalquotienten geïntegreerd worden om een oplossing te verkrijgen. In zijn eenvoudigste vorm bestaat een integrator uit een weerstand en een condensator (fig. 12). Omdat een stroom door een condensator deze oplaadt, waardoor de spanning toeneemt is de stroom niet constant maar afhankelijk van de spanning welke op dat moment over de condensator staat

$$i = C \frac{dE}{dt} \quad (19)$$

De aangelegde spanning X_1 laadt via R de condensator op met een van de tijd afhankelijke stroom.

De spanning over de condensator is X_0 . Omdat geen belasting is aangesloten vloeit geen stroom naar de uitgang. De vergelijking voor de stroom is

$$i = (X_1 - X_0) \frac{1}{R} - C \frac{dX_0}{dt} = 0 \quad (20)$$

waaruit volgt

$$dX_0 = \frac{X_1 - X_0}{RC} dt$$

of

$$X_0 = \frac{1}{RC} \int X_1 dt - \frac{1}{RC} \int X_0 dt \quad (21)$$

De gewenste vorm is echter

$$X_0 = \frac{1}{RC} \int X_1 dt \quad (22)$$

Een mogelijke oplossing om tot een goede benadering te komen is te zorgen dat X_o zeer klein blijft door een grote R en C te gebruiken. Dit geeft echter wel moeilijkheden als X_o voor verdere bewerkingen belast moet worden. Bovendien wordt de snelheid van de integratie belangrijk kleiner.

Ook in dit geval geeft toepassing van een op-amp. een veel nauwkeuriger oplossing zonder het bezwaar van een hoog-ohmige uitgang.

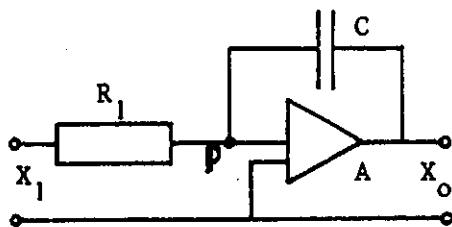


Fig. 13. Integrator met op-amp

In P is de spanning $\frac{X_o}{A}$ wegens de versterking van de op-amp. (A).

Door de ingang vloeit geen stroom zodat we ook hier weer een eenvoudige stroomvergelijking kunnen opstellen

$$\frac{X_1 - \frac{X_o}{A}}{R} + C \frac{d(X_o - \frac{X_o}{A})}{dt} = 0$$

$$\text{of } \frac{d(X_o - \frac{X_o}{A})}{dt} = \frac{X_o - X_1}{RC}$$

$\frac{X_o}{A}$ kan verwaarloosd worden ten opzichte van X_o en X_1 . Omdat door de ingang geen stroom vloeit zal $\frac{X_o}{A}$ slechts zeer weinig van 0 kunnen verschillen

$$\frac{dX_o}{dt} = -\frac{X_1}{RC}$$

$$X_o = -\frac{1}{RC} \int X_1 dt$$

De integrator zal dus beter aan deze vergelijking voldoen naarmate de versterkingsfactor groter en de ingangsstroom kleiner is. Voor de integrator van fig. 13 wordt vaak het vereenvoudigde schema van fig. 14 gebruikt.



Fig. 14. Schema integrator

De differentiator kan eenvoudig worden verkregen door de weerstand en de condensator van plaats te verwisselen. Deze differentiator wordt echter weinig gebruikt omdat moeilijkheden optreden in verband met de stabiliteit (genereer neiging). De problemen met de differentiator kunnen in

het algemeen worden vermeden door bij een integrator het uitgang- en ingangssignaal van plaats te verwisselen. Door het uitgangssignaal te sturen verschijnt nu op de ingang het gezochte differentiaalquotiënt (fig. 15). Door gebruikmaking van terugkoppeling van bepaalde functies in het rekenprogramma is het mogelijk niet lineaire differentiaalvergelijking op te lossen.

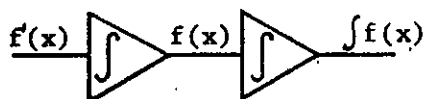


Fig. 15. Integrator en differentiator

PASSIEVE MODELLEN

De tweede groep van de analoge computers, de passieve modellen, worden in de hydrologie veel toegepast. Omdat voor elk medium waarin een stroming plaats heeft voor deze stroming analoge formules kunnen worden toegepast in een eenvoudige overeenkomst te vinden tussen passieve modellen en de hydrologie. Er zijn verschillende soorten modellen, zowel elektrische als mechanische modellen. De laatste worden hier niet behandeld.

Bij de elektrische modellen kunnen we diverse types onderscheiden:

Elektrolytische tanks

Deze tanks, gevuld met een geleidende vloeistof dienen voor het oplossen van 3-dimensionale problemen. De constructie van deze modellen is vrij kostbaar omdat de plaats waar potentialen gemeten worden met behulp van een verschuifbaar meetstiften-systeem worden vastgelegd. De vorm van het gebied is met behulp van was gemakkelijk te verwezenlijken en kan tijdens de proeven eenvoudig worden aangepast.

Plaatgeleiders

Voor 2-dimensionale stromingsproblemen zijn plaatgeleiders zeer geschikt omdat de gewenste vorm van het model uitgeknipt kan worden. Metaalfolie heeft een goede homogeniteit maar vergt voor nauwkeurige metingen grote stroomsterktes wegens de hoge geleidbaarheid. Modellen van geleidend papier (o.a. Teledeltos) hebben dit bezwaar niet maar zijn vrij onnauwkeurig wegen de inhomogeniteit van de weerstand in de verschillende richtingen. Behalve voor onderwijs- en demonstratiedoeleinden worden de papiermodellen gebruikt voor snelle maar globale oplossingen van problemen.

Weerstandnetwerken

Voor nauwkeuriger onderzoek wordt de voorkeur gegeven aan weerstandsmodellen. Vooral als in één bepaald gebied diverse problemen moeten worden onderzocht, wordt veelvuldig gebruik gemaakt van zowel 2- als 3-dimensionale weerstandsnetwerken. De manier waarop zo'n model wordt ontwikkeld en de voorwaarden waaraan het moet voldoen worden aan de hand van een 2-dimensionaal model besproken.

Voor de bestudering van een 2-dimensionaal drainageprobleem kiezen we een verticale doorsnede. Verdelen we deze doorsnede in gelijke vierkanten dan is bij homogene grond de weerstand van dat vierkant in horizontale en verticale richting gelijk (fig. 16a). 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. 16b). Vervangen we nu elke weerstand R door twee parallel geschakelde weerstanden $2R$ die langs de randen van het vierkant gelegd worden dan ontstaat fig. 16c. 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. 16d).

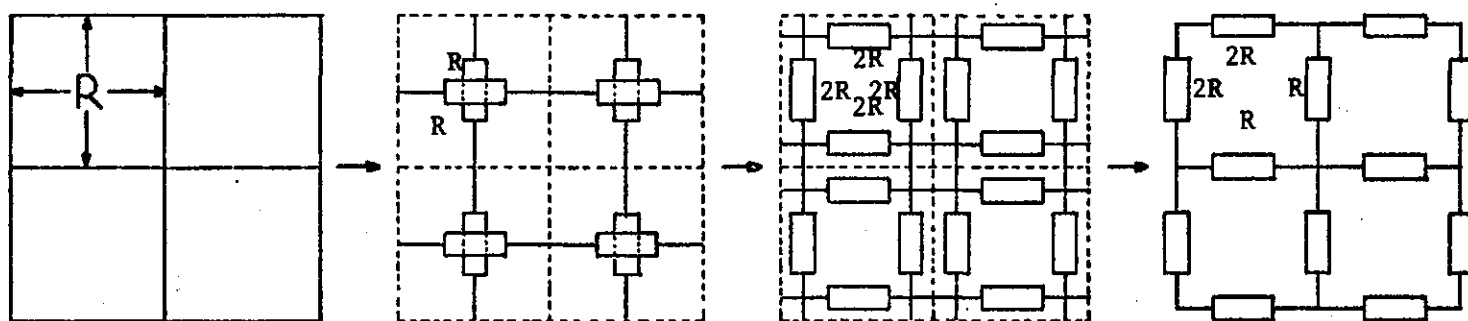


Fig. 16. Schematische weergave van de overgang van een blok grond naar een weerstandsnetwerk

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 zullen in een afzonderlijke nota worden behandeld.

De toepassing van passieve analoge modellen valt buiten de algemene opzet van deze nota.

ENKELE TOEPASSINGSMOGELIJKHEDEN VAN ANALOGE MODELLEN

Bezoek aan een park in de nabijheid van een stad

Voor de aanleg van toegangswegen naar een park of de extra verkeersbelasting op bestaande wegen bij een aan te leggen park is het van belang de grootte van de te verwachten verkeersstroom van tevoren te bepalen. Met behulp van een elektrisch analoog kan dit op een eenvoudige manier gebeuren. De stad kan worden weergegeven door een spanningsbron, de weg naar het park door een weerstand en het park door een condensator (fig. 17).

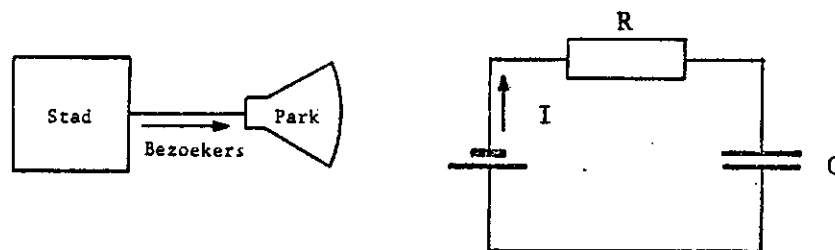


Fig. 17. Bezoekersstroom in werkelijkheid en in een analoog

Zoals de weg naar het park bepaald hoeveel mensen per tijdseenheid naar het park kunnen gaan, zo beperkt de weerstand de stroom naar de condensator. Naarmate het park voller wordt zullen minder mensen er hun recreatie zoeken. Naarmate de condensator verder opgeladen wordt neemt de tegenspanning toe zodat over de weerstand een kleinere spanning komt te staan die een afname van de stroom tengevolge heeft. Bij een afname van de voedingsspanning zal de condensator zich via de weerstand weer ontladen. Dit komt overeen met een terugkerende stroom bezoekers als deze tegen de avond weer naar huis gaan.

Dit eenvoudige model is op vele manieren uit te breiden. De druk

die door de bezoekers op het park wordt uitgeoefend kan afhankelijk van het tijdstip op de dag worden gesteld door geen constante spanning aan te sluiten op het model, maar deze met de tijd te laten variëren. De verkeersstroom op de weg kan in het model beter bij de werkelijkheid worden aangepast door een niet-lineaire weerstand te gebruiken waarvan de weerstandswaarde toeneemt bij een toenemende stroom. Ook kunnen uitwijkmogelijkheden ingebouwd worden naar één of meerdere recreatiegebieden. Voor een groter gebied kunnen meerdere woonkernen in het model worden ingebouwd door meerdere voedingsbronnen te gebruiken (fig. 18)

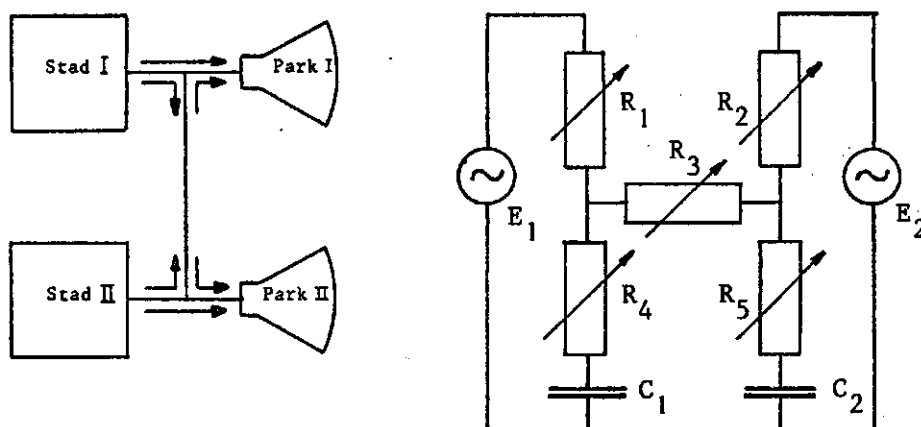


Fig. 18. Meerdere stromen van bezoekers weergegeven door een analogon

HYDROLOGISCHE PROBLEMEN

Voor het oplossen van verschillende hydrologische problemen zijn algemene formules bekend. De moeilijkheid ligt hoofdzakelijk op het gebied van het invoeren van de juiste randvoorwaarden in deze formules. Bij ingewikkelde stromingsproblemen of in gevallen waarbij het doorstroomde gebied niet constant is neemt men dan ook vaak zijn toevlucht tot analogons.

Een probleem bij drainage wat niet met eenvoudige formules is

weer te geven vormt de invloed van de kwaliteit van de drainsleuf op de totale ontwatering. Voor het bestuderen van deze invloed kan gebruik worden gemaakt van een weerstandennetwerk waarbij voor het gebied van de ongestoorde grond en de drainsleuf verschillende weerstandswaarden gebruikt worden in een verhouding omgekeerd evenredig met de doorlaatfactoren van deze twee gebieden. De intreeweerstand van de drain kan door afzonderlijke weerstanden in rekening worden gebracht.

Bij een bepaalde afvoer moet het doorstroomde gebied worden aangepast aan de hoogte van het freatisch oppervlak. Met behulp van een schakelsysteem worden de weerstanden boven het freatisch vlak zo geschakeld dat in dit gebied alleen een verticale stroming mogelijk is. De invoer van bovenaf wordt door meerdere constante stroombronnen zo geregeld dat de invoer per lengte-eenheid constant is (fig. 19). Door nu de potentiaalverdeling in het gebied te meten bij verschillende weerstandswaarden voor de drainsleuf kan de invloed hiervan op de totale ontwatering worden nagegaan.

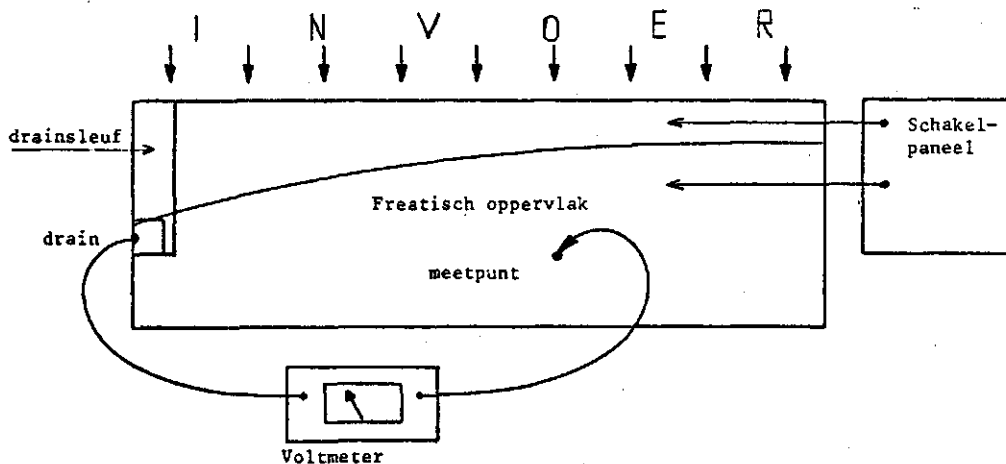


Fig. 19. Electric model for study of drainage problems

Om van de hier aangehaalde voorbeelden een volledige beschrijving van de toe te passen schakelschema's en meetresultaten te geven zou te ver voeren.

Bovendien vraagt elk probleem zijn eigen aanpassingen in het schema zodat de resultaten niet algemeen toepasbaar zijn.

Voor uitgebreidere informatie over algemene problemen van analogons kan men onder andere de volgende literatuur raadplegen.

LITERATUUR

KARPLUS, J.W., 1958. Analog simulation. McGraw-Hill Book Company Inc.

KORN, G.A. and Th.M. KORN, 1956. Electronic Analog Computers. McGraw-Hill Book Company Inc.

Introduction to Electronic Analog Computers.

Pergamon Press Ltd London.

VERHAGEN, C.J.D.M., 1960. Rekenmachines in Delft. Technische Hogeschool, Delft.