BODEMKUNDIG INSTITUUT TE GRONINGEN

BIJDRAGEN TOT DE KENNIS VAN EENIGE NATUURKUNDIGE GROOTHEDEN VAN DEN GROND

No. 7. ALGEMEENE BESCHOUWING VAN HET PROBLEEM VAN DE DETAILONTWATERING EN DE INFILTRATIE DOOR MIDDEL VAN PARALLEL LOOPENDE DRAINS, GREPPELS, SLOOTEN EN KANALEN

DOOR

Dr. S. B. HOOGHOUDT

(Ingezonden 2 December 1940)

HOOFDSTUK I

Inleiding

In een vorige publicatie (1) werd in hoofdstuk I aangegeven, dat het essentieele van de oplossingswijze, die in de genoemde publicatie voor de oplossing van het drainageprobleem werd toegepast, daarin bestaat, dat de potentiaal in het grondwater in verticale richting constant werd verondersteld, of m. a. w., dat de strooming van het grondwater werd vereenvoudigd tot een horizontale waterbeweging. Hierbij werd echter reeds opgemerkt, dat deze methode geen oplossing kan geven in die gevallen, waarin de bovenkant van de ondoorlatende laag zich te diep onder de drains (greppels, slooten, enz.) bevindt. Sedert het verschijnen van deze publicatie zijn eenige jaren van verder onderzoek verloopen, waarin wel is gebleken, dat deze laatst bedoelde gevallen veel vaker voorkomen dan eerst werd verondersteld. Daarom werd dan ook een methode uitgewerkt, die in deze publicatie nader zal worden aangegeven en waarbij ook daarmede rekening is gehouden. Bovendien zullen deze gevallen ook meestal voorkomen, wanneer het er om gaat den invloed van den waterstand in evenwijdig loopende kanalen, slooten, enz., d. w. z. dus in ontwateringssystemen op grooteren afstand dan drains of greppels, op den grondwaterstand in het tusschenliggende land na te gaan.

Aangezien de daarbij toegepaste methoden — en dit geldt behalve voor ontwatering ook voor infiltratie — analoog zijn aan die, welke voor drainagevraagstukken moeten worden toegepast, heb ik gemeend goed te doen ook vraagstukken, die daarop betrekking hebben, in deze publicatie te bespreken.

De oplossingen van de bovengenoemde problemen komen nu hierop neer, dat zij alle herleid zullen worden tot stroomingsproblemen, zij het dan ook, dat er tevens de nadruk op zal worden gelegd, welke kennis ons nog ontbreekt of althans in onvoldoende mate ter onzer beschikking staat en waarvan het m. i. ten zeerste gewenscht zou zijn deze kennis uit te breiden. De bovenbedoelde oplossing is in hoofdzaak een mathematische, hetgeen bij de beschouwing van stroomingsvraagstukken ook moeilijk anders kan worden verwacht. Deze oplossingen hebben bij de toepassing het bezwaar, dat zij in haar meest exacten vorm tijdroovend zijn, terwijl mogelijk bovendien ook niet alle belanghebbenden den noodigen tijd bezitten deze oplossingsmethoden van geval tot geval te kunnen toepassen. Deze bezwaren, die een algemeene toepassing ten zeerste in den weg staan, hebben mij er dan ook toe aangezet de bedoelde oplossingen onder gebruikmaking van tabellen zoo te vereenvoudigen, dat beide bezwaren wegvallen, zoodat in een minimum van tijd en door toepassing van zeer eenvoudige berekeningen het mogelijk is de gewenschte berekeningen te maken als bijv.: of slooten met een bepaalden natten omtrek en op een gegeven onderlingen afstand en bij bekend bodemprofiel en bekende doorlatendheid daarvan op zich zelf een voldoende ontwatering van het tusschenliggende land zullen geven, dan wel of ook nog een drainage moet worden toegepast en op welken afstand deze drainreeksen, die op een bepaalde diepte gelegd worden, dan moeten liggen, enz.

Afgezien van het boven medegedeelde leek het mij gewenscht de bovenbedoelde oplossing van deze vraagstukken eerst nog eens in het algemeen aan te geven om daarna de uitgewerkte oplossingen, en de vereenvoudiging, die daaraan gegeven kan worden, te bespreken.

In hoofdstuk II zullen dan ook de bedoelde problemen en de wijze om deze op te lossen algemeen, en dus globaal, besproken worden; voor zoover echter deze problemen drainage- of begreppelingsvraagstukken betreffen wordt tevens verwezen naar hoofdstuk VI van de in noot (1) genoemde publicatie, aangezien het niet wel mogelijk is deze bespreking hier nogmaals in te lasschen.

In hoofdstuk III zullen dan de voornaamste oplossingen in uitgebreideren vorm worden behandeld, terwijl in hoofdstuk IV zal worden uiteengezet op welke wijze deze oplossingen kunnen worden vereenvoudigd met behoud van een voldoende nauwkeurigheid. In hoofdstuk V zullen ten slotte aan diverse voorbeelden deze vereenvoudigde berekeningen worden toegelicht, waarbij tevens zal worden aangegeven over welke gegevens men moet beschikken om deze berekeningen te kunnen uitvoeren.

HOOFDSTUK II

Oplossing van drainage- en overeenkomstige problemen door deze te herleiden tot stroomingsvraagstukken

A. De probleemstelling; herleiding van drainage- en overeenkomstige problemen tot stroomingsvraagstukken

Het drainageprobleem (en op analoge wijze overeenkomstige vraagstukken) kunnen als opgelost worden beschouwd, indien het gelukt een methode aan te geven, waarmede de juiste drainafstand en diepte kan worden bepaald.

De *draindiepte* wordt in de eerste plaats bepaald door het polderpeil, aangezien het gewenscht is, dat de drainreeksen als regel boven het waterpeil in de slooten liggen (tenzij extra voorzorgen zijn genomen) in verband met het dichtslibbingsgevaar van de drainreeksen (zie ook hoofdstuk VI van de in noot (1) genoemde publicatie). Is de grond tot deze of nog tot een grootere diepte doorlatend, dan zal het dus voordeelig zijn (2) de drains zoo diep mogelijk, of dus zoo weinig mogelijk boven het polderpeil (3) te leggen. Men bedenke echter wel, dat deze draindiepte de goede legging en ligging van de drainreeksen niet in gevaar mag brengen, waarvoor het zeker noodig is, dat deze drainreeksen in droge drainsleuven worden gelegd. Komen in den grond slecht doorlatende lagen op relatief geringe diepte voor, terwijl ook de onderliggende lagen slecht doorlatend zijn, dan zal een grootere draindiepte geen effect hebben, waarvoor naar de in noot (1) genoemde literatuur, hoofdstuk VI, wordt verwezen. Ten slotte kunnen ook andere oorzaken als loopzandlagen op draindiepte het dieperleggen van de drains bemoeilijken, bijv. doordat de, daardoor extra te nemen, maatregelen om de drainreeksen voor dichtslibben te behoeden te kostbaar worden, enz.

Uit het bovenstaande volgt dan ook, dat in deze publicatie de oplossing van het drainageprobleem kan worden beperkt tot het aangeven van een methode, waardoor de juiste drainafstand bij *gegeven* draindiepte kan worden bepaald. Ook bij begreppeling geldt iets dergelijks, terwijl, indien eventueel alleen slooten een voldoende ontwatering zouden moeten geven, het peil hierin als gegeven kan worden beschouwd. Omgekeerd kan bij gegeven drain-, greppel-, sloot- of kanaalafstanden ieder andere factor worden uitgerekend, indien alle overige bekend zijn; zoo bijv. de grondwaterstand, indien alle andere factoren als de af te voeren hoeveelheid water, de opbouw en doorlatendheid van het profiel en verder benoodigde gegevens bekend zijn.

Met het bovenstaande is het probleem echter onvoldoende gesteld om het te kunnen oplossen; daarvoor moeten we het doel, waarvoor gronden gedraineerd worden, eens nader in oogenschouw nemen. Dit doel van de

drainage is nu tweeërlei, nl. het scheppen van omstandigheden, waardoor men:

1°. de benoodigde bedrijfszekerheid voor de bewerking van het land verkrijgt, en

2°. die voor de cultuurgewassen gunstig en tegelijker tijd voldoende — dus niet overdreven gunstig — zijn.

Welke van de twee genoemde oogmerken het voornaamste is, doet hier weinig ter zake. Beide hangen in elk geval samen met de waterhuishouding en dus met de ligging van het phreatisch vlak (grondwaterspiegel) onder het maaiveld, aangezien de waterhuishouding voornamelijk, hetzij rechtstreeks hetzij indirect, door de ligging van den waterspiegel wordt beheerscht en overigens deze grondwaterspiegel door een tijdigen afvoer van het overtollige water naar de drains (resp. naar de greppels, slooten, kanalen) beneden een bepaalden hoogsten stand kan worden gehouden. Is de ligging van dit phreatisch vlak immers *steeds* voldoend diep onder het maaiveld, dan zal de grond in den winter zoo weinig mogelijk aan structuurbederf door den regenval bloot staan en in het voorjaar steeds voldoend stevig of althans zoo stevig mogelijk zijn voor de benoodigde grondbewerking. Ook zal boven den grondwaterspiegel en onder het maaiveld steeds een laag grond van voldoende dikte voorkomen, waarin een goede verdeeling tusschen grondeeltjes, lucht en water optreedt, gesteld althans, dat deze grondlagen niet om andere reden een slechte structuur bezitten, terwijl onder het phreatisch vlak de poriën en verdere ruimten in den grond practisch geheel gevuld zijn met water.

Uit het bovenstaande volgt dus, dat het drainageprobleem (of feitelijk iedere ontwatering, die de bedoeling heeft den grondwaterstand door rechtstreeksche afvloeiing van overtollig water naar deze ontwateringssystemen voldoend laag te houden) nu zoo kan worden gesteld, dat een methode wordt gevraagd om den juisten drainafstand bij gegeven draindiepte aan te geven, waarbij het phreatisch vlak een maximale hoogte niet overschrijdt bij den in ons land heerschenden regenval, regenverdeeling en verdamping; afgezien dan van slechts zelden voorkomende, abnormaal hooge, neerslagen. De overtollige neerslag (= neerslag, die niet verdampt, niet door de planten wordt opgenomen, of niet door den grond wordt vastgehouden) moet derhalve zoo tijdig door de drains (greppels, enz.) naar elders worden afgevoerd, dat het phreatisch vlak niet hooger oploopt dan tot de aangegeven maximale hoogte, afgezien dan tijdens, of vlak na, ongewoon hevige en relatief zelden voorkomende neerslagen. Deze maximale hoogte wordt nu beheerscht door de eischen, die de cultuurgewassen aan de dikte van de laag grond boven het

phreatisch vlak stellen, waarin een goede verdeeling van water, lucht en grondeeltjes optreedt en verder door de eischen, die een voldoende bedrijfszekerheid aan de ligging van het phreatisch vlak stelt.

De eischen, die daaraan door de verschillende cultuurgewassen worden gesteld, zijn waarschijnlijk zeer verschillend en als gevolg daarvan zal men in verband met de vruchtopvolging op hetzelfde perceel dus een soort gemiddelden eisch moeten opstellen. Exact is hierover vrijwel niets bekend (4). Voor zoover deze onderzoekingen niet in de in noot (4) genoemde literatuur zijn genoemd, bepalen deze zich — voor zoover mij bekend — tot onderzoekingen van Prof. Blaauw te Wageningen (5) over het verband tusschen den grondwaterstand en de ligging van het capillaire oppervlak en de teelt van bloembollen in duinzanden, verder tot die van Dr. Zijlstra te Groningen (6) over het verband tusschen den grondwaterstand en het grasgewas, terwijl enkele onderzoekingen op kleine schaal in bakken, waarin bepaalde grondwaterstanden worden aangehouden, op het Rijkslandbouwproefstation te Groningen worden en ook reeds gedeeltelijk zijn genomen, waarvan de resultaten nog niet gepubliceerd zijn (7). Mogelijk zijn in dit opzicht ook eenige proefnemingen verricht in den Wieringermeerpolder, die mij echter niet bekend zijn. Mijns inziens is het dan ook ten zeerste gewenscht proefnemingen op daarvoor ingerichte proefvelden te verrichten. Overigens is het wel opmerkelijk, dat in ons land, dat altijd te kampen heeft gehad en ook nog steeds te kampen heeft met een teveel (soms trouwens ook met een tekort) aan water, over deze kwestie zoo weinig bekend is en de eerste goede, speciaal daarvoor ingerichte proefvelden nog steeds voor dergelijke proefnemingen moeten worden ingericht. Afgezien daarvan is het bovendien volstrekt niet onmogelijk, dat door dergelijke proefnemingen verbeteringen in de oogstopbrengsten zijn te verkrijgen, die veel grooter zijn dan degene, die nu nog te verkrijgen zijn door een nog fijnere differentiatie in het kunstmeststoffengebruik. Hoe het overigens ook moge zijn, ons is op enkele drainageproefvelden en verder op diverse perceelen, waar grondwaterstanden zijn bepaald, gebleken, dat niet meer over overlast van water wordt gesproken, wanneer het phreatisch vlak op bouwland (kleigrond) niet hooger oploopt dan tot 50 cm onder het maaiveld. Daarmee wil niet gezegd zijn, dat deze aan de drainage te stellen eisch mogelijk niet wat te streng is en dat hoogere grondwaterstanden gedurende een niet te langen tijd ontoelaatbaar zouden zijn. Overigens kan hierbij nog worden opgemerkt, dat deze eisch voor grasland anders zal luiden dan voor bosch in polderland (8) (althans voor de in noot (8) genoemde polders), enz. Deze eischen moeten natuurlijk bekend zijn om de hieronder besproken methoden in de practijk te kunnen toepassen, maar zijn overigens, voor deze methoden zelf, niet van belang.

Verder is ons op een proefveld nabij Amsterdam, waarbij zeker geen bovengrondsche afvoer is opgetreden, gebleken, dat slechts zelden de afvoer aan overtolligen neerslag door de drains 5 mm per 24 uur is geweest (9), zij het dan ook, dat eenmaal een afvoer van 7 mm per 24 uur is gemeten. Ook op andere proefvelden, waar de afvoer van de drains (niet continue) werd gemeten en waar geen bovengrondsche afvoer is opgetreden en dus al de overtollige neerslag door den grond naar de drains werd afgevoerd, werden geen hoogere afvoercijfers per dag waargenomen. Dit neemt niet weg, dat in zeer regenrijke perioden wel eens hoogere afvoeren dan 5 mm per 24 uur gedurende een korten tijd zullen voorkomen en dat de grondwaterstand (zie hieronder) tot een hoogere waarde dan 50 cm onder het maaiveld zal kunnen oploopen (50).

Ook al staat deze maximale afvoer door drains van overtolligen neerslag, die *door* den grond naar de drains is gevloeid (dus niet bovengronds en door de drainsleuven) geenszins volledig vast; toch hebben we gemeend den, aan drainage in bouwland te stellen, eisch op kleigrond (en dergelijke gronden, zonder kwel) zoo te moeten stellen, dat bij een continuen afvoer van 5 mm overtolligen neerslag per 24 uur de grondwaterstand niet hooger mag oploopen dan tot 50 cm onder het maaiveld. Deze eisch lijkt ons streng genoeg, aangezien het ons voorloopig en in afwachting van de resultaten van de proefnemingen op de bovengenoemde proefvelden toelaatbaar lijkt, dat de grondwaterstand gedurende een korten tijd eventueel iets hooger oploopt dan tot 50 cm onder het maaiveld, indien de afvoer van den overtolligen neerslag gedurende een korten tijd hooger mocht zijn dan 5 mm per 24 uur. Afgezien daarvan zal een continue afvoer van 5 mm aan overtolligen neerslag per 24 uur hoogstens gedurende een korten tijd voorkomen. Daarvoor en daarna zal deze afvoer per 24 uur veel kleiner zijn, met als gevolg, dat er dan veel lagere grondwaterstanden dan 50 cm onder het maaiveld voorkomen. In een volgende periode van veel neerslag zal dus een aanmerkelijk waterbergend vermogen van den grond aanwezig zijn, waardoor een aanzienlijke hoeveelheid overtollig water tijdelijk geborgen kan worden, voordat de grondwaterstand tot 50 cm onder het maaiveld is opgeloopen, waarmede gezegd wil zijn, dat zelfs, al komen hoogere overtollige neerslagen (dus geen afvoeren) dan 5 mm per 24 uur voor, de grondwaterstand daardoor nog niet tot 50 cm onder het maaiveld, laat staan tot hoogere waarden, behoeft op te loopen.

Interessant zijn in bovengenoemd opzicht de gegevens, welke mij door Ir. J. G. Maschhaupt werden medegedeeld. Uit lysimeterwaarnemingen op het terrein van het Rijkslandbouwproefstation te Groningen bleek het volgende (10):

In den „lysimeter met een grondwaterstand" werd sedert eind October

1936 op 36 dagen van in totaal 1512 dagen een afvoer waargenomen van meer dan 5 mm per 24 uur en op 22 dagen van meer dan 6 mm per 24 uur, terwijl het zelden is voorgekomen, dat op 2 opeenvolgende dagen meer dan 5 mm per 24 uur is afgevoerd. Aangezien door de intensieve drainage van deze lysimeters en de geringe afmetingen daarvan de grondwaterstand practisch constant zal zijn geweest, treedt hier dus niet de bufferende werking op de snelheid van de afgifte van overtolligen neerslag op, die in gedraineerde gronden wel optreedt en die hierboven is beschreven. Het gevolg hiervan is dan ook, dat ware dit wel het geval geweest, het aantal dagen, waarop een afvoer van meer dan 5 mm per 24 uur zou zijn geregistreerd, belangrijk zou zijn ingekrompen en mogelijk slechts tot enkele dagen beperkt zou zijn gebleven. Het resultaat van deze onderzoekingen kan dan ook in overeenstemming met onze ervaringen genoemd worden.

Overigens kan worden opgemerkt, dat de hieronder nog te bespreken methode steeds toegepast kan worden, wanneer de aan de ontwatering te stellen eischen bekend zijn. Zij kan dus bijv. even goed worden toegepast, indien men van een drainage bijv. zou eischen, dat 7 mm overtollige neerslag moet worden afgevoerd, waarbij de grondwaterstand niet hooger mag oploopen dan tot 40 cm onder het maaiveld, enz. Voor sport- en vliegvelden zal men — gezien den eisch, dat het gevallen, overtollige regenwater zeer snel moet worden afgevoerd — een hoogeren eisch aan den afvoer van overtolligen neerslag (berekend per 24 uur) stellen. Zoo zal verder bij bouwland deze afvoer grooter moeten worden gesteld, wanneer kwel optreedt, terwijl voor het boven genoemde bosch (zie noot (8)) door anderen de eisch gesteld is, dat (bij een overtolligen neerslag van 5 mm per 24 uur) de grondwaterstand niet hooger dan tot 100 cm onder het maaiveld mag oploopen, enz.

Uit het bovenstaande volgt dan ook, dat het drainageprobleem — en dus ook in het algemeen detailontwateringsproblemen, waarbij het de bedoeling is door middel van de toegepaste detailontwateringssystemen den grondwaterstand door een rechtstreekschen afvoer van water voldoende laag te houden, zoodat de overtollige neerslag door den grond tijdig naar deze ontwateringssystemen afvloeit — dus nu herleid is tot het aangeven van een methode om den juisten drainafstand bij een gegeven draindiepte aan te geven, waarbij bijv. bij bouwland (zonder kwel) bij een afvoer van 5 mm overtolligen neerslag per 24 uur de grondwaterspiegel niet hooger oploopt dan tot 50 cm onder het maaiveld of in het algemeen dus, dat bij een bepaalden afvoer de grondwaterstand niet hooger dan tot een bepaalden stand oploopt.

Hiermede is het probleem echter nog steeds niet voldoend scherp gesteld. Daarvoor is noodig ons te herinneren, dat, indien drains water afvoeren,

het phreatisch vlak tusschen de drains een bollen vorm heeft (11), d. w. z. de hoogste grondwaterstand juist in het midden tusschen twee drainreeksen optreedt (12). Verder kan er al of niet grondwater boven de drains voorkomen. Door bepaalde voorzorgsmaatregelen (13) kan er echter voor gezorgd worden, dat geen, of althans slechts weinig, grondwater boven de drains voorkomt, terwijl, indien dit in verloop van tijd toch nog het geval mocht zijn, door schoonmaken van de drains in de meeste gevallen kan worden gezorgd, dat dit euvel wordt opgeheven (14). Hieruit volgt dan ook, dat er bij het aangeven van den juisten drainafstand op gerekend kan worden, dat geen water boven de drains voorkomt (in bijzondere gevallen kan men daarvoor desgewenscht een bepaalde waarde aannemen, terwijl bij slooten, enz. de waterstand daarin bekend moet zijn), zoodat tenslotte het drainageprobleem zoo kan worden geformuleerd, dat een methode wordt verlangd, waardoor de juiste drainafstand wordt aangegeven bij een gegeven draindiepte, waarbij bij een bepaalden afvoer van overtolligen neerslag per 24 uur het phreatisch vlak midden tusschen de drains niet hooger oploopt dan tot een bepaalden stand onder het maaiveld en waarbij zich boven de drains geen grondwater, of althans hoogstens een laag grondwater van bekende dikte, bevindt. Algemeen gesproken kan men dus zeggen, dat een methode wordt verlangd, waardoor de juiste afstand van de ontwateringssystemen bij gegeven diepte (en afmetingen; zie hieronder) wordt gevraagd, waarbij bij een bepaalden afvoer van overtolligen neerslag per 24 uur het phreatisch vlak midden tusschen deze ontwateringssystemen niet hooger dan tot een bepaalde waarde oploopt en waarbij een bepaalde grondwaterlaag daarboven (deze kan ook nul zijn) resp. boven den bodem daarvan voorkomt. Hierbij kan worden opgemerkt, dat, zooals nader zal blijken, de natte omtrek van greppels, slooten, kanalen, enz. van belang is evenals trouwens de doorsnede van de drainbuizen of — bij een goed doorlatende drainsleuf — zelfs mogelijk van de afmetingen van de drainsleuven op de draindiepte.

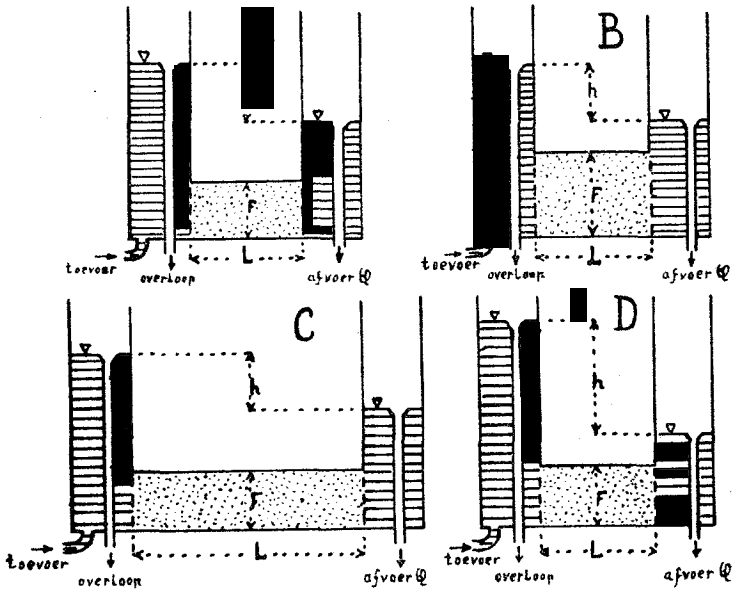
Door het bovenstaande is het drainageprobleem — of dus algemeen het detailontwateringsprobleem, waarbij het de bedoeling is door den aanleg van de ontwateringssystemen den grondwaterstand door een rechtstreekschen afvoer van overtollig water naar deze ontwateringssystemen voldoende diep te houden — dus herleid tot zoogenaamde „stroomingsproblemen".

B. Globale oplossing van het drainage- en dus tevens in het algemeen van het detailontwateringsprobleem

§ 1. De wet van Dupuit-Darcy

Uit het voorgaande zal gebleken zijn, dat de bedoelde stroomingsvraagstukken nooit zullen zijn op te lossen, indien niet de wet bekend zou zijn,

die de kwantitatieve strooming van water in den grond beheerscht. Deze wet is omstreeks het midden van de vorige eeuw door een tweetal onderzoekers, nl. Dupuit en Darcy, gevonden en wordt sedert dan ook de wet van Dupuit-Darcy of ook wel alleen de wet van Darcy genoemd (15). Ofschoon ik deze wet in een vorige publicatie (zie de in noot (15) genoemde publicatie) uitvoerig heb besproken, lijkt het mij toch gewenscht deze wet hieronder nog eens aan de hand van een schematische teekening van een apparaat, waarmede men deze wet zou kunnen controleeren, duidelijk te maken, aangezien deze wet niet alleen de basis is, waarop de geheele theorie van de waterstrooming in den grond steunt, maar bovendien aan de hand daarvan duidelijk gemaakt kan worden, dat bij een niet-rechtlijnig veranderenden druk of beter potentiaal in het grondwater in plaats van het verhang (zie verder hieronder) een differentiaalcoëfficient komt.



Figuur 1

Geschematiseerd apparaat ter verduidelijking van de wet van Dupuit-Darcy

In figuur 1 zijn nu 4 geschematiseerde toestelletjes aangegeven, waarmede men desgewenscht deze wet zou kunnen controleeren. De 4 figuurtjes hierin

stellen de doorsneden van bijv. ronde U-vormige buisjes voor. In het horizontale gedeelte bevindt zich telkens tusschen twee geperforeerde plaatjes bijv. een zandgrond in steeds dezelfde ligging, terwijl zich in de verticale beenen water van steeds dezelfde temperatuur bevindt, dat door een overloop op steeds dezelfde hoogte is te houden. In de 4 achtereenvolgende gevallen A, B, C en D is nu telkens één factor afwijkend van geval A, terwijl alle andere omstandigheden steeds dezelfde zijn. Nu zal het water bij zijn strooming door den grond weerstand ondervinden, die overwonnen moet worden door den overdruk van het water h aan weerszijden van de kolom grond. Wanneer dus, als in geval B ten opzichte van geval A, de overdruk h en de lengte van de kolom l dezelfde zijn, maar de doorsnede van de kolom grond in geval B grooter is dan in geval A, dan is de weerstand, die het water ondervindt in geval B kleiner dan in geval A, of m. a. w. zal per eenheid van tijd door de kolom grond in geval B een hoeveelheid water Q vloeien, die grooter is dan in geval A. Door proefnemingen is nu komen vast te staan, dat deze hoeveelheid Q, die per eenheid van tijd door een kolom grond stroomt, recht evenredig is met de doorsnede F van de kolom grond.

In geval C is in vergelijking met geval A alleen de lengte van de kolom grond grooter, terwijl de overdruk h en de doorsnede van de kolom grond F dezelfde zijn. De weerstand, die het water bij zijn strooming door den grond in geval C ondervindt, is grooter dan in geval A, aangezien een grootere lengte doorstroomd moet worden of m. a. w. zal per eenheid van tijd de hoeveelheid water Q, die door de kolom grond in geval C stroomt, kleiner zijn dan in geval A en wel is door proefnemingen gebleken, dat de hoeveelheid water, die per tijdseenheid door een kolom grond onder overigens gelijke omstandigheden stroomt, omgekeerd evenredig is met deze lengte.

Tenslotte is in geval D in vergelijking met geval A de drukhoogte h grooter, terwijl de lengte van de kolom l en de doorsnede F daarvan dezelfde zijn. Daar de aandrijvende kracht (overdruk) in geval D dus grooter is dan in geval A, zal in geval D per eenheid van tijd meer water door den grond stroomen dan in geval A en wel is door proefnemingen gebleken, dat de hoeveelheid water, die per tijdseenheid door een kolom grond onder overigens gelijke omstandigheden stroomt, recht evenredig is met dezen overdruk h.

Stellen we nu al deze factoren onder invoering van een evenredigheidsconstante in een vergelijking (wet van DUPUIT-DARCY) samen, dan luidt deze:

$$Q = k \cdot F \cdot \frac{h}{l},$$

waarin Q dus de hoeveelheid water voorstelt, die per tijdseenheid door een kolom grond van de lengte l en de doorsnede F stroomt, wanneer de overdruk

in het water aan weerszijden van deze kolom grond gelijk is aan de lengte van een kolom water h. Deze wet geldt alleen voor een z. g. lamillaire strooming; voor gronden in de natuurlijke ligging is dit steeds het geval. In deze vergelijking is k, die men den *doorlaatfactor* noemt, een constante, zoolang tenminste de ligging van den grond en temperatuur van het water in den grond dezelfde blijven. Nu geeft het omgekeerde van de viscositeit van het water, welke viscositeit met een toenemende temperatuur afneemt, de vloeibaarheid van het water aan. Aangezien de weerstand, die het water bij zijn strooming door den grond ondervindt, afneemt, naarmate de vloeibaarheid van het water toeneemt of de viscositeit dus afneemt, zal het duidelijk zijn, dat deze doorlaatfactor k van den grond bij dezelfde ligging van den grond toeneemt, naarmate de temperatuur van het grondwater hooger is. Door schrijver is nu in een vorig artikel (16) voorgesteld den doorlaatfactor van den grond op een temperatuur van het grondwater van 10° C (zandgronden in het laboratorium) om te rekenen (voor drainage bedraagt deze temperatuur 5° C, aangezien in den winter op deze temperatuur van het grondwater gerekend moet worden). Rekent men bijv. een doorlaatfactor k_t, bepaald bij een temperatuur t van het grondwater, om op een doorlaatfactor, die gemeten zou zijn bij een temperatuur van het water van 5° C, dan luidt de formule daarvoor:

$$k_5 = k_t \cdot \frac{\eta_t}{\eta_5},$$

waarin η_t en η_5 resp. de viscositeiten van het grondwater (practisch gelijk aan die van gedestilleerd water) bij een temperatuur van t° resp. van 5° C voorstellen.

Wat de ligging van den grond betreft, kan worden opgemerkt, dat de doorlaatfactor ook daarvan afhangt. Voor zoover de grond in de natuurlijke ligging (dus op het veld) een structuur[1]) heeft (practisch gesproken alle gronden met meer dan 5 à 6 tot soms ± 10 % klei) is de doorlaatfactor alleen bij deze ligging van belang, zoodat de doorlaatfactor voor deze gronden in hun natuurlijke ligging een karakteristieke grootheid vormt en natuurlijk ook in de natuurlijke ligging bepaald moet worden; een methode daartoe werd in een vorige publicatie (17) aangegeven.

[1]) In deze publicatie wordt onder een structuurloozen grond een niet-verkitte grond verstaan, waarvan de korrels enkelvoudig zijn en waarin de, tusschen deze korrels voorkomende, ruimten een doorsnede van dezelfde grootte-orde hebben, als de doorsneden van de afzonderlijke korrels zijn. Zandgronden met een gering klei- en humusgehalte, onder den grondwaterspiegel en zelfs onder het capillaire oppervlak gelegen, zijn — afgezien van de bouwvoor — gewoonlijk structuurloos of zijn voor de strooming van water door den grond als zoodanig op te vatten.

Ook voor zandgronden vormt de doorlaatfactor natuurlijk een karakteristieke grootheid. Deze doorlaatfactor kan men echter in het laboratorium bepalen, aangezien dergelijke gronden (althans onder den grondwaterspiegel en voor zooverre zij niet verkit zijn) in de natuurlijke ligging geen structuur bezitten en deze doorlaatfactor, behalve door de temperatuur van het grondwater, op een bepaalde wijze van het poriënvolume van den grond en het aanwezige luchtgehalte blijkt af te hangen (18) en de natuurlijke ligging op voldoend nauwkeurige wijze door het poriënvolume wordt aangegeven. Indien dus het poriënvolume en het luchtgehalte in de natuurlijke omstandigheden bekend zijn, evenals deze gegevens tijdens de bepaling in het laboratorium, kan dus gemakkelijk een omrekening plaats vinden. De daarvoor benoodigde formule (vergelijk de in noot (18) genoemde literatuur) is de volgende:

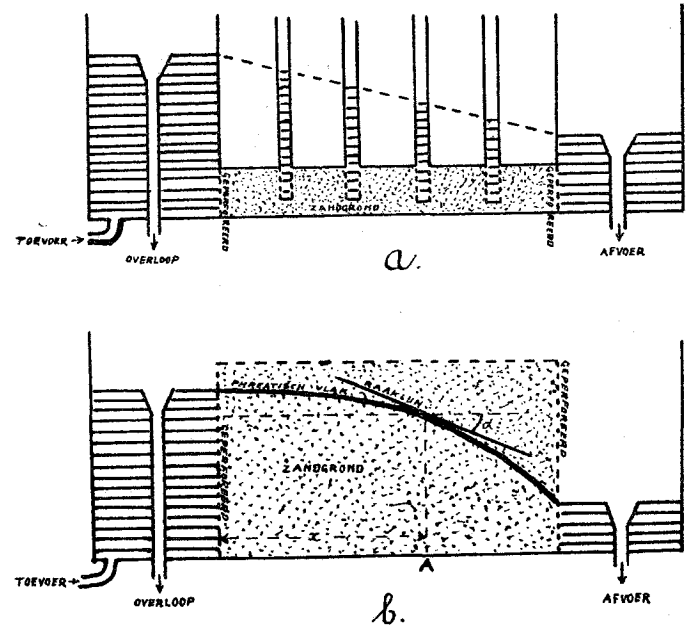
$$k = k' \cdot \frac{\eta'}{\eta} \frac{(1-p')^2}{(1-p)^2} \cdot \frac{p_o^3}{(p_o')^3},$$

waain k de doorlaatfactor van den grond in de natuurlijke ligging bij een poriënvolume p en een luchtvrij poriënvolume p_o en een viscositeit η van het grondwater bij een temperatuur t voorstelt en k', η', p' en p_o' deze grootheden tijdens de bepaling in het laboratorium voorstellen. Hierbij kan $p' = p_o'$ worden genomen, aangezien in het apparaat, waarmede in het laboratorium de doorlaatfactor wordt bepaald, de lucht zorgvuldig uit den grond wordt verdreven (19). Om dezen doorlaatfactor ook voor zandgronden op zich zelf beschouwd een karakteristieke grootheid te laten zijn, is door schrijver (20) voorgesteld de in het laboratorium bepaalde doorlaatfactoren om te rekenen op een luchtvrij poriënvolume van 35 volumeprocenten (0,35 volume-gedeelte) en een temperatuur van het grondwater van 10° C.

Blijven we echter bij gronden in de natuurlijke ligging, dan geldt dus, dat bij eenzelfde temperatuur van het grondwater $Q = k \cdot F \cdot \frac{h}{l}$. Nu noemt men de breuk $\frac{h}{l}$ het verhang en stelt deze gewoonlijk voor door de letter I, zoodat: $Q = k \cdot F \cdot I$. Den overdruk h geeft men nu aan door de lengte van een kolom water, zooals ook in figuur 1 is geschied en waardoor het verhang I dus in practisch opzicht een zuiver getal wordt (21). Deelt men nu Q door de doorsnede F, dan is dus: $\frac{Q}{F} = V = k \cdot I$, waarin V (22) dus blijkbaar de dikte van de *laag* water voorstelt, die door de doorsnede loodrecht de stroomrichting in de eenheid van tijd stroomt. De doorlaatfactor is dus blijkbaar de dikte van deze laag water, indien het verval I = 1;

de doorlaatfactor k geeft dus de dikte van de laag water aan, die per tijdseenheid door een doorsnede loodrecht de stroomrichting in de eenheid van tijd bij een verhang I stroomt. Deze doorlaatfactor wordt gewoonlijk in meters per 24 uur uitgedrukt (soms echter ook in cm per sec., waarbij 1 m per 24 uur = 1 : 864 cm per sec.) en wisselt voor gronden in de natuurlijke ligging van minder dan 0,001 tot meer dan 30 m per 24 uur, ook al komen deze uitersten — althans voor grootere oppervlakten — niet vaak voor.

Nu zal in de gevallen, die in figuur 1 zijn weergegeven, het verhang in het grondwater van het eene uiteinde naar het andere uiteinde van de kolom grond (de grond wordt homogeen doorlatend verondersteld) rechtlijnig veranderen, zooals in figuur 2*a* is aangegeven. Dit wil zeggen, dat, brengt men dunne, verticale buisjes, met een geperforeerd gedeelte in de kolom grond, op verschillende afstanden in deze kolom grond aan (zie figuur 2*a*), het water in deze buisjes juist tot de stippellijn zal stijgen. In deze gevallen is dus het verhang overal constant. Gewoonlijk treedt dit echter niet op; in figuur 2*b*



Figuur 2
Geschematiseerde apparaten, waarin een constant (fig. *a*) en een continue veranderend verhang (fig. *b*) zal optreden

is een eenvoudig geval geteekend, waarbij dit niet het geval is. Hier geeft de verandering in den vorm van het phreatisch vlak — practisch gesproken — tevens de verandering van het verval van verticale doorsnede tot verticale doorsnede aan. Is de onderkant van de kolom grond (homogeen doorlatend) in geval 2*b* horizontaal, dan zal het duidelijk zijn, dat in iedere verticale doorsnede (bijv. vlak A) het verval aangegeven kan worden door de tangens van den hoek *a*, die de raaklijn aan het phreatisch vlak in het punt, waar deze verticale doorsnede het phreatisch vlak snijdt, maakt met het horizontale grondvlak, of dus (zie figuur 2*b*) voorgesteld kan worden door $\frac{dy}{dx}$, zoodat voor deze verticale doorsnede geldt, dat $Q = k \,.\, y \,.\, \frac{dy}{dx}$ of $V = k \,.\, \frac{dy}{dx}$, waarin $\frac{dy}{dx}$ dus het verhang voorstelt. De doorsnede van de kolom grond (per strekkenden meter lengte) is *y*, terwijl de andere letters de reeds eerder genoemde beteekenis hebben.

§ 2. Uiteenzetting van het begrip potentiaal

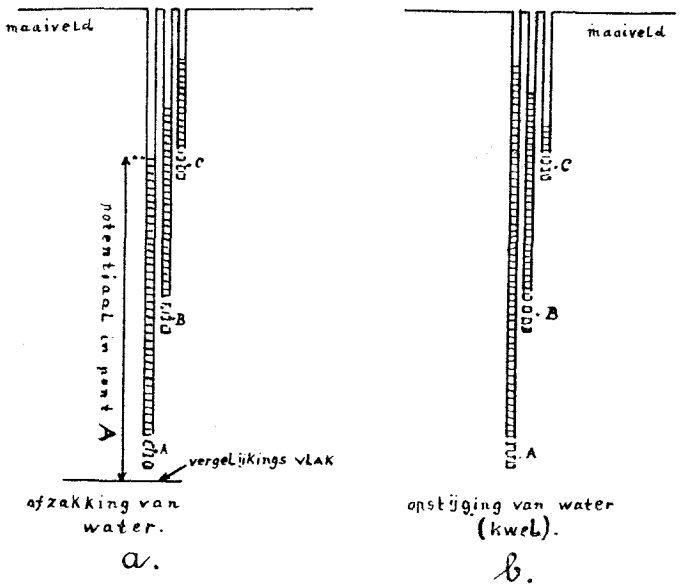
De bovenbehandelde wet van Dupuit-Darcy voor stroomend water in den grond is volkomen analoog aan de wet van Ohm voor — laten we zeggen — stroomende electriciteit (gelijkstroom) in een geleider. De wet van Ohm luidt immers: $i = \frac{e}{w}$, waarin *i* de stroomsterkte (hoeveelheid electriciteit, die per tijdseenheid door een doorsnede loodrecht de lengterichting van een geleider stroomt) is, welke factor dus overeenkomt met den factor Q in de wet van Dupuit-Darcy. Verder is *e* het potentiaalverschil aan de uiteinden van den geleider (komt overeen met het drukverschil *h* in het water aan weerszijden van de kolom grond) terwijl *w* de weerstand van den geleider is. Nu is deze weerstand $w = \frac{l}{k.F}$, waarin *l* de lengte en F de doorsnede van den geleider en *k* het specifiek geleidingsvermogen daarvan voorstelt. Ingevuld luidt de wet van Ohm dus: $i = k \,.\, F \,.\, \frac{e}{l}$. In dezen vorm is deze wet dus volkomen analoog aan de wet van Dupuit-Darcy voor stroomend water in den grond, nl. $Q = k \,.\, F \,.\, \frac{h}{l}$. In verband met deze overeenkomst zal het wellicht begrijpelijk zijn, waarom in de theorie van de waterstrooming in den grond de naam *potentiaal* en *potentiaalverschil* ingevoerd is.

Onder potentiaal in een punt van een stroomingsveld (doorlatende laag of complex van doorlatende lagen, waarin het water stroomt) verstaat men nu de som van de hoogte van het betreffende punt ten opzichte van een horizontaal-vergelijkingsvlak en de in dat punt bestaande drukhoogte, gemeten als de lengte van een waterkolom (23). Onder potentiaalverschil verstaat men het verschil in potentiaal tusschen twee punten in het stroomingsveld, die op dezelfde stroombaan liggen of beter tusschen 2 aequipotentiaalvlakken, die door dezelfde stroombanen gesneden worden (51). Voor zoover potentiaalverschil niet liniair verandert van het eene punt naar het andere dit wordt het potentiaalverhang in een bepaald punt aangegeven door $\frac{dP}{dl}$, waarin *d*P de oneindig kleine verandering van de potentiaal P over een oneindig kleinen afstand *dl* in de stroomrichting voorstelt (24). Vaak ontbindt men dit potentiaalverschil in 3 (driedimensionale strooming) of 2 (tweedimensionale strooming) onderling loodrechte richtingen, of dus in het laatste geval in $\frac{\delta P}{\delta x}$ en $\frac{\delta P}{\delta y}$ (partieele differentiaal-coëfficiënten naar *x* en *y*).

Om nu een juisten indruk te geven, wat men eigenlijk onder potentiaal in een bepaald punt verstaat, heb ik gemeend aan het bovenstaande in het kort te moeten toevoegen, op welke wijze men deze potentiaal in een bepaald punt bepaalt. Daartoe brengt men een nauwe buis (doorsnede 2 à 3 cm) in den grond, die bij het betreffende punt over een kleine lengte geperforeerd is (een punt is hier een mathematische fictie). Het grondwater zal onder invloed van den heerschenden druk in het grondwater in dat punt in de buis opstijgen tot een hoogte, dat het gewicht van de kolom water boven het geperforeerde gedeelte gelijk is aan den druk in het grondwater ter plaatse van dit geperforeerd gedeelte. De lengte van deze kolom water vermeerderd met de hoogte van dat punt ten opzichte van een willekeurig horizontaal vergelijkingsvlak (bijv. ten opzichte van N. A. P.) is de potentiaal van dat punt (zie figuur 3*a*, waarin de potentiaal in punt A ten opzichte van een willekeurig vergelijkingsvlak is aangegeven).

Op deze wijze kan men op diverse punten in het beschouwde stroomingsveld de potentiaal bepalen. Zakt bijv. het water verticaal naar beneden ten gevolge van een onttrekking van water uit dieper gelegen lagen (zooals soms voorkomt bij het onttrekken van water aan putten door de drinkwaterleiding), komt geen ondoorlatende laag vanaf het maaiveld voor tot minstens de diepte, waarop het water wordt onttrokken (tot minstens deze diepte vormt de grond dus een samenhangend stroomingsveld) en brengt men hierin een verticalen bundel, van elkaar geïsoleerde, buizen, die op een steeds toenemende diepte een geperforeerd gedeelte hebben, dan zal blijken, dat de

potentiaal naar de diepte afneemt (zie figuur 3*a*). Dit laatste moet immers het geval zijn, daar het water alleen onder den invloed van een potentiaalverschil stroomt en dit potentiaalverschil verticaal naar beneden gericht moet zijn, of althans een component in verticale richting naar beneden moet hebben, om het mogelijk te maken, dat het water naar de diepte kan afzakken.



Figuur 3

Geschematiseerde aanduiding van de wijze, waarop men de verandering van de potentiaal in verticale richting kan aantoonen, resp. kan meten

Zoo treedt bij kwel om soortgelijke redenen een opwaarts gerichte strooming op en neemt de potentiaal bij een overigens gelijken profielopbouw, als boven is genoemd, in een verticale richting omlaag toe; er treedt dus een potentiaalverval in verticale richting naar boven (of althans een verticaal omhoog gerichte component) op, waardoor het water zich in opwaartsche richting kan bewegen (zie figuur 3*b*). Voor de bepaling van de ligging van het phreatisch vlak zou men dus feitelijk moeten volstaan met het in den grond brengen van een buis, die ter hoogte van dit phreatisch vlak over een klein gedeelte geperforeerd is. Dit phreatisch vlak kan echter in verloop van tijd soms meer

of minder in hoogteligging verschillen, waarom het noodzakelijk is deze buis — afgezien van de eerste 30 à 50 cm onder het maaiveld — over de geheele lengte te perforeeren (25).

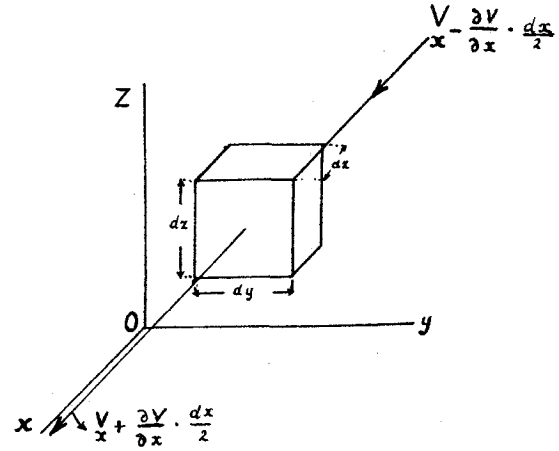
§ 3. Afleiding van een algemeene vergelijking die voor iedere strooming in den grond geldt

Beschouwen we nu een bepaald punt in een stroomingsveld, dan zal het grondwater zich met een bepaalde snelheid en in een bepaalde richting bewegen onder invloed van het potentiaalverhang in een bepaalde richting. Deze snelheid in een punt x, y, z, evenals het potentiaalverhang, kunnen we bij een driedimensionale strooming in 3 onderling loodrechte richtingen x, y en z ontbinden, nl. in resp. Vx, Vy en Vz en $\frac{\delta p}{\delta x}$, $\frac{\delta p}{\delta y}$ en $\frac{\delta p}{\delta z}$. Volgens de wet van Dupuit-Darcy is nu:

$$V_x = k\,\frac{\delta p}{\delta x};\ V_y = k\,\frac{\delta p}{\delta y} \text{ en } V_z = k\,\frac{\delta p}{\delta z}.$$

Beschouwen we nu eens een afgesloten gebied (bijv. de kubus in figuur 4; het middelpunt daarvan heeft de coordinalen x, y en z) binnen een stroomingsveld.

In een zijvlak van den kubus met de ribben dx, dy en dz loodrecht de



Figuur 4

Kubus in een stroomingsveld, waarin de ribben evenwijdig aan resp. de x-, de y- en de z-as loopen en het middelpunt de coordinaten x, y en z heeft

x-as en op den afstand $x - \frac{dx}{2}$ van den oorsprong komt het water den kubus binnen met de stroomsnelheid (26):

$$V_x - \frac{\delta V_x}{\delta x} \cdot \frac{dx}{2} = k \left(\frac{\delta p}{\delta x} - \frac{\delta^2 p}{\delta x^2} \cdot \frac{dx}{2} \right), \tag{1}$$

terwijl het water het tegenoverliggende zijvlak van den kubus weer verlaat met de stroomsnelheid:

$$V_x + \frac{\delta V_x}{\delta x} \cdot \frac{dx}{2} = k \left(\frac{\delta p}{\delta x} + \frac{\delta^2 p}{dx^2} \cdot \frac{dx}{2} \right), \tag{2}$$

Beide zijvlakken hebben een oppervlak ter grootte van $dydz$, zoodat per oppervlakte-eenheid het overschot (positief of negatief) van deze in- en uitstrooming dus kan worden aangegeven door (1 van 2 aftrekken en met $dydz$ vermenigvuldigen):

$$\frac{\delta V_x}{\delta x} dxdydz = k \frac{\delta^2 p}{\delta x^2} dxdydz. \tag{3}$$

Het overschot van de in- en uitstrooming van de zijvlakken loodrecht de y- en de z-as is op analoge wijze af te leiden en wordt dus per tijdseenheid weergegeven door:

$$k \frac{\delta^2 p}{\delta y^2} dxdydz \text{ resp. } k \frac{\delta^2 p}{\delta z^2} dxdydz. \tag{4}$$

Uit het feit, dat per tijdseenheid evenveel water *in* het beschouwde kubusje moet stroomen als *er uit* moet stroomen (er treedt geen samenpersing noch een luchtledig op), volgt, dat het overschot van de in- en uitstrooming van water van alle zijden van het beschouwde kubusje nul moet zijn, of dus dat:

$$k \left(\frac{\delta^2 p}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 p}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 p}{\delta z^2} \right) dxdydz = 0 \tag{5}$$

of dus, dat (k noch dx, dy of dz zijn nul):

$$\frac{\delta^2 p}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 p}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 p}{\delta z^2} = 0, \tag{6}$$

welke vergelijking de bekende vergelijking van La Place is en dus ook voor alle stroomingsvraagstukken geldt.

§ 4. Nadere beschouwing van de randvoorwaarden. De begrenzing van een stroomingsveld; behandeling van een rechtlijnige, radiale, tweedimensionale stroming

De vergelijking van La Place geldt voor ieder stroomingsveld, zoodat een bijzondere oplossing van deze vergelijking, die voor een bepaald stroomingsveld geldig moet zijn, aan bepaalde voorwaarden moet voldoen. Aangezien ieder stroomingsveld nu door grensvlakken, of althans door het karakter van de stroomingsafname (tot nul) zelf, wordt begrensd, moet deze bijzondere oplossing van de vergelijking van La Place voldoen aan voorwaarden door de begrenzing van het stroomingsveld gesteld. Men zegt gewoonlijk, dat deze bijzondere oplossing moet voldoen aan de z.g. „randvoorwaarden".

Bij drainage — althans in klei-, zavel, leem- en dergelijke gronden (27) — is het stroomingsveld van boven afgesloten door het phreatisch vlak (28). Zooals reeds is opgemerkt, heeft dit vlak geen constante ligging; het stijgt in regenrijke tijden en daalt in droge perioden, terwijl dit vlak bovendien noch de meetkundige plaats is van punten met alle dezelfde potentiaal (= aequipotentiaalvlak) noch een vlak is, waar de stroomingbanen, bij wijze van uitdrukking, langs glijden, of dus een stroomvlak is. Het is slechts de meetkundige plaats van punten, waar de hydrostatische druk gelijk is aan den atmosferischen druk. Het gevolg hiervan is, dat met de vergelijking van La Place om deze reden dan ook voor de bedoelde vraagstukken niet veel te beginnen is. Desondanks zijn we echter wel in staat benaderende oplossingen, geldend voor de genoemde en analoge vraagstukken, aan te geven. Om deze te kunnen volgen, dienen we echter eerst eens nader in te gaan op deze begrenzingsvlakken en op de wijze, waarop het overtollige regenwater **door den grond** naar de drains (greppels, slooten, kanalen, enz.) afvloeit, aangezien daardoor tevens nog een andere mogelijke begrenzing van de strooming van het water duidelijk zal worden. Met andere woorden zullen we de mogelijke randvoorwaarden van een stroomingsveld dienen na te gaan. Daarvoor zullen we eerst een eenvoudig geval van strooming van water door den grond behandelen.

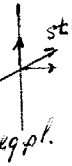
Stel eens, dat zich in een homogeen doorlatenden grond, die zich naar alle zijden onbegrensd uitstrekt, een verticaal geplaatste, cylindervormige, geperforeerde buis bevindt, die zich eveneens naar beide zijden onbeperkt uitstrekt. Uit deze buis wordt water gepompt. In iedere doorsnede loodrecht deze buis vloeit het water steeds op dezelfde wijze naar de buis. Een dergelijke strooming, waarbij de aard van de strooming van het water in een plat vlak is weer te geven, noemt men een tweedimensionale strooming.

Doordat nu water aan den grond rondom de pompbuis wordt onttrokken, ontstaat een potentiaalverlaging in het grondwater rondom de buis. Deze potentiaalverlaging is op den omtrek van de buis het grootste en neemt met een toenemenden afstand van de buis af, waardoor een potentiaalverhang in het grondwater naar de pompbuis toe ontstaat, onder invloed waarvan het grondwater naar de pompbuis kan toestroomen. Aangezien de grond homogeen doorlatend is, zal rondom de buis en op denzelfden afstand daarvan

de potentiaalverlaging en dus ook de potentiaal zelf gelijk zijn. Cylindermantels concentrisch om de pompbuis vormen dus vlakken met overal dezelfde potentiaal. Dergelijke vlakken noemt men aequipotentiaalvlakken. In figuur 5, die dus een doorsnede loodrecht de pompbuis voorstelt, vormen dus cirkels concentrisch om het middelpunt van de pompbuis de aequipotentiaallijnen. In ieder aequipotentiaalvlak (-lijn) treedt geen strooming op, aangezien hier geen potentiaalverhang aanwezig is.

Verder zal het water straalgewijze naar de pompbuis stroomen. De vlakken, waarin het water stroomt — z.g. stroomvlakken — worden dus gevormd door platte vlakken met de as van de pompbuis als gemeenschappelijke snijlijn. In figuur 5 vormen dus de, straalsgewijs naar het middelpunt van de pompbuis loopende, rechte lijnen de stroomlijnen. Een dergelijke strooming noemt men „radiaal rechtlijnig".

Verder blijkt uit figuur 5, dat de stroomlijnen de aequipotentiaallijnen loodrecht snijden, en dus ook de stroomvlakken de aequipotentiaalvlakken loodrecht snijden, hetgeen steeds het geval is. Ware dit immers niet het geval, dan zou een component van de stroomingsrichting langs de aequipotentiaallijn of het aequipotentiaalvlak moeten optreden, hetgeen een potentiaalverhang in die richting eveneens noodzakelijk maakt, hetgeen echter onmogelijk is, daar op een aequipotentiaallijn of -vlak geen potentiaalverhang bestaat.

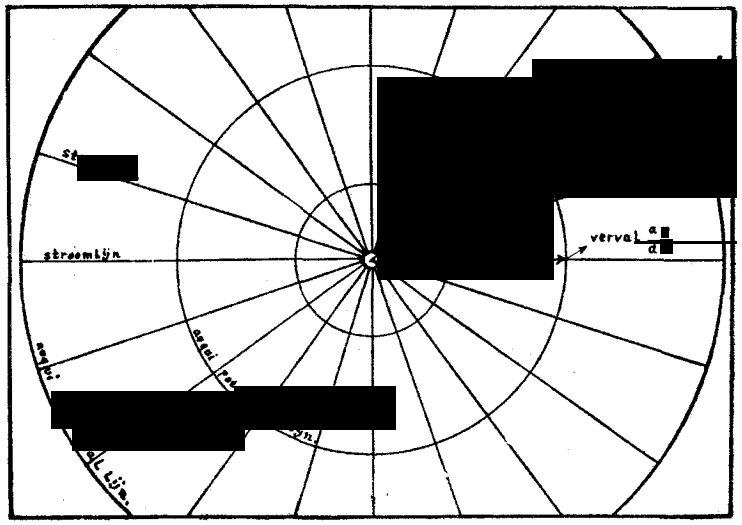


Bepalen we ons nu tot een tweedimensionale strooming — ook de drainage behoort daar practisch gesproken toe (29) — waarvan de stroomingsaard dus in een plat vlak is weer te geven, dan is men gewend alleen die stroombanen aan te geven, waartusschen een tiende deel van het totale debiet, van de helft of mogelijk van een kwart van het totale debiet stroomt. In figuur 5 is daarvoor een tiende deel van de helft van het totale debiet gekozen. Het is duidelijk, dat het voor de constructie van deze lijnen in het besproken geval voldoende is een willekeurige aequipotentiaalcirkel in 20 gelijke deelen te verdeelen en de rechte lijnen te trekken, die deze punten met het centrum van de pompbuis verbinden; zie figuur 5.

Bij de hier behandelde rechtlijnige radiale strooming valt verder op, dat door alle concentrische cirkels — dus door alle aequipotentiaallijnen — evenveel water stroomt. Aangezien de lengte van deze cirkels des te grooter is, naarmate de straal daarvan grooter is, zal de hoeveelheid water, die per tijdseenheid door een strekkenden meter daarvan stroomt, afnemen, naarmate de straal daarvan grooter is. Ofschoon dus het stroomingsveld onbeperkt groot is, wordt de strooming rondom de buis toch door het feit begrensd, of, zoo men wil, aangegeven, dat de intensiteit van de strooming (= de hoeveelheid water, die door een vlak van de eenheid van oppervlakte loodrecht de stroom-

richting in de eenheid van tijd stroomt) afneemt, naarmate de afstand tot het centrum van de pompbuis grooter is en wel in dit geval omgekeerd evenredig met dezen afstand. Verder is de pompbuis zelf een aequipotentiaalvlak, waardoor dus voor dit geval alle randvoorwaarden zijn aangegeven. De behandelde strooming is dus niet alleen radiaal rechtlijnig, maar heeft bovendien nog als kenmerkende eigenschap, dat door alle aequipotentiaallijnen (-vlakken) evenveel water stroomt, nl. de hoeveelheid water Q, die per tijdseenheid uit de buis wordt gepompt.

Wil men deze strooming berekenen, en deze berekening zullen we hier uitvoeren, omdat we deze later noodig hebben, dan kan men al naar gelang het doel, waarvoor men de berekeningen opzet, den vorm van de stroombanen of de potentiaal berekenen. In het eerste geval spreekt men van het opstellen van de stroomfuncties en in het tweede geval van de potentiaalfuncties. Deze functies hebben daarbij *steeds* deze eigenaardigheid, dat de schaar van lijnen (vlakken), die door de stroomfuncties worden aangegeven, steeds loodrecht de schaar van lijnen (vlakken), die door de potentiaalfuncties worden aan-



Figuur 5

Stroombanen en aequipotentiaallijnen in het geval door middel van een cylindervormige pompbuis van oneindige lengte water aan een stroomingsveld onttrokken wordt, dat zich naar alle zijden onbeperkt uitstrekt en homogeen doorlatend is

gegeven, moet snijden, aangezien immers de stroomlijnen (-vlakken) de aequipotentiaallijnen (-vlakken) loodrecht moeten snijden.

De potentiaallijnen (-vlakken) kunnen elkaar niet snijden; ditzelfde geldt ook voor stroomlijnen (-vlakken). Zouden immers twee potentiaallijnen elkaar snijden, dan zou in het snijpunt — dus in een punt in het stroomingsveld — te gelijker tijd twee verschillende potentialen moeten optreden, hetgeen niet mogelijk is. Zouden verder twee stroombanen elkaar snijden, dan zou in het snijpunt — dus in een punt van het stroomingsveld — ook twee potentiaallijnen elkaar moeten snijden, aangezien loodrecht op iedere snijlijn een aequipotentiaallijn staat. Dit laatste is, zooals reeds eerder werd aangetoond, onmogelijk, zoodat ook twee stroombanen elkaar niet kunnen snijden. Hetzelfde geldt natuurlijk ook voor aequipotentiaal- resp. stroomvlakken. Beschouwen we nu een bepaalden aequipotentiaalcirkel met straal r (zie figuur 5), dan stroomt door dezen cirkel (feitelijk dus per strekkenden meter pompbuis) per tijdseenheid evenveel water (Q) als door den wand van de pompbuis. Het verval in het grondwater in de richting naar het centrum van de pompbuis is overal op den beschouwden aequipotentiaalcirkel dezelfde, nl. $\frac{dp}{dr}$, waarin p de potentiaal voorstelt. Door een strekkenden meter van dezen aequipotentiaalcirkel, per strekkenden meter pompbuis en per eenheid van tijd stroomt dus:

$$q = k \cdot \mathrm{I} \cdot 1 = k \cdot \frac{dp}{dr} \tag{7}$$

en dus door den geheelen cirkel:

$$\mathrm{Q} = 2\pi r k \cdot \frac{dp}{dr} \tag{8}$$

De algemeene oplossing (de potentiaal zelf is immers onbepaald; alleen een potentiaalverschil tusschen twee punten is bepaald) daarvan is:

$$\mathrm{Q}\, ln\, r = 2\pi k p \text{ of } p = \frac{\mathrm{Q}}{2\pi k}\, ln\, r, \tag{9}$$

waarmede dus tevens de potentiaal in den beschouwden aequipotentiaalcirkel is aangegeven.

Komen we nu weer terug op de wijzen, waarop het stroomingsveld en dus ook de strooming zelf begrensd kan worden, dan zal het duidelijk zijn, dat de bovenkant (30) van een ondoorlatende laag het stroomgebied naar onderen zal afsluiten, indien natuurlijk een dergelijke laag in het bodemprofiel voorkomt. Dit vlak moet een stroomvlak zijn, aangezien de stroombanen daar als het ware overheen moeten glijden. Verder kan ook een aequipotentiaalvlak een grensvlak zijn; bijv. het cylindervormige vlak van de pompbuis in de reeds behandelde, radiaal rechtlijnige strooming. Zoo zijn

ook de natte omtrek van slooten en kanalen en het cylindervormige oppervlak van een drainbuis, of feitelijk de omtrek tot halve drainbuishoogte van de drainsleuf, indien deze althans veel beter doorlatend is dan de omringende grond, hetgeen bij een goed gelegde drainage overigens het geval moet zijn, aequipotentiaal- en tevens grensvlakken. In de derde plaats kan het phreatisch vlak een grensvlak zijn, zooals dit ook bij het stroomingsveld naar drains, greppels, slooten en kanalen en in gronden met een structuur in de natuurlijke ligging (zie noot 28) optreedt; alleen voor zandgronden zonder of vrijwel zonder structuur vormt het capillaire oppervlak de bovenbegrenzing van het stroomingsveld. Tenslotte kan het stroomingsveld ook nog naar een of meer zijden onbegrensd zijn, doordat de grond in deze richting(en) tot onbegrensden afstand (theoretisch oneindig) doorlatend blijft. Bij de reeds behandelde, radiaal rechtlijnige strooming hebben we reeds aangetoond, dat de strooming dan op die manier bepaald wordt, dat de intensiteit van de strooming op een bepaalde wijze afneemt, naarmate de afstand tot de plaats van onttrekking van het water grooter wordt.

Bij drainage (evenals bij de strooming naar greppels, slooten, kanalen) treedt o.a. de laatst aangegeven begrenzing van de strooming op, indien de grond onder de drains tot groote diepte (theoretisch oneindig) doorlatend blijft. Ook hier wordt, zooals we zullen zien, de strooming dan op die wijze bepaald, dat de intensiteit van de strooming met een toenemende diepte onder het vlak door de drains (resp. onder de greppels, onder de waterspiegels in slooten, kanalen, enz.) afneemt.

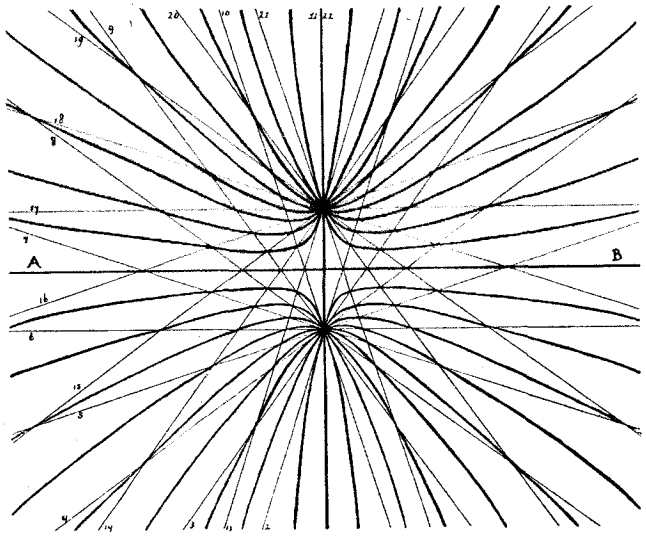
§ 5. Behandeling van een geval van een kromlijnige, radiale, tweedimensionale strooming, waarbij een stroomvlak optreedt, zonder dat een ondoorlatende laag in het bodemprofiel aanwezig is. De „spiegelmethode"

In de vorige paragraaf is aangegeven, dat de bovenkant van een ondoorlatende laag steeds een stroomvlak is. Het omgekeerde gaat echter niet op. We zullen daarom nu een geval van strooming (nl. een radiale kromlijnige strooming) behandelen, waarbij een stroomvlak optreedt, zonder dat een ondoorlatende laag aanwezig is. Tevens zal daardoor een methode van berekening van stroomingsgevallen — nl. de z.g. „spiegelmethode" — duidelijk worden, die veelvuldig wordt toegepast.

In een grond, die zich naar alle zijden oneindig ver uitstrekt en die homogeen doorlatend is, bevinden zich in afwijking van het in § 4 behandelde geval nu twee geperforeerde buizen op eenigen afstand evenwijdig van elkaar, welke buizen zich naar beide zijden oneindig ver uitstrekken. Als uit beide

buizen per tijdseenheid steeds evenveel water wordt gepompt, wordt gevraagd aan te geven hoe de stroombanen dan loopen en hoe dan de potentiaalfuncties zijn.

In ieder punt van het stroomingsveld treedt nu een potentiaal op, die de som is van de potentialen, die het pompen van de aangegeven hoeveelheid water uit iedere pompbuis in het betreffende punt zou geven, indien iedere buis *alleen* in het stroomingsveld aanwezig ware. Ook de stroomrichting in een bepaald punt staat onder invloed van de richting en de stroomsnelheid van het water, die het pompen van de aangegeven hoeveelheid water uit iedere buis op zich zelf zou doen ontstaan. Hieruit volgt dus, dat de werkelijk optredende stroombanen moeten gaan door de snijpunten van de overeenkomstige, fictieve stroombanen, uitgaande van iedere pompbuis, wanneer deze alleen in het stroomingsveld aanwezig waren. Verder zal in iedere doorsnede loodrecht de pompbuizen de strooming overal op dezelfde wijze plaats vinden, of m.a.w. ook deze strooming is tweedimensionaal.



b.

Fig. 6

Stroombanen in het geval door twee cylindervormige, evenwijdige pompbuizen van oneindige lengte per tijdseenheid evenveel water aan een stroomingsveld onttrokken wordt, dat zich naar alle zijden onbeperkt uitstrekt en homogeen doorlatend is

In figuur 6 is de bovenbedoelde doorsnede aangegeven; de buizen zijn hier door een punt aangegeven. Naar iedere pompbuis zijn weer, evenals bij de reeds behandelde radiale, rechtlijnige strooming (zie figuur 5), de 20 rechtlijnig radiaal gerichte (fictieve) stroombanen geteekend, waartusschen een tiende deel van het halve debiet naar iedere pompbuis zou stroomen, indien iedere buis alleen in het stroomingsveld aanwezig zou zijn (dun getrokken lijnen). De werkelijk optredende stroomlijnen zijn door de dik getrokken lijnen aangegeven. Hierbij kan worden opgemerkt, dat deze teekening is gemaakt naar analogie van een teekening aangegeven in de dissertatie van De Glee (31).

De boven bedoelde strooming is dus een kromlijnige, radiale strooming, waarbij ook hier door ieder aequipotentiaalvlak, tot telkens het vlak, dat het vlak door de assen van de buizen loodrecht midden doordeelt, evenveel water per tijdseenheid stroomt. Uit figuur 6 blijkt dus niet alleen, dat het vlak door de assen van de 2 buizen een stroomvlak is (symmetrievlak), maar dat dit ook het geval is voor het vlak AB; dat is het vlak, dat het eerstgenoemde vlak gaande door de assen van de twee buizen loodrecht middendoor deelt. Het stroomingsveld wordt door dit laatste vlak (in de figuur 6, die een doorsnede loodrecht de 2 pompbuizen voorstelt, is dit vlak dus voorgesteld door de lijn AB) in twee gelijke deelen verdeeld. Het is dus alsof de stroomingswijze naar de onderste buis het spiegelbeeld is van de stroomingswijze van het water naar de bovenste buis met het vlak AB als spiegelvlak.

De potentiaal van het grondwater in ieder punt van het stroomingsveld is verder de som van de potentialen, die het pompen van de aangegeven hoeveelheid water uit iedere pompbuis op zich zelf in dat punt zou geven. Indien één pompbuis in het stroomingsveld aanwezig ware, zou deze potentiaal volgens de vergelijking 9 gelijk zijn aan $p = \frac{Q}{2\pi k} \ln r$, zoodat de werkelijke potentiaal in het betreffende punt gelijk is aan:

$$P = \frac{Q}{2\pi k} \ln r' + \frac{Q}{2\pi k} \ln r'', \qquad (10)$$

waarin r' en r'' de stralen van de fictieve aequipotentiaalcirkels om iedere pompbuis en gaande door dit punt voorstellen, zooals deze zouden optreden, indien iedere buis alleen in het stroomingsveld aanwezig zou zijn.

Verder blijkt uit figuur 6, dat de strooming naar de bovenste pompbuis niet verandert, indien vlak AB den bovenkant van een ondoorlatende laag ware en dus onder dit vlak de grond ondoorlatend zou zijn, aangezien deze bovenkant van de ondoorlatende laag immers een stroomvlak zou moeten zijn. Dat wil dus zeggen, dat we dit laatste geval kunnen berekenen door onder dezen bovenkant van de ondoorlatende laag, en op dezelfde diepte er onder als de werkelijk aanwezige pompbuis er boven ligt, een denkbeeldige

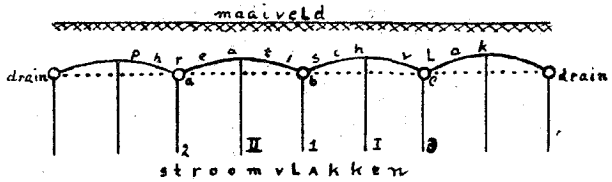
pompbuis aan te nemen, waaruit continue een evengroote hoeveelheid water per tijdseenheid wordt gepompt als uit de bestaande pompbuis en waarbij ook het gebied onder dezen bovenkant van de ondoorlatende laag even doorlatend wordt verondersteld als het gebied boven deze ondoorlatende laag. Beschouwen we immers de potentiaal in een punt van het stroomingsveld (dus natuurlijk boven de ondoorlatende laag) als de som van de potentialen, die zoowel de werkelijk aanwezige als de denkbeeldige pompbuis zou geven, wanneer zij ieder op zichzelf in het stroomingsveld (dus naar alle zijden onbeperkt gedacht) aanwezig waren, dan is daarmede aan de randvoorwaarden voldaan, nl. dat het vlak AB stroomvlak is, of m.a.w. de berekening is juist. De potentiaalfunctie van dit geval wordt dus ook door de vergelijking 10 voorgesteld. Deze methode, die veelvuldig wordt toegepast, noemt men *de methode van de conforme projectie of ook wel de spiegelmethode.* Het is mij niet bekend, wie deze methode voor het eerst heeft toegepast.

§ 6. Nadere beschouwing van de begrenzingswijzen, zooals deze bij drainage kan voorkomen

Komen we nu terug op de wijze, waarop het stroomingsveld of de strooming zelf bij drainage begrensd kan worden, dan weten we reeds, dat dit stroomingsveld van boven door het phreatisch vlak wordt begrensd (alleen voor zandgronden is dit het capillaire oppervlak). Naar onderen kan dit gebied door den bovenkant van een ondoorlatende laag begrensd worden. Ook kan de grond tot zoo groote diepte doorlatend blijven, dat ten opzichte van de berekening van dit geval kan worden aangenomen, dat de grond tot oneindige diepte doorlatend blijft. We dienen ons dus nu af te vragen, hoe dit stroomingsveld aan de zijkanten begrensd wordt.

Om de bovenbedoelde begrenzing aan de zijkanten te begrijpen, evenals de begrenzing van de strooming zelf voor het geval het stroomingsveld zich naar de diepte onbegrensd voortzet (dus de grond tot groote diepte — theoretisch oneindig — doorlatend blijft), zullen we moeten nagaan op welke wijze het overtollige regenwater door den grond naar de drains (en hetzelfde geldt natuurlijk ook voor ontwatering door middel van greppels, slooten, kanalen, enz.) stroomt, waarbij we ons zullen beperken tot het geval, dat de grond tot groote diepte (in practisch opzicht gelijk aan de theoretisch gevraagde oneindige diepte) homogeen doorlatend blijft en geen kwel optreedt. We kunnen dit, als volgt, beredeneeren:

In figuur 7 is een doorsnede loodrecht de drainreeksen aangegeven. De overtollige neerslag, die links van het midden tusschen de drains *b* en *c* valt, zal naar drain *b* en die rechts van dit midden valt naar drain *c* worden afgevoerd.



Figuur 7

Begrenzing van de stroomingsvelden van drains naar de zijkanten, indien deze drains alle op denzelfden afstand en dezelfde diepte liggen en het debiet van alle drains per tijdseenheid hetzelfde is

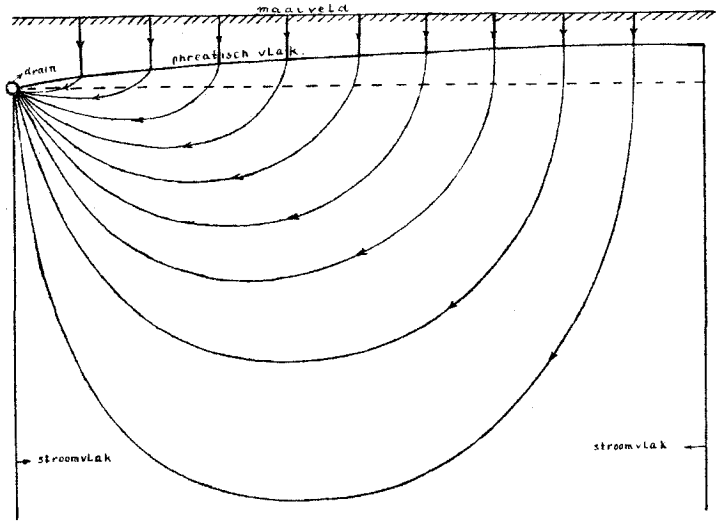
Het vlak I, loodrecht onder het midden van het verbindingsvlak van de drains *b* en *c* zal de stroomgebieden naar de drains *b* en *c* dus scheiden en dus een stroomvlak moeten zijn. Evenzoo is vlak II, loodrecht onder het midden van het verbindingsvlak van de drains *a* en *b* een stroomvlak. Verder zal de overtollige neerslag, die tusschen drain *b* en vlak I valt, naar de rechterhelft van drain *b* en de overtollige neerslag, die tusschen drain *b* en vlak II valt, naar de linkerhelft van drain *b* stroomen. Hieruit volgt, dat ook het vlak 1 loodrecht onder den drain *b* een stroomvlak moet zijn, aangezien dit vlak het stroomgebied naar drain *b* in twee afzonderlijke, gelijke stroomingsgebieden verdeelt. Zoo zijn ook de verticale vlakken 2 en 3, verticaal onder de drains *a* en *c*, stroomvlakken. Hieruit volgt dus, dat de zijkanten van het stroomingsgebied bij drainage (en iets analoogs geldt ook bij de ontwatering door middel van greppels, slooten, kanalen, enz.) gevormd worden door stroomvlakken.

Tenslotte zullen we dus nog moeten nagaan, hoe de strooming begrensd of feitelijk bepaald wordt, wanneer het stroomingsgebied zich tot zeer groote diepte (theoretisch oneindig) onder het vlak door de drains uitstrekt. We zullen daartoe nagaan, hoe het overtollige regenwater vanaf het maaiveld tenslotte naar de drains in genoemd geval stroomt.

Vanaf het maaiveld tot het phreatisch vlak zal het overtollige regenwater onder invloed van de zwaartekracht verticaal naar beneden zakken. Zoodra het phreatisch vlak bereikt is, wordt de zwaartekracht door den tegendruk van het daaronder reeds aanwezige water in zooverre opgeheven, dat nu de stroomrichting in ieder punt bepaald wordt door de richting van het potentiaalverval in dat punt. Om begrijpelijk te maken, hoe het water nu zal stroomen, of dus hoe de stroombanen onder het phreatisch vlak naar de drains zullen loopen, zullen we de volgende redeneering toepassen:

De strooming van het water naar de drains zal zoo verloopen, dat de totaal ondervonden weerstand bij de strooming van de totale hoeveelheid water,

die door de drains wordt afgevoerd, zoo klein mogelijk is. De stroombanen zullen daarbij (in dit geval) *diep* in den grond onder de drains moeten doordringen, aangezien dan het water, dat naar de drains stroomt, over een groote doorsnede wordt verdeeld, waardoor immers de totaal ondervonden weerstand, zooals bij de afleiding van de wet van DUPUIT-DARCY (zie § 1) is uiteengezet, wordt verkleind. Omgekeerd zullen echter niet *alle* stroombanen tot zeer diep in den grond kunnen doordringen, aangezien dan de totale lengte daarvan te groot zou worden, hetgeen weer den weerstand zoo sterk zou verhoogen, dat het voordeel van een grootere doorsnede, waardoor het water stroomt, weer zou worden opgeheven. Beide factoren, die dus tegengesteld zijn, zullen zich zoo doen gelden, dat de totaal ondervonden weerstand zoo klein mogelijk is. Slechts een gedeelte van de stroombanen zal dan ook diep in den grond doordringen, zoodat dus de intensiteit van de strooming met een toenemende diepte onder het vlak door de drains af zal nemen en wel doordat een gedeelte van de stroombanen dus in de bovenste lagen blijft en waardoor dus de onderlinge afstand van de opeenvolgende stroombanen, waartusschen een tiende deel van het halve debiet stroomt, des te grooter wordt, naarmate zij dieper onder het vlak door de drains liggen. Verder hebben we reeds gezien, dat de



Figuur 8

Stroomlijnen naar de drains, indien deze per tijdseenheid evenveel water afvoeren, op denzelfden onderlingen afstand en op dezelfde diepte liggen en de grond tot onbeperkte diepte homogeen doorlatend is

stroombanen elkaar nooit kunnen snijden, terwijl gedurende den regen per oppervlakte-eenheid tusschen de drains evenveel water zal worden afgevoerd, hetgeen ook het geval blijft na afloop van den regen, indien de drains water blijven afvoeren (32).

Teekenen we dan ook de stroombanen, waartusschen een tiende deel van het halve debiet stroomt, dat door iedere drain wordt afgevoerd (zie figuur 8), dan zullen deze stroombanen dus moeten aanvangen bij de punten, die den afstand van een drain tot het midden van den volgende drain in 10 gelijke stukken verdeeld.

In verband met het bovenstaande meen ik duidelijk gemaakt te hebben, dat de stroombanen zoo moeten loopen, als in figuur 8 zijn aangegeven. Hieruit blijkt, dat de breedte van het gebied tusschen 2 opeenvolgende stroombanen afneemt, naarmate de stroombanen dieper in den grond doordringen, hetgeen dus in overeenstemming is met het feit, dat de intensiteit van de strooming naar dieper gelegen lagen moet afnemen.

§ 7. OPSTELLING VAN DE POTENTIAALFUNCTIE VOOR HET GEVAL DE GROND TOT ONBEPERKTE DIEPTE ONDER DE DRAINS HOMOGEEN DOORLATEND IS

We hebben dus nu alle randvoorwaarden aangegeven, waaraan de berekening van de strooming van den overtolligen neerslag naar de drains (en dus ook naar greppels, slooten, kanalen, enz.) moet voldoen. We zullen dus nu de potentiaalfuncties in een aantal gevallen globaal opstellen, waaruit zal blijken, dat het drainageprobleem — en dus ook het detailsontwateringsprobleem in het algemeen — voor zoover het als een stroomingsgeval mag worden beschouwd (dus afgezien de eischen, die aan den grondwaterstand en aan de hoeveelheid overtolligen neerslag, die per etmaal moet worden afgevoerd, moeten worden gesteld), practisch gesproken is opgelost, d.w.z. in die gevallen, waarbij een niet al te klein aantal evenwijdig loopende drains, greppels, slooten, kanalen, enz. op denzelfden afstand in het land aanwezig zijn of worden gelegd resp. gemaakt. Ook echter wanneer slechts één sloot, kanaal enz. in het land aanwezig is, zijn berekeningen mogelijk; deze zullen echter in deze publicatie niet verder besproken worden.

Voor de opstelling van de potentiaalfuncties vormt echter de bovenbegrenzing van het stroomingsveld, nl. het phreatisch vlak, nog een moeilijkheid. We zullen daarom het vlak, gaande door de assen van de drains, als dit bovenvlak aannemen en dus de strooming boven dit vlak verwaarloozen. In de volgende hoofdstukken zal dan wel nader worden aangegeven op welke wijze daarmede toch rekening is te houden. Dat de fout, in het geval de grond tot groote diepte homogeen doorlatend blijft, niet groot kan zijn, indien we

het verbindingsvlak door de drains als de bovenbegrenzing aannemen, kan uit de volgende redeneering blijken: Onder dit verbindingsvlak (zie figuur 9; dit stelt een doorsnede loodrecht de drains voor) is immers een dikke laag grond voor de stroming van het water naar de drains aanwezig. De dikte van deze laatste laag is groot ten opzichte van de laag begrensd door het phreatisch vlak en het verbindingsvlak door de drains. Het zal dus duidelijk zijn, dat, als de doorlatendheid overal even groot en niet te klein is in verband met de af te voeren hoeveelheid overtolligen neerslag, we slechts een kleine fout maken, indien we in het laatstgenoemde gebied de component van het potentiaalverhang in horizontale richting $\left(\frac{dp}{dx}\right)$ verwaarloozen of dus gelijk nul stellen, hetgeen dus beteekent, dat de stroomrichting in dit gedeelte van het stroomingsveld als zuiver verticaal wordt opgevat. Ook voor deze verticaal stroming — dus in het gedeelte van het stroomingsgebied tusschen het phreatisch vlak en het verbindingsvlak door de drains — is echter een potentiaalverval noodig. We kunnen dit in rekening brengen; hier zullen we ook dit verval verwaarloozen, hetgeen overigens eveneens slechts een kleine, te verwaarloozen fout kan geven, gezien de geringe dikte van dit gedeelte van het stroomingsveld in vergelijking met de dikte van het stroomingsgebied onder het verbindingsvlak door de drains. Deze laatste veronderstelling wil zeggen, dat we in het stroomingsgebied tusschen het phreatisch vlak en het verbindingsvlak door de drains de doorlatendheid in verticale richting als oneindig groot beschouwen, aangezien immers bij deze stroming — volgens de gemaakte veronderstelling — geen potentiaalverlies optreedt.

Uit het bovenstaande volgt dus, dat geen groote fout wordt gemaakt, indien voor de bovenbegrenzing van het stroomingsgebied het verbindingsvlak door de assen van de drains wordt aangenomen.

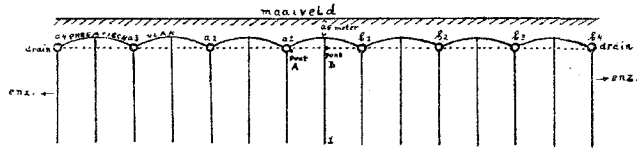
Wanneer slechts één drainreeks — d. w. z. de onderste helft daarvan — in een dergelijk stroomgebied aanwezig zou zijn, zou de stroomingsaard van het water naar dezen drain zeer veel gelijken op de stroming naar de eene helft van de pompbuis in een stroomingsveld, dat zich naar alle richtingen oneindig ver uitstrekt en homogeen doorlatend is. Dit wil zeggen, dat de potentiaal in een punt van het stroomingsveld, waarin deze halve drain aanwezig is en waardoor een bepaalde hoeveelheid overtollige neerslag per 24 uur wordt afgevoerd, is weer te geven door de vergelijking (zie de afleiding van de vergelijking 9):

$$p = \frac{Q}{\pi k} \ln r \qquad (11)$$

Geheel juist is deze vergelijking niet, aangezien de vergelijking 11 geldt voor een rechtlijnig radiale stroming, waardoor voor de stroming naar

den beschouwden drain het horizontale vlak door de as van den drain een stroomvlak zou moeten zijn. Dit kan echter niet het geval zijn, daar ook deze ééne drain tenslotte het overtollige regenwater zou moeten afvoeren, hetgeen het noodzakelijk maakt, dat alle stroombanen tenslotte — op welken afstand van den drain dan ook — weer naar boven naar het genoemde horizontale vlak door de as van den drain zou moeten ombuigen, welk vlak dus door de stroombanen met een zekeren hoek zullen worden gesneden (deze hoek is recht, indien boven dit verbindingsvlak de stroming werkelijk verticaal naar onderen is gericht). Het gevolg is dan ook, dat de onder nog te behandelen oplossing alleen met voldoende benadering geldig is, in het geval de grond tot groote diepte doorlatend blijft, waarop nog zal worden teruggekomen.

Komen we dus nu weer terug op de opstelling van de potantiaalfunctie voor het geval dus een serie drainreeksen in een grond aanwezig is, die tot groote diepte (theoretisch oneindig) homogeen doorlatend blijft, dan moet deze potentiaalfunctie zoo worden opgesteld, dat voldaan wordt aan de reeds behandelde randvoorwaarden voor dit geval, d. w. z. dat daardoor automatisch stroomvlakken ontstaan loodrecht onder het midden van de drains en onder het midden van het verbindingsvlak door de drains. Nu is een drainage practisch zoo op te vatten, dat zich in den grond op dezelfde diepte en denzelfden onderlingen afstand een (theoretisch) oneindig aantal drainreeksen bevindt, die alle per tijdseenheid dezelfde hoeveelheid water afvoeren (zie figuur 9; dit is dus een doorsnede loodrecht de drains; ook de stroomvlakken zijn hierin door verticale lijnen aangegeven).



Figuur 9

Dwarsdoorsnede door de drains, waarbij deze zich in een, tot onbeperkte diepte, homogeen doorlatenden grond bevinden

Beschouwen we nu slechts twee drainreeksen en wordt de potentiaal in een bepaald punt van het stroomingsveld, waarvoor we het midden van de verbindingslijnen van de twee middelpunten (punt B) van deze drains zullen kiezen, berekend als de som van de potentialen, die iedere drain op zich zelf beschouwd in dat punt zou geven, dan ontstaat daardoor automatisch een stroomvlak (zie figuur 9 en de afleiding van de vergelijking 10; § 5). Het

verticale vlak onder het midden van de verbindingslijnen van de drains a_1 en b_1 is dus daarmede een stroomvlak (vlak 1) geworden. Hiermede is echter niet aan de randvoorwaarden voldaan, aangezien door de boven aangegeven berekening van de potentiaal onder de drains a_1 en b_1 geen stroomvlakken ontstaan (vergelijk figuur 6). Om nu te bereiken, dat het verticale vlak onder drain a_1 een stroomvlak wordt, moeten we ook den invloed van drain a_2 (d. i. drain b_1 ten opzichte van dit vlak gespiegeld; spiegelmethode!) op de potentiaal in punt B beschouwen. Wordt dus nu de potentiaal in punt B berekend als de som van de potentialen, die de drains a_1, a_2 en b_2 in dit punt zouden geven, indien ieder op zich zelf in het stroomingsgebied aanwezig zou zijn, dan is hiermede bereikt, dat het verticale vlak onder den drain a_1 een stroomvlak is. Nu is echter het verticale vlak 1 geen stroomvlak meer. Om dit weer te bereiken, moeten we drain a_2 spiegelen ten opzichte van dit vlak, d.w.z. dat ook de invloed van drain b_2 op de potentiaal in punt B mede in aanmerking moet worden genomen. Nu is echter weer het verticale vlak onder drain a_1 niet precies meer een stroomvlak en moeten we weer drain b_2 ten opzichte van dit vlak spiegelen, of m. a. w. moet ook de invloed van drain a_3 op de potentiaal in punt B mede in aanmerking genomen worden, enz. Alleen wanneer we (theoretisch, practisch kunnen we met een zeker aantal drains volstaan) den invloed van een oneindige reeks drains ter weerszijden van de drains a_1 en b_1 op de potentiaal in punt B in aanmerking hebben genomen, hebben we daarmede bereikt, dat de verticale vlakken onder de drains a_1, b_1 en onder het midden tusschen deze drains zuivere stroomvlakken zijn, waarmede dus aan de randvoorwaarden is voldaan. De potentiaal P_B (33) in punt B is dus de som van de potentialen van een oneindig aantal drains, die ieder van deze drainreeksen op dat punt zou uitoefenen, indien zij alleen in het stroomingsgebied aanwezig zouden zijn (de drains voeren alle per tijdseenheid evenveel water af en liggen alle op denzelfden onderlingen afstand); d. w. z., dat de potentiaal in punt B weer te geven is door:

$$P_B = \sum_{-\infty}^{+\infty} \frac{Q}{\pi k} \ln r' \qquad (12)$$

waarin r' de straal van den aequipotentiaalcirkel om iederen drain en gaande door punt B voorstelt.

De vergelijking 12 geeft echter de *absolute* potentiaal in punt B aan. Hieraan hebben we echter niets; daarvoor moeten we een potentiaalverschil van twee punten ten opzichte van elkaar beschouwen. Wanneer nu bedacht wordt, dat we het drainageprobleem (en dit geldt ook voor de ontwatering door greppels, slooten, kanalen, enz., voor zooverre althans de rechtstreeksche invloed daarvan op den grondwaterstand in den tusschenliggenden grond

wordt beschouwd) zoo hebben gesteld, dat bij een bepaalden afvoer van overtolligen neerslag per 24 uur het phreatisch oppervlak midden tusschen de drains niet hooger mag oploopen dan tot een bepaalde waarde onder het maaiveld, terwijl geen water boven de drains voorkomt, zal het duidelijk zijn, dat we voor de beide punten, waartusschen het potentiaalverschil bepaald zal worden, één punt op den omtrek van den drain (resp. van den natten omtrek van de greppel, sloot, kanaal, enz. Dit zijn ook alle aequipotentiaalvlakken), bijv. punt A, kiezen en het tweede punt (punt B) juist midden op de verbindingslijn van de twee middelpunten van twee opeenvolgende drains (voor greppels, slooten, kanalen ligt dit punt midden daartusschen en in het vlak door de waterspiegels in de greppels, slooten en kanalen, resp. bij practisch droge greppels met vlakken bodem in het vlak door de bodems van deze greppels, enz.). De absolute potentiaal in het punt A wordt natuurlijk door een analoge reeks voorgesteld als voor het punt B en is dus gelijk aan:

$$P_A = \sum_{-\infty}^{+\infty} \frac{Q}{\pi k} \ln r'' \qquad (13)$$

waarin r'' de straal van de aequipotentiaalcirkels om de resp. drains en gaande door punt A voorstelt. Het potentiaalverschil tusschen de punten B en A is nu bekend, nl.:

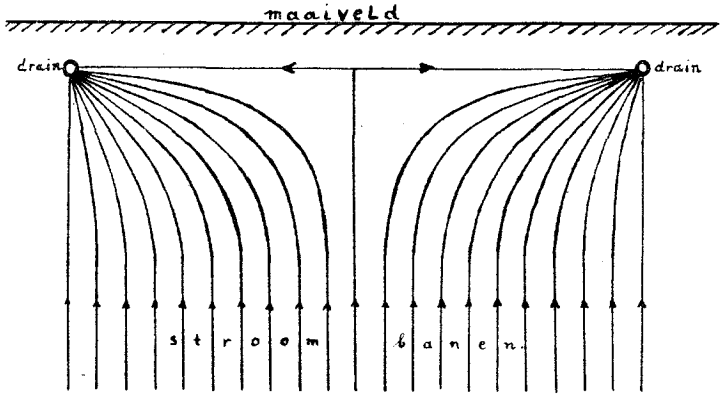
$$\triangle P = P_B - P_A = \sum_{-\infty}^{+\infty} \frac{Q}{\pi k} \ln r' - \sum_{-\infty}^{+\infty} \frac{Q}{\pi k} \ln r'' \qquad (14)$$

Uit de twee reeksen in de vergelijking 14 is één reeks te vormen (overeenkomstige termen algabraisch optellen), die convergeerend is, d. w. z., dat de som van deze reeks tot een bepaalde limiet nadert. Dat dit overigens het geval moet zijn, volgt ook hieruit, dat de invloed van iederen drain op het potentiaalverschil ($\triangle P = P_B - P_A$) van de twee beschouwde punten des te kleiner wordt, naarmate de afstand van dezen drain tot de punten A en B grooter wordt.

De vergelijking 14 vormt onder de beschreven omstandigheden (de grond is tot groote diepte homogeen doorlatend) de oplossing van het drainageprobleem. Immers bij invulling van Q ($= s.l$, waarin s den afvoer in meters per 24 uur bedraagt; bijv. 5 mm of 0,005 m per 24 uur; l = de drainafstand) en k (doorlaatfactor) is l te berekenen, aangezien $\triangle P$ bekend is (bij drainage in bouwland zonder kwel is $\triangle P$ gelijk aan $d - h$, waarin d de gemiddelde draindiepte in meters onder het maaiveld en h de verlangde grondwaterstand midden tusschen de drains en onder het maaiveld is; hier gelijk 0,5 m).

Alvorens nu voor andere gevallen de potentiaalfunctie op te stellen, dienen we eerst na te gaan, welke vorm van stroombanen aan de voorgaande

berekening ten grondslag ligt. Bezien we hiertoe nog eens figuur 6 en draaien we deze een kwart slag om, dan geven de stroomlijnen onder het vlak door de middelpunten van deze buizen tevens de stroomlijnen aan, die zullen optreden (voor 2 drains gelden deze feitelijk alleen dicht om deze drains heen; zie ook opmerking blz. 544 en 545), wanneer slechts 2 drainreeksen in den grond aanwezig zijn. Uit de voorgaande beschouwingen volgt verder, dat we door de toegepaste berekeningswijze niets anders bereikt hebben, dan dat de stroomlijnen loopen als in figuur 10 (uit de hand getrokken; niet berekend) is afgebeeld en waarin men dus aan weerszijden van de beide aan-



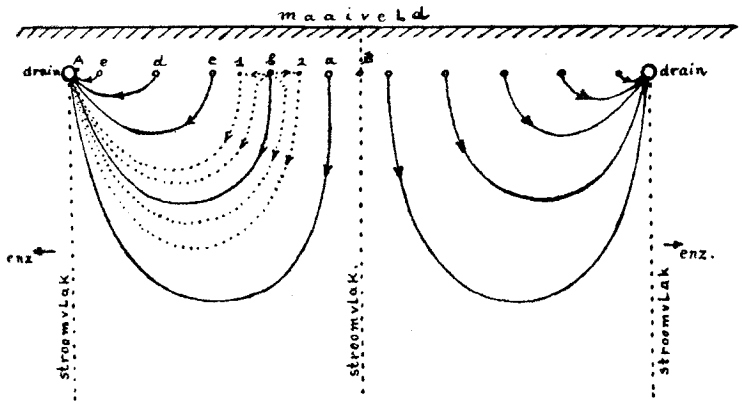
Figuur 10

Vorm van de stroombanen, die aan de afleiding van vergelijking 14 ten grondslag liggen. Deze stroombanen komen in werkelijkheid voor in het geval kwel optreedt en de drains met de onderste helft in een, tot onbeperkte diepte, homogeen doorlatenden grond en met de bovenste helft in een ondoorlatenden grond liggen

gegeven drainreeksen nog een theoretisch oneindige reeks drainreeksen moet denken. Deze stroomlijnen lijken in het geheel niets op de stroombanen, zooals deze in werkelijkheid bij drainage en onder de aangegeven omstandigheden zullen optreden (zie figuur 8). Het in formule 14 weergegeven potentiaalverschil blijkt volgens het stroomschema met een zeer hooge benadering te gelden voor het geval de drains juist voor de onderste helft liggen in een homogeen doorlatende laag, die zich tot een onbepaalde diepte voortzet, terwijl de andere helft ligt in een ondoorlatende laag (of dus het vlak door de assen van de drains een stroomvlak is) en door deze drains nu water, dat uit de diepte omhoog stijgt (bijv. bij kwel), moet worden verwijderd. Ofschoon hieruit dus oppervlakkig beschouwd zou volgen, dat formule 14

niet geldt voor een drainage, waarbij *de overtollige neerslag* moet worden afgevoerd — het af te voeren water komt nu van boven — zoo kan toch worden aangetoond, dat deze formule ook voor dit laatste geval geldig blijft. We kunnen dit als volgt bewijzen:

Tusschen de drainreeksen op een onderlingen afstand l, die ieder een hoeveelheid water Q per 24 uur afvoeren, denken we ons telkens nog 10 drainreeksen op gelijken onderlingen afstand, waarbij iedere drainreeks telkens een hoeveelheid 0,1 Q *aanvoert*. De totale aanvoer van deze laatste 10 drainreeksen is dus telkens gelijk aan den afvoer van één drainreeks, waardoor water wordt afgevoerd. Figuur 11 geeft daarvan een doorsnede loodrecht de drainreeksen aan. Hierin zijn de drains, die water *afvoeren* door



Figuur 11

Dwarsdoorsnede door de drains A, B, enz., die water afvoeren, en door de drains a, b, enz., die water aanvoeren, in het geval de grond tot onbeperkte diepte homogeen doorlatend is, de drains alle op dezelfde diepte en op bepaalde onderlinge afstanden liggen en een bepaalden afvoer resp. aanvoer hebben

iets grootere cirkeltjes aangegeven dan de drains, waarin water wordt *aangevoerd*. In een dergelijk geval, waarbij dus de neerslag vervangen is door den aanvoer van het water in de genoemde 10 drainbuizen tusschen iedere 2 drainbuizen, die water afvoeren, zullen de stroombanen komen uit de drains, die het water aanvoeren en uitmonden in de drains, die het water afvoeren, en deze stroombanen zullen dus reeds zeer veel gelijken op de stroombanen, die optreden, wanneer alleen drains, die het overtollige regenwater afvoeren, in den grond aanwezig zijn. Het verschil zit alleen hierin, dat de neerslag regelmatig tusschen de opeenvolgende drains, die water

afvoeren, is verdeeld, terwijl hier telkens 0,1 deel van den totalen afvoer door 1 reeks, en dus op één plek, wordt aangevoerd. Alle stroombanen *afkomstig uit drain b* liggen dus binnen de gestippelde stroombanen 2 en 1, die (uiterste stroombanen) dus juist midden tusschen de drains *a* en *b* resp. *b* en *c* scherp naar onderen ombuigen.

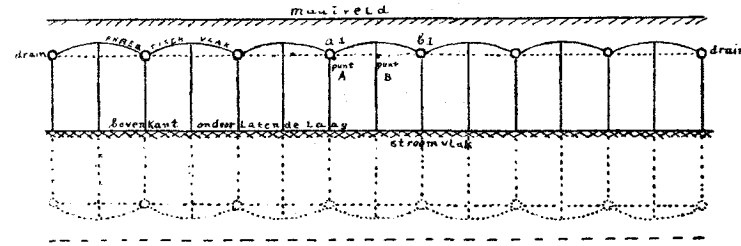
Bij de berekening van het bestaande potentiaalverschil tusschen een punt op den omtrek van den drain, die water afvoert, en een punt, die de verbindingslijn tusschen de middelpunten van den genoemden en den volgenden drain, die water afvoert, middendoor deelt — of dus van de punten A en B — moet behalve de invloed van de drains, die water afvoeren, ook de invloed van de 10 reeksen drains, die water aanvoeren, op de potentiaal in deze punten A en B beschouwd worden. Behalve de 2 reeksen, die in formule 14 zijn weergekomen, komen er hier dus nog 10 × 2 reeksen bij. Voert men deze berekening uit — en dit is door mij veiligheidshalve gedaan — dan blijkt, dat ten gevolge van de symmetrische ligging van de drains, die water aanvoeren, ten opzichte van de drains, die water afvoeren, telkens de som van twee reeksen gelijk 0 is, waardoor dus alle 10 × 2 reeksen, die tengevolge van de aanwezigheid van de drains, die water aanvoeren, in de berekeningen moeten worden opgenomen, tegen elkaar wegvallen, zoodat alleen de formule 14 overblijft (34). Hieruit volgt dus, dat deze formule 14 ook geldig is in het aangegeven geval, waarbij de af te voeren hoeveelheid water van de drains, die water aanvoeren, afkomstig is van de drains, die water aanvoeren. Aangezien dit ook het geval blijft, wanneer tusschen de drains, die water afvoeren, een willekeurig aantal van *n* drains, die water aanvoeren, op onderlinge gelijke afstanden worden gelegd op een zoodanige wijze, dat deze drains regelmatig verdeeld liggen tusschen de drains, die water afvoeren, en waarbij ieder van deze drainreeksen nu $\frac{1}{n}$de gedeelte van Q aanvoert, dan volgt hieruit tevens, dat formule 14 ook geldig moet zijn voor den afvoer van overtolligen neerslag, die volkomen regelmatig over den afstand tusschen de drains is verdeeld, aangezien *n* zoo groot genomen kan worden als men slechts wil.

Tenslotte kan in verband met het bovenstaande worden opgemerkt, dat, indien de stroomfuncties worden opgesteld in het geval, dat *de overtollige neerslag* door de drains onder de gegeven omstandigheden moet worden afgevoerd, de stroombanen, waartusschen een tiende deel van het halve debiet van één drain stroomt, zullen moeten beginnen in punten, die den afstand van het middelpunt van den beschouwden drain tot het midden van den volgenden drain in 10 gelijke deelen verdeeld (zie figuur 8). Wordt daarentegen *alleen* de van onder komende kwel afgevoerd, dan loopen deze stroombanen op voldoende diepte onder de drains zuiver verticaal en op

onderling gelijken afstand en waarbij ook nu de loodrechte afstand van de twee loodlijnen onder het middelpunt van den beschouwden drain en onder het punt op het midden van de verbindingslijn met het middelpunt van den volgenden drain in 10 gelijke deelen wordt verdeeld (zie ook figuur 10).

§ 8. Opstelling van de potentiaalfunctie voor het geval de grond tot een bepaalde diepte onder de drains homogeen doorlatend is

We kunnen nu ook het geval oplossen, waarbij het stroomgebied aan de onderzijde afgesloten is door den bovenkant van een ondoorlatende laag (stroomvlak), mits deze bovenkant om later te bespreken redenen diep genoeg onder de drains ligt. In figuur 12 is een doorsnede van dit geval loodrecht de drains aangegeven. De oplossing, die ook geldt onder de genoemde omstandigheden voor den afvoer van overtolligen neerslag naar greppels, slooten, kanalen, enz., bestaat in een volledige spiegeling ten opzichte van dezen bovenkant van de ondoorlatende laag.



Figuur 12

Dwarsdoorsnede door de drains in het geval de grond tot een bepaalde diepte onder het vlak door de drains homogeen doorlatend is. In deze figuur zijn ook de gespiegelde drains aangegeven

Voor de opstelling van de potentiaalfunctie, of dus hier weer voor de berekening van het potentiaalverschil van de punten B en A, moet nu zoowel de invloed van de werkelijk bestaande reeks drains als van een denkbeeldige reeks, met per drain hetzelfde debiet en op denzelfden onderlingen afstand, beschouwd worden. Deze denkbeeldige reeks ligt verder even ver onder den bovenkant van de ondoorlatende laag als de werkelijk bestaande reeks er boven ligt, terwijl verder wordt verondersteld, dat de grond in alle richtingen — dus ook onder den bovenkant van de in werkelijkheid voorkomende ondoorlatende laag — dezelfde doorlatendheid bezit. Hiermede wordt dus

bereikt, dat de bovenkant van de ondoorlatende laag een stroomvlak wordt, hetgeen noodzakelijk is. De potentiaal van punt B wordt dus nu voorgesteld door:

$$P_B = \sum_{-\infty}^{+\infty} \frac{Q}{\pi k} \ln r' + \sum_{-\infty}^{+\infty} \frac{Q}{\pi k} \ln r''' \qquad (15)$$

waarin r' en r''' de stralen van de aequipotentiaalcirkels om iederen drain van de werkelijk bestaande reeks en gaande door punt B resp. de stralen van de aequipotentiaalcirkels om iederen drain van de denkbeeldige reeks en gaande door punt B voorstellen, indien ieder van deze werkelijk bestaande drainreeksen resp. ieder van deze denkbeeldige drainreeksen alléén in het stroomingsveld aanwezig zouden zijn. Verder is de potentiaal van punt A:

$$P_A = \sum_{-\infty}^{+\infty} \frac{Q}{\pi k} \ln r'' + \sum_{-\infty}^{+\infty} \frac{Q}{\pi k} \ln r'''' \qquad (16)$$

waarin r'' en r'''' een overeenkomstige beteekenis hebben als r' en r''' in vergelijking 15.

Het potentiaalverschil tusschen de punten B en A is dus:

$$\triangle P = P_B - P_A = \sum_{-\infty}^{+\infty} \frac{Q}{\pi k} \ln r' + \sum_{-\infty}^{+\infty} \frac{Q}{\pi k} \ln r''' - \sum_{-\infty}^{+\infty} \frac{Q}{\pi k} \ln r'' - \sum_{-\infty}^{+\infty} \frac{Q}{\pi k} \ln r'''' \qquad (17)$$

Uit deze 4 reeksen is weer één reeks op te stellen, die convergeerend is, waaruit dus volgt, dat ook de som van deze 4 reeksen tot een bepaalde limiet nadert.

§ 9. Bespreking van de voorwaarden, waaronder de in § 8 ontwikkelde potentiaalfunctie geldig is; opstelling van de potentiaalfunctie in het geval de drains op de ondoorlatende laag liggen

Met de bovenaangegeven oplossingen is men er echter nog niet. De gevolgde berekeningswijze voor het laatst behandelde geval geeft nl. des te onjuister resultaten, naarmate de bovenkant van de ondoorlatende laag op geringe diepte onder het vlak door de drains ligt. De oorzaak schuilt eenerzijds in het feit, dat, afgezien van den eenen drain, op den omtrek waarvan we het punt A hebben gekozen, alle andere drains beschouwd worden als punten. Deze laatste veronderstelling is des te onjuister, naarmate de ondoorlatende laag dichter onder de drains ligt en natuurlijk ook, naarmate de drainafstand (resp. greppel, sloot-, kanaalafstand, enz.) kleiner is. Tevens schuilt de

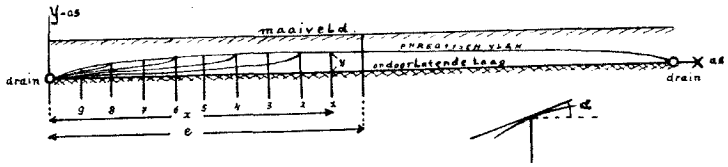
oorzaak echter in het feit, dat de grondformule, die we voor de berekening van den invloed van iederen drain op de potentiaal in punt A en B gebruikt hebben, alleen geldig is, indien door alle aequipotentiaalvlakken (resp. -lijnen in de doorsneden loodrecht de drains) om iederen drain evenveel water stroomt (de aequipotentiaalvlakken blijven daarbij natuurlijk beperkt tot het stroomingsveld van iederen drain (zie ook figuur 12). Deze grondformule toegepast op het drainageprobleem (in het algemeen op detailontwateringsproblemen) geeft dan ook alleen goede resultaten, indien bovendien nog voldaan is aan den eisch, dat door alle aequipotentiaalvlakken om iederen drain en gelegen binnen het stroomingsveld van dezen drain evenveel water stroomt. Dit is nu streng genomen wel is waar in geen van beide oplossingen het geval — de gegeven oplossingen zijn dan ook benaderende oplossingen, zij het dan ook van een meer dan voldoende nauwkeurigheid —; we kunnen echter gemakkelijk aantoonen, dat practisch gesproken aan dezen eisch is voldaan in het geval, dat de homogeen doorlatende laag zich naar de diepte onbeperkt uitstrekt of dit althans tot voldoende diepte het geval is.

Bezien we daartoe nog eens figuur 8, dan zien we, dat de stroombanen wel is waar niet loodrecht staan op het phreatisch vlak (was dit wel het geval, dan was het phreatisch vlak een aequipotentiaalvlak en ging dus alle overtollige neerslag door het eerste aequipotentiaalvlak en dus tevens door alle anderen; dit is ook het geval, indien de strooming in het gedeelte van het stroomingsveld boven het verbindingsvlak door de assen van de drains verticaal gericht is), maar zij maken er toch, behalve misschien de binnenste twee stroombanen een hoek mede, die niet al te veel van 90° afwijkt. Dit laatste wil zeggen, dat een slechts weinig onder het verbindingsvlak van de drains liggend aequipotentiaalvlak vrijwel alle stroombanen snijdt, of dus, dat hierdoor reeds het grootste gedeelte van de af te voeren hoeveelheid regenwater stroomt. Hierbij kan worden opgemerkt, dat de stroombanen uit de hand zijn getrokken, zoodat mogelijk de hoek van de eerste twee stroombanen bij den drain minder scherp is als in figuur 8 is aangegeven. Door ieder dichter om den drain getrokken aequipotentiaalvlak stroomt dus een nog grooter gedeelte van de totaal af te voeren hoeveelheid overtolligen neerslag.

Het bovenstaande is wellicht nog duidelijker in te zien door te bedenken, dat het phreatisch vlak des te meer tot een aequipotentiaalvlak nadert, naarmate de welving van dit phreatisch vlak boven het verbindingsvlak door de drains kleiner is en naarmate bij dezelfde welving de drainafstand grooter is. Hieruit volgt dan ook, dat in het aangegeven geval (de grond is tot groote diepte homogeen doorlatend) practisch gesproken aan de voorwaarde is voldaan, dat door ieder aequipotentiaalvlak om iederen drain,

en liggende binnen het stroomgebied van dezen drain, evenwel water per tijdseenheid stroomt, indien de doorlatende laag onder de drains slechts voldoende dik is en het phreatisch vlak in verband met den drainafstand niet teveel boven het verbindingsvlak door de drains uitkomt.

Hoe minder diep de bovenkant van de ondoorlatende laag onder het maaiveld ligt, hoe minder aan de bovengenoemde voorwaarde is voldaan en hoe onjuistere resultaten met behulp van de aangegeven rekenwijze (*in het vervolg kortweg de „radiale methode" genoemd*) zullen worden verkregen. Om dit laatste duidelijk te maken, gaan we tot het ander uiterste geval over, nl. het geval, waarbij de drains juist op de ondoorlatende laag liggen. Figuur 13 geeft hiervan een indruk; in deze figuur, die een doorsnede loodrecht de drains voorstelt, zijn tevens nog enkele stroombanen aangegeven. Uit den



Figuur 13

Dwarsdoorsnede door de drains in het geval deze drains juist op de ondoorlatende laag liggen en de grond daarboven homogeen doorlatend is

vorm van de stroombanen blijkt, dat deze practisch horizontaal loopen, d. w. z., dat practisch gesproken de aequipotentiaalvlakken hier verticaal gericht zijn. Een 9-tal vlakken, die dus practisch gesproken aequipotentiaalvlakken zijn en den afstand van den drain tot het midden van de volgende juist in 10 gelijke deelen verdeelen, is in figuur 13 aangegeven. Aangezien nu verder de overtollige neerslag, die rechts van het midden tusschen twee drains valt, naar den rechterdrain en die links van het midden valt naar den linkerdrain zal worden afgevoerd, zal door het aequipotentiaalvlak 1 slechts de overtollige neerslag stroomen, die links van het midden tot dit vlak is gevallen. Door het aequipotentiaalvlak 2 zal behalve de reeds genoemde hoeveelheid water ook nog de overtollige neerslag stroomen, die tusschen de aequipotentiaalvlakken 1 en 2 is gevallen, enz. Hieruit volgt, dat in dit geval dus steeds des te meer water door ieder aequipotentiaalvlak stroomt, naarmate dit vlak dichter bij de drains is gelegen.

Uit het bovenstaande volgt dan ook, dat de „radiale methode" hier en ook als de bovenkant van de ondoorlatende laag slechts weinig onder het vlak door de assen van de drains ligt, totaal onbruikbare resultaten zal geven, hetgeen door uitvoering van deze berekening dan ook werd bevestigd.

Voor de berekening van het potentiaalverschil voor dit laatste geval, kan worden aangenomen, dat de stroombanen horizontaal verloopen, hetgeen beteekent, dat we het potentiaalverlies in verticale richting kunnen verwaarloozen ten opzichte van het potentiaalverlies in horizontale richting. Dit wil niets anders zeggen, dan dat kan worden aangenomen, dat $\frac{\delta p}{\delta y} = 0$. Van de potentiaalverandering blijft dus alleen de component in horizontale richting, nl. $\frac{\delta p}{\delta x}$, over. Nemen we een rechthoekig xy-coordinatenstelsel, zooals in figuur 13 is aangegeven, dan is dus voor eenzelfde x maar wisselende y, of dus voor iedere verticale doorsnede door het stroomingsveld, de potentiaal constant, hetgeen niets anders wil zeggen, dan dat deze verticale doorsneden aequipotentiaalvlakken zijn, hetgeen reeds eerder op andere wijze is afgeleid. Verder volgt uit het bovenstaande, dat $\frac{\delta p}{\delta x} = \frac{dy}{dx}$, d. w. z. gelijk aan de tangens van den hoek α, dien de raaklijn aan het phreatisch vlak in het punt, waar het te beschouwen aequipotentiaalvlak dit phreatisch vlak snijdt, maakt met de x-as, aangezien immers $\frac{\delta p}{\delta x}$ voor alle punten op eenzelfde verticale doorsnede constant is.

Noemen we nu verder de hoeveelheid water, die per strekkenden meter drain per eenheid van tijd door het beschouwde aequipotentiaalvlak stroomt q_x, dan stroomt door dit vlak dus $q_x = \frac{e-x}{e} \cdot Q$, indien e en x resp. den halven drainafstand en den afstand van het beschouwde aequipotentiaalvlak tot den drain voorstelt en Q de totale hoeveelheid water is, die *van één zijde* naar den drain wordt afgevoerd. Deze hoeveelheid q_x is gelijk aan (wet van Dupuit—Darcy) $k \cdot y \cdot \frac{dy}{dx}$, waarin y de doorsnede van het stroomingsgebied ter plaatse van het beschouwde aequipotentiaalvlak voorstelt. Hieruit volgt dus, dat

$$Q \cdot \frac{e-x}{e} = k \cdot y \cdot \frac{dy}{dx}$$

Door integratie van $x = 0$ tot $x = e$ en $y = 0$ tot $y = H_0$, volgt hieruit, dat

$$Q = s \cdot e = \frac{kH_0^2}{e} \text{ of } s = \frac{kH_0^2}{e^2} \qquad (18)$$

Is y bij den drain $= h_0$, d. w. z. komt grondwater boven de drains tot een hoogte h_0 voor, dan luidt deze betrekking:

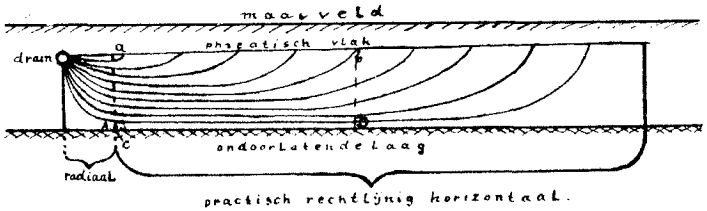
$$s = \frac{k(H_0^2 - h_0^2)}{e^2} \qquad (19)$$

Deze vergelijkingen werden ook reeds in een vroegere publicatie afgeleid; zie de in noot (1) genoemde literatuur, blz. 465.

Dezelfde methode (zie de in noot (1) genoemde literatuur) kan ook in overeenkomstige gevallen $\left(\frac{\delta p}{\delta x} = \frac{dy}{dx}\right)$ worden toegepast, waarbij de grond niet homogeen, maar heterogeen doorlatend is. Ook geeft de laatste oplossingswijze voldoend juiste resultaten, wanneer de bovenkant van de ondoorlatende laag niet te diep onder het verbindingsvlak door de drains ligt; zie ook de volgende hoofdstukken. Indien in het laatste geval de grond tot de ondoorlatende laag homogeen doorlatend is, is vergelijking 19 dus eveneens geldig; h_0 en H_0 worden nu echter gerekend vanaf den bovenkant van de ondoorlatende laag. *Deze oplossingsmethode zal in het vervolg kortweg de „horizontaal rechtlijnige methode" worden genoemd.*

§ 10. Oplossing van detailontwateringsvraagstukken door samenstelling van een radiale en een rechtlijnig horizontale strooming

Een volledige oplossing van het gestelde probleem beteekent echter ook de oplossing van het geval, waarbij noch de radiale noch de rechtlijnige horizontale methode voldoend juiste resultaten geven; d. w. z., waar voor de toepassing van de radiale methode de bovenkant van de ondoorlatende laag niet diep genoeg onder de drains ligt en voor de toepassing van de rechtlijnige horizontale methode weer te diep. Om dit laatste geval op te lossen, passen we de radiale- en de rechtlijnig horizontale methode tegelijk toe. Men noemt dit de strooming samenstellen uit een rechtlijnig horizontaal- en een radiaal-gedeelte (ook andere combinaties zijn mogelijk). Naast de spiegelmethode is dit één van de meest gebruikelijke oplossingsmethoden bij stroomingsvraagstukken. In figuur 14 is dit geval nader aangegeven.



Figuur 14

Dwarsdoorsnede door de drains in het geval de grond tot een bepaalde diepte onder de drains homogeen doorlatend en daaronder ondoorlatend is en de strooming samengesteld moet worden uit een radiaal en uit een horizontaal rechtlijnig gedeelte

Volgens de radiale methode berekenen we het benoodigde potentiaalverschil om het water van vlak A naar den drain te doen stroomen en volgens de rechtlijnige horizontale methode het potentiaalverschil om het water vanaf het midden tusschen twee drains (B) naar het vlak A te doen stroomen, of dus volgens de radiale methode het potentiaalverschil tusschen een punt op den omtrek van den drain tot punt a en volgens de rechtlijnig horizontale methode het potentiaalverschil tusschen de punten b en a. De som van beide potentiaalverschillen is het gevraagde potentiaalverschil, waarmede ook voor dit geval het drainageprobleem is opgelost. De uitwerking van de potentiaalfuncties zal in hoofdstuk III geschieden.

Voor de meest nauwkeurige oplossing volgens de bovenaangegeven methode is het verder eenerzijds gewenscht, dat dit vlak A zoo dicht mogelijk bij den beschouwden drain ligt. In dat geval zal de radiale methode de grootste nauwkeurigheid voor de berekening van het aangegeven potentiaalverschil geven, aangezien dan practisch gesproken door alle aequipotentiaalvlakken om den beschouwden drain, en gelegen tusschen den drain en vlak A, evenveel water per tijdseenheid stroomt. Anderzijds moet dit vlak A ook met voldoende benadering een aequipotentiaalvlak zijn; d. w. z., dat het potentiaalverschil tusschen de punten a en c klein moet zijn ten opzichte van de twee bovengenoemde potentiaalverschillen, aangezien dit vlak immers het begin vormt van het gedeelte, waar de horizontale rechtlijnige methode wordt toegepast en waarbij alle verticale doorsneden loodrecht het vlak door de assen van de drains aequipotentiaalvlakken moeten zijn. De afstand van vlak A tot den beschouwden drain kan daardoor ook weer niet al te klein zijn. Hierop zal in hoofdstuk III worden teruggekomen.

Het geldigheidsbereik van de bovenaangegeven methode is zeer groot. Alleen als de ondoorlatende laag al te dicht onder het verbindingsvlak door de drains ligt, zal deze methode onjuiste resultaten geven en wel bij dezelfde diepteligging van de ondoorlatende laag des te onjuistere resultaten, naarmate de drainafstand kleiner is. De invloed van het, op de radiale methode berekende, potentiaalverschil zal immers steeds grooter worden ten opzichte van het potentiaalverschil berekend volgens de horizontaal rechtlijnige methode, naarmate de drainafstand bij dezelfde diepteligging van de ondoorlatende laag kleiner wordt. In dit geval is echter reeds lang het gebied bereikt, waar de rechtlijnig horizontale methode alleen mag worden toegepast.

Ook indien de ondoorlatende laag te diep ligt, geeft de bovenaangegeven methode tenslotte onjuiste resultaten. In hoofdstuk IV zal echter blijken, dat in dat geval alleen de radiale methode kan worden toegepast, of dus direct de methode voor de berekening van het geval de grond tot (theoretisch) onbeperkte diepte doorlatend blijft.

§ 11. Slotopmerking

Uit het bovenstaande volgt dan ook, dat het drainageprobleem is opgelost, voor zoover dit als een stroomingsvraagstuk is op te vatten. Dit is ook in het algemeen het geval, indien de ontwatering, d. w. z. de rechtstreeksche beheersching van den grondwaterstand, geschiedt door evenwijdig loopende greppels, slooten, kanalen, enz. op een bepaalden onderlingen afstand (35).

In het volgende hoofdstuk zullen de, in dit hoofdstuk globaal aangegeven, berekeningen worden uitgewerkt.

HOOFDSTUK III

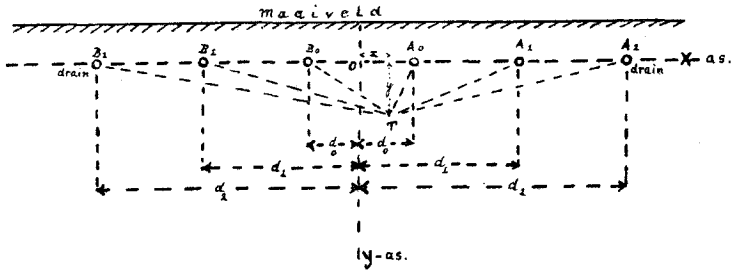
Uitwerking van de in hoofdstuk II globaal aangegeven berekeningsmethoden

Zooals in hoofdstuk II is aangegeven, zullen in dit hoofdstuk enkele berekeningswijzen worden uitgewerkt, die globaal in hoofdstuk II zijn behandeld. Hierbij zal alleen nader worden ingegaan, op hetgeen in het genoemde hoofdstuk niet verder is behandeld of in onuitgewerkten vorm is blijven staan.

§ 1. Opstelling van de potentiaalfunctie voor het geval de grond tot onbeperkte diepte homogeen doorlatend is en het phreatisch vlak zich slechts weinig boven het vlak door de assen van de drains verheft

a. Berekening van de potentiaalfunctie door gebruik te maken van een rechthoekig coordinatenstelsel

In de eerste plaats zal nu het geval worden uitgewerkt, dat de grond tot onbeperkte diepte homogeen doorlatend blijft en het phreatisch oppervlak zich midden tusschen de drains slechts weinig boven het vlak door de assen van de drains verheft. Dit beteekent dus, dat we in het gedeelte tusschen het phreatisch vlak en dit vlak door de assen van de drains een verticale strooming zullen aannemen en het potentiaalverlies ten gevolge van de verticale strooming van het water in dit gedeelte van het stroomingsveld zullen verwaarloozen (zie hoofdstuk II). Figuur 15 geeft een verticale doorsnede loodrecht de drains van dit geval aan (36). Hierbij kan worden opgemerkt, dat deze oplossingsmethode ook geldt voor evenwijdig loopende greppels, slooten, kanalen, enz., hetgeen steeds het geval zal zijn, tenzij uitdrukkelijk anders is vermeld, waarop nog zal worden teruggekomen.



Figuur 15

Dwarsdoorsnede door de drains in het geval de grond tot onbeperkte diepte homogeen doorlatend is

De invloed van iederen drain op de potentiaal in een bepaald punt wordt dus (zie hoofdstuk II) aangegeven door:

$$p = \frac{Q}{\pi k} \ln r \tag{20}$$

waarin p de potentiaal, Q het debiet per strekkenden meter drain, k de doorlaatfactor en r de straal van den aequipotentiaalcirkel om dezen drain en gaande door het punt, waarvan men de potentiaal wil bepalen, voorstelt.

De vergelijking 20 is aangegeven in z. g. poolcoordinaten. De ligging van een punt wordt daarbij bepaald door de lengte van een uit een vast punt (pool; hier centrum drain) getrokken rechte lijn (voerstraal) naar dit punt en den hoek ς (anamolie), dien deze lijn maakt met een bepaalde rechte lijn (polaire as) door de pool. De polaire as ligt in figuur 15 horizontaal naar rechts. Uit hoofdstuk II weten we reeds, dat de cirkels om het centrum van dezen drain als middelpunt, en als deze alleen in het stroomingsveld aanwezig zou zijn, aequipotentiaallijnen zijn. Dat dit zoo moet zijn, volgt reeds hieruit, dat, als in vergelijking 20 p constant is (aequipotentiaallijn), ook r constant moet zijn. De stroombanen naar den drain zijn in genoemd geval rechte lijnen gaande door het middelpunt van den drain en loodrecht staande op de aequipotentiaallijnen. Hiervoor geldt de stroomingsfunctie $\psi = \frac{Q}{\pi k} \varsigma = \frac{Q}{\pi k} bg\, tg\, \varsigma$.

Hier zullen we ons bepalen tot het uitwerken van de potentiaalfunctie (gewoonlijk aangegeven door de letter Φ, hier echter aangegeven door P of p) en daarvoor zullen we de vergelijking 20 uitdrukken in gewone rechthoekige xy-coordinaten. Als x-as kiezen we de verbindingslijn door de middenpunten van de drains; als oorsprong het punt op die verbindingslijn

tusschen de drains A_0 en B_0 (zie figuur 15), die deze lijn middendoor deelt en als positieve y-as de loodrecht hierop staande lijn naar onderen.

Aangezien de strooming symmetrisch is ten opzichte van den oosprong kunnen we bij de berekening van de strooming volstaan met het gebied tusschen O en A_0 te beschouwen of dus dat $0 \leq x \leq d_0$, waarin d_0 den halven drainafstand voorstelt.

Noemen we nu d_0, d_1, d_2, enz. de afstanden van het centrum van de drains A_0 en B_0, resp. A_1 en B_1, resp. A_2 en B_2, enz. tot den oorsprong, dan geldt voor de grenzen, waartusschen x zich beweegt en indien aan d_0, d_1, d_2, enz. een absolute waarde wordt toegekend, dat voor de drains rechts van den oorsprong:

$$r = \sqrt{(d_n - x)^2 + y^2} \tag{21}$$

en links van den oorsprong:

$$r = \sqrt{(d_n + x)^2 + y^2} \tag{22}$$

waarin d_n de afstand van de middelpunten van den drain A_n resp. B_n tot den oorsprong voorstelt, zoodat voor dezen drain rechts van den oorsprong dus:

$$p = \frac{Q}{\pi k} \ln \sqrt{(d_n - x)^2 + y^2} \tag{23}$$

en links van den oorsprong:

$$p = \frac{Q}{\pi k} \ln \sqrt{(d_n - x)^2 + y^2} \tag{24}$$

Zooals reeds in hoofdstuk II is uiteengezet is de potentiaal van een willekeurig punt T gelijk aan de algebraische som van de potentialen, die iedere drain van een oneindige reeks drains aan beide zijden van den oorsprong, op denzelfden onderlingen afstand en met hetzelfde debiet in dit punt zou uitoefenen, indien zij ieder op zich zelf in het stroomingsveld aanwezig zouden zijn. Voor een punt T ($0 \leq x \leq d_0$) is deze potentiaal dus gelijk aan:

$$P_T = \frac{Q}{\pi k} \left\{ \ln \sqrt{(d_0 - x)^2 + y^2} + \ln \sqrt{(d_0 + x)^2 + y^2} + \ln \sqrt{(d_1 - x)^2 + y^2} + \ln \sqrt{(d_1 + x)^2 + y^2} + \ldots\ldots \text{enz.} \right\} \tag{25}$$

waarin de eerste term betrekking heeft op drain A_0; de tweede op drain B_0, de derde op A_1, de vierde op B_1, enz.

Als vergelijkingspunt — dus om een potentiaalverschil te kunnen aangeven — nemen we een punt op den omtrek van drain A_0. Voor den drain A_0 zelf (eerste term) geldt dat $r_0 = \sqrt{(d_0 - x)^2 + y^2} =$ de straal van den drain (feitelijk de straal van de halfcirkelvormige sleuf, waarin de drainbuis

ligt). Voor de overige drains kunnen we echter dit punt steeds laten samenvallen met het middelpunt van drain A_0 of dus steeds $y = 0$ en $x = d_0$ stellen, terwijl ook de andere drains door punten vervangen kunnen worden. Hierdoor, en dat geldt ook voor alle andere berekeningen volgens de radiale methode, zijn deze berekeningen alleen geldig, indien r_0 klein is ten opzichte van l (= drainafstand). De potentiaal van dit punt op den omtrek van den drain A_0 (P_{OM}) is dus gelijk aan:

$$P_{OM} = \frac{Q}{\pi k} \left\{ \ln r_0 + \ln \sqrt{(d_0 + d_0)^2} + \ln \sqrt{(d_1 - d_0)^2} + \ln \sqrt{(d_1 + d_0)^2} + \ln \sqrt{(d_2 - d_0)^2} + \ln \sqrt{(d_2 + d_0)^2} + \ldots \text{enz.} \right\} \tag{26}$$

Is l de onderlinge drainafstand, dan is $d_0 = 0{,}5\ l$; $d_1 = 1{,}5\ l$; $d_2 = 2{,}5\ l$; enz. Na invulling gaat vergelijking 26 over in:

$$P_{OM} = \frac{Q}{\pi k} \left\{ \ln r_0 + \ln l + \ln l + \ln 2l + \ldots\ldots \text{enz.} \right\} \tag{27}$$

Het potentiaalverschil tusschen punt T en den omtrek van drain A_0 is dus:

$$\triangle P = P_T - P_{OM} = \frac{Q}{\pi k} \left\{ \ln \left(\frac{\sqrt{(d_0 - x)^2 + y^2}}{r_0} \right) + \ln \left(\frac{\sqrt{(d_0 + x)^2 + y^2}}{l} \right) + \ln \left(\frac{\sqrt{(d_1 - x)^2 + y^2}}{l} \right) + \ln \left(\frac{\sqrt{(d_1 + x)^2 + y^2}}{2l} \right) + \ldots \text{enz.} \right\} \tag{28}$$

Deze berekeningsmethode werd, voor zoover mij bekend, voor het eerst toegepast op stroomingsvraagstukken, zooals deze bij drainage optreden, door Dr. Ir. J. P. Mazure, ingenieur bij den Waterloopkundigen Dienst van de Zuiderzeewerken en wel in een particulier schrijven aan Dr. Ir. A. J. Zuur, landbouwkundig ingenieur van de Zuiderzeewerken, dat mij ter inzage werd gegeven.

Nu interesseert ons voor de oplossing van het drainagevraagstuk, evenals voor ontwateringsvraagstukken in het algemeen, waarbij de ontwateringssystemen rechtstreeks (en alleen) de grondwaterstanden in den grond door afvloeiing van water **door** den grond naar deze ontwateringssystemen beheerschen, alleen het potentiaalverschil van een punt gelegen op het midden van de verbindingslijn van de drains en een punt op den omtrek van de drains of dus het potentiaalverschil tusschen den oorsprong ($x = 0$ en $y = 0$) en een punt op den omtrek van den drain A_0. Ingevuld in de vergelijking 28 ontstaat na invulling van $d_0 = 0{,}5\ l$; $d_1 = 1{,}5\ l$; $d_2 = 2{,}5\ l$; enz.:

$$\triangle P = \frac{Q}{\pi k} \left\{ \ln \frac{0.5l}{r_0} + \ln \frac{1}{2} + \ln \frac{3}{2} + \ln \frac{3}{4} + \ln \frac{5}{4} + \ln \frac{5}{6} + \ldots \text{enz.} \right\} \tag{29}$$

of

$$\triangle P = \frac{Q}{\pi k}\left(ln\,\frac{l}{2r_0} - 0{,}454\right) = \frac{2{,}3026\,Q}{\pi k}\left(log\,\frac{l}{2r_0} - 0{,}197\right) =$$

$$\frac{2{,}3026.\,s.l}{\pi k}\left(log\,\frac{l}{2r_0} - 0{,}197\right) \qquad (30)$$

waarin „*ln*" de natuurlijke en „*log*" de Briggiaansche (= gewone) logarithmen aangeven, terwijl s het debiet (als een laag water in meters per 24 uur) voorstelt.

Het zal duidelijk zijn, dat de vergelijking 30 ook geldig is in het geval er water boven de drains staat, het phreatisch vlak midden tusschen de drains zich weinig boven het horizontale vlak door de waterspiegels boven de drains (boven iederen drain staat het water evenhoog) verheft *en mits de waterbeweging in dit gedeelte van het stroomingsveld (boven het verbindingsvlak door de drains) verticaal naar beneden gericht is*, aangezien het potentiaalverlies ten gevolge van de verticale strooming boven de drains en tot de drains en midden tusschen de drains en tot het verbindingsvlak door de assen van de drains vrijwel gelijk is, zoodat $\triangle P$ daardoor niet wordt beinvloed. Is de hoogte van het phreatisch vlak boven het vlak door de drains ($= m_0$) veel grooter dan boven de drains ($= n$) *en is ook nu de strooming in dit gedeelte van het stroomingsveld verticaal naar beneden gericht*, dan moet bij $\triangle P$ nog worden opgeteld $\frac{s(m_0-n)}{k}$, aangezien dit potentiaalverschil door het verschil in potentiaalverlies in verticale richting, ten gevolge van de strooming door een kolom van de eenheid van doorsnede en bij een doorgestroomde hoeveelheid water s in 24 uur midden tusschen den drain en ter lengte m_0 resp. boven den drain en met een lengte n, wordt aangegeven (Wet van DUPUIT—DARCY toepassen).

b. Berekening van de potentiaalfunctie door gebruik te maken van poolcoördinaten

De vergelijking 30 hadden we ook langs een veel eenvoudiger weg kunnen afleiden en wel door de vergelijking 20 in pool-coördinaten te laten staan. Voor de potentiaal in een punt T midden op de verbindingslijn van de middelpunten van twee drains is reeds gevonden, dat (vergelijk vergelijking 12):

$$P_T = \frac{Q}{\pi k}\,(ln\,r_1 + ln\,r_2 + ln\,r_3 + ln\,r_4 + \ldots\ \text{enz.}) \qquad (31)$$

waarin r_1, r_2, r_3 r_4, enz. de stralen van de aequipotentiaalcirkels om den drain A_0, B_0, A_1, B_1, enz. en gaande door het betreffende punt voorstellen.

De potentiaal van een punt op den omtrek van den drain A_0 met straal r_0 is dus:

$$P_{OM} = \frac{Q}{\pi k}\,(ln\,r_0 + ln\,r'_2 + ln\,r'_3 + ln\,r'_4 + \ldots\ \text{enz.}) \qquad (32($$

waarin r_0 de straal van den drain A_0 en r'_2, r'_3, r'_4, enz. de stralen van de aequipotentiaalcirkels om de drains B_0, A_1 en B_1, enz. en gaande door het beschouwde punt voorstellen. Het verlangde potentiaalverschil ($\triangle P$) tusschen de punten: O (oorsprong) en een punt op den omtrek van drain A_0 is dus weer:

$$\triangle P = \frac{Q}{\pi k}\left(ln\,\frac{r_1}{r_0} + ln\,\frac{r_2}{r'_2} + ln\,\frac{r_3}{r'_3} + ln\,\frac{r_4}{r'_4} + \ldots\ \text{enz.}\right) \qquad (33)$$

Nu is blijkens figuur 15: $r_1 = r_2 = d_0 = 0{,}5\ l$; $r_3 = r_4 = l + d_0 = 1{,}5\ l$, enz. en $r'_2 = r'_3 = l$; $r'_4 = r'_5 = 2\ l$ enz. Ingevuld in de vergelijking 33 ontstaat:

$$\triangle P = \frac{Q}{\pi k}\left(ln\,\frac{l}{2r_0} + ln\,\frac{0.5l}{l} + ln\,\frac{1.5l}{l} + ln\,\frac{1.5l}{2l} + \ldots\ \text{enz.}\right) \qquad (34)$$

of

$$\triangle P = \frac{Q}{\pi k}\left(ln\,\frac{l}{2r_0} + ln\,\frac{1}{2} + ln\,\frac{3}{2} + ln\,\frac{3}{4} + \ldots\ \text{enz.}\right) \qquad (35)$$

welke vergelijking gelijk is aan de vergelijking 29.

c. Geldigheid van de opgestelde potentiaalfunctie

De bovenstaande oplossingen zijn alleen geldig, indien r_0 klein blijft ten opzichte van l. Zou dit laatste niet het geval zijn, dan mogen de afmetingen van de drains (greppels, slooten, kanalen) niet verwaarloosd worden, d.w.z. niet als punten worden beschouwd, hetgeen bij de bovenbehandelde (en dit zal steeds bij berekeningen volgens de „radiale" methode geschieden) oplossing is gedaan, afgezien dan van den drain, waarop het eene vergelijkingspunt voor het verkrijgen van het potentiaalverschil tusschen de twee eerder genoemde punten is gekozen. Alle in deze publicatie uitgevoerde berekeningen volgens de radiale methode mogen dus niet worden toegepast, indien bijv. breede slooten met een straal grooter dan 0,6 m op 10 m onderlingen afstand, enz. voorkomen (de natte omtrek van de sloot op een halfcirkelvormige sloot omgerekend), of althans geven deze berekeningen dan slechts een ruwe benadering (zie hoofdstuk III).

d. De potentiaalfunctie geldt met voldoende benadering tevens voor niet-halfcirkelvormige ontwateringssystemen

Zooals reeds herhaalde malen terloops is aangeduid, gelden de bovenstaande, evenals de nog te behandelen berekeningen, ook voor greppels, slooten,

kanalen, enz. voor zoover deze althans evenwijdig aan elkaar en op eenzelfden onderlingen afstand liggen en **indien deze onder den waterspiegel een halfcirkelvormigen vorm hebben. Meestal is deze vorm echter anders. Toch blijven deze berekeningen — mits het potentiaalverschil van een punt op voldoenden afstand van de greppels, slooten, kanalen, enz. en een punt op den natten omtrek daarvan wordt beschouwd — ook dan met voldoende benadering gelden: alleen is het noodig den natten omtrek gelijk te stellen aan $\pi\, r$, waarin r de straal van de halfcirkelvormige greppel, sloot, kanaal, enz. voorstelt met eenzelfden natten omtrek als van de beschouwde greppels, slooten, kanalen, enz. (Is de greppel enz. practisch gesproken droog, dan stelt men den platten bodem gelijk aan $\pi\, r$), die dus voor de werkelijk voorkomende greppels, slooten, kanalen in de plaats wordt gedacht.** Hierbij kan worden opgemerkt, dat de natte omtrek van *deze* ontwateringssystemen dus grooter wordt bij een stijgenden waterstand.

We kunnen het bovenstaande nu bewijzen door de berekening ook uit te voeren voor het geval elliptisch gevormde greppels, slooten, kanalen, enz. aanwezig zijn en de grond onder het vlak door den waterspiegel in deze ontwateringssystemen tot onbeperkte diepte homogeen doorlatend blijft, indien in het deel van het stroomgebied boven het vlak door de waterspiegels in deze ontwateringssystemen ook nu een verticaal gerichte strooming optreedt. Figuur 16 geeft een doorsnede loodrecht deze ontwateringssystemen aan.

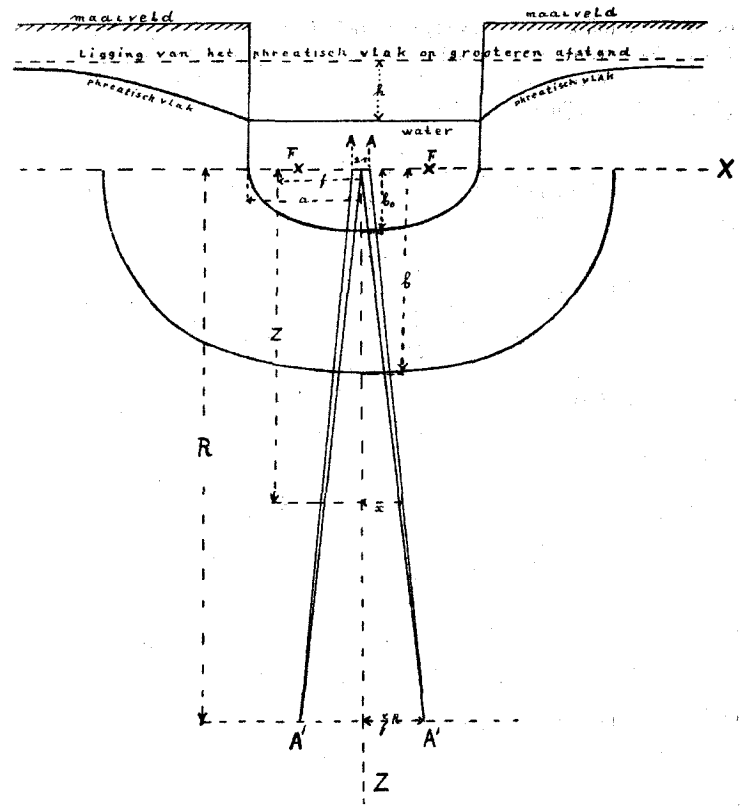
Indien slechts één ellipsvormige sloot aanwezig is, is het potentiaalverschil tusschen een willekeurig punt T en een punt op den omtrek van dit ontwateringssysteem voor te stellen door:

$$\triangle P = \frac{Q}{\pi k}\left(bg\, sinh\, \frac{b}{f} - bg\, sinh\, \frac{b_0}{f}\right) \qquad (36)$$

waarin $2f$ den brandpuntafstand F_1—F_2 van het halfellipsvormige ontwateringssysteem voorstelt; b_0 is de halve korte as van het ontwateringssysteem en b van de ellips om dit halfellipsvormig ontwateringssysteem beschreven met dezelfde brandpunten F_1 en F_2 en gaande door het punt A.

De vergelijking 36 is, naar analogie van de afleiding van de potentiaalfunctie van het stroomingsveld van water naar een cirkelvormigen put met vlakken bodem door FORCHHEIMER (37), als volgt af te leiden:

Stelt figuur 16 een doorsnede loodrecht de sloot met halfellipsvormigen bodem voor, welke zich dus in een homogeen doorlatenden grond tot onbeperkte diepte bevindt, terwijl de grond boven dit halfellipsvormige gedeelte ondoorlatend is, dan is in al de doorsneden loodrecht deze sloot de strooming naar deze sloot dezelfde, d.w.z. de strooming is tweedimensionaal. De bodem van de sloot is een aequipotentiaalvlak; andere confocale ellipsen om de eerstgenoemde ellips vormen dus tevens (in de genoemde doorsneden) de aequipotentiaallijnen. De stroombanen zijn (in deze doorsneden) hyperbolen



Figuur 16

Dwarsdoorsnede door een sloot (kanaal, enz.) met een halfellipsvormigen bodem en in het geval de grond onder dit halfellipsvormige gedeelte tot onbeperkte gedeelte homogeen doorlatend en daarboven ondoorlatend is

(niet in figuur 16 aangegeven). Voor de berekening van h (zie figuur 16) bij een gegeven debiet Q per eenheid van tijd en per strekkenden meter beschouwen we een zeer kleinen bundel stroombanen ter weerszijden van de as, welke bundel dus begrensd wordt door de stroombanen AA'. Legt men een rechthoekig coördinatenstelsel door de lange resp. korte as van de halve ellips, die den slootbodem vormt, terwijl het middelpunt van deze ellips samenvalt met den oorsprong van dit coördinatenstelsel, dan wordt dus een bundel stroombanen (= gedeelte van het stroomingsveld) beschouwd, waarvan de

doorsnede r (bij $z = 0$ en $x = r$) zeer klein is, zoodat in elk geval r klein is ten opzichte van den halven brandpuntsafstand f (zie figuur 16).

De stroombanen (hyperbolen) worden aangegeven door de vergelijking (de hyperbolen zijn confocaal):

$$\frac{x^2}{r^2} - \frac{z^2}{f^2 - r^2} = 1 \tag{37}$$

waarin, aangezien r in het beschouwde geval zeer klein is ten opzichte van f, geschreven mag worden:

$$\frac{x^2}{r^2} - \frac{z^2}{f^2} = 1 \tag{38}$$

waaruit volgt, dat

$$x = r\sqrt{\frac{f^2 + z^2}{f^2}} = r\sqrt{1 + \left(\frac{z}{f}\right)^2} \tag{39}$$

Beschouwen we nu een halfcirkelvormigen cylinder om de sloot of dus in de doorsnede (zie figuur 16) een halven cirkel met een straal R (middelpunt cirkel = middelpunt halve ellips, die den slootbodem vormt), waarvan R zeer groot is, dan kunnen we aannemen, dat deze cirkel (practisch gesproken) een aequipotentiaalvlak is, waardoor dus eveneens een hoeveelheid water Q per eenheid van tijd (en per strekkenden meter) stroomt[1]).

Volgens de vergelijking $\frac{x^2}{r^2} - \frac{z^2}{f^2} = 1$, sluiten de asymptoten (in de doorsnede) aan de beschouwde begrenzingsstroombanen AA' een hoek $2\,\varphi$ in, waarvan tangens φ gelijk is aan $\frac{r}{f}$ (r is klein ten opzichte van f). Deze asymptoten snijdt den beschouwden cirkel met straal R volgens een lijn, waarvan de lengte gelijk is aan $2 \operatorname{tg} \varphi \,.\, R = \frac{2rR}{f}$. Is nu R zeer groot, dan kan op den afstand R van den oorsprong worden aangenomen, dat de asymptoten daar met de stroombanen AA′ samenvallen, zoodat aldaar dus $\frac{2rR}{f}$ als de doorsnede van den beschouwden stroombanenbundel kan worden beschouwd. Aangezien verder bij een groote waarde van R kan worden aangenomen, dat door gelijke lengten van den cirkel (per strekkenden meter) per tijdseenheid evenveel water zal vloeien, zal dus de hoeveelheid water $\triangle q$, die per tijdseenheid en per strekkenden meter door het gebied, begrensd door de stroombanen AA″ stroomt, zich als volgt tot het totale debiet per strekkenden meter en per tijdseenheid verhouden, nl. als:

$$\triangle q : Q = \frac{2rR}{f} : \pi R \text{ of } \triangle q = \frac{2r}{\pi f} \cdot Q \tag{40}$$

[1]) Aangezien f steeds gelijk blijft, naderen de ellipsen des te meer den cirkelvorm, naarmate a en b grooter worden, aangezien steeds $f^2 = a^2 - b^2$.

Op een willekeurig punt met ordinaat z (binnen dezen bundel stroombanen) is dus de stroomsnelheid (= debiet per eenheid van doorsnede loodrecht de stroomrichting):

$$V_x = \frac{\triangle q}{2x} = Q \cdot \frac{r}{\pi f x} \tag{41}$$

Nu is x gelijk aan $r\sqrt{1 + \left(\frac{z}{f}\right)^2}$, zoodat

$$V_x = Q \frac{1}{\pi f \sqrt{1 + \left(\frac{z}{f}\right)^2}} \tag{42}$$

In een klein stukje van den beschouwden stroombaanbundel dz in de richting van de strooming is dus de verandering van de potentiaal dp en aangezien

$$V_x = k\frac{dp}{dz} \text{ of } dp = \frac{V_x dz}{k} \tag{43}$$

(de stroomrichting kan als zuiver verticaal worden aangenomen) is dus:

$$dp = \frac{Q\,dz}{\pi k f \sqrt{1 + \left(\frac{z}{f}\right)^2}} \tag{44}$$

Na integratie van $z = b_0$ tot $z = b$, ontstaat:

$$\triangle P = \frac{Q}{\pi k f} \cdot f \cdot \left(bg\ sinh\ \frac{b}{f} - bg\ sinh\ \frac{b_0}{f}\right), \text{ of} \tag{45}$$

$$\triangle P = \frac{Q}{\pi k}\left(bg\ sinh\ \frac{b}{f} - bg\ sinh\ \frac{b_0}{f}\right) \tag{46}$$

Heeft het ontwateringssysteem een vlakken bodem en bevindt zich hierin vrijwel geen water (of ligt deze bodem juist op een homogeen doorlatenden grond tot onbeperkte diepte, terwijl de grond daarboven ondoorlatend is), dan is $b_0 = 0$ (de ellips nadert tot een rechte lijn) en luidt de formule dus:

$$\triangle P = \frac{Q}{\pi k}\, bg\ sinh\ \frac{b}{f} \tag{47}$$

Aangezien $f^2 = a_0^2 - b_0^2$, waarin a_0 de halve lange as en b_0 de halve korte as voorstelt en zoo ook $f^2 = a^2 - b^2$, kan de vergelijking 46 ook geschreven worden als:

$$\triangle P = \frac{Q}{\pi k}\left(bg\ sinh \sqrt{\left(\frac{a^2 - f^2}{f^2}\right)} - bg\ sinh \sqrt{\left(\frac{a_0^2 - f^2}{f^2}\right)}\right) \tag{48}$$

of dus als:

$$\triangle P = \frac{Q}{\pi k}\left(bg\ cosh\ \frac{a}{f} - bg\ cosh\ \frac{a_0}{f}\right) \tag{49}$$

Voor een halfcirkelvormige sloot zou deze formule luiden:

$$\triangle P = \frac{Q}{\pi k} \, ln \, \frac{r}{r_o} \qquad (50)$$

Dat de vergelijking 50 slechts een bijzonder geval is van de vergelijking 46 of 49, kan op de volgende wijze worden aangetoond:

Is $bg \sinh \frac{b}{f} = x$, dan is $\sinh x = \frac{b}{f}$; evenzoo is $bg \cosh \frac{a}{f} = y$, dan is $\cosh y = \frac{a}{f}$. Verder is $\sinh x = \frac{e^x - e^{-x}}{2}$; $\cosh x = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$ (38); $bg \sinh x = ln \, (x + \sqrt{x^2 + 1})$ en $bg \cosh x = ln \, (x + \sqrt{x^2 - 1})$. De laatste waarde in vergelijking 49 (op analoge wijze is dit ook voor de vergelijking 36 aan te toonen) ingevuld geeft:

$$\triangle P = \frac{Q}{\pi k} \left\{ ln \left(\frac{a}{f} + \sqrt{\frac{a^2}{f^2} - 1} \right) - ln \left(\frac{a_o}{f} + \sqrt{\frac{a_o^2}{f^2} - 1} \right) \right\} \qquad (51)$$

Na vereenvoudiging ontstaat hieruit:

$$\triangle P = \frac{Q}{\pi k} \, ln \left(\frac{a + \sqrt{a^2 - f^2}}{a_o + \sqrt{a_o^2 - f^2}} \right) \qquad (52)$$

Indien een ellips overgaat in een cirkel, beteekent dit, dat de twee brandpunten samenvallen, of dus dat $2f = 0$ of dus $f = 0$ en verder, dat $a = r$ en $a_o = r_o$ wordt. Dit laatste toegepast op de vergelijking 52 geeft:

$$\triangle P = \frac{Q}{\pi k} \, ln \, \frac{r + \sqrt{r^2}}{r_o + \sqrt{r_o^2}} = \frac{Q}{\pi k} \, ln \, \frac{2r}{2r_o} = \frac{Q}{\pi k} \, ln \, \frac{r}{r_o} \qquad (53)$$

welke vergelijking dus gelijk is aan de vergelijking 50.

Zijn nu een (theoretisch) oneindige reeks half-ellipsvormige ontwateringssystemen op gelijken onderlingen afstand l in een homogeen, tot onbeperkte diepte doorlatenden grond aanwezig, en voert ieder van deze per eenheid van tijd dezelfde hoeveelheid water af, dan is het potentiaalverschil tusschen een punt op de verbindingslijn door de waterspiegels in de halfellipsvormige ontwateringssystemen en midden tusschen de middelpunten daarvan, en een punt op den natten omtrek van één van de halfellipsvormige ontwateringssystemen, met behulp van de spiegelmethode op dezelfde wijze af te leiden, als dit voor de drains reeds vroeger is gedaan en waarbij ook nu de afmetingen van alle halfellipsvormige ontwateringssystemen behalve die een, waarop een van de punten is gelegen, voor de opstelling van het verlangde potentiaalverschil, verwaarloosd worden, hetgeen ook nu alleen toelaatbaar is, indien a_o en b_o klein zijn ten opzichte van l (= onderlinge afstand van de ont-

wateringssystemen). Deze formule luidt (alleen formule 49 is hiervoor bruikbaar, aangezien a en a_0 bekend zijn):

$$\triangle P = \frac{Q}{\pi k} \left\{ bg \cosh \frac{l}{2f} - bg \cosh \frac{a_o}{f} + bg \cosh \frac{0.5l}{f} - bg \cosh \frac{l}{f} + bg \cosh \frac{1.5l}{f} - bg \cosh \frac{l}{f} + bg \cosh \frac{1.5l}{f} - bg \cosh \frac{2l}{f} + \ldots \text{ enz.} \right\} \qquad (54)$$

Bedenken we nu, dat $bg \cosh x = ln(x + \sqrt{x^2 - 1})$, dan is, daar f klein is ten opzichte van l,

$$bg \cosh \frac{0.5l}{f} - bg \cosh \frac{l}{f} = ln \left\{ \frac{0.5l}{f} + \sqrt{\left(\frac{(0.5l)^2}{f^2} - 1 \right)} \right\} - ln \left\{ \frac{l}{f} + \sqrt{\left(\frac{l^2}{f^2} - 1 \right)} \right\} = ln \, \frac{0.5l + \sqrt{(0.5l)^2 - f^2}}{l + \sqrt{l^2 - f^2}} = ln \, \frac{l}{2l} = ln \, \frac{1}{2} \qquad (55)$$

Evenzoo kan worden aangetoond, dat met voldoende benadering $bg \cosh \frac{1.5l}{f} - bg \cosh \frac{l}{f} = ln \, \frac{3}{2}$, enz. Dit wil dus zeggen, dat vergelijking 54 met voldoende benadering vervangen kan worden door:

$$\triangle P = \frac{Q}{\pi k} \left(bg \cosh \frac{0.5l}{f} - bg \cosh \frac{a_o}{f} + ln \frac{1}{2} + ln \frac{3}{2} + ln \frac{3}{4} + \ldots \text{ enz.} \right) \qquad (56)$$

welke vergelijking dus alleen in de twee eerste termen verschillend is van de vergelijking 29 of 35. Er blijft dus slechts nog over aan te toonen, dat $bg \cosh \frac{0{,}5l}{f} - bg \cosh \frac{a_o}{f}$ = (met voldoende benadering) $ln \, \frac{0.5l}{r_o}$, indien $\pi \, \frac{a_o + b_o}{2} = \pi \, r_o$ of $\frac{a_o + b_o}{2} = r_o$ wordt gesteld.

De halve omtrek van een ellips is immers bij benadering, en als a_o en b_o niet te veel verschillen, gelijk aan $\pi \, \frac{a_o + b_o}{2}$. Nu is:

$$bg \cosh \frac{0.5l}{f} - bg \cosh \frac{a_o}{f} = ln \left\{ \frac{l}{2f} + \sqrt{\frac{l^2}{4f^2} - 1} \right\} - ln \left\{ \frac{a_o}{f} + \sqrt{\left(\frac{a_o^2}{f^2} - 1 \right)} \right\} = ln \, \frac{l + \sqrt{(l^2 - 4f^2)}}{2a_o + 2\sqrt{(a_o^2 - f^2)}} \qquad (57)$$

In den term $\sqrt{l^2 - 4f^2}$ is $4f^2$ klein ten opzichte van l^2, zoodat bij benadering:

$$ln \, \frac{l + \sqrt{(l^2 - 4f^2)}}{2a_o + 2\sqrt{(a_o^2 - f^2)}} = \text{(bij benadering)} \; ln \, \frac{2l}{2a_o + 2\sqrt{(a_o^2 - f^2)}} =$$

$$= ln \frac{2l}{2\left\{a_o + \sqrt{(a_o^2 - a_o^2 + b_o^2)}\right\}} = ln \frac{l}{a_o + b_o} \qquad (58)$$

Aangezien verder $r_o = \frac{a_o + b_o}{2}$ gesteld is, is dus $ln \frac{l}{a_o + b_o} = ln \frac{l}{2r_o}$, waarmede dus practisch gesproken het bewijs geleverd is, dat bij de berekening de halfelliptisch gevormde ontwateringssystemen door halfcirkelvormige ontwateringssystemen vervangen mogen worden gedacht, die denzelfden natten omtrek hebben als de halfelliptische ontwateringssystemen, mits echter de afmetingen van deze ontwateringssystemen (dus a_o, b_o en f) klein zijn ten opzichte van den onderlingen afstand en mits (zooals hier het geval is) een potentiaalverschil beschouwd wordt van een punt op een voldoenden afstand van het beschouwde ontwateringssysteem en een punt op den natten omtrek van dit ontwateringssysteem. [1]) Dit is tevens de reden, waarom ook voor de in de volgende paragrafen te bespreken berekeningen, waarbij de strooming wordt samengesteld uit een radiaal en een evenwijdig rechtlijnig gedeelte, halfellipsvormige ontwateringssystemen door halfcirkelvormige mogen worden vervangen gedacht. Zou de berekening in § 3 (zie verder hieronder) met halfellipsvormige ontwateringssystemen worden uitgevoerd, dan zouden hier — afgezien van termen, die met een zeer hooge benadering in de overeenkomstige termen, die bij de berekening met halfcirkelvormige ontwateringssystemen ontstaan, kunnen worden veranderd — nog de termen voorkomen:

$$bg\ cosh \frac{0{,}707\ H}{f} - bg\ cosh \frac{a_o}{f} = ln \frac{0{,}707\ H + \sqrt{\{(0{,}707\ H)^2 - f^2\}}}{a_o + \sqrt{(a_o^2 - f^2)}}$$

Aangezien de afmetingen van de halfellipsvormige ontwateringssystemen klein moeten zijn ten opzichte van H, zal dus a_o en b_o en dus zeker f klein zijn ten opzichte van H, zoodat f kan worden verwaarloosd. Verder is $\sqrt{a_o^2 - f^2} = b_o$, zoodat bovenstaande formule overgaat in:

$$ln \frac{0{,}707\ H + \sqrt{\{(0{,}707\ H)^2 - f^2\}}}{a_o + b_o} = ln \frac{2 \bullet 0{,}707\ H}{a_o + b_o} = ln \frac{0{,}707\ H}{r_o},$$

aangezien r_o = (bij benadering) $\frac{a_o + b_o}{2}$ kan worden gesteld. Hiermede (zie ook § 3 van dit hoofdstuk) is tevens weer aangetoond, dat ook voor dit type

[1]) Verschillen a_0 en b_0 meer dan in de verhouding 2 : 1, dan gebruike men voor den omtrek van de ellips liever de iets nauwkeuriger benadering: omtrek ellips = $\pi \frac{a_o + b_o}{2} \left(1 + \frac{(a_o - b_o)^2}{4(a_o + b_o)^2}\right)$

met de berekening van halfcirkelvormige ontwateringssystemen kan worden volstaan. [1])

§ 2. Opstelling van de potentiaalfunctie voor het geval de grond onder het verbindingsvlak door de assen van de drains tot een zekere diepte homogeen doorlatend is

We zullen nu het geval behandelen, dat de grond onder het verbindingsvlak door de assen van de drains tot een zekere diepte homogeen doorlatend is en het stroomingsveld dus van onderen door den bovenkant van een horizontaal gelegen ondoorlatende laag wordt afgesloten. Ook nu zullen we veronderstellen, dat het phreatisch vlak zich slechts weinig boven genoemd verbindingsvlak verheft.

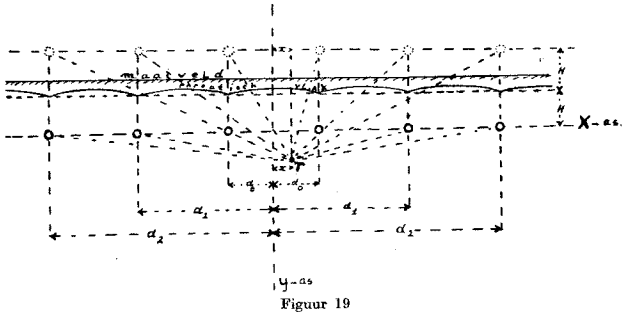
Zooals reeds in hoofdstuk II is aangegeven, bestaat de oplossing hierin, dat we onder den bovenkant van de ondoorlatende laag een denkbeeldige reeks drains op denzelfden onderlingen afstand en op dezelfde diepte onder dezen bovenkant, als de werkelijk bestaande reeks er boven ligt, zullen veronderstellen, waarbij iedere drain in de eenheid van tijd eveneel water afvoert als iedere drain van de werkelijk bestaande reeks. De grond onder den bovenkant van de ondoorlatende laag tot het verbindingsvlak door de assen van de denkbeeldige drains heeft daarbij dezelfde homogene doorlatendheid als de grond daarboven, terwijl verder wordt aangenomen, dat zich onder dit verbindingsvlak door de denkbeeldige reeks drains een overeenkomstig phreatisch vlak bevindt als boven het overeenkomstige verbindingsvlak door de werkelijk bestaande drains, met dien verstande echter, dat voor de berekening van den invloed op de potentiaal in een bepaald punt binnen het stroomingsgebied van de werkelijk bestaande reeks, welke potentiaal door de werkelijk bestaande reeks wordt uitgeoefend, de grond onder het verbindingsvlak door de assen van de werkelijk bestaande reeks tot onbeperkte diepte homogeen doorlatend wordt verondersteld, terwijl voor de berekening van de potentiaal in hetzelfde punt, welke potentiaal door de denkbeeldige reeks drains wordt uitgeoefend, wordt aangenomen, dat de grond (feitelijk ruimte) boven het verbindingsvlak door de assen van de denkbeeldige reeks drains tot onbeperkte hoogte daar boven homogeen doorlatend blijft en deze doorlatendheid in beide gevallen dus even groot is.

Aan de randvoorwaarden, nl., dat de bovenkant van de ondoorlatende laag een stroomvlak is, evenals aan de verdere randvoorwaarden (39) (zie ook hoofdstuk II), is voldaan, indien de potentiaal in ieder punt van het werkelijk bestaand stroomingsveld wordt beschouwd als te zijn de algebraïsche som van de potentialen, die ieder van de drains van de oneindige

[1]) Zie de noot op blz. 570.

volstaan met voor het laatste geval zoo exact mogelijk het potentiaalverschil tusschen een punt op den omtrek van een drain en een punt midden op de verbindingslijn, die de centra van den beschouwden drain met den volgenden verbindt, te berekenen.

Figuur 19 geeft een doorsnede loodrecht de drains van dit geval aan. Aangezien het phreatisch vlak midden tusschen de drains maar weinig hooger



Figuur 19

Dwarsdoorsnede door de drains in het geval de grond tot onbeperkte diepte onder de drains homogeen doorlatend is; er zich echter grondwater boven de drains bevindt. In deze figuur is ook de gespiegelde drainreeks aangegeven

is dan boven de drains kunnen we hier veronderstellen, dat het horizontale vlak door den grondwaterspiegel **boven** de drains de bovenbegrenzing van het stroomingsgebied vormt.

Voor de berekening van het verlangde potentiaalverschil tusschen de genoemde punten maken we ook nu gebruik van de spiegelmethode en denken ons een denkbeeldige reeks drains op dezelfde hoogte boven het genoemde vlak door de grondwaterspiegels boven de drains als de werkelijke reeks er onder ligt. Ieder van deze denkbeeldige drains laten we evenveel water per tijdseenheid afvoeren als iedere drain van de werkelijk bestaande reeks, terwijl de drainafstand l ook voor beide reeksen dezelfde is. Voor de berekening moeten we nu veronderstellen, dat voor iederen drain van beide reeksen het stroomingsveld zich naar alle kanten onbeperkt uitstrekt. De grondformule voor één drain luidt derhalve (zie ook vergelijking 9):

$$p = \frac{Q}{2\pi k} \ln r \tag{79}$$

Aangezien de berekening van het verlangde potentiaalverschil ($\triangle$ P) volkomen analoog is aan die, in § 2 besproken, kan dan ook direct het ver-

kregen resultaat worden aangegeven, waarbij kan worden opgemerkt, dat het potentiaalverschil juist tweemaal zoo klein is als in het geval van § 2 werd berekend, indien de drainafstand l, het debiet Q en de factor H dezelfde zijn, waarbij H in dit geval de hoogte van den grondwaterspiegel boven de drains en boven het vlak door de middelpunten van de drains voorstelt (zie figuur 19). Dit potentiaalverschil is gelijk aan (vergelijk vergelijking 67):

$$\triangle P = \frac{2{,}3026\ sl}{2\pi k}\left(\log \frac{l}{2r_0} - 0.197\right) + \frac{2{,}3026\ sl}{2\pi k}\left\{\log \sqrt{\left(\frac{\frac{1}{4}l^2 + 4H^2}{4H^2}\right)} + \log \sqrt{\left(\frac{\frac{1}{4}l^2 + 4H^2}{l^2 + 4H^2}\right)} + \log \sqrt{\left(\frac{\frac{9}{4}l^2 + 4H^2}{l^2 + 4H^2}\right)} + \log \sqrt{\left(\frac{\frac{9}{4}l^2 + 4H^2}{4l^2 + 4H^2}\right)} + \ldots\ldots \text{enz.}\right\}, \tag{80}$$

waarin de voorkomende letters l, s, k en r_0 de gewone beteekenis hebben. We kunnen vergelijking 80 ook schrijven als:

$$\triangle P = \frac{sl}{k} \cdot E \tag{81}$$

waarin E de rest van formule 80 voorstelt.

Ofschoon ook formule 80 alleen geldig is, indien r_0 klein blijft ten opzichte van H, blijft deze formule ook, wanneer dit niet geheel meer het geval is, toch veel juistere resultaten geven dan de formule 67 voor het desbetreffende geval, aangezien hier althans met groote benadering blijft gelden, dat door ieder aequipotentiaalvlak om iederen drain en gelegen binnen het stroomingsgebied van den beschouwden drain per tijdseenheid practisch gesproken evenveel water stroomt.

HOOFDSTUK IV

Vereenvoudiging van de in hoofdstuk III aangegeven berekeningen

A. *Ontwatering*

§ 1. UITEENZETTING VAN DE WIJZE, WAAROP MEN DE BEREKENINGEN KAN VEREENVOUDIGEN DOOR GEBRUIK TE MAKEN VAN TABELLEN, IN HET GEVAL DE GROND HOMOGEEN DOORLATEND IS EN DE STROOMING BOVEN HET VLAK DOOR DE ASSEN VAN DE DRAINS RESP. DOOR DE WATERSPIEGELS IN ANDERE ONTWATERINGSSYSTEMEN MAG WORDEN VERWAARLOOSD

De in hoofdstuk III aangegeven berekeningen zijn te ingewikkeld en nemen te veel tijd in beslag om anders dan bij uitzondering voor practische toepassing in aanmerking te komen.

Beschouwen we nu nog eens de formule, die geldt voor het geval de grond onder de drains of onder het vlak door de waterspiegels in andere ontwateringssystemen tot onbeperkte diepte homogeen doorlatend blijft en het phreatisch vlak zich weinig boven het vlak door de assen van de drians resp. boven het vlak door de waterspiegels in andere ontwateringssystemen verheft. Deze formule luidt dus (zie hoofdstuk III, § 1):

$$\triangle P = \frac{2{,}3026\ sl}{\pi k}\left(log\ \frac{l}{2r_0} - 0{,}197\right) = \frac{sl}{k} \cdot A \qquad (82)$$

waarin A de rest van de formule voorstelt. We kunnen nu den factor A voor verschillende waarden van r_0 en l uitrekenen, hetgeen in tabel 1 in diverse gevallen is geschied.

Komt op een diepte H onder het vlak door de assen van de drains resp. onder het vlak door de waterspiegels in andere ontwateringssystemen (bij practisch droge greppels is dit de bodem) een ondoorlatende laag voor, is de grond tot deze diepte homogeen doorlatend en verheft zich ook nu het phreatisch vlak slechts weinig boven het vlak door de assen van de drains resp. boven het vlak door de waterspiegels in andere ontwateringssystemen, dan wordt (zie hoofdstuk III) het verlangde potentiaalverschil aangegeven door de formule:

$$\triangle P = \frac{sl}{k}(B + C) = \frac{sl}{k} \cdot D \qquad (83)$$

Ook nu kunnen we de factoren B en C voor verschillende waarden van r_0, l en H uitrekenen. Als voorbeeld is in tabel 2 voor verschillende waarden van l en H en voor $r_0 = 0{,}03$ m de factor B en in tabel 3 voor verschillende waarden van l en H de factor C berekend, terwijl in tabel 4 de som van de factoren B + C = factor D, eveneens dus voor $r_0 = 0{,}03$ m, is aangegeven. Tevens zijn in deze laatste tabel ook de waarden van A, of dus de waarden van B + C voor H = oneindig (H = ∞), en eveneens geldend voor $r_0 = 0{,}03$ m, aangegeven. Uit deze tabel 4 blijkt, dat voor alle waarden van l vanaf een bepaalde waarde van H, afhankelijk van de waarde van l, de som van de factoren B + C = factor D tenslotte practisch gelijk wordt aan de waarde van den factor A = de waarde van dezen factor D voor H = oneindig. Dit wil zeggen, dat vanaf een zekere diepte, afhankelijk van den afstand der ontwateringssystemen, het practisch geen verschil meer maakt of de grond nog doorlatend dan wel ondoorlatend is. Deze diepte, waarop dit het geval is, is steeds ongeveer: H = ongeveer 0,25 l (zie ook de later te bespreken tabellen 5). Hiermede is dus tevens een automatische overgang van deze twee berekeningswijzen verkregen. Ditzelfde, en wel eveneens voor H = ongeveer 0,25 l, geldt ook voor andere waarden van r_0.

Ofschoon de bovengenoemde tabellen, die natuurlijk voor verschillende waarden van r_0-waarden zijn uitgerekend, de berekeningen reeds aanmerkelijk vereenvoudigen — door intrapolatie (desnoods grafisch) zijn voor tusschenliggende waarden van r_0, l of H de waarden van de som van de factoren B + C met voldoende nauwkeurigheid te verkrijgen — vormen deze tabellen toch een onvoldoende vereenvoudiging en wel doordat met 3 feiten geen rekening is gehouden, n.l.:

1. Er is geen rekening gehouden met de mogelijkheid, dat de welving van het phreatisch vlak boven het vlak door de assen van de drains resp. door de waterspiegels in andere ontwateringssystemen **niet** te verwaarloozen is.

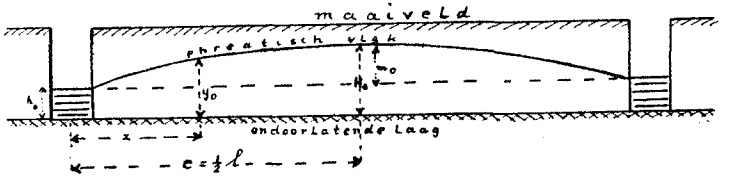
2. Indien H klein wordt, moet ook voor drains ten slotte de formule, waarmede het verlangde potentiaalverschil wordt berekend, overgaan in (zie ook hieronder en de in noot 1 genoemde literatuur blz. 465 en 466):

$$s = \frac{k\,(H_0^2 - h_0^2)}{e^2} = \frac{4k\,(H_0^2 - h_0^2)}{l^2} \qquad (84)$$

waarin l den drainafstand, resp. den afstand van de andere ontwateringssystemen voorstelt en H_0 en h_0 resp. de hoogteligging van het phreatisch vlak midden tusschen de drains (midden tusschen de andere ontwateringssystemen) en boven de drains (in de andere ontwateringssystemen) en boven den bovenkant van de ondoorlatende laag voorstelt. Het is nu niet duidelijk, wanneer men de formule 84 dan wel de formule 83 moet toepassen.

3. Er is geen rekening gehouden met heterogeen doorlatende gronden.

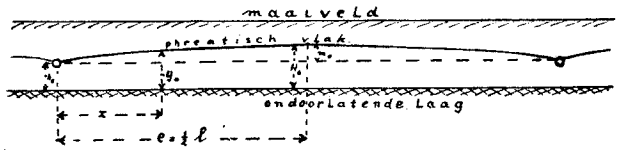
Om nu in de eerste plaats aan het in sub 2 genoemde bezwaar tegemoet te komen, zullen we eerst nog eens de vergelijking afleiden voor het geval met hooge benadering een rechtlijnig horizontale strooming aangenomen mag worden. Dit is het geval, indien greppels met loodrechte wanden reiken tot den bovenkant van de ondoorlatende laag, zooals in figuur 20 (doorsnede loodrecht deze greppels) is aangegeven. Dit blijft ook het geval voor drains



Figuur 20

Dwarsdoorsnede van het geval, dat greppels met rechtstandige wanden juist tot den bovenkant van de ondoorlatende laag reiken en de grond daarboven homogeen doorlatend is

— ook als de ondoorlatende laag niet te diep onder het vlak door de drains ligt — (figuur 21) of voor ontwateringssystemen met schuine wanden. In dit



Figuur 21

Dwarsdoorsnede van het geval, dat de drains op geringe hoogte boven den bovenkant van de ondoorlatende laag liggen en de grond daarboven homogeen doorlatend is

geval is het verhang aan te geven door $\frac{dy}{dx}$ en geldt dus de reeds vroeger afgeleide betrekking (zie vergelijking 71):

$$q_x = Q\,\frac{e - x}{e} = k\,y\,\frac{dy}{dx} \qquad (85)$$

waarin Q dus het debiet voorstelt, dat van één zijde en per strekkenden meter in de eenheid van tijd in de greppel stroomt; e = halve drainafstand = 0,5 l; q_x is de hoeveelheid water, die per tijdseenheid door een loodrechte doorsnede van een doorsnede y, per strekkenden meter en op een afstand x uit den rand van de greppel vloeit. Geïntegreerd van $x = 0$ tot $x = e$ en $y = h_0$ tot $y = H_0$ ontstaat hieruit:

$$Q = \frac{k\,(H_0^2 - h_0^2)}{e} \text{ of } s = \frac{k\,(H_0^2 - h_0^2)}{e^2} = \frac{4k\,(H_0^2 - h_0^2)}{l^2} \qquad (86)$$

waarin H_0 en h_0 de ligging van het phreatisch vlak midden tusschen de greppels resp. van den waterspiegel in de greppels boven den bovenkant van de ondoorlatende laag aangeven (zie figuur 20), en aangezien $s = Q\,.\,e$. Noemen we nu $m_0 = H_0 - h_0$ (zie figuur 20), dan is de vergelijking 86 ook te schrijven als:

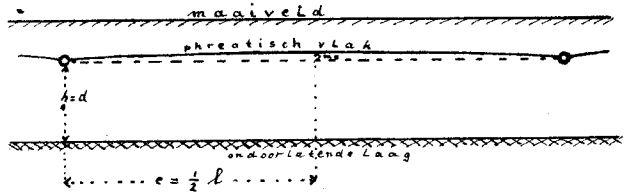
$$s = \frac{4k\,(H_0 + h_0)\,(H_0 - h_0)}{l^2} = \frac{4k\,(2h_0 + m_0)\,m_0}{l^2} = \frac{8kh_0\,m_0 + 4km_0^2}{l^2} \qquad (87)$$

Is nu m_0 klein, of m. a.w. is de welving van het phreatisch vlak boven het vlak door de waterspiegels in de greppels en dus de factor 4 km_0^2 te verwaarloozen klein, of is de stroming in het stroomingsveld boven dit laatste vlak zuiver verticaal en is het potentiaalverlies in deze richting en in het gedeelte van het stroomingsveld boven genoemd vlak te verwaarloozen, zooals

we ook voor de (meeste) berekeningen in hoofdstuk III hebben verondersteld, dan is dus:

$$s = \frac{8kdm_0}{l^2} \text{ of } m_0 = \frac{sl^2}{8kd} \qquad (88)$$

waarin $d = h_0$ de verticale afstand van den waterspiegel in de greppels of dergelijke ontwateringssystemen, resp. bij drains de verticale afstand van het vlak door de drains, tot den bovenkant van de ondoorlatende laag (zie figuur 22) voorstelt.



Figuur 22

Dwarsdoorsnede van het geval, dat de drains op relatief geringe hoogte boven den bovenkant van de ondoorlatende laag liggen, de grond daarboven homogeen doorlatend is en de stroming boven het vlak door de assen van de drains te verwaarloozen gering is

Wanneer we nu eens het geval beschouwen, dat drains of andere ontwateringssystemen aanwezig zijn in een tot onbeperkte diepte homogeen doorlatenden grond en ook nu de stroming tengevolge van de geringe welving van het phreatisch vlak boven het vlak door de assen van de drains resp. boven het vlak door de waterspiegels in andere ontwateringssystemen te verwaarloozen klein is, of dus dat vergelijking 82 geldt, dan kunnen we ons de vraag stellen, hoe dik een laag grond van dezelfde doorlatendheid onder het vlak door de drains resp. onder het vlak door de waterspiegels in andere ontwateringssystemen zou moeten zijn, waarbij deze drains of andere ontwateringssystemen door greppels met loodrechte wanden op denzelfden onderlingen afstand als de beschouwde drains, enz. en reikende tot den (fictieven) bovenkant van de ondoorlatende laag vervangen moeten worden gedacht, opdat bij hetzelfde potentiaalverschil $\triangle P = H_0 - h_0 = m_0$ **evenveel** water naar deze greppels per tijdseenheid vloeit. Noemen we deze dikte d, die ook in formule 88 is opgenomen, dan is dus (zie ook vergelijking 82):

$$\triangle P = \frac{sl}{k}\,A = \frac{sl^2}{8kd} \text{ of } d = \frac{l}{8A} \qquad (89)$$

De berekende dikte d is dus de dikte van een soort aequivalent-laag, waardoor onder overigens gelijke omstandigheden en bij gebruik van rechthoekige

greppels evenveel water per tijdseenheid wordt afgevoerd (zie ook de in noot 1, blz. 559 genoemde literatuur; de aldaar besproken factor G is gelijk aan $d \,.\, k$, waarin d dezelfde beteekenis heeft als hier).

Ditzelfde kan men ook toepassen in het geval op een bepaalde diepte H onder het verbindingsvlak door de assen van de drains resp. door de waterspiegels in andere ontwateringssystemen een ondoorlatende laag voorkomt en men het potentiaalverschil berekent door de samenstelling van een radiaal en een horizontaal rechtlijnig gedeelte. In dat geval is dus bij een homogeen doorlatenden grond (zie ook vergelijking 83):

$$\frac{sl}{k}\,(\mathrm{B} + \mathrm{C}) = \frac{sl^2}{8kd} \text{ of } d = \frac{l}{8\,(\mathrm{B} + \mathrm{C})} = \frac{l}{8\mathrm{D}} \qquad (90)$$

Tenslotte is er reeds vaker op gewezen, dat, indien de ondoorlatende laag op geringe diepte onder het vlak door de assen van de drains resp. onder het vlak door de waterspiegels in andere ontwateringssystemen voorkomt, ook de formule 88 geldig is, d. w. z., dat $d = h_0 = \mathrm{H}$ = de loodrechte afstand van het verbindingsvlak door de assen van de drains resp. door de waterspiegels in andere ontwateringssystemen tot den bovenkant van de ondoorlatende laag. Dit wil dus zeggen, dat de waarde van den factor d, berekend uit de factoren B + C (= factor D), zooals in vergelijking 90 is aangegeven, ten slotte, bij kleiner wordende H, gelijk moet worden aan H. Hiermede is dus tevens verkregen, dat automatisch voor alle waarden van H van de eene op de andere berekeningswijze wordt overgegaan, indien steeds de formule 88 $\left(\text{dus } m_0 = \frac{sl^2}{8kd}\right)$ wordt toegepast en hierin een waarde van den factor d wordt ingevoerd, die uit tabellen moet zijn af te lezen.

In de tabellen 5 is nu de waarde van den factor d voor diverse r_0-waarden (straal halfcirkelvormige, of halfcirkelvormig gedachte, ontwateringssystemen) en voor verschillende H- en l-waarden uitgerekend. Voor de tabellen 5-1 tot en met 5-8 zijn ten behoeve van het berekenen van drain- en greppelafstanden diverse tusschenliggende waarden van d (cursief gedrukt) uit de berekende waarden (gewoon gedrukt) door grafische intrapolatie bepaald. Hierbij werd niet verder gegaan dan tot $r_0 = 0{,}10$ m. In de tabellen 5-9 tot en met 5-31 zijn alleen de berekende waarden van d opgenomen; zoo noodig kunnen daaruit door gewone of door grafische intrapolatie (afhankelijk van de gewenschte nauwkeurigheid) de d-waarden voor tusschenliggende waarden van r_0, l of H worden afgeleid.

Beschouwen we nu eens tabel 5-1, die dus geldt voor $r_0 = 0{,}03$ m, dan blijkt, dat, als l (= afstand ontwateringssystemen) 5 m en H (ligging ondoorlatende laag onder het vlak door de assen van de drains resp. onder het vlak

door de waterspiegels in andere ontwateringssystemen) gelijk 0,5 m is, de waarde van den factor d gelijk is aan 0,36, d. w. z., dat d nog niet gelijk genomen mag worden aan H. Hadden we d berekend voor een waarde van H = 0,25 m, dan was voor d een waarde gevonden, die slechts weinig van 0,25 verschillend was geweest. Is H daarentegen 1,25, dan is d 0,48 (bij $l = 5$ m) of practisch (de cijfers zijn afgerond) gelijk aan de waarde, die d heeft — n.l. 0,49 —, indien de grond tot onbeperkte diepte doorlatend is, vandaar dan ook de verticale pijl in de kolom voor $l = 5$ m van H = 1,25 en $d = 0{,}48$ tot H = ∞ en $d = 0{,}49$. Hieruit volgt dus tevens, dat het in het gegeven geval practisch van geen belang meer is, of de grond op meer dan 1,25 m nog al of niet doorlatend is, aangezien voor H = 1,25 de waarde van d reeds practisch gelijk is aan de maximale waarde van d voor H = ∞ (d kan dus kleiner of hoogstens gelijk H, echter *nooit* grooter dan H zijn).

Is $l = 50$ m, dan is voor H = 0,5 m de factor $d = 0{,}48$ of practisch gelijk aan H, wat dus ook te verwachten is; zie hoofdstuk III. Voor een waarde van H kleiner dan 0,5 geldt dit in het gegeven geval dus ook, n.l. dat d = H of dus voor H = 0,35 is d ook gelijk 0,35, enz. Voor grootere waarden van H treden hoe langer hoe grooter verschillen op tusschen d en H. Verder zien we uit deze tabel 5-1, dat voor H = 12,5 m en $l = 50$ m de factor d een waarde krijgt van 3,12, welke waarde slechts weinig verschillend meer is van de waarde van den factor d voor H = ∞, n.l. 3,13. Verder blijkt, dat voor een afstand van de ontwateringssystemen van 5 m het onverschillig is, of de grond op meer dan 1,25 m onder de drains al of niet doorlatend is, terwijl, indien deze afstand b.v. 25 m is, dit pas op ongeveer 6 à 7 m en bij een afstand van 50 m op omstreeks 12,5 m diepte het geval is. Hieruit volgt dus tevens tot welke diepte de doorlatendheid van den grond van belang is. Verder blijkt, dat vanaf $l = 200$ m en voor H = 0,5 ook $d = 0{,}5$. In de volgende tabel (5-2) — geldend voor $r_0 = 0{,}04$ m — is dit ook het geval en hier is dan ook vanaf $l = 150$ m en voor H = 0,5 m voor d ingevuld „blijft verder 0,5", hetgeen dus beteekent, dat voor alle waarden van l grooter dan 150 m en voor H = 0,5 m de factor $d = 0{,}5$ blijft. In tabel 5-9 — geldend voor $r_0 = 0{,}15$ m — is bijv. voor alle waarden van l en voor H = 0,5 m de waarde van den factor d steeds gelijk aan 0,5; ook voor kleinere waarden van H is dus steeds d = H. Voor H = 0,75 m is dit alleen het geval voor l-waarden van 200 of meer meters. Voor $l = 5$ m en H = 0,75 m is (rechtlijnig intrapoleeren) d gelijk aan $0{,}50 + (0{,}77 - 0{,}50)\,\frac{0{,}25}{0{,}50} = 0{,}635$ of afgerond 0,64. Bij grafisch interpoleeren, hetgeen nauwkeuriger is, verkrijgt men voor d een waarde van 0,67 à 0,68. Hierbij moet er dus in het gegeven geval aan gedacht worden, dat voor alle H-waarden, kleiner dan 0,5 m, steeds d = H

of dus bijv. voor H = 0,25 ook d = 0,25, terwijl vanaf H = 0,25 l, of hier vanaf H = 1,25 m, de waarde van d bij grooter wordende H-waarden practisch niet meer verandert en ongeveer gelijk — iets kleiner — is dan de waarde van d voor H = ∞, of dus in dit geval iets kleiner is dan 0,83 of waarschijnlijk dus gelijk 0,82. In tabel 5-12 — geldend voor r_0 = 0,30 m — is ook voor H = 1 m en voor alle waarden van l, d = H, zoodat voor alle waarden van H, kleiner dan 1 m dus steeds d gelijk is aan H. Voor H = 1,25 en l = 5 m is d = 1,16 of dus d niet gelijk aan H. Om dus de waarden van d voor l = 5 m voor h (1,0 > H > 1,25) uit te rekenen, moet er dus een analoge intrapolatie, als boven is beschreven, plaats vinden, enz.

In de tabel 5-13 — geldend voor r_0 = 0,35 m — is onderaan de tabel vermeld, dat de waarden van d voor l = 5 m slechts bij benadering geldig zijn, hetgeen dus ook geldt voor de met behulp van deze d-waarden te maken berekeningen, afgezien dan voor kleine H-waarden (in dit geval tot H = 1,25 m). Is de grond tot grootere diepte doorlatend, dan geeft de vergelijking 89 en 90 de waarden van $\triangle$P slechts bij benadering aan, aangezien dan de voorwaarde niet volledig meer vervuld is, dat r_0 klein moet zijn ten opzichte van l. De waarde van d voor H = ∞ en l = 5 m, of dus 1,30, is dus slechts bij benadering juist. Voor grootere waarden van r_0 geldt dit in steeds sterkere mate. Zoo staat onderaan tabel 5-17 — geldend voor r_0 = 0,60 m — dan ook de opmerking, dat deze cijfers voor afstanden kleiner dan 10 m niet meer te berekenen zijn, afgezien dan voor H-waarden kleiner dan $\frac{1}{4}$ l.

In tabel 5-31 — geldend voor r_0 = 5 m — geldt dit laatste voor alle l-waarden kleiner dan 100 m, afgezien dan voor H-waarden kleiner dan $\frac{1}{4}$ l. Al dergelijke gevallen, waarvoor geen cijfers van den factor d in de tabellen 5 zijn aangegeven, zijn practisch echter van weinig beteekenis.

Tegen de bovenstaande omvorming van de vergelijkingen 82 en 83 tot de vergelijking 88, onder gebruikmaking van de tabellen 5 en den factor d, zijn geen bezwaren aan te voeren. Het feit, dat de waarde van d slechts tot twee decimalen, of hoogstens in drie cijfers, is aangegeven, heeft hiermede niets te maken, evenmin als het feit, dat bij gebruikmaking van de tabellen 5 vaak geïntrapoleerd (grafisch of gewoon) moet worden. Het is immers op zichzelf heel goed mogelijk den factor d in meer cijfers aan te geven door het aantal tabellen uit te breiden. Dat dit niet geschied is, ligt eenvoudig hieraan, dat de vereischte nauwkeurigheid van berekening ook nu groot genoeg blijft. Door deze berekeningswijze is tevens aan het onder sub 2 genoemde bezwaar (zie blz. 583) op afdoende wijze tegemoet gekomen, aangezien op deze wijze een 3-tal berekeningswijzen, n.l. de horizontaal-rechtlijnige methode, de horizontaal-rechtlijnige gecombineerd met de radiale methode en de radiale methode alleen, tot één enkele is herleid, waarin geen onderbrekingen voor-

komen. De wijze, waarop men van deze tabellen 5 gebruik moet maken, zal — en dat moge hier reeds worden vermeld — in hoofdstuk V in een aantal practische toepassingen worden duidelijk gemaakt.

§ 2. Bespreking van de verandering, die de in § 1 aangegeven vereenvoudigde berekening moet ondergaan in het geval de grond heterogeen doorlatend is

Verder kan het voorkomen, dat de grond onder het vlak door de drains resp. onder het vlak door de watervlakken in andere ontwateringssystemen heterogeen doorlatend is. Hiermede is op de volgende wijze rekening te houden:

Stel eens, dat de grond onder de drains resp. onder de watervlakken in andere ontwateringssystemen tot de ondoorlatende laag een dikte van H m heeft en bestaat uit onder elkaar gelegen horizontale lagen van een dikte d_1, d_2, d_3, d_4, enz. en met een doorlaatfactor van resp. k_1, k_2, k_3, k_4, enz. Noemen we nu verder k_{gh} den gemiddelden doorlaatfactor voor het geheele pakket van lagen voor een horizontale strooming en k_{gv} den gemiddelden doorlaatfactor voor een verticale strooming.

Voor een **horizontale** strooming is de totale hoeveelheid water Q, die bij een verhang I per 24 uur door het pakket van lagen stroomt, gelijk aan de som van de hoeveelheden q_1, q_2, q_3, q_4, enz., die door ieder van de afzonderlijke lagen in dezen tijd stroomt. Aangezien het verhang I in alle lagen dezelfde is en in het algemeen geldt, dat $q = k \,.\, d \,.\, \mathrm{I}$ is dus:

$$\mathrm{H} \bullet k_{gh} = k_1 d_1 + k_2 d_2 + k_3 d_3 + k_4 d_4 + \text{enz.} \qquad (91)$$

waaruit k_{gh} is te berekenen.

Voor een **verticale** strooming is de hoeveelheid water, die door iedere laag en dus ook door het geheele pakket van lagen per m² en in 24 uur stroomt, dezelfde. Stelt $\triangle$ P het totale potentiaalverschil in het grondwater aan weerszijden van het geheele pakket van lagen voor en $\triangle$ P_1, $\triangle$ P_2, $\triangle$ P_3, $\triangle$ P_4, enz. deze potentiaalverschillen aan weerszijden van de 1ste, 2de, 3de, 4de, enz. laag, dan is dus:

$$\triangle \mathrm{P} = \triangle \mathrm{P}_1 + \triangle \mathrm{P}_2 + \triangle \mathrm{P}_3 + \triangle \mathrm{P}_4 + \text{enz.} \qquad (92)$$

Aangezien verder algemeen geldt, dat per m² en per eenheid van tijd $\mathrm{Q} = k \dfrac{\triangle \mathrm{P}}{d}$ is dus, na deeling door Q:

$$\frac{\mathrm{H}}{k_{gv}} = \frac{d_1}{k_1} + \frac{d_2}{k_2} + \frac{d_3}{k_3} + \frac{d_4}{k_4} + \text{enz.} \qquad (93)$$

of

$$\mathrm{C} = c_1 + c_2 + c_3 + c_4 + \text{enz.} \qquad (94)$$

waarin C, c_1, c_2, c_3, c_4, enz. de weerstanden van het geheele pakket van lagen resp. van de 1ste, 2de, 3de, 4de, enz. laag (voor een verticale strooming) voorstellen. Uit de vergelijking 93 is k_{gv} te berekenen.

We kennen dus nu zoowel den gemiddelden doorlaatfactor van het geheele pakket van lagen voor een horizontale als voor een verticale strooming. Aangezien in werkelijkheid het water zoowel in meer horizontale als in meer verticale richting door dit pakket van lagen in het gegeven geval zal stroomen, is voor den werkelijken gemiddelden doorlaatfactor (k_{gw}) ruwweg, en, als k_{gh} en k_{gv} weinig uiteenloopen, met voldoende nauwkeurigheid het gemiddelde van k_{gh} en k_{gv} aan te nemen of dus:

$$k_{gw} = (k_{gh} + k_{gv}) : 2 \qquad (95a)$$

Soms kan echter ook met voordeel rekening worden gehouden met de lengte van de stroombanen in horizontale en in verticale richting. Dit is dus dan slechts noodig, als k_{gh} en k_{gv} nogal verschillend zijn, bijv. meer dan in de verhouding 3 : 4 uiteenloopen. De lengte van de stroombanen in verticale en in horizontale richting loopt ongeveer uiteen in de verhouding H : $\frac{1}{2}\,l$, zoodat een nauwkeuriger berekening van k_{gw} als volgt luidt:

$$k_{gw} = \frac{0.5\,l}{H + 0.5\,l}\,k_{gh} + \frac{H}{H + 0.5\,l}\,k_{gv} \qquad (95b)$$

Voor zooverre H > 0,25 l, kan echter, voor H in vergelijking 95b, toch H = $\frac{1}{4}\,l$ worden aangehouden.

Uit den aard der zaak wordt de dikte H van het totale pakket van lagen zoo noodig — d. w. z. als het bodemprofiel tot zoo groote diepte doorlatend blijft en niet reeds op geringere diepte een ondoorlatende laag moet worden aangenomen — niet grooter gekozen dan in verband met den afstand van de ontwateringssystemen noodig is, d. w. z. dus tot een diepte, waaronder de strooming naar deze ontwateringssystemen te verwaarloozen is. Een en ander is dus uit de tabellen 5 af te lezen. Verder neemt men, als de grond op een bepaalde diepte een veel kleinere doorlatendheid krijgt dan van de hooger gelegen lagen, den bovenkant van deze lagen als den bovenkant van de ondoorlatende laag aan. Overigens beoordeele men van geval tot geval wat het beste is.

Het spreekt vanzelf, dat de berekening van den gemiddelden doorlaatfactor met behulp van vergelijking 95a en b des te juister is, naarmate k_{gh} en k_{gv} minder van elkaar afwijken. Indien deze laatste twee gemiddelde doorlaatfactoren — dus k_{gh} en k_{gv} — meer dan in een verhouding 3 : 4 van elkaar afwijken, worden bij gebruik van formule 95a grootere fouten gemaakt en moet de formule 95b worden toegepast. Dit laatste zal des te eerder het geval

zijn, naarmate d en k van de afzonderlijke lagen, waaruit het pakket bestaat, meer van elkaar afwijken.

De bovenstaande berekening van den gemiddelden doorlaatfactor (k_{gw}) is niet toelaatbaar of althans met een veel grootere fout belast, indien direct onder de drains resp. direct onder de waterspiegels in (en vooral ook onder de bodems van) andere ontwateringssystemen een laag voorkomt met een veel geringere doorlatendheid dan van de dieper gelegen lagen. Een berekening is ook nu in eerste benadering wel uitvoerbaar volgens de hieronder aangegeven berekeningswijze. Men verdeelt daartoe H in bijv. 10 gelijke deelen. De waarden van k_{gv} voor al deze 10 afzonderlijke stukken berekent men dan volgens vergelijking 93. Noemt men deze afzonderlijke k_{gv}-waarden resp. k_{1gv}, k_{2gv}, k_{3gv}, enz. (no. 1 geldt voor het eerste 10de deel van H van boven af gerekend, enz.), dan is k'_{gv} voor de geheele laag ter dikte van H (H is maximaal $\frac{1}{4}\,l$) nu gelijk aan:

$$k'_{gv} = (10k_{1gv} + 9k_{2gv} + 8k_{3gv} + 7k_{4gv} + 6k_{5gv} + 5k_{6gv} + 4k_{7gv} + 3k_{8gv} + 2k_{9gv} + k_{10gv}) : 55.$$

De waarde van k_{gh} wordt gewoon volgens vergelijking 91 en k_{gw} volgens vergelijking 95b berekend, waarin echter voor k_{gv} nu k'_{gv} in de plaats komt. Hierdoor is rekening gehouden met het feit, dat door de bovenste lagen in verticale richting meer water stroomt dan in dieper gelegen lagen. Hierbij kan worden opgemerkt, dat men voor het aangeven van drain- of greppelafstanden, gezien de toch slechts geringe afstanden, die hiervoor in dit geval in aanmerking komen, meestal eenvoudigheidshalve kan aannemen, dat de grond tot onbeperkte diepte een doorlatendheid heeft, als de bovenste slecht doorlatende laag vlak onder de drains bezit. De drainafstand kan dan iets grooter dan de aldus berekende genomen worden. Is de genoemde slecht doorlatende laag zeer dun en is de daaronder voorkomende laag tot voldoende diepte voldoende doorlatend, dan kan men deze beter doorbreken ter plaatse, waar de drains gelegd worden, waarna men hiermede geen rekening meer behoeft te houden. (Dit is bijv. geschied op een proefveld te Nieuw-Buinen (dalgrond), waar onder de veenlaag een relatief dunne ijzeroerlaag aanwezig is. Ofschoon hierover nog onvoldoende gegevens ter beschikking staan, is de ervaring tot heden zeer gunstig.)

Verder spreekt het vanzelf, dat als de omstandigheden daarvoor gunstig zijn, men ook de formules, die in hoofdstuk II van de in noot (1) genoemde literatuur zijn ontwikkeld, kan toepassen. Dit laatste is alleen mogelijk als de ondoorlatende laag zich niet te diep onder de ontwateringssystemen bevindt. Tot welke diepte dit het geval mag zijn, is uit de tabellen 5 af te leiden. Voor practische toepassing zijn deze formules in het algemeen te bewerkelijk en

houde men zich liever aan de vergelijkingen, die hieronder nader zullen worden aangegeven.

In verband met de in noot (1) genoemde publicatie kan nog worden opgemerkt, dat als de Q-H_o-lijnen enz. bekend zijn, waaruit G (= kd) kan worden berekend (zie hoofdstuk III van de genoemde publicatie), de waarde van d, en met behulp van de tabellen 5 ook de waarde van H, kan worden berekend als k bekend is, zoodat men in dat geval weet, waar zich de ondoorlatende laag bevindt. Omgekeerd, is H bekend, dan kan aan de tabellen 5 de factor d worden ontleend en is dus k (de doorlaatfactor) van deze laag bekend.

§ 3. BESPREKING VAN DE VERANDERING, DIE DE IN § 1 AANGEGEVEN VEREENVOUDIGDE BEREKENING MOET ONDERGAAN, INDIEN DE WELVING VAN DEN GRONDWATERSPIEGEL BOVEN HET VERBINDINGSVLAK DOOR DE ASSEN VAN DE DRAINS RESP. DOOR DE WATERSPIEGELS IN ANDERE ONTWATERINGSSYSTEMEN ZOO GROOT IS, DAT DEZE NIET VERWAARLOOSD MAG WORDEN EN HIERIN DE STROOMING NIET TOT EEN VERTICALE STROOMING MAG WORDEN VEREENVOUDIGD; DE GROND IS HOMOGEEN DOORLATEND

In § 2 is dus rekening gehouden met een heterogeen doorlatenden grond onder de assen door de drains resp. onder het vlak door de waterspiegels in andere ontwateringssystemen: we moeten dus thans rekening houden met het geval, dat de welving van den grondwaterspiegel boven het verbindingsvlak door de assen van de drains resp. door de waterspiegels in andere ontwateringssystemen zoo groot is, dat deze niet verwaarloosd mag worden en hier ook de *strooming* niet tot een verticale strooming mag worden vereenvoudigd.

Ook nu zullen we een analoge methode toepassen, d. w. z. ook nu zullen we het stroomingsveld onder het vlak door de assen van de drains resp. door de waterspiegels in de andere ontwateringssystemen vervangen door de reeds vaker besproken aequivalent-laag ter dikte d.

We gaan daarbij uit van de vergelijking 86, n.l.:

$$s = \frac{4k\,(H_o^2 - h_o^2)}{l^2} \qquad (96)$$

Is d de doorsnede van de doorlatende laag onder het vlak door de assen van de drains en ligt dus de bovenkant van de ondoorlatende laag werkelijk op deze diepte onder het vlak door de assen van deze drains en is deze afstand (voorloopig) zoo klein, dat de bovenstaande vergelijking 96 geldt, dan is $H_o = d + m_o$ en $h_o = d + n$, waarin m_o en n resp. de hoogte van den

grondwaterspiegel midden tusschen de drains resp. boven de drains en boven het vlak door de assen van de drains (zie figuur 23) voorstellen,. De vergelijking 96 is dan om te vormen tot:

Figuur 23

Dwarsdoorsnede van het geval, dat de strooming van het water boven het vlak door de drains ten gevolge van de *relatief groote* welving van het phreatisch vlak boven genoemd vlak niet te verwaarloozen is en de grond tot een bepaalde diepte homogeen doorlatend en daaronder ondoorlatend is

$$s = \frac{8kd\,(m_o - n) + 4k\,(m_o^2 - n^2)}{l^2} \qquad (97)$$

Voor andere ontwateringssystemen wordt m_o gerekend vanaf het verbindingsvlak door de waterspiegels in deze ontwateringssystemen (voor practisch droge greppels vanaf het vlak door de bodems van deze greppels) en is $n = 0$, waardoor de vergelijking 97, evenals in het geval dat geen water boven de drains voorkomt, overgaat in:

$$s = \frac{8kdm_o + 4km_o^2}{l^2} \qquad (98)$$

Om nu de gewenschte vereenvoudiging van de berekeningen te verkrijgen met behoud van een voldoende nauwkeurigheid zullen we de bovengenoemde vergelijking 97 en 98 **steeds** gebruiken; alleen krijgt d dan de beteekenis van de dikte van een aequivalent laag, die dus uit de tabellen 5 voor de diverse omstandigheden is af te leiden. De berekeningen worden daardoor tot wel zeer eenvoudige berekeningen herleid. Zij zijn echter niet geheel correct, aangezien er immers geen sprake van is, dat in het stroomingsveld boven het vlak door de assen van de drains resp. door de waterspiegels in andere ontwateringssystemen de *strooming zuiver horizontaal* verloopt, zooals volgens de afleiding van de vergelijking 96 vereischt wordt. Hierbij moge wellicht ten overvloede worden opgemerkt, dat, ware de genoemde strooming in het genoemde deel van het stroomingsveld wel horizontaal, de vergelijking 96 ook bij toepassing van de aequivalentlaag ter dikte d volkomen juist zou zijn.

De boven besproken vereenvoudiging is — en dat is vooruit te voorspellen — alleen dan met voldoende benadering juist, indien het gedeelte van het stroomingsveld, dat zich boven het vlak door de drains resp. door de waterspiegels in andere ontwateringssystemen bevindt, niet te groot is en wel zal bij een gelijke hoogte van den grondwaterspiegel boven genoemd vlak de te maken fout des te kleiner zijn, naarmate de afstand van de drains of andere ontwateringssystemen grooter wordt (de strooming wordt namelijk in bedoeld deel van het stroomingsveld horizontaler, naarmate de genoemde afstand onder overigens gelijke omstandigheden grooter wordt). Ook wordt deze fout bij gelijken afstand van de drains of van andere ontwateringssystemen des te kleiner, naarmate de ondoorlatende laag minder diep onder dit vlak door de drains resp. door de waterspiegels in andere ontwateringssystemen ligt, aangezien ook nu de strooming van het water boven genoemd vlak gemiddeld genomen des te horizontaler van richting wordt, naarmate de ondoorlatende laag minder diep onder genoemd vlak voorkomt. De grootste fout wordt dan ook gemaakt, indien de grond tot onbeperkte diepte doorlatend is en deze fout is, zooals reeds eerder werd uiteengezet (zie blz. 579), grooter in het geval de grondwaterspiegel boven en midden tusschen de drains vrijwel even hoog ligt, dan indien de grondwaterspiegel midden tusschen de drains even hoog ligt als in het eerstgenoemde geval, maar nu geen grondwaterspiegel boven de drains voorkomt ($n = 0$), of dus naarmate bij gelijke m_0 de factor n kleiner wordt.

Ligt nu de grondwaterspiegel midden tusschen de drains slechts iets hooger dan boven de drains, dan kan het potentiaalverschil van een punt midden op de verbindingslijn van de centra van de drains (in een doorsnede loodrecht de drains) en een punt op den omtrek van de drains berekend worden volgens de vergelijking 80 of 81, waarbij H in deze vergelijking gelijk wordt gesteld aan n. Opgemerkt kan worden, dat voor de toepassing van deze vergelijking r_0 niet te groot mag worden ten opzichte van n, zooals zonder meer duidelijk zal zijn (de afmetingen van de ontwateringssystemen zijn dan niet te verwaarloozen (zie afleiding formule 80). Ook mag de waarde van n niet te klein worden en wel geeft bij dezelfde waarde van n (n = H) de vergelijking 80 des te onjuister resultaten, naarmate l grooter is, waarop verder onder (595) zal worden teruggekomen.

Bovengenoemd potentiaalverschil is ook te berekenen volgens de vergelijking 97, die als volgt gewijzigd kan worden:

$$s = \frac{8kd\,(m_0 - n) + 4k\,(m_0^2 - n^2)}{l^2} = \frac{8kd\,(m_0 - n) + 8kn\,(m_0 - n)}{l^2} \qquad (99)$$

aangezien $m_0^2 - n^2 = (m_0 - n)\,(m_0 + n) = 2n(m_0 - n)$, daar $m_0 + n$ in het gegeven geval practisch gelijk aan $2n$ is. Uit de vergelijking 99 volgt, dat:

$$(m_0 - n) = \triangle P_1 = \frac{sl^2}{8kd + 8kn} = \frac{sl}{k} \cdot \frac{l}{8d + 8n} \qquad (100)$$

De vergelijking 80 is te schrijven als (zie vergelijking 81; $\triangle$P wordt hier, duidelijkheidshalve, $\triangle P_2$ genoemd):

$$\triangle P_2 = \frac{sl}{k} \cdot E \qquad (101)$$

Worden bij de berekening volgens de vergelijkingen 100 en 101 dezelfde waarden voor $\triangle P_1$ en $\triangle P_2$ (bij gelijke andere factoren) gevonden, dan geeft de vereenvoudigde berekening dus hetzelfde resultaat als de andere berekeningswijze. Meestal zal dit echter niet het geval zijn. Daarom leek het mij noodzakelijk zoowel $\triangle P_1$ als $\triangle P_2$ voor een aantal gevallen te berekenen, waarbij we dus wel bedenken moeten, dat de berekening in het aangegeven geval de maximale fout aangeeft. In de tabel 6 is dit geschied, waarbij in vergelijking 100 dus telkens voor d de waarde is ingevuld voor $H = \infty$; zie de tabellen 5 (de grond blijft immers tot onbeperkte diepte doorlatend; zie ook blz. 594). Hierin is de verhouding $\frac{P_2}{P_1}$ aangegeven voor verschillende waarden van l, n en r_0.

Alvorens hierop verder in te gaan, willen we eerst aantoonen, dat vergelijking 80 bij dezelfde waarde van n (n = H) des te onjuister resultaten geeft, naarmate l grooter is.

Beschouwen we vergelijking 80 eens wat nader, dan blijkt, dat deze vergelijking voor $n = 0$ (of dus voor H = 0) niet gelijk wordt aan de vergelijking 30 (of 82), hetgeen natuurlijk wel het geval had moeten zijn. De oorzaak daarvan ligt voornamelijk in het feit, dat de afmetingen van den denkbeeldigen drain, die het spiegelbeeld is van den drain, waarop het *potentiaalverschil* betrekking heeft, is verwaarloosd. Zoolang n (n = H) grooter is dan 0,5 r_0, geeft vergelijking 80 of dus 101 te kleine waarden voor $\triangle P_2$, ofschoon bij toenemende waarden van n ten opzichte van r_0 en bij dezelfde l-waarde deze fout daalt. Bij n-waarden kleiner dan 0,5 r_0 geeft vergelijking 80 te hooge waarden, hetgeen hier verder van geen belang is. Neemt nu l toe ten opzichte van n, dan wordt vergelijking 80 (n = H) hoe langer hoe meer gelijk aan vergelijking 30 (of 82), aangezien dan n (n = H) ten opzichte van l te verwaarloozen is, afgezien van de termen:

$$\log \frac{l}{2r_0} \text{ en } \log \sqrt{\left(\frac{\frac{1}{4}l^2 + 4n^2}{4n^2}\right)},$$

welke laatste term dan te schrijven is als

$$\log \sqrt{\left(\frac{\frac{1}{4}l^2}{4n^2}\right)} = \log \frac{l}{4n}.$$

Deze verwaarloozing van n (n = H) ten opzichte van l beteekent niets anders, dan dat het gedeelte van het stroomingsveld boven het vlak door de assen van de drains te verwaarloozen is ten opzichte van het gedeelte van het stroomingsveld, dat onder het genoemde vlak ligt. Aangezien de dikte van dit laatste gedeelte (zie de tabellen 5) toeneemt met stijgende l-waarden, zal deze verwaarloozing van het eerstgenoemde gedeelte van het stroomingsveld bij een bepaalde n-waarde des te meer geoorloofd zijn, naarmate l grooter wordt. Wordt nu n ten opzichte van l verwaarloosd en noemen we $\triangle P_3$ het potentiaalverschil berekend volgens de vergelijking 30 (of 82), dan geeft deze vergelijking 80 of 101 dus maximaal zooveel kleinere waarden van $\triangle P_3$ als gegeven is door:

$$\frac{2{,}3026\ sl}{2\pi k}\left(log\ \frac{l}{2r_0} - log\ \frac{l}{4n}\right) = \frac{2{,}3026\ sl}{2\pi k}\left(log\ \frac{4n}{2r_0}\right),$$

zoodat in dat geval

$$\frac{\triangle P_2}{\triangle P_3} = \frac{\triangle P_3 - \frac{2{,}3026\ sl}{2\pi k} \cdot \left(log\ \frac{4n}{2r_0}\right)}{\triangle P_3} = \frac{A - \frac{2{,}3026}{2\pi}\ log\ \frac{4n}{2r_0}}{A}$$

Aangezien A (zie vergelijking 82) toeneemt met stijgende l-waarden (echter slechts in geringe mate) en de term $\frac{2{,}3026}{2\pi}\ log\ \frac{4n}{2r_0}$ onafhankelijk van l is, moet dus bij stijgende l-waarden ten slotte $\frac{\triangle P_2}{\triangle P_3} = 1$ zijn, hetgeen echter voor practische voorkomende waarden van l (zie hieronder) niet het geval is. Verder wordt $\triangle P_3$ des te meer gelijk aan $\triangle P_2$, naarmate r_0 grooter en meer gelijk wordt aan $2n$. Is nu bijv. l = 150 m, n = 0,25 m en r_0 = 0,03 m, dan is (bij verwaarloozing van n ten opzichte van l): $\frac{\triangle P_2}{\triangle P_3}$ = (afgerond) 0,808. Verwaarloozen we n niet ten opzichte van l, dan is: $\frac{\triangle P_2}{\triangle P_3}$ = (afgerond) 0,808 of dus (practisch) dezelfde gebleven, hetgeen dus ook het geval blijft voor dezelfde n-waarde en voor grooter l en r_0-waarden dan l = 150 m en r_0 = 0,03 m. Voor l = 300 m, n = 0,25 m en r_0 = 0,03 m is $\frac{\triangle P_2}{\triangle P_3}$ = 0,826 (n verwaarloozen ten opzichte van l), welke verhouding dus (practisch) dezelfde blijft als n in vergelijking 80 (n = H) niet verwaarloosd wordt ten opzichte van l. Verder zien we, dat $\frac{\triangle P_2}{\triangle P_3}$ iets is toegenomen bij een vergrooting van l = 150 m tot l = 300 m. Bedenkt men echter, dat bij een afstand van 300 m het in werkelijkheid voor het te berekenen potentiaalverschil zeer weinig

verschil moet uitmaken, of men het gedeelte van het stroomingsveld boven het vlak door de assen van de drains (en hier dus in het geval n = 0,25 m) al of niet verwaarloost, moet dus in deze gevallen de vergelijking 80 te kleine waarden geven voor $\triangle P_2$, waarop verder hieronder nog zal worden teruggekomen. We gaan nu over tot een nadere beschouwing van tabel 6.

Alvorens hierop in te gaan, wil ik opmerken, dat het mij toelaatbaar lijkt, dat bij de berekening van $\triangle P_1$ een fout van maximaal 20 % (de genoemde verhouding van $\triangle P_2$ en $\triangle P_1$ dus mag liggen tusschen rond 0,80 en 1,20) gemaakt wordt, aangezien de berekende drainafstand dan nog slechts met een fout van hoogstens omstreeks 10 % is belast, hetgeen practisch van geen belang is, o.a. ook door het feit, dat de berekende drainafstanden in verband met de afmetingen van het te draineeren perceel slechts zelden kunnen worden toegepast en deze afstand dus gewoonlijk iets kleiner wordt. Is de berekende drainafstand bijv. 20 m en is de breedte van het perceel 70 (de drains worden verondersteld in de lengte van het perceel te worden gelegd), dan wordt de drainafstand in de practijk dus al 70 : 4 = 17,5 m, waarbij dus 3 drainreeksen worden gelegd.

Voor het aangeven van drainafstanden behoeft verder met een grootere diepte dan gemiddeld 150 cm onder het maaiveld (gemiddelde van hoogst en laagst gelegen eind- resp. beginpunten van deze drainreeksen) geen rekening te worden gehouden, aangezien een grootere draindiepte practisch gesproken niet voorkomt. Verder zal bij het aangeven van drainafstanden de grondwaterstand midden tusschen de drains op hoogstens 50 cm onder het maaiveld worden aangenomen. Nog afgezien van het feit, dat bij dit laatste verondersteld wordt, dat geen grondwater boven de drains voorkomt, zal dus voor de toepassing van de vereenvoudigde berekening alleen van belang zijn (voor greppels zijn de omstandigheden in elk geval veel gunstiger, aangezien deze veel minder diep zijn dan de draindiepten onder het maaiveld bedragen) na te gaan, wat de grootte van de te maken fout is bij toepassing van de vereenvoudigde berekening, indien n = 150 — 50 = 100 cm = 1 m. Voor slooten, kanalen, enz. kunnen grootere waarden van n van belang zijn; de onderlinge afstanden daarvan zijn — uitzonderingen daargelaten — altijd veel grooter dan practisch voor drainage voorkomt; hierop zal nog worden teruggekomen. Verder kan worden opgemerkt, dat de nauwste drainbuizen een uitwendige doorsnede hebben van 7 cm en aangezien deze drains in een sleuf worden gelegd, waarvan de doorlatendheid (bij een goede legging van deze drains) grooter is dan van den omringenden grond en zonder rekening te houden met een omkleedsel van turfmolm of dergelijk materiaal, kan voor drainage op een minimalen straal (bij de berekening) van 4 cm of 0,04 m worden gerekend. De waarden voor r_0 = 0,03 m zijn slechts volledigheidshalve genoemd.

Beschouwen we nu de tabellen 6 eens wat nader, dan blijkt, dat in alle subtabellen voor de verschillende l-waarden in den rechterbovenhoek een aantal waarden voor $\frac{\triangle P_2}{\triangle P_1}$ onïngevuld zijn gebleven (aangegeven door een streepje). Deze waarden zijn in verband met de waarde van r_0 ten opzichte van n in geen geval van eenig belang. Zien we nu af van de subtabellen voor $l = 5$ tot en met $l = 40$ m, dan blijken in de subtabellen voor grootere l-waarden geen waarden voor $\frac{\triangle P_2}{\triangle P_1}$ voor te komen, die grooter zijn dan 1,00, hetgeen ook het geval zal zijn voor grootere l-waarden dan 150 m, terwijl deze waarden nergens kleiner zijn dan 0,80, zoodat nergens de vereenvoudigde berekening van het verlangde potentiaalverschil (volgens vergelijking 100) de veroorloofde fout overschrijdt. Hierbij kan echter worden opgemerkt, dat deze verhouding van $\frac{\triangle P_2}{\triangle P_1}$ — althans voor de kleine n-waarden — *in werkelijkheid* niet onbelangrijk grooter is, aangezien de berekende waarde van $\triangle P_2$, zooals reeds eerder werd aangetoond en waarop verder hieronder nog zal worden teruggekomen, niet onbelangrijk te klein is en in werkelijkheid dus hooger zal liggen. Voor al deze tabellen is de te maken fout, wanneer de vereenvoudigde berekening wordt gevolgd (volgens vergelijking 100), dan ook op niet meer dan 10 % te stellen. Ditzelfde geldt ook voor de subtabel voor $l = 40$ m, zij het dan ook, dat voor $n = 2$ m de volgens de vereenvoudigde methode berekende potentiaalverschillen iets kleiner zijn dan ze in werkelijkheid zullen bedragen. In de subtabel voor $l = 30$ m geldt voor de kleinere n-waarden hetzelfde; alleen voor $n = 2$ m moet voor r_0-waarden van 0,03 tot en met 0,05 m op fouten van 14 tot 11 % (voor $\triangle P_1$) worden gerekend. Voor de drainage (n niet grooter dan 1,00) is deze fout echter kleiner dan 10 %. Iets dergelijks geldt voor de subtabel voor $l = 20$ m; alleen zijn berekeningen voor n-waarden grooter dan ruim 1,5 m dan volgens de vereenvoudigde methode en bij r_0-waarden kleiner dan $r_0 = 0{,}10$ m niet meer toelaatbaar, tenzij men rekening wil houden met deze fout en dus een correctie wil invoeren. Voor drainage (n niet grooter dan 1,00) blijft de te maken fout kleiner dan 10 %. Voor de subtabel voor $l = 10$ m blijken voor $r_0 = 0{,}03$ m geen berekeningen volgens de vereenvoudigde methode meer toelaatbaar, waarbij n grooter is dan bijna 1,00 m; voor $r_0 = 0{,}04$, 0,05, 0,06, 0,07, 0,10 en 0,20 blijken deze maximale n-waarden, waarbij dus $\triangle P_1$ hoogstens 20 % fout is, te liggen bij resp. 1,00 m, ruim 1,00 m, ruim 1,00 m, bijna 1,25 m, ruim 1,25 m en ruim 1,50 m. Voor drainage (r_0 minstens gelijk 0,04 m en n hoogstens gelijk 1 m) is de vereenvoudigde berekening toelaatbaar, zij het dan ook, dat men tot r_0-waarden van 0,10 m moet rekenen op fouten van 10 tot 20 %

(op de $\triangle P_1$-waarde). Ten slotte blijkt uit de subtabel voor $l = 5$ m, dat tot en met $r_0 = 0{,}06$ m de vereenvoudigde berekening alleen uitvoerbaar is als n hoogstens 50 tot bijna 75 cm (afh. r_0) is (men kan echter correcties aanbrengen). Voor grootere r_0-waarden kan n grooter zijn. Voor drainage ($r_0 = 0{,}04$ m of hooger) kan dus de vereenvoudigde berekening worden toegepast, voor zoover n kleiner is dan ruim 60 cm (tenzij men correcties aanbrengt). Het kan dus voorkomen, dat de vereenvoudigde berekening (zonder correctie) te groote fouten zou geven, maar een dergelijk geval zal niet vaak in de practijk worden aangetroffen, aangezien in de eerste plaats dergelijke kleine drainafstanden slechts zelden voorkomen, en wanneer deze nog voorkomen de n-waarden niet zoo groot zijn, dat de vereenvoudigde berekening niet meer mag worden toegepast. Ook voor $l = 7{,}5$ m zal voor $n = 1{,}00$, en voor kleinere r_0-waarden kunnen te groote fouten optreden bij $n = 1{,}00$, zooals uit een vergelijking van de subtabellen voor $l = 5$ m en $l = 10$ m blijkt (tenzij een correctie wordt ingevoerd); voor $n = 0{,}75$ m zal dit niet meer het geval zijn.

Bij het bovenstaande moet bovendien in aanmerking genomen worden, dat de genoemde gevallen, waarbij m_0 en n weinig verschillend zijn (grondwaterstand midden tusschen de drains en boven de drains zijn vrijwel gelijk) **en waarbij dus de vereenvoudigde berekening een maximale fout geeft,** practisch gesproken niet voorkomen. Meestal is dit verschil tusschen m_0 en n veel grooter en bij den aanleg van een drainage kan n zelfs op nul worden gesteld. **Hieruit volgt dus, dat in het algemeen de te maken fouten — ook wanneer de grond tot onbeperkte diepte doorlatend blijft** — kleiner zijn dan uit het bovenstaande zou volgen, waardoor bij berekening van drainafstanden tot 7,5 m en voor m_0-waarden tot 1,00 m de vereenvoudigde methode van berekening toelaatbaar is en voor kleinere drainafstanden (tot 5 m) voor m_0-waarden tot naar schatting 0,75 m.

Verder zal de te maken fout bij toepassing van de vereenvoudigde methode ook nog kleiner zijn in die gevallen, waarbij de grond slechts tot een bepaalde diepte (die dus niet zoo groot is, dat voor de berekening de grond als tot onbeperkte diepte doorlatend mag worden beschouwd) onder het vlak door de assen van de drains resp. onder het vlak door de waterspiegels in de andere ontwateringssystemen doorlatend is en wel is deze fout des te kleiner, naarmate deze diepte geringer is.

Ook kan nog worden opgemerkt, dat voor andere ontwateringssystemen (open ontwatering) dan drainage (bedekte ontwatering) n uit den aard der zaak steeds gelijk nul is, aangezien immers n gerekend wordt vanaf het vlak door de waterspiegels in deze ontwateringssystemen. Hieruit en uit het feit, dat tot n-waarden van 2 m volgens tabel 6 (*maximale fout!*) voor grootere afstanden en zelfs voor $r_0 = 0{,}03$ m de fout kleiner is dan 10 % en uit het feit, dat slooten en kanalen, behalve dat zij practisch alleen op relatief grootere

afstanden voorkomen, ook nog veel grootere afmetingen hebben dan drains, volgt dan ook, dat in die gevallen de vereenvoudigde berekening bovendien mag worden toegepast, waarbij m_0 veel grooter is dan 2 m, zoodat voor de, in ons land practisch voorkomende, gevallen, afgezien dan van hooge uitzonderingen (bijv. breede slooten op ongewoon korten onderlingen afstand), de vereenvoudigde berekening mag worden toegepast.

We willen tot slot nog op een andere wijze aantoonen, dat de waarde van $\triangle P_1$ bij hoogere l- en kleinere n-waarden een veel kleinere fout zal moeten hebben dan de subtabel 6 voor $l =$ (bijv.) 150 m zou doen vermoeden. Daartoe berekenen we de verhouding $\frac{\triangle P_3}{\triangle P_1}$, dus de verhouding van het potentiaalverschil, als het gedeelte van het stroomingsveld boven het vlak door de drains wordt verwaarloosd of dus vergelijking 30 (of 82) wordt toegepast, en waarbij dit niet gedaan wordt, maar de vereenvoudigde berekening (vergelijking 100) wordt toegepast. In tabel 7 zijn deze cijfers voor $l = 150$ m en voor diverse n- en r_0-waarden aangegeven (dus in het geval m_0 en n weinig uiteenloopen). Uit deze tabel blijkt, dat deze verhouding grooter is dan 1,00 en voor $n = 0{,}25$ van 1,02 tot 1,03 uiteenloopt, terwijl deze in werkelijkheid nauwelijks van 1,00 verschillend kan zijn bij l- en n-waarden van resp. 150 m en 0,25 m. Deze waarde van 1,03 voor $r_0 = 0{,}03$ — zoo ook deze waarden voor de andere r_0-waarden — is in elk geval te hoog, aangezien de vereenvoudigde berekening te kleine waarden van $\triangle P_1$ geeft. Voor de vereenvoudigde berekening is immers aangenomen, dat de strooming in het gedeelte van het stroomingsveld boven het vlak door de drains horizontaal verloopt, terwijl deze strooming hierin in werkelijkheid meer verticaal dan horizontaal is. De aanname van een horizontale strooming beteekent, dat een gedeelte van het totale debiet vrijwel volgens den kortsten weg naar de drains wordt afgevoerd, terwijl in werkelijkheid deze weg veel langer is. Hiervoor is dus een grooter potentiaalverschil noodig dan bij de vereenvoudigde berekening in aanmerking wordt genomen, d. w. z., dat het potentiaalverschil, berekend volgens de vereenvoudigde methode, te klein is, waaruit volgt, dat de verhouding van $\frac{\triangle P_3}{\triangle P_1}$ voor $l = 150$ m en $n = 0{,}25$ en voor $r_0 = 0{,}03$ m kleiner moet zijn dan 1,03, enz. Ditzelfde geldt ook, zij het dan ook voor stijgende n-waarden in mindere mate, voor hoogere waarden van n. Ondanks het feit, dat $\triangle P_1$ dus in de genoemde gevallen iets te klein berekend wordt, is deze waarde slechts weinig verschillend van $\triangle P_3$, of m.a.w. zijn de, volgens de vereenvoudigde berekening verkregen, waarden van $\triangle P_1$ vrijwel juist. Hieruit volgt dan ook, dat de fouten, die gemaakt worden bij de toepassing van de vereenvoudigde methode (en bij grootere l-waarden) geringer zijn

dan uit tabel 6 zou blijken. De oorzaak van dit laatste wordt dus gevormd door het feit, dat in de genoemde gevallen de berekening van $\triangle P_2$ te kleine tot soms 20% te kleine waarden geeft.

Samenvattend meen ik dan ook te kunnen concludeeren, dat, indien bij de berekening van potentiaalverschillen (grondwaterstanden) en doorlaatfactoren een maximale fout van 20 % wordt toegestaan, bij de berekening van de *afstanden* van de ontwateringssystemen slechts maximaal een fout van ongeveer 10 % (soms iets grooter) wordt gemaakt, indien in de, in ons land voorkomende, omstandigheden — behoudens uitzonderingen — de vereenvoudigde methode van berekening wordt toegepast, terwijl deze fout meestal onder de 10 % resp. onder de 5 % zal blijven. Alleen voor afstanden kleiner dan 10 m en vooral kleiner dan 7,5 m, moet er om gedacht worden, dat grootere fouten dan 20 (berekening $\triangle P_1$) resp. 10% (berekening afstanden) *kunnen* optreden. Dit laatste treedt in het genoemde geval op, indien n en m_0 vrijwel gelijk zijn en, bij $l = 5$ resp. 7,5 m, de factor n grooter wordt dan 60 resp. rond 75 cm. Verschillen n en m_0 meer of is $n = 0$, dan mag m_0 bij de genoemde afstanden grooter zijn dan 60 resp. 75 cm, waaruit dus volgt, dat, aangezien de eerst-genoemde gevallen, waarbij dan tevens nog de genoemde hooge n- en hooge m_0-waarden moeten optreden, practisch niet zullen voorkomen, ook voor deze afstanden van de ontwateringssystemen (drains) de vereenvoudigde methode van berekening kan worden toegepast. **De vereenvoudigde berekening — dus ook volgens vergelijking 97 of 98, waarop het hier aankomt — kan dan ook algemeen worden toegepast.**

§ 4. Bespreking van de verandering, die de in § 1 aangegeven vereenvoudigde berekening moet ondergaan, indien de welving van den grondwaterspiegel boven het verbindingsvlak door de assen van de drains resp. door de waterspiegels in andere ontwateringssystemen zoo groot is, dat deze niet verwaarloosd mag worden en hierin de strooming niet tot een verticale strooming mag worden vereenvoudigd; de grond is heterogeen doorlatend

De conclusie aan het slot van § 3 geldt echter alleen, indien de grond homogeen doorlatend is. Het gaat er nu dus om de formule 97 resp. 98 zoo te wijzigen, *dat zij ook geldig blijven voor heterogeen doorlatende gronden.* Dit laatste is alleen mogelijk, als we één gemiddelden doorlaatfactor (k_1) van den grond onder het vlak door de assen van de drains resp. onder het vlak door de waterspiegels in andere ontwateringssystemen invoeren, terwijl de berekeningswijze veel eenvoudiger wordt, als we ook één gemiddelden doorlaatfactor (k_2) invoeren voor den grond boven genoemd vlak.

De berekening van deze gemiddelde doorlaatfactoren kan — voor zooverre

het k_1 betreft — geschieden met behulp van de vergelijking 95a of b waarin dus $k_{gw} = k_1$ den gevraagden doorlaatfactor aangeeft; voor zooverre de grond tot groote diepte doorlatend blijft wordt de dikte van de te beschouwen laag door den afstand van de ontwateringssystemen bepaald (zie blz. 590 en de tabellen 5), waarbij dus wordt aangenomen, dat de stroombanen even diep in den grond doordringen, als dit in een overeenkomstig geval, maar nu voor een volkomen homogeen doorlatenden grond, het geval zou zijn geweest. Alleen, wanneer onder de drains of onder andere ontwateringssystemen eerst een nog relatief slecht doorlatende laag, echter daaronder een veel beter doorlatende laag voorkomt, zal het van de dikte van de slecht doorlatende laag en de afmetingen van de ontwateringssystemen afhangen hoe dat geval berekend moet worden; de vereenvoudigde berekening moet dan worden gewijzigd, waarvoor naar blz. 591 verwezen kan worden.

De doorlaatfactor k_2 kan eveneens volgens vergelijking 95a of b of soms ook volgens 91 of 93 berekend worden. Welke vergelijking (95a of b, 91 of 93) men gebruiken moet, hangt dus van de omstandigheden af.

Nu is de bovengenoemde berekening van k_1 en k_2 volgens de bovenaangegeven methoden alleen mogelijk, **als de doorlaatfactoren bekend en dus bepaald zijn en wel in grondmonsters in het laboratorium (dus voor zandprofielen), aangezien alleen in dit geval het aantal lagen, waarvan monsters worden (kunnen worden) genomen, groot genoeg is om de genoemde berekeningswijze toe te kunnen passen.** (Wil men deze doorlaatfactoren uit de overige bekende factoren berekenen, dan komt daarvoor alleen de methode (desgewenscht nog iets te vereenvoudigen) in aanmerking, die beschreven is in hoofdstuk III, sub E, § 1, van de in noot 1 genoemde literatuur.) Voor drainage is de boorgatmethode (dus hoofdzakelijk voor niet-zandgronden) echter zoo uit te voeren, dat tot omstreeks de vermoedelijke draindiepte de gemiddelde doorlaatfactor wordt bepaald (dus de boorgaten tot deze diepte uitboren); met behulp van zoo mogelijk minstens 50 cm diepere boorgaten wordt de doorlaatfactor van de laag, die daaronder voorkomt, bepaald, waardoor dus k_1 en k_2 bekend zijn, zij het dan ook, dat nog rekening moet worden gehouden met den opbouw van den grond op grootere diepte. In bijzondere gevallen kan dan nog (bijv. bij het voorkomen van een dikke kniklaag) in ondiepe boorgaten, die de kniklagen niet doorboren, worden geprobeerd ook nog den doorlaatfactor van deze kniklaag te bepalen.

Noemen we dezen gemiddelden doorlaatfactor boven het vlak door de drains enz. dus k_2 en onder dit vlak k_1, dan kan de vergelijking 97 in zijn algemeenen vorm als volgt worden geschreven (zie figuur 31), nl.:

$$s = \frac{8k_1\, d\,(m_o - n) + 4k_2\,(m_o^2 - n^2)}{l^2} \qquad (102)$$

welke vergelijking voor $n = 0$ overgaat in (zie figuur 32 en 33):

$$s = \frac{8k_1\, dm_o + 4k_2\, m_o^2}{l^2} \qquad (103)$$

In de bovenstaande formules heeft dus d weer de beteekenis van de dikte van een aequivalent-laag, die uit de tabellen 5 kan worden afgeleid en waarvoor naar het reeds eerder daarover medegedeelde wordt verwezen.

De vraag kan dus worden gesteld, welke fout gemaakt kan worden bij toepassing van deze vergelijkingen 102 en 103. Deze fout is niet te berekenen, aangezien de vereenvoudigde methode tevens de eenige methode vormt om in deze gevallen berekeningen uit te voeren, tenzij natuurlijk de ondoorlatende laag op zoo geringe diepte ligt, dat de berekeningen, die in de in noot (1) genoemde publicatie, hoofdstuk II, sub II, ontwikkeld zijn, geldig worden.

Is k_2 grooter dan k_1, dan zal de strooming in de laag boven het vlak door de drains resp. door de waterspiegels in andere ontwateringssystemen meer horizontaal worden, dan dit in een homogeen doorlatenden grond het geval zal zijn. Dit wil dus zeggen, dat de fout, die men bij de toepassing van de vergelijkingen 102 en 103 kan maken, kleiner is dan in het overeenkomstige geval, waarbij de grond homogeen doorlatend is, hetgeen beteekent, dat de vergelijkingen 102 en 103 mogen worden toegepast; bij de afleiding van genoemde vergelijkingen is immers aangenomen, dat de strooming boven het vlak door de drains, enz. horizontaal is. In al deze gevallen — dus tot welke diepte de grond onder het vlak door de drains resp. door de waterspiegels in andere ontwateringssystemen ook doorlatend is en waarbij dus de doorlatendheid meer of minder regelmatig met een toenemende diepte onder het maaiveld afneemt — kunnen de vergelijkingen 102 en 103 worden gebruikt en waarbij dus de bereikte nauwkeurigheid groot genoeg blijft.

Ook het omgekeerde geval komt voor. Is k_2 klein ten opzichte van k_1 en *is de grond overigens tot groote diepte doorlatend*, dan is de tweede factor in den teller van de breuk achter het gelijk-teeken van de formules 102 en 103 klein ten opzichte van den eersten factor. Inderdaad zal in dat geval deze laag van weinig invloed zijn, tenzij k_2 zoo klein wordt, dat de regen deze laag niet snel genoeg kan passeeren en dus plassen op het land komen (zie de in noot (1) genoemde literatuur; hoofdstuk II, § 5, critische regenval; zie ook hoofdstuk VI van deze publicatie). Berekeningen zijn dan niet mogelijk, tenzij men, òf deze laag — bijv. door bekalking of andere maatregelen — althans zoo doorlatend kan maken, dat de regen snel genoeg kan passeeren, zoodat deze plasvorming (schijnspiegels) niet meer voorkomt, òf de werkelijke grondwaterspiegel tot het maaiveld is opgeloopen, welke berekeningen we hier echter niet verder zullen aangeven. Deze laag behoeft — voor de be-

rekeningen althans — niet in aanmerking genomen te worden, indien de grondwaterspiegel bij den maximaal verlangden afvoer beneden deze laag blijft. Wel moeten dan natuurlijk nog de genoemde maatregelen genomen worden om deze laag beter doorlatend te maken; zoo noodig bijv. door ondiepe sleuven te graven, die de slecht doorlatende laag juist doorgraven en die daarna weer met den uitgegraven grond (zoo noodig bijkalken) kunnen worden gevuld en die dus alleen dienen om een verbinding tusschen de boven- en onderliggende lagen te verkrijgen.

De vergelijkingen 102 en 103 kunnen uit den aard der zaak in genoemd geval ($k_2 < k_1$) **ook** worden toegepast, indien de beter doorlatende laag onder het vlak door de drains enz. relatief dun is. In tusschenliggende gevallen — $k_2 > k_1$; de doorlatende laag onder de drains enz. is noch relatief dun noch relatief dik — zou $m_0 - n$ (vergelijking 102) of m_0 ($n = 0$; vergelijking 103) iets te groot worden berekend; de slechter doorlatende laag wordt immers in meer verticale richting doorloopen, dan dit bij een homogenen grond in overeenkomstige omstandigheden het geval zou zijn. Voor toepassing op drainage (of infiltratie; zie hieronder) is dit echter geen ernstig bezwaar, aangezien men dus iets te kleine drainafstanden berekent, waardoor dus in geen geval het risico geloopen wordt te groote afstanden te adviseeren.

Samenvattend kunnen we derhalve vaststellen, dat de vergelijkingen 102 en 103 voor heterogeen doorlatende gronden met behoud van een voldoende nauwkeurigheid mogen worden toegepast. Voor de berekening van **drainafstanden,** of in het algemeen dus voor de berekeningen van de afstanden van ontwateringssystemen, kunnen deze vergelijkingen nog worden omgevormd tot:

$$l = \sqrt{\left\{ \frac{8k_1 d (m_0 - n) + 4k_2 (m_0^2 - n^2)}{s} \right\}} \qquad (104)$$

en voor $n = 0$ (behalve in uitzonderingsgevallen is dit voor de berekening van drainafstanden steeds het geval):

$$l = \sqrt{\left\{ \frac{8k_1 d m_0 + 4k_2 m_0^2}{s} \right\}} \qquad (105)$$

Slotopmerking

In het voorgaande is steeds aangenomen, dat de ontwatering betrekking heeft op niet-zandgronden — dus waarbij het phreatisch vlak zich bevindt in niet-zandgronden — waarin de horizontale strooming in de capillaire laag mag worden verwaarloosd. Heeft de ontwatering echter betrekking op zandgronden, d. w. z. liggen het phreatisch vlak en de capillaire laag in een zandgrond, dan moet de capillaire laag in rekening worden gebracht. Aangezien dit voor de practijk van weinig belang is, zullen de veranderingen, die de

berekeningen in dat geval moeten ondergaan, niet verder worden behandeld. Deze zijn echter wel bij de behandeling van infiltratievraagstukken (zie hieronder) aangegeven, zoodat aan de hand daarvan zoo noodig de bedoelde wijzigingen, die in dit geval in de vergelijkingen 102 t/m 105 zouden moeten worden aangebracht, daaruit zijn af te leiden.

B. *Infiltratie*

§ 1. Eenige algemeene opmerkingen

Onder verwijzing naar hoofdstuk IV van de in noot (1) genoemde publicatie kan worden opgemerkt, dat infiltratie weliswaar gewoonlijk op zandgronden, maar ook wel op niet-zandgronden wordt toegepast. Er kan aan herinnerd worden, dat voor de eerstgenoemde gronden de capillaire laag tot het stroomingsveld gerekend moet worden, terwijl dit bij de laatstgenoemde gronden niet het geval is, aangezien in dergelijke gronden de strooming van het water in de capillaire laag kan worden verwaarloosd. Verder is de stroomrichting bij infiltratie juist omgekeerd aan die bij ontwatering, waarmede samenhangt, dat bij infiltratie de grondwaterstand boven de drains hooger is dan de grondwaterstand midden tusschen de drains, of bij infiltratie uit greppels, slooten, enz. de waterstand in deze greppels, slooten, enz. hooger is dan de grondwaterstand midden tusschen deze greppels, slooten, enz.

Ten slotte kan nog worden opgemerkt, dat voor zoover de factor r_0 (= straal ontwateringssysteem) in de onderstaande formules, (inclusief in den factor d (tabellen 5)) voorkomt, hiermede ook nu bedoeld wordt de straal van een halfcirkelvormig ontwateringssysteem met denzelfden natten omtrek als van de werkelijk aanwezige ontwateringssystemen. Ten slotte kan in dit verband worden opgemerkt, dat de, in de nog aan te geven vergelijkingen voorkomende, gemiddelde doorlaatfactoren berekend kunnen worden met behulp van de vergelijkingen 91, 93, resp. 95 a of b en met behulp van de, in grondmonsters van diverse lagen, bepaalde en op de natuurlijke omstandigheden omgerekende doorlaatfactoren, dan wel met behulp van de, met de boorgatmethode, bepaalde doorlaatfactoren; afhankelijk van de omstandigheden.

§ 2. Infiltratie in niet-zandgronden

In verband nu met hetgeen over de infiltratie in hoofdstuk IV van de in noot (1) genoemde publicatie is medegedeeld en in verband met het voorgaande lijkt het mij niet meer noodig te bewijzen, dat voor niet-zandgronden, en bij gebruikmaking van drains en in het geval de grondwaterspiegel midden

tusschen de drains boven het vlak door de drains ligt, analoge vergelijkingen als de nos. 102 t/m 105 moeten gelden, welke vergelijkingen echter in verband met de juist tegengestelde stroomrichting nu anders moeten luiden; zoo bijv. wordt de vergelijking 102 nu:

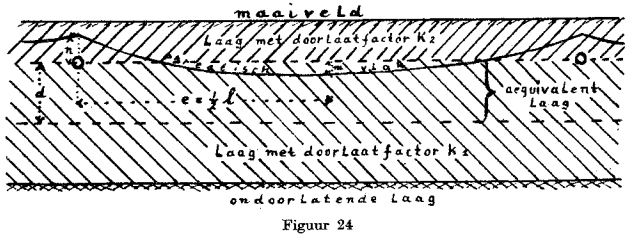
$$s = \frac{8k_1\, d\,(n - m_0) + 4k_2\,(n^2 - m_0^2)}{l^2} \qquad (106)$$

enz., aangezien nu n grooter is dan m_0. Hierbij is dus aangenomen, dat onder de drains een doorlatende laag aanwezig is. (Is deze niet aanwezig, d. w. z. liggen de drains juist op een ondoorlatende laag, dan is in vergelijking 106 $d = 0$. Bij gebruikmaking van greppels, slooten, enz. is d nooit gelijk nul, aangezien immers altijd een laag doorlatende grond onder het vlak door de waterspiegels in greppels, slooten, enz. aanwezig is.)

De in vergelijking 106 voorkomende factor d kan ook nu weer worden ontnomen aan de tabellen 5, terwijl k_1, k_2, s en l dezelfde beteekenis hebben als in vergelijking 102, enz. Onder n wordt verstaan de loodrechte afstand van den grondwaterspiegel boven de drains tot de lijn, die de centra van de drains verbindt en onder m_0 de loodrechte afstand van den grondwaterspiegel midden tusschen de drains tot genoemde lijn.

Ligt deze laatste grondwaterspiegel onder de lijn door de centra van de drains, hetgeen denkbaar is (zie figuur 24, die een doorsnede loodrecht de drains voorstelt), dan luidt de vergelijking, als m_0 ook nu den loodrechten afstand van den grondwaterspiegel midden tusschen de drains tot het vlak door de drains voorstelt (zie figuur 24):

$$s = \frac{8k_1\, d\,(n + m_0) + 4k_2\, n^2 - 4k_1\, m_0^2}{l^2} \qquad (107)$$

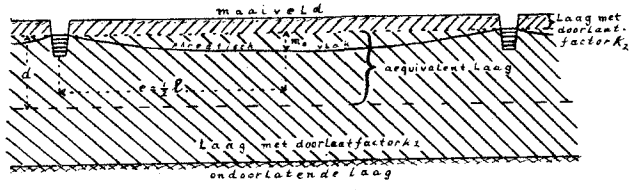


Figuur 24

Dwarsdoorsnede van het geval, dat de grond door middel van drainreeksen geïnfiltreerd wordt; de gemiddelde doorlatendheid van den grond boven de drains is k_2 en onder de drains, tot een zekere diepte daaronder, k_1. De grondwaterspiegel midden tusschen de drains ligt onder het vlak door de drains. De strooming in de capillaire laag mag verwaarloosd worden

Men zie hiervoor ook de afleiding van de vergelijking 181 van de in noot 1 genoemde publicatie, die dezelfde blijft als, in plaats van greppels, drains op een dusdanige wijze in den grond liggen, dat de middelpunten van deze drains juist liggen op de scheidingslijn van de lagen 1 en 2, waarbij $h_1 = d$ (in de vergelijkingen 179, 180 en 181 komt de factor h voor, dit is een drukfout en moet zijn h_1) en waarbij in dit geval de factor d de beteekenis krijgt van een aequivalent-laag, waarvan de waarde uit de tabellen 5 kan worden afgeleid.

Bij greppels, slooten, enz. wordt de vergelijking 106, aangezien m_0 wordt gerekend vanaf het vlak door de waterspiegels in deze greppels, slooten, enz. (zie figuur 25; n is hier gelijk nul):



Figuur 25

Dwarsdoorsnede van het geval, dat de grond door middel van greppels (slooten, enz.) geïnfiltreerd wordt, de gemiddelde doorlatendheid van den grond boven het vlak door de waterspiegels in deze greppels (slooten, enz.) k_2 en onder genoemd vlak, tot een zekere diepte daaronder, k_1 is. De strooming in de capillaire laag mag verwaarloosd worden

$$s = \frac{8k_1\, dm_0 - 4k_1\, m_0^2}{l^2} \qquad (108)$$

waarbij k_2 van de vergelijking 106 uit den aard der zaak veranderd wordt in k_1, aangezien immers de grondwaterspiegel midden tusschen de greppels, slooten, enz. onder den waterspiegel in de greppels, slooten, enz. ligt. Men denke er om, dat de grondwaterspiegel nu *onder* het vlak door de waterspiegels in de greppels, slooten, enz. ligt. Bij vergelijking 106 ligt deze waterspiegel *boven* het vlak door de drains; zie ook vergelijking 107. Verder spreekt het wel vanzelf, dat voor homogene gronden de doorlaatfactor k van dezen grond in de plaats komt van k_1 en k_2.

Tenslotte kan nog worden opgemerkt, dat in vele gevallen, behalve wanneer drainreeksen als infiltratiesystemen worden gebruikt, eenvoudig kan worden aangenomen, dat het vlak door de waterspiegels in greppels en slooten de bovenbegrenzing van het stroomingsveld vormt, of dus, dat gedeelten, die niet tot het stroomingsveld mochten behooren en die daar nog onder mochten liggen, eenvoudig verwaarloosd kunnen worden. In dat geval geldt eenvoudig:

$$s = \frac{8kdm_0}{l^2} \qquad (109)$$

Deze laatste vergelijking is des te juister, naarmate de factor d grooter is ten opzichte van m_0, hetgeen vaak het geval zal zijn, aangezien bij infiltratie de factor m_0 meestal klein is.

§ 3. Infiltratie in zandgronden

In dit geval moet de capillaire laag wel in rekening worden gebracht, tenzij men deze kan verwaarloozen (zie hieronder). Zooals reeds in hoofdstuk IV van de in noot 1 genoemde publicatie werd aangegeven, zijn verschillende gevallen mogelijk, die in verband met de invoering van n, m_0 en d met nog enkele gevallen kunnen worden uitgebreid. Zij zullen hieronder in het kort worden aangegeven. Eenvoudigheidshalve zal worden aangenomen, dat onder de ontwateringssystemen tot op zekere diepte steeds een doorlatende laag wordt aangetroffen. Is deze bij drains niet aanwezig, dan is in dat geval de factor d in de vergelijkingen, die voor het gebruik van drains gelden, gelijk nul.

a. Vergelijkingen, die zoowel bij gebruik van drains als greppels, slooten, enz. gelden, voorzoover althans niet anders is vermeld; de capillaire laag mag verwaarloosd worden

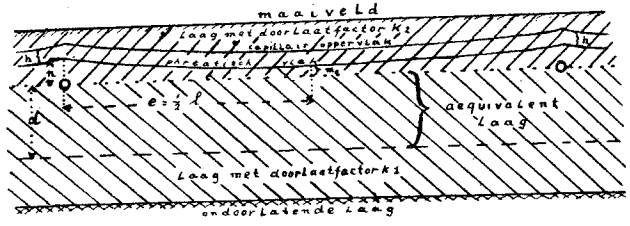
Geval 1. In de eerste plaats kunnen we ook nu het geval hebben, dat het vlak door de waterspiegels in greppels, slooten, enz. als de bovengrens van het stroomingsveld mag worden beschouwd. In dat geval geldt de reeds boven aangegeven vergelijking 109. De dikte van de capillaire zone wordt dus ook verwaarloosd, voor zooverre zij boven genoemd vlak ligt. Dit geval geldt dus niet voor drains.

Geval 2. In de tweede plaats is het mogelijk, dat de capillaire laag zoo dun is, dat deze verwaarloosd mag worden, terwijl het horizontale vlak door de waterspiegels in greppels, slooten, enz. niet als de bovenbegrenzing van het stroomingsveld mag worden beschouwd. Voor deze begrenzing mag dan de grondwaterspiegel worden genomen en bij gebruik van drains resp. van andere ontwateringssystemen gelden dan de vergelijkingen: voor drains 106 en 107 en voor greppels, slooten, enz. 108.

b. Behandeling van eenige vergelijkingen, die alleen gelden bij gebruik van drains en voor het geval de capillaire laag niet verwaarloosd mag worden

Geval 1. Het capillaire oppervlak reikt nergens tot het maaiveld, terwijl de grondwaterspiegel midden tusschen de drains boven het vlak door de assen van de drains ligt.

In dit geval (zie figuur 26) geldt de onderstaande vergelijking; vergelijk



Figuur 26

Dwarsdoorsnede van het geval de grond door middel van drains wordt geïnfiltreerd en de capillaire laag niet verwaarloosd mag worden, echter nergens reikt tot het maaiveld. De grond onder het vlak door de drains, tot een zekere diepte daaronder, heeft een gemiddelden doorlaatfactor k_1 en boven dit vlak een gemiddelden doorlaatfactor k_2

de afleiding van de vergelijking 185 van de in noot 1 genoemde publicatie (de term $k_1h_1h_0\ (1 - n_1)$ in vergelijking 184 en 185 moet zijn $2k_1h_1h_0\ (1 - n_1)$; het cijfer 2 is helaas weggevallen):

$$s = \frac{8k_1\, d\,(n - m_0) + 4k_2 \left\{ (n + h)^2 - (m_0 + h)^3 \right\}}{l^2} \qquad (110)$$

waarin alle letters dezelfde beteekenis hebben als in de reeds aangegeven vergelijkingen; de factor h geeft de gemiddelde dikte van de capillaire laag [1]) aan.

Nu is de doorlaatfactor van den grond in de capillaire laag ten gevolge van het aldaar aanwezige, grootere luchtgehalte meestal kleiner tot veel kleiner dan van de dieper gelegen lagen. Wil men deze capillaire laag afzonderlijk met een gemiddelden doorlaatfactor k_3 van deze laag in rekening brengen, dan worden de vergelijkingen veel ingewikkelder. De afleiding daarvan blijft echter analoog aan die van de bovenstaande vergelijking; zij zal echter niet behandeld worden, aangezien voor k_2 op de reeds eerder aangegeven methoden (zie de vergelijkingen 95 a en b) een gemiddelde doorlaatfactor van de geheele laag onder het capillaire oppervlak tot het vlak door de assen van de drains

[1]) In werkelijkheid is het capillaire oppervlak immers een grillig gevormd vlak; in figuur 26 is de gemiddelde ligging van dit vlak aangegeven. Deze opmerking zal verder niet worden herhaald.

berekend kan worden, die voldoend nauwkeurige berekeningen toelaat en waardoor de berekeningen van eenvoudigen aard blijven.

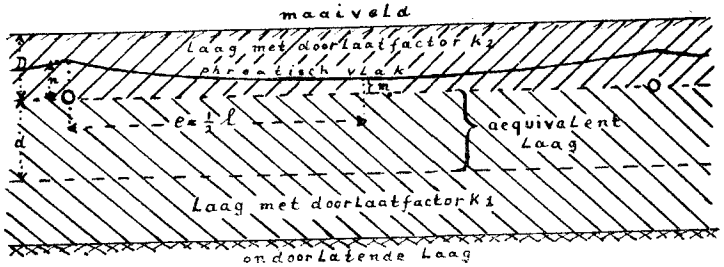
Geval 2 *en* 3. Het capillaire oppervlak reikt nergens tot het maaiveld. De grondwaterspiegel ligt midden tusschen de drains onder de lijn, die de centra van de drains verbindt; het capillaire oppervlak midden tusschen de drains ligt boven dan wel onder de genoemde lijn.

Deze gevallen zullen weinig voorkomen en zullen dan ook niet verder behandeld worden, temeer, aangezien drains nog slechts in zeer beperkte mate voor infiltratie gebruikt worden.

Geval 4. Het capillaire oppervlak reikt overal tot het maaiveld. De grondwaterspiegel midden tusschen de drains ligt boven de lijn, die de centra van de drains verbindt.

De vergelijking, die in dit geval (zie figuur 27, die een doorsnede loodrecht de drains voorstelt) geldt, luidt als volgt:

$$s = \frac{8k_1\, d\, (n - m_0) + 8k_2\, \mathrm{D}\, (n - m_0)}{l^2} \qquad (111)$$



Figuur 27

Dwarsdoorsnede van het geval, dat de grond door middel van drains wordt geïnfiltreerd, de capillaire laag niet verwaarloosd mag worden en overal tot het maaiveld reikt. De grond onder het vlak door de drains heeft, tot zekere diepte daaronder, een gemiddelden doorlaatfactor k_1 en boven dit vlak een gemiddelden doorlaatfactor k_2

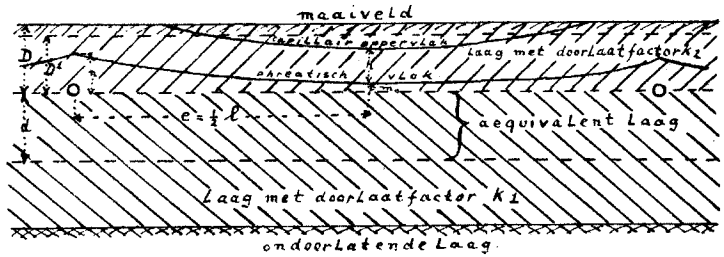
waarin D gelijk is aan den verticalen afstand van het maaiveld tot het vlak, dat de assen van de drains verbindt.

Geval 5. Het capillaire oppervlak reikt overal tot het maaiveld. De grondwaterspiegel midden tusschen de drains ligt onder de lijn, die de centra van de drains verbindt.

Om soortgelijke redenen, als voor de gevallen 2 en 3 zijn aangegeven, zal ook de hiervoor geldende vergelijking niet verder worden behandeld.

Geval 6. Het capillaire oppervlak reikt gedeeltelijk tot het maaiveld. De grondwaterspiegel midden tusschen de drains ligt boven de lijn, die de centra van de drains verbindt.

In dit geval (zie figuur 28) blijft de vergelijking 111 geldig, alleen komt voor den factor D de factor $\mathrm{D}' = \dfrac{\mathrm{D} + m_0 + h}{2}$ in de plaats.



Figuur 28

Dwarsdoorsnede van het geval, dat de grond door middel van drains wordt geïnfiltreerd, de capillaire laag niet verwaarloosd mag worden en de capillaire laag gedeeltelijk wel gedeeltelijk niet tot het maaiveld reikt. De grond onder het vlak door de drains heeft, tot zekere diepte daaronder, een gemiddelden doorlaatfactor k_1 en boven dit vlak een gemiddelden doorlaatfactor k_2

Geval 7. Het capillaire oppervlak reikt gedeeltelijk tot het maaiveld. De grondwaterspiegel midden tusschen de drains ligt onder de lijn, die de centra van de drains verbindt.

Om soortgelijke redenen als bij de bespreking van de gevallen 2 en 3 zijn aangegeven, zal dit geval niet nader besproken worden.

Algemeene opmerking

Ligt de ondoorlatende laag zoo ondiep onder het vlak door de drains, dat de factor d volgens de tabellen 5 practisch gesproken of wel geheel gelijk is aan den verticalen afstand van deze ondoorlatende laag tot genoemd vlak door de drains, dan kunnen ook de in hoofdstuk IV en voor drains geldende vergelijkingen van de in noot 1 genoemde publicatie worden toegepast.

Is de grond homogeen doorlatend, dan is in de bovenstaande vergelijkingen steeds $k_1 = k_2 = k$.

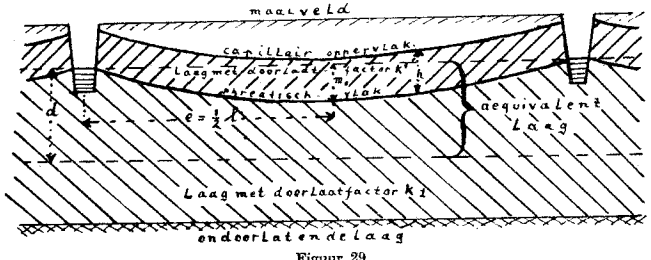
Verder kan in de grondlaag boven het vlak door de assen van de drains, indien de omstandigheden daarvoor gunstig zijn, ook een continue veranderlijke doorlaatfactor in rekening worden gebracht. Dit zal hier echter niet verder worden behandeld.

c. Vergelijkingen, die alleen gelden bij gebruik van greppels, slooten, enz., of dus van z.g. open infiltratiesystemen en voor het geval de capillaire laag niet verwaarloosd mag worden

In al deze gevallen ligt uit den aard der zaak de grondwaterspiegel midden tusschen de greppels, slooten, enz. onder het verbindingsvlak door de waterspiegels in deze greppels, slooten, enz. In verband hiermede kan men vaak de eenvoudigste oplossing verkrijgen door den gemiddelden doorlaatfactor k' van de capillaire laag in te voeren, die dus bij gegeven grondwaterstand en waterstand in de greppels, slooten, enz. uit de in het laboratorium bepaalde doorlaatfactoren en de capillaire stijghoogte is te berekenen. De doorlaatfactor k_1 heeft dan de beteekenis van den gemiddelden doorlaatfactor van den grond onder den grondwaterspiegel. De factor m_0 wordt ook nu gerekend vanaf het vlak door de waterspiegels in de greppels, slooten, enz.

Geval 1. Het capillaire oppervlak reikt nergens tot het maaiveld; het bevindt zich midden tusschen de greppels, slooten, enz. boven het vlak door de waterspiegels in deze greppels, slooten, enz.

De afleiding van de voor dit geval geldende vergelijking is als volgt (zie figuur 29):



Figuur 29

Dwarsdoorsnede van het geval de grond door middel van greppels (slooten, enz.) wordt geïnfiltreerd, de capillaire laag niet verwaarloosd mag worden, deze laag nergens tot het maaiveld reikt en het capillair oppervlak zich midden tusschen de greppels (slooten, enz.) boven het vlak door de waterspiegels in deze greppels (slooten, enz.) bevindt. Onder het phreatisch vlak, tot zekere diepte daaronder, heeft de grond een gemiddelden doorlaatfactor k_1, terwijl de capillaire laag een doorlaatfactor k^1 heeft

Is Q de hoeveelheid water, die per eenheid van tijd door den greppelwand (slootwand, enz.) naar één zijde vloeit, dan gaat dus door een doorsnede op een afstand x van den greppel (sloot, enz.) een hoeveelheid water

$$q_x = Q\,\frac{e-x}{x} = k_1\,(d-m)\,\frac{dm}{dx} + k'\,h\,\frac{dm}{dx},$$

waarin d weer de beteekenis heeft van de dikte van een aequivalent-laag; k_1 is de gemiddelde doorlaatfactor van den grond *onder* den grondwaterspiegel en k' van de capillaire laag.

Geïntegreerd van $x = 0$ tot $x = x$ en van $m = 0$ tot $m = m$, ontstaat hieruit:

$$Q\left(x - \frac{x^2}{2e}\right) = k_1\,dm - \tfrac{1}{2}\,k_1\,m^2 + k'\,hm$$

Voor $x = e$ en $m = m_0$ gaat de vergelijking over in:

$$Q = \frac{2k_1\,dm_0 - k_1\,m_0^2 + 2k'\,hm_0}{e}$$

Vullen we in voor $Q = se = \frac{1}{2}\,sl$ en voor $e = \frac{1}{2}\,l$, dan ontstaat:

$$s = \frac{8k_1\,dm_0 - 4k_1\,m_0^2 + 8k'\,hm_0}{l^2} \qquad (112)$$

waarin d, m_0, l weer de gewone beteekenis hebben en k en k' de reeds genoemde.

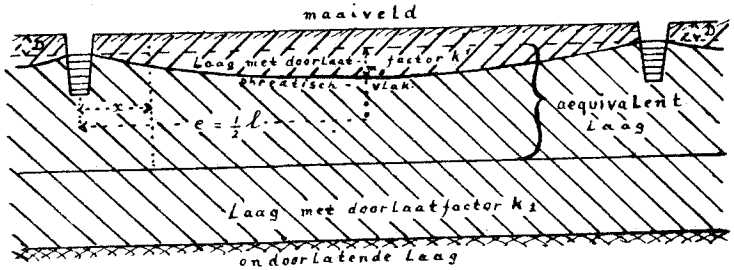
Bij het bovenstaande kan worden opgemerkt, dat, indien men den gemiddelden doorlaatfactor van de capillaire laag en van de onderliggende laag samen berekent en als k_1 aangeeft, de vergelijking wordt:

$$s = \frac{8k_1\,m_0\,(d + h) - 4k_1\,m_0^2}{} \qquad (113)$$

Geval 2. Het capillaire oppervlak reikt nergens tot het maaiveld; het bevindt zich midden tusschen de greppels, slooten, enz. onder het vlak door de waterspiegels in deze greppels, slooten, enz.

Dit geval zal weinig voorkomen en zal dan ook niet verder behandeld worden. Mocht het nog worden aangetroffen, dan zal men door den gemiddelden doorlaatfactor van de capillaire laag en van de daaronder liggende laag samen te berekenen het vlak door den waterspiegel in de greppels, slooten, enz. als bovenbegrenzing van het stroomgebied mogen beschouwen, aangezien de gedeelten van het door de capillaire laag gevormde stroomingsveld, die boven (dicht bij de greppels, slooten, enz) genoemd vlak liggen, weg zullen vallen tegen het gedeelte (meer in het midden tusschen de greppels, slooten, enz.) onder genoemd vlak, dat niet tot het stroomingsveld behoort. Dit wil dus zeggen, dat de vergelijking 109 mag worden toegepast.

Geval 3. Het capillaire oppervlak reikt overal tot het maaiveld.



Figuur 30

Dwarsdoorsnede van het geval, dat de grond door middel van greppels (slooten, enz.) wordt geïnfiltreerd, de capillaire laag niet verwaarloosd mag worden en de capillaire laag overal tot het maaiveld reikt. De grond onder het phreatisch vlak, tot een zekere diepte daaronder, heeft een gemiddelden doorlaatfactor k_1, terwijl de capillaire laag een doorlaatfactor k^1 heeft

In dit geval geldt de onderstaande vergelijking, die op analoge wijze als vergelijking 112 kan worden afgeleid. In dit geval is (zie figuur 30, die een doorsnede loodrecht de ontwateringssystemen voorstelt):

$$q_x = Q\,\frac{e - x}{e} = k_1\,(d - m)\,\frac{dm}{dx} + k'\,(D + m)\,\frac{dm}{dx}$$

Na integratie van $x = 0$ tot $x = e = \frac{1}{2}\,l$ en van $m = 0$ tot $m = m_0$ ontstaat hieruit na eenige omwerking:

$$s = \frac{8k_1\,dm_0 + 8k'\,Dm_0 + 4\,(k' - k_1)\,m_0^2}{l^2} \qquad (114)$$

waarin de letters dezelfde beteekenis hebben als in de vergelijking 112; alleen stelt D nu den loodrechten afstand van het maaiveld tot het vlak door de waterspiegels in de greppels, slooten, enz. voor.

Verder lijkt het mij gewenscht op te merken, dat, als men onder k_1 den gemiddelden doorlaatfactor van de laag **onder het vlak door de waterspiegels in de greppels, slooten, enz.** verstaat (in vergelijking 114 stelt k_1 den gemiddelden doorlaatfactor van den grond onder den **grondwaterspiegel** voor) en als k_2 de gemiddelde doorlaatfactor van den grond boven dit vlak is, dan de vergelijking moet luiden:

$$s = \frac{8k_1\,dm_0 + 8k_2\,Dm_0}{l^2} \qquad (115)$$

waarin dus, afgezien van de letters k_1 en k_2, de overige letters de reeds eerder genoemde beteekenis hebben.

Geval 4. Het capillaire oppervlak reikt gedeeltelijk wel, gedeeltelijk niet tot het maaiveld.

In dit geval geldt eveneens de vergelijking 114 of 115 (afhankelijk dus van wat men onder k_1, k_2 en k' verstaat); alleen komt voor D nu in de plaats $D' = \frac{D + h - m_0}{2}$, waarin h de dikte van de capillaire laag voorstelt en de overige letters dezelfde beteekenis hebben als in de vergelijking 114 resp. 115.

d. Algemeene opmerking

Ligt de ondoorlatende laag zoo ondiep onder het vlak door de waterspiegels in de greppels, slooten, enz., dat de factor d volgens de tabellen 5 practisch gesproken of geheel gelijk is aan den verticalen afstand van deze ondoorlatende laag tot genoemd vlak, dan kunnen ook de in hoofdstuk IV van de in noot 1 genoemde publicatie en de voor greppels, slooten, enz. (open infiltratiesystemen) geldende vergelijkingen worden toegepast.

Is de grond homogeen doorlatend, dan is in de bovenstaande vergelijkingen steeds $k_1 = k_2 = k' = k$.

HOOFDSTUK V

Enkele practische toepassingen

In dit hoofdstuk zal aan enkele voorbeelden worden duidelijk gemaakt op welke wijze men de benoodigde gegevens kan bepalen en hoe men de verlangde gegevens (bijv. den drainafstand) moet berekenen. Uit den aard der zaak moet hiervoor een keuze worden gedaan. We zullen beginnen met vraagstukken betreffende de ontwatering te behandelen en wel zullen we zoowel enkele gevallen van drainage als een geval van ontwatering door middel van slooten en kanalen nagaan. Daarna zal nog een enkel geval van infiltratie worden behandeld.

A. *Ontwatering*

§ 1. Korte bespreking van de belangrijkste formules met behulp waarvan de verlangde factoren worden berekend

In de eerste plaats mogen hier nogmaals de drie belangrijkste formules worden besproken, die in de practijk voor de berekening van de gevraagde factoren wel vrijwel steeds zullen worden gebruikt.

a. Ontwatering door middel van drains

Bij gebruik van drains als ontwateringssystemen zijn dat de volgende, nl.:

1. Er komt grondwater boven de drains voor, of hierop moet bij den aanleg van de drainage worden gerekend (zie ook noot 13).

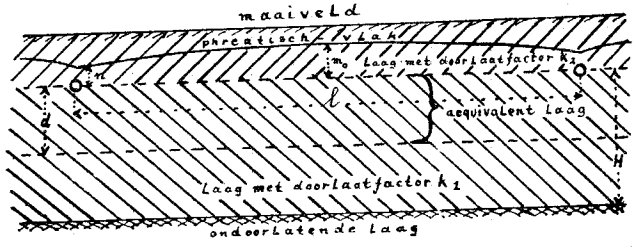
Hiervoor geldt de vergelijking:

$$s = \frac{8k_1\, d\,(m_0 - n) + 4k_2\,(m_0^2 - n^2)}{l^2} \qquad (115a)$$

of

$$l = \sqrt{\left(\frac{8k_1\, d\,(m_0 - n) + 4k_2\,(m_0^2 - n^2)}{s}\right)} \qquad (115b)$$

Hierin stelt (zie ook figuur 31; H = diepteligging van den bovenkant van de ondoorlatende laag in meters onder het vlak door de assen van de drains);



Figuur 31

Dwarsdoorsnede door de drains in het geval grondwater boven de drains voorkomt, of hierop bij den aanleg van de drains gerekend moet worden en in het geval de strooming boven het vlak door de drains niet verwaarloosd mag worden. De grond boven het vlak door de drains heeft een gemiddelden doorlaatfactor k_2 en onder dit vlak, tot een zekere diepte daaronder, een doorlaatfactor k_1

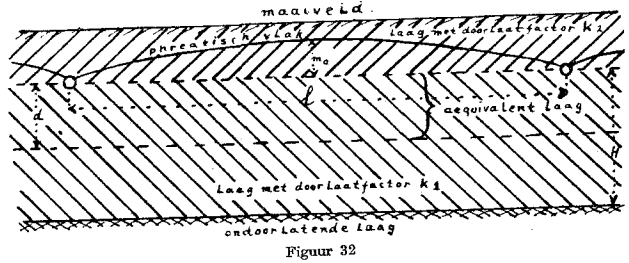
s den afvoer van een laag water in meters per 24 uur voor (bijv. 5 mm = 0,005 m per 24 uur); l is de drainafstand in meters. De factor d geeft de dikte van de aequivalent-laag in meters aan, die uit de tabellen 5 is af te leiden (zie hieronder). De factoren m_0 en n geven resp. de hoogteligging van den grondwaterspiegel (meestal phreatisch vlak genoemd) in meters midden tusschen de drains resp. boven de drains en gerekend vanaf het vlak door de assen van de drains aan. Ten slotte zijn k_1 en k_2 de gemiddelde doorlaatfactoren van den grond in meters per 24 uur onder het vlak door de assen van de drains resp. daarboven.

Hierbij kan worden opgemerkt, dat, indien de drains juist op de ondoorlatende laag liggen, de factor $d = 0$ wordt en dus zoowel in de vergelijking 115a als 115b de factor $8k_1 d\,(m_0 - n)$ gelijk nul wordt.

Indien het betreffende perceel reeds gedraineerd is, kan men waarnemen, of grondwater boven de drains voorkomt, door een boorgat recht boven de drains en tot op korte hoogte daarboven te boren en na te gaan, of in verloop van eenige dagen en gedurende een natte periode hierin water komt te staan. Men mag dit gat niet tot op de drainreeks doorboren om een eventueel slecht doorlatend laagje, dat soms vlak boven de drains aanwezig is, indien hier grondwater boven voorkomt (zie ook de in noot 1 genoemde literatuur blz. 643 en hieronder), niet te doorboren.

2. Er komt geen grondwater boven de drains voor.

Komt geen grondwater boven de drains voor (hierop kan als regel bij den aanleg van drains — mits deze goed worden uitgevoerd — worden gerekend), dan is de factor $n = 0$ en luidt de vergelijking (zie figuur 32; hierin stelt H



Figuur 32

Dwarsdoorsnede door de drains in het geval geen grondwater boven de drains voorkomt, of hierop bij den aanleg van drains niet gerekend behoeft te worden en in het geval de strooming boven het vlak door de drains niet verwaarloosd mag worden. De grond boven het vlak door de drains heeft een gemiddelden doorlaatfactor k_2 en onder dit vlak ,tot een zekere diepte daaronder, een doorlaatfactor k_1

de diepteligging van den bovenkant van de ondoorlatende laag in meters onder het vlak door de assen van de drains voor):

$$s = \frac{8k_1\, dm_0 + 4k_2\, m_0^2}{l^2} \qquad (116a)$$

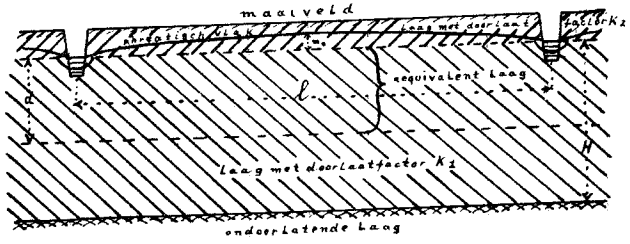
of

$$l = \sqrt{\left(\frac{8k_1\, dm_0 + 4k_2\, m_0^2}{s}\right)} \qquad (116b)$$

Hierin hebben de letters s, d, k_1 en k_2 dezelfde beteekenis als in de formules 115a en 115b. Ook de factor m_0 heeft dezelfde beteekenis, nl. de hoogteligging van den grondwaterspiegel (meestal phreatisch vlak genoemd) in meters midden tusschen de drains en gerekend vanaf het vlak door de assen van de drains. Liggen de drains juist op de ondoorlatende laag, dan is de factor: $8k_1dm_0 = 0$.

b. Ontwatering door middel van open ontwateringssystemen (greppels, slooten, kanalen, enz.)

In al deze gevallen gelden de vergelijkingen 116a en 116b (zie figuur 33. Hierin stelt H de diepteligging van den bovenkant van de ondoorlatende laag



Figuur 33

Dwarsdoorsnede door greppels (slooten, enz.) in het geval de stroming boven het vlak door de waterspiegels in deze greppels (slooten, enz.) niet verwaarloosd mag worden. De grond boven het vlak door de waterspiegels in deze greppels (slooten, enz.) heeft een gemiddelden doorlaatfactor k_2 en onder dit vlak, tot een zekere diepte daaronder, een doorlaatfactor k_1

onder het vlak door den waterspiegel in deze ontwateringssystemen voor; bij practisch droge ontwateringssystemen — tijdens afvoer van water — is dit laatste vlak het vlak door den bodem van deze ontwateringssystemen).

Kunnen we het gedeelte van het stroomingsveld boven het vlak door de waterspiegels in deze ontwateringssystemen verwaarloozen, hetgeen des te eerder het geval is, naarmate de dikte en de doorlatendheid van de doorlatende grondlaag onder genoemd vlak en tot aan den bovenkant van de ondoorlatende laag grooter is, evenals de onderlinge afstand van deze ontwateringssystemen, dan luidt de vergelijking (de factor $4k_2m_0^2$ verdwijnt):

$$s = \frac{8kdm_0}{l^2} \qquad (117)$$

De letters s, d, k_1 en k_2 hebben dezelfde beteekenis als in de vergelijkingen 115a en 115b.

Onder m_0 wordt in beide gevallen verstaan de hoogteligging van den grondwaterspiegel (= phreatisch vlak) in meters midden tusschen de ontwateringssystemen en gerekend vanaf het verbindingsvlak door de waterspiegels in deze ontwateringssystemen. Voor zoover deze ontwateringssystemen bij afvoer van water practisch gesproken droog blijven (een waterspiegel is dan soms moeilijk aan te geven) vormt het verbindingsvlak door de bodems van deze ontwateringssystemen het bovenbedoelde vlak, waar vanaf de factor m_0 dan wordt gerekend.

Voor zoover deze ontwateringssystemen niet halfcirkelvormig zijn (d. w. z. alléén het gedeelte onder den waterspiegel), wordt dus de natte omtrek (omtrek van deze ontwateringssystemen onder den waterspiegel = Om), uitgedrukt in meters, omgerekend op een halfcirkelvormig ontwateringssysteem met straal r_0 (in meters), zoodat $\pi r_0 = Om$. Deze laatste straal r_0 gebruikt men om de waarde van den factor d uit de tabellen 5 af te leiden. Bevatten deze ontwateringssystemen bij den betreffenden afvoer van water practisch geen water en, is de bodembreedte van deze ontwateringssystemen B, dan is dus $\pi r_0 = B$, waaruit weer r_0 is uit te rekenen.

c. Enkele opmerkingen

Ofschoon voor de practijk van minder belang, kan men ook vergelijkingen gebruiken, waarbij de laag grond (bij drainage) boven het vlak door de assen van de drains nog in verschillende lagen met ieder een verschillenden doorlaatfactor verdeeld is, dan wel een continue, volgens de een of andere functie, veranderenden doorlaatfactor bezit. Deze vergelijkingen zullen hier niet verder besproken worden, aangezien men, als meerdere doorlaatfactoren van deze geheele laag ter beschikking zijn, gemakkelijker een gemiddelden doorlaatfactor kan berekenen (zie de vergelijkingen 95a en b en hieronder; zie ook de in noot 1 genoemde literatuur, hoofdstuk II, sub II, §§ 1 en 2) en dan de formule 115 of 116 toepassen. Ook bij open ontwateringssystemen zijn de bedoelde vergelijkingen op te stellen (zie de hierboven aangehaalde literatuur); ook hier gebruikt men gemakkelijker de gemiddelde doorlaatfactoren en de formules 116 of 117.

Alleen wanneer de z.g. Q-H_0-lijnen enz. bekend zijn en men de doorlatendheid wil berekenen, verdienen de bovengenoemde vergelijkingen (zie de in noot 1 aangehaalde literatuur, hoofdstuk III, sub E, § 1, γ) de voorkeur.

§ 2. De helling en de dieptelligging van de drainreeeksen

Zooals bekend is worden de drainreeksen gewoonlijk onder een zekere helling gelegd. Deze helling bedraagt in de provincie Groningen bijv. meestal

10 cm per 100 m drain; soms echter ook 15 tot 20 cm. In andere provincies (bijv. in de provincie Friesland), waar kruinige perceelen (soms) voorkomen, moet wel eens een grootere helling worden toegepast, aangezien anders de draindiepte onder het maaiveld te ongelijk en halfweg de perceelen te diep zou worden (kruinige perceelen hebben den vorm van de bovenste helft van een horizontaal doorgesneden kussen, waarvan de randen dus door de slooten gevormd worden).

De vraag kan nu worden gesteld, wat men onder de draindiepte moet verstaan, nl. de diepteligging in meters van de as van het hoogst gelegen uiteinde dan wel de gemiddelde diepteligging van het vlak door de assen van de geheele drainreeksen onder het maaiveld. Het antwoord kan daarop m. i. luiden, dat men beide kan kiezen. Het meest voor de hand liggend is de gemiddelde draindiepte aan te houden, d. w. z. dus de gemiddelde diepte van de geheele drainreeks onder het maaiveld. Bij het stellen van den eisch, waaraan de drainage moet voldoen, kan men er immers rekening mede houden, dat een gedeelte van de drainreeks iets minder diep onder het maaiveld ligt. Ook bij de opstelling van den in hoofdstuk II genoemden eisch aan de drainage van bouwland op kleigrond zonder kwel, n.l. dat 5 mm overtollige neerslag per 24 uur moet kunnen worden afgevoerd, zonder dat de grondwaterstand midden tusschen de drains hooger oploopt dan tot 50 cm onder het maaiveld, is met deze gemiddelde draindiepte rekening gehouden. Alleen, indien de drains naar één zijde hellen (dus niet afwisselend in de tegenovergestelde slooten uitmonden) en langer zijn dan omstreeks 200 m, zal men goed doen er rekening mede te houden, dat de ééne helft van de drainreeksen een iets geringere draindiepte heeft. Afhankelijk van de lengte (bijv. 250, 300 m, enz.) en van de helling (10, 15 cm enz. per 100 m drain) moet men dan *voor het berekenen* van den benoodigden drainafstand de daarvoor geldende draindiepte een 5 à 15 cm geringer aannemen (dus afhankelijk van de omstandigheden) dan de gemiddelde draindiepte in werkelijkheid bedraagt (zie de in noot 44 genoemde literatuur). Hieraan wil ik echter toevoegen, dat naar mijn meening het beter is er zooveel mogelijk voor te zorgen, dat de drainreeksen niet langer worden dan omstreeks 200 m.

Ten slotte kan ten opzichte van een samengestelde drainage (hoofddrain met z.g. zuigdrains) worden opgemerkt, dat hier alleen de gemiddelde diepte van de *zuig*drains van belang is voor het aangeven van den drainafstand. Aangezien echter de hoofddrain ook onder een zekere helling wordt gelegd, kan het voorkomen, dat de gemiddelde diepteligging van den eersten zuigdrain onder het maaiveld niet onbelangrijk verschilt van die van den laatsten zuigdrain. Men berekent dan zoowel den benoodigden drainafstand voor een diepteligging van de zuigdrains onder het maaiveld bij het begin als bij het

eind van dezen hoofddrain. Is deze benoodigde afstand bijv. resp. 15 en 20 m, dan laat men over den vollen afstand van den hoofddrain dezen drainafstand geleidelijk van 15 tot 20 m oploopen. Is de hoofddrain echter slechts kort, dan neemt men als gemiddelde draindiepte het gemiddelde van de diepteligging van alle zuigdrains onder het maaiveld aan.

In alle gevallen moet men uit de bovenbedoelde gemiddelde draindiepte (dus gelijk aan de gemiddelde diepteligging van het vlak door de assen van de geheele drainreeksen in meters onder maaiveld) den factor m_0 afleiden. Deze factor m_0 is gelijk aan de gemiddelde draindiepte onder het maaiveld minus de hoogste ligging, die de grondwaterspiegel midden tusschen de drains en onder het maaiveld mag hebben. Voor bouwland op kleigrond is deze laatste afstand 0,5 m, zoodat in dat geval m_0 = gemiddelde draindiepte onder maaiveld — 0,5 (m_0 in meters uitdrukken). Is de gemiddelde draindiepte bijv. 1,0 m onder het maaiveld, dan is in het laatste geval $m_0 = 1{,}0 - 0{,}5 = 0{,}5$ m, enz. Onder verwijzing naar hoofdstuk II kan worden opgemerkt, dat deze eisch verschillend kan zijn, al naar gelang van het doel, waarvoor het betreffende terrein moet dienen.

Ten slotte kan in dit verband nog worden opgemerkt, dat men desnoods draineeren kan als het polderpeil constant nogal hoog is, dan wel in natte perioden tot hooge waarden oploopt (slechte beheersching van het polderpeil), ofschoon men verreweg het beste kan adviseeren een onderbemaling te stichten resp. de beheersching van het polderpeil te verbeteren. Als regel wordt de draindiepte namelijk bepaald door het polderpeil en de beheersching daarvan, aangezien de drainreeksen als regel boven het slootpeil moeten liggen. Is dit laatste niet het geval en liggen de drainreeksen als regel onder water, dan bestaat eerder kans op verstopping en dichtslemping van de drainreeksen, tenzij extra voorzorgen zijn genomen, die men echter beter in verband met de kosten daarvan kan vermijden, afgezien nog van het feit, **dat, als de drains onder water liggen, er grondwater boven de drains komt te staan, waarmede bij de berekening van den drainafstand rekening moet worden gehouden (zie noot 13 en ook de in noot 1 genoemde literatuur, hoofdstuk VI).**

Alleen, indien de grond onder het maaiveld zoo slecht doorlatend is, dat zelfs met een drainafstand van 5 m nog geen behoorlijke ontwatering te bereiken is, heeft een zoo diep mogelijke ligging van de drains (boven het slootpeil echter) geen zin, waarvoor ook naar hoofdstuk VI, sub IIA, „Het bovengrondsche type" van de in noot 1 genoemde publicatie verwezen kan worden. Dergelijke gevallen schijnen echter in ons land slechts weinig voor te komen of werden door ons althans weinig onderzocht, aangezien meestal onder een slecht doorlatende laag — indien deze althans voorkomt — een veel beter doorlatende laag aanwezig bleek te zijn.

Is de beheersching van het polderpeil onvoldoende en kan deze om welke reden dan ook niet verbeterd worden, dan kan men de draindiepte toch vaststellen aan de hand van het polderpeil, dat als regel — dus niet in zeer natte perioden — aanwezig is, aangezien dan immers de ontwatering van de diepere ligging van de drains profiteeren kan in die perioden, waarin het polderpeil voldoende laag is en de drains dus boven water liggen. Desnoods legt men de drains nog iets dieper, indien althans nog perioden voorkomen van niet te korten duur (in het winterhalfjaar; 1 October—1 April), waarin het polderpeil nog lager is, zoodat gedurende deze perioden nog van de diepere ligging van de drains voordeel kan worden getrokken. In dat geval (drainage) voert men de berekening uit met de vergelijking 115b, waarin n = verschil slootpeil en diepteligging van de drains. Men dient er echter wel op te rekenen, dat in de periode, waarin het polderpeil hoog is (hooger dan 50 cm onder het maaiveld) de ontwatering door de drainage onvoldoende is en door drainage ook niet te verbeteren is, aangezien in dat geval bij welken drainafstand dan ook de grondwaterstand midden tusschen de drains toch te hoog oploopt. Wel is dan echter de ontwatering in de andere perioden met een dieperen slootwaterstand verbeterd.

Ten slotte kan nog worden opgemerkt, dat, indien het polderpeil constant in het winterhalfjaar gelijk of hooger is dan 50 cm onder het maaiveld, door drainage geen betere ontwatering is te verkrijgen dan door de greppels, die ongetwijfeld dan wel in het land aanwezig zullen zijn, zoodat ook nà de drainage de ontwatering onvoldoende blijft. Wil men desondanks (dus zonder verlaging van het polderpeil) toch draineeren, dan dient er dus de nadruk op te worden gelegd, dat men geen verbetering van de ontwatering moet verwachten, maar dat men alleen ter wille van de grondbewerking en om grondverlies te voorkomen moet gaan draineeren, aangezien natuurlijk de greppels dan kunnen verdwijnen. De draindiepte kan dan gering zijn; nl. iets dieper dan het polderpeil Is dit polderpeil zeer hoog, dan moet de draindiepte diep genoeg zijn, dat geen beschadiging daarvan tijdens de bewerking van het land kan optreden.

§ 3. Bepaling van de benoodigde gegevens

Uit de vergelijkingen 115—117 volgt, dat hierin 6 of als grondwater boven de drains staat (n niet gelijk nul) 7 factoren voorkomen, waarvan 5 resp. 6 bekend moeten zijn om de 6de resp. de 7de te kunnen berekenen. Achtereenvolgens zal nu worden aangegeven, hoe men deze factoren bepalen kan.

a. De factor n

Komt water boven de (bestaande) drains voor, dan kan men dit bepalen door òf een boorgat boven de drains te boren en hierin den waterstand te

bepalen (zie ook § 2) òf hiernaast op korten afstand grondwaterstandsbuizen te plaatsen, waarin men den waterstand opneemt (de koppen van de grondwaterstandsbuizen zoo noodig waterpassen; zie de in noot 1 genoemde literatuur, hoofdstuk III, sub A). Soms moet ook bij het leggen van drains veiligheidshalve gerekend worden op het feit, dat er grondwater boven de drains zal optreden, waarvoor echter naar § 2 en noot 13 verwezen wordt.

b. De factor m_0

Bij een bestaande drainage of bij een andere reeds aanwezige ontwateringswijze (bijv. door greppels, slooten, enz.) meet men m_0 het best door midden tusschen de drains, enz. grondwaterstandsbuizen in den grond te brengen en hierin de grondwaterstanden te bepalen (bovenkant grondwaterstandsbuizen waterpassen), waarvoor echter naar de in noot 1 genoemde literatuur, hoofdstuk III, sub A, verwezen kan worden.

Bij nieuw te leggen drains (resp. andere ontwateringssystemen) moet men dus weten, welke eischen aan de drainage (ontwatering) worden gesteld, waarvoor naar § 2 van dit hoofdstuk evenals naar hoofdstuk II verwezen kan worden. Aangezien men hiervoor ook het polderpeil moet kennen, aangezien deze als regel de draindiepte bepaalt (zie § 2 van dit hoofdstuk), moet men dus het maaiveld van het te draineeren perceel op een voldoend aantal plaatsen waterpassen, waarvoor meestal die plekken worden gekozen, waar ook de doorlatendheid wordt bepaald (zie hieronder), hetgeen ook noodig is voor het gemiddelde en het hoogst voorkomende slootwaterpeil in het winterhalfjaar, welke peilen door den betreffenden landbouwer of andere belanghebbenden wel zullen kunnen worden aangegeven. Is dit hoogste polderpeil bijv. 1,2 m onder het gemiddelde maaiveld, dan kunnen de assen van de drains bij de uitmonding op dit peil, d. w. z. hier 1,2 m onder het gemiddelde maaiveld, worden gelegd. Wanneer de beheersching van het polderpeil niet zoo goed mocht zijn als in het voorgaande geval stilzwijgend is aangenomen, neme men een dusdanige draindiepte aan, dat de drains als regel boven het polderpeil liggen (zie echter ook § 2).

Is het perceel nu bijv. 200 m lang en worden de drains in de lengterichting gelegd, dan is de diepteligging op het hoogste punt, indien de helling bijv. 10 cm per 100 m drainreeks bedraagt en de drains bij de uitmonding van de sloot op 1,2 m onder het maaiveld liggen, 1,2 — 0,2 = 1,0 m en de gemiddelde draindiepte derhalve in dit geval 1,1 m. Betreft het gewoon bouwland op kleigrond (natuurlijk geldt dit ook voor zavel-, leem- en dergelijke gronden), dan is m_0 (zie § 2) gelijk aan 1,1 — 0,5 = 0,6 m, enz.

Heeft het maaiveld een helling naar de richting, waarin de drains gelegd zouden kunnen worden, dan geeft men de drains een helling in die richting

en blijft de draindiepte zelfs constant, als de helling van het maaiveld en de drainreeksen dezelfde is.

c. De factor *s*

De factor *s* (laag water in meters per 24 uur, die door de drains of andere ontwateringssystemen moet worden of wordt afgevoerd) kan bij een bestaande drainage gemeten worden op een wijze als aangegeven is in de, in noot (1) genoemde, literatuur, hoofstuk III, sub A, § 2. Ook bij begreppeling kan dezelfde methode worden toegepast, indien althans deze greppels door middel van een kort stuk riool op de slooten uitmonden. Voor andere ontwateringssystemen kan de afvoer meestal alleen worden bepaald door stroomsnelheidsmetingen of door middel van overstorten, waarop niet verder kan worden ingegaan.

Voor nieuw te leggen drains of andere ontwateringssystemen wordt *s* bepaald door den eisch, waaraan deze ontwateringssystemen moeten voldoen (zie ook hoofdstuk II). Voor gewoon bouwland zonder kwel op klei-, zavel- of dergelijke gronden kan dit voor ons land op 5 mm per 24 uur of dus op 0,005 m per 24 uur worden gesteld.

d. De factor *l* en de doorsnede van de ontwateringssystemen r_0

Bij een bestaande drainage is de drainafstand zoo eenvoudig te bepalen, dat hierop niet verder behoeft te worden ingegaan. Bij alle andere ontwateringssystemen (open ontwateringssystemen) wordt de afstand gemeten van hart tot hart. Alleen indien men zeker weet, dat de bodem van deze ontwateringssystemen juist of vrijwel op de ondoorlatende laag ligt (zelden voorkomend geval), kan men voor dezen afstand den afstand van de gemiddelde, naar elkaar toegekeerde zijkanten van deze ontwateringssystemen nemen (zie de in noot 1 genoemde literatuur, hoofdstuk II, blz. 470), hetgeen echter in practisch opzicht vrijwel geen verschil maakt.

Moet de grond gedraineerd worden, of moeten andere ontwateringssystemen worden gegraven, die alleen of tevens dienen voor den rechtstreekschen afvoer van overtollig water, dan moet deze afstand worden berekend met behulp van de andere bekende factoren. De wijze, waarop dit moet geschieden, zal verder onder (zie sub *e* en § 4) nog aan een aantal voorbeelden duidelijk worden gemaakt.

Wat de afmetingen van de ontwateringssystemen betreft, die dus voor het effect daarvan van belang zijn (zie hoofdstuk II en III), kan worden opgemerkt, dat voor gewone drains (inwendige doorsnede 5 cm, uitwendige

doorsnede 7 cm) de straal daarvan aangenomen kan worden op 4 cm, zoodat $r_0 = 0{,}04$ m. Hierbij kan worden opgemerkt, dat, als de drains worden gelegd, zooals het behoort, nl. dat de drainsleuf veel doorlatender is dan de omringende grond en dus de drainbuizen niets anders zijn dan afvoerpijpen in een sterk doorlatend materiaal, het niet onverschillig is, of men op de Zeeuwsche (smalle drainsleuf) dan wel op de Groningsche methode (drains worden gelegd op den bodem van greppels) draineert. De natte omtrek zal bij de Groningsche methode veel grooter zijn (= bodembreedte van de greppel + tweemaal den straal van de drainbuizen) en deze biedt in dit opzicht dus voordeelen. Vooral in gronden met een niet te groote doorlatendheid lijkt mij dit voordeel van belang. Het ware zeker de moeite waard op een dergelijken grond eens de beide methoden met elkaar te vergelijken, waarbij ook aandacht ware te schenken aan de mate van dichtslibbing van de drainbuizen, gesteld althans, dat deze optreedt. Aangezien hierover geen exacte gegevens beschikbaar zijn, stelle men in alle twee gevallen r_0 veiligheidshalve op 0,04 m, of, indien dikkere buizen mochten worden gebruikt, op de halve doorsnede van deze buizen (uitwendig) vermeerderd met 0,5 cm (r_0 steeds in meters uitdrukken).

Voor andere ontwateringssystemen is reeds in sub A, § 1, *b*, van dit hoofdstuk aangegeven op welke wijze men r_0 uit den natten omtrek van deze ontwateringssystemen moet berekenen. Hierbij kan worden opgemerkt, dat, indien het peil hierin wisselt, ook de natte omtrek wisselt en dus tevens r_0, waarmede rekening moet worden gehouden.

Tenslotte kan nog worden opgemerkt, dat, als de (open) ontwateringssystemen nog gegraven moeten worden, men de afmetingen nog kan kiezen. Voor zooverre het slooten of ontwateringssystemen van grooteren omvang betreft, worden deze afmetingen ongetwijfeld in de eerste plaats bepaald door de snelheid, waarmede het overtollige water, dat zich in deze ontwateringssystemen bevindt, moet worden afgevoerd, evenals door het toelaatbaar verhang en dus door de mate, waarin het slootpeil beheerscht moet kunnen worden. Voor zooverre deze ontwateringssystemen echter tevens voor den rechtstreekschen afvoer van overtollig water (dus door den grond heen) moeten dienen, ga men echter ook na, of ten behoeve van deze ontwatering mogelijkerwijze een nog wat grootere afmeting nog niet voordeeliger is. Als voorbeeld zou ik willen noemen het geval, dat door een juiste keuze van afstand en afmetingen van de slooten men het tusschenliggende land bij een daarvoor geschikten opbouw en doorlatendheid van het bodemprofiel niet meer behoeft te draineeren, terwijl bij een onjuiste keuze van dezen afstand en afmetingen dit wel het geval zou moeten zijn, hetgeen uit den aard der zaak beter vermeden kan worden.

e. De factoren k_1 en k_2

De doorlaatfactoren k_1 en k_2 geven dus resp. de gemiddelde doorlatendheid van de laag **onder** het vlak door de assen van de drains of door de waterspiegels in andere ontwateringssystemen resp. de gemiddelde doorlatendheid van deze laag **boven** genoemd vlak aan. De wijze, waarop deze doorlaatfactoren bepaald worden, is reeds aangegeven in hoofdstuk IV § 2 van deze publicatie, waarnaar kan worden verwezen. Hier mogen eenige voorbeelden volgen.

1. *Niet-zandgronden, d. w. z. gronden van de tweede soort (met een structuur in de natuurlijke ligging).*

In de eerste plaats zullen we drie gevallen behandelen, waarbij de doorlatendheid met behulp van de boorgatmethode moest worden bepaald. Deze boorgaten boort men, indien de doorlaatfactor van twee grondlagen bepaald zal worden, op ongeveer 10 à 15 plekken per ha, welke plekken regelmatig over het betreffende perceel verdeeld moeten liggen. Op iedere plek boort men één boorgat tot ongeveer de toekomstige draindiepte en een tweede op 1 à 2 m afstand daarvan tot zoo diep, als mogelijk is (zoo mogelijk tot 2 m). Deze methode is beter dan de ondiepe boorgaten na de meting dieper uit te boren, zooals in de, in noot 16 aangegeven, literatuur is voorgesteld. Voor zooverre de boorgaten inzakken, kan met voordeel gebruik worden gemaakt van geperforeerde roodkoperen buizen, die direct na het boren in de boorgaten worden geplaatst. In het eerste geval geve men de boorgaten een doorsnede van omstreeks 12,5 cm en in het tweede geval van 8 cm (ook andere doorsneden kunnen echter worden gebruikt).

Eerste voorbeeld. Perceel bouwland van den heer H. D. Louwes, Westpolder, Ulrum.

Op dit perceel werden op 21 plekken telkens in 2 verschillend diepe boorgaten op 1,5 à 2 m afstand de doorlatendheid met behulp van de boorgatenmethode bepaald. De resultaten daarvan zijn in tabel 8 aangegeven. In de eerste kolom is het nummer van de boorplek aangegeven (feitelijk is het nummer van het ondiepe boorgat 1*a* en van het diepe boorgat 1*b*). In de tweede kolom is de laag grond in cms onder het maaiveld vermeld, waarvan in hoofdzaak de doorlatendheid is bepaald (zie ook de in noot 16 genoemde literatuur). De bovenbegrenzing daarvan wordt namelijk door den waterspiegel in het boorgat gevormd en de onderbegrenzing in hoofdzaak door den bodem van het boorgat. De eerste cijfers van deze kolom — en dit geldt ook voor kolom 4 — geven dus telkens den grondwaterstand in cms onder het maaiveld ten tijde van de metingen aan. De 3de en 5de kolom vermelden de gemeten doorlaatfactoren in meters per 24 uur in resp. de ondiepe en diepe boorgaten.

Uit tabel 8 blijkt, dat de doorlaatfactoren van plek tot plek slechts weinig onderling verschillen, zoodat een gemiddelde doorlaatfactor zonder meer kan worden berekend. Deze gemiddelde doorlaatfactor blijkt van de laag van gemiddeld 90—136 cm onder het maaiveld 0,26 en van gemiddeld 92—172 cm onder het maaiveld 0,24 m per 24 uur te bedragen. Deze gemiddelde waarden verschillen zoo weinig, dat voor de geheele laag van 92—172 cm onder het maaiveld 0,24 per 24 uur mag worden aangenomen. Deze grond blijkt dus practisch gesproken homogeen doorlatend te zijn.

Uit afboringen van het perceel op een voldoend aantal plaatsen bleek verder, dat de opbouw van het bodemprofiel vrijwel overal dezelfde was. Tot 70 à 100 cm onder het maaiveld bestaat de grond uit zavel (meestal ruim 20 % klei); daaronder tot 2 m diepte wordt de grond lichter van samenstelling (lichte zavel). Op één plek werd nog dieper geboord, waarbij bleek, dat ook de dieper gelegen lagen dezelfde samenstelling behouden (lichte zavel) en mogelijk op nog grootere diepte overgaan in slibrijken zandgrond. Hieruit volgt in elk geval, dat tot de hier van belang zijnde diepte (zie ook § 4) mag worden aangenomen, dat de grond dezelfde doorlatendheid behoudt, of dus voor de berekening van den drainafstand, dat de grond tot onbeperkte diepte een doorlatendheid heeft van 0,24 per 24 uur (zie echter ook § 4).

Verder kan nog worden opgemerkt, dat ten tijde van de metingen de grondwaterstand minstens 70 cm en gewoonlijk meer onder het maaiveld stond, zoodat tijdens de metingen deze grondwaterstand voldoende laag was. Het perceel was reeds gedraineerd.

Tweede voorbeeld. Perceel n°. 2 van de Proefboerderij te Nieuw-Beerta.

Op dit perceel werden op 15 plekken eveneens telkens twee boorgaten van verschillende diepte geboord, waarin de doorlatendheid werd gemeten. De resultaten daarvan zijn in tabel 9 weergegeven (voor de inrichting van deze tabel, zie: „Eerste voorbeeld tabel 8").

Uit tabel 9 blijkt, dat wel is waar gewoonlijk de gemeten doorlaatfactoren weinig uiteenloopen; dit neemt niet weg, dat toch afwijkende hooge cijfers zijn waargenomen. Aangezien het ten zeerste de vraag is, welke beteekenis aan deze afwijkende cijfers (tusschen haakjes geplaatst) moet worden toegekend en anderzijds een drainage-advies aan den veiligen kant moet liggen, zijn deze afwijkende cijfers niet bij de berekening van de gemiddelde doorlaatfactoren in aanmerking genomen (om dezelfde reden worden afwijkende cijfers aan den lagen kant wel in aanmerking genomen). De gemiddelde doorlaatfactor van de laag van gemiddeld 43—123 cm onder het maaiveld blijkt dan te zijn 0,12 en van de laag van gemiddeld 44—176 cm onder het maaiveld 0,11 m per 24 uur. Aangezien deze doorlaatfactoren weinig onderling

verschillen, kan worden aangenomen, dat de grond van gemiddeld 44 tot 176 cm onder het maaiveld een gemiddelden doorlaatfactor heeft van 0,11 m per 24 uur. Ook deze grond is dus homogeen doorlatend.

Uit een afboring van het perceel op een voldoend aantal plekken is gebleken, dat de samenstelling van het bodemprofiel van plek tot plek weinig verandert en dat het uit zeer zwaren kleigrond bestaat; althans tot 110 à 160 cm (= boordiepte) onder het maaiveld. Daaronder (dus soms reeds op 110 cm) treedt meestal een klei en (of) zandhoudende laag darg op; soms komt hieronder nog een lichtere, blauwgrijze zavelgrond (kleigrond) voor en soms ook een blauw tot zwart gekleurd slik, terwijl dus soms ook de zware kleilaag niet doorboord werd. Over de samenstelling van dieper gelegen lagen is niets bekend. Tot hoever onder het maaiveld de grond dus een doorlatendheid van 0,11 m per 24 uur behoudt, is niet te zeggen. Gezien echter het feit, dat de grond op grootere diepte dan gemiddeld 176 cm onder het maaiveld niet direct volkomen ondoorlatend zal zijn, is het geoorloofd aan te nemen, dat de grond over een zekere laag nog de bovenbedoelde doorlatendheid zal blijven behouden. In verband met de noodzakelijkheid van het geven van een veilig drainage-advies, nemen we aan, dat slechts tot 2 m onder het maaiveld de grond een doorlaatfactor van 0,11 m per 24 uur behoudt en dat daaronder de grond ondoorlatend is; de dikte van de gemeten laag wordt dus iets vergroot (meestal omstreeks 25 cm) en tot een rond getal afgerond. Is dit laatste niet het geval, d. w. z. blijft de grond tot grootere diepte dezelfde doorlatendheid behouden, dan kan de drainafstand iets grooter zijn, dan men op grond van genoemde cijfers berekent. Aangezien hierover echter verder niets bekend is, lijkt het mij gewenscht zich aan den berekenden drainafstand te houden.

Verder blijkt uit tabel 9, dat de grondwaterstand ten tijde van de meting verschillend is geweest. Volgens practische gegevens was het eene gedeelte van het perceel (met de diepe grondwaterstanden) dan ook beter ontwaterd dan het overige gedeelte. Voor zoover de grondwaterstand hooger was dan 50 cm onder het maaiveld, was de ontwatering onvoldoende. Het perceel was reeds gedraineerd.

Derde voorbeeld. Perceel Sectie B 939 van den heer A. K. DE BOER, te Pietersbierum (Fr.).

Op dit perceel werden op 21 plekken eveneens telkens twee boorgaten van verschillende diepte geboord, waarin de doorlatendheid werd gemeten. De resultaten daarvan zijn in tabel 10 weergegeven (voor de inrichting van deze tabel, zie: „Eerste voorbeeld, tabel 8").

Uit tabel 10 blijkt, dat ook nu een enkele, afwijkend hooge, doorlaat-

factor werd bepaald (tusschen haakjes geplaatst), die ook nu niet bij de berekening van den gemiddelden doorlaatfactor in aanmerking is genomen (zie onder „Tweede Voorbeeld").

De gemiddelde doorlaatfactor van de laag van gemiddeld 27—103 cm onder het maaiveld blijkt 0,10 en van de laag van gemiddeld 26—152 cm onder het maaiveld 0,39 m per 24 uur te bedragen. Hieruit volgt, dat de doorlatendheid met de diepte onder het maaiveld toeneemt. Noemen we den doorlaatfactor van de laag van gemiddeld 27—103 cm onder het maaiveld k_2 en de dikte van deze laag h_2 (hier 103 — 26 = 77 cm); de doorlaatfactor van de laag van gemiddeld 26—152 cm onder het maaiveld k_{totaal} en de dikte daarvan h_{totaal} (hier 152 — 26 = 126 cm) en de doorlaatfactor van de laag van gemiddeld 103—152 cm onder het maaiveld k_1 en de dikte van deze laag h_1 (hier 152 — 103 = 49 cm) dan is (zie de in noot 16 genoemde literatuur):

$$k_{\text{totaal}} \cdot h_{\text{totaal}} = k_1 h_1 + k_2 h_2, \text{ of}$$

$$k_1 = \frac{k_{\text{totaal}} \cdot h_{\text{totaal}} - k_2 h_2}{h_1} = \frac{0{,}39 \cdot 126 - 0{,}10 \cdot 77}{49} = 0{,}85$$

m per 24 uur.

Uit een afboring van het perceel op een voldoend aantal plekken is gebleken, dat het bodemprofiel van plek tot plek weinig verandert. Hierbij is gebleken, dat onder een lichte bouwvoor of althans humusrijkere laag tot 30 à 45 cm onder het maaiveld met naar schatting ruim 20 % klei een iets zwaardere laag voorkomt met rond 25 tot soms bijna 40 % klei. Daaronder treedt soms een vrij dikke laag lichte grond op met een kleigehalte van 10—20 %. De dieper gelegen laag bestaat meestal uit zeer lichten grond met ruim 10 % klei, afgezien dan van een enkele plek, waar deze laag iets zwaarder is. De boordiepte bedroeg 150 cm onder het maaiveld. Aangezien deze diepere lagen in elk geval koolzure kalk zullen bevatten (per abuis is dit hier niet onderzocht) is deze lichtere grond, die zich ongetwijfeld tot een veel grootere diepte voortzet, doorlatend. De doorlatendheid van de diepst gemeten laag van gemiddeld 103 tot 152 cm onder het maaiveld heeft echter een relatief goede doorlatendheid en het is de vraag of ten gevolge van den toenemenden druk, waaronder de grond met een toenemende diepte onder het maaiveld staat, de dichtheid van de ligging met de diepte niet onbelangrijk zal toenemen, waardoor de doorlatendheid in deze richting sterk zou afnemen. Ook nu zal daarom veiligheidshalve worden aangenomen, dat de grond slechts tot 175 cm onder het maaiveld deze goede doorlatendheid zal behouden, terwijl de grond daaronder als ondoorlatend zal worden beschouwd. Vermoedelijk zal echter de drainafstand grooter kunnen zijn dan op grond

van de genoemde gegevens wordt berekend, waarmede echter bij het geven van het advies veiligheidshalve geen rekening dient te worden gehouden.

Verder blijkt uit de tabel 10 (het perceel heeft een kruinige ligging), dat de grondwaterstand tijdens de metingen meestal hooger dan 50 cm onder het maaiveld en op sommige plekken zelfs veel hooger heeft gestaan. De ontwatering van dit perceel (niet gedraineerd, lengte 170 en breedte 140 m) is dus onvoldoende.

Met het geven van deze drie voorbeelden zal worden volstaan.

2. *Zandgronden, d. w. z. gronden van de eerste soort (zonder een structuur in de natuurlijke ligging).*

In de tweede plaats zullen we nu een geval nagaan, waarbij de doorlaatfactoren in daartoe genomen grondmonsters op het laboratorium zijn bepaald. Voor de techniek van de bepalingen; zie de in noot 15 genoemde literatuur.

Om aan te toonen, dat men van te voren de ligging van den grondwaterspiegel in verloop van het jaar kan voorspellen, als men behoudens andere benoodigde gegevens (zie § 5) de dikte en de doorlatendheid van de doorlatende grondlagen kent, werd op perceel 11 van de proefboerderij te Borgercompagnie een boring tot 7 m diepte verricht. Helaas het het toen aanwezige boormateriaal niet toe tot grootere diepte te boren (zie ook hieronder). Tijdens deze boring werden grondmonsters genomen, die op het laboratorium verder werden onderzocht. De resultaten daarvan zijn in tabel 11 medegedeeld.

In de eerste kolom van deze tabel is de laag in cms onder het maaiveld aangegeven, waarvan monsters werden genomen. In de tweede kolom volgt de beschrijving van deze bodemlagen; in de derde kolom is het vochtgehalte per 100 gram droge stof vermeld. In de vierde kolom volgt de pH. In de vijfde kolom tot en met de achtste kolom zijn resp. het koolzure kalkgehalte ($CaCO_3$-gehalte) het humus-, het klei- en het zandgehalte in procenten op droge stof (bij 105° C gedroogden grond) aangegeven. In kolom 9 volgt het soortelijk oppervlak (U-cijfer), dat zooals bekend zal zijn de fijnheid van de zandfractie (deeltjes van 16—2000 μ) in één cijfer uitdrukt (40). In kolom 10 is het poriënvolume aangegeven, zooals dit berekend kan worden uit het vochtgehalte (kolom 3) onder de veronderstelling, dat de grond geen lucht meer bevat, hetgeen voor de lagen dieper dan 86 cm onder het maaiveld (ten tijde van de diepboring onder den grondwaterspiegel) zeker toelaatbaar is. Aangezien het de vraag is, of tijdens het pulsen de grond niet met water is vermengd of mogelijk juist tijdens het ophalen van de puls (een dergelijke boring wordt met een pulsboor uitgevoerd) water heeft verloren, waardoor uit het vochtgehalte een onjuist poriënvolume van den grond berekend zou

worden, zijn in kolom 11 ook nog de poriënvolumina aangegeven, zooals de grond tijdens de bepaling van de doorlatendheid in het laboratorium had en waarbij de dichtheid van ligging (zie de in noot 15 aangehaalde literatuur) in elk geval groot is en niet veel kan verschillen van de dichtheid van deze lagen in de natuurlijke ligging. Uit een vergelijking van kolom 10 en 11 blijkt, dat deze waarden dan ook practisch gelijk zijn; de waarden van kolom 10 zullen verder voor de omrekening van de doorlaatfactoren (zie hieronder) gebruikt worden. In kolom 12 zijn de doorlaatfactoren van de diverse zandlagen aangegeven, zooals deze uit de in het laboratorium bepaalde doorlaatfactoren op een luchtvrij poriënvolume van 35 volumeprocenten en een temperatuur van het grondwater van 10° C omgerekend kunnen worden (zie hoofdstuk II en de in noot 15 genoemde literatuur). In kolom 13 zijn deze doorlaatfactoren omgerekend op het in de natuurlijke ligging voorkomend poriënvolume (kolom 10) en een temperatuur van het grondwater van 13° C (zie hoofdstuk II). Deze doorlaatfactoren geven dus de doorlatendheid van den grond in de diverse lagen in de natuurlijke ligging aan. Met behulp van de vergelijkingen 91 en 93 berekenen we hieruit de waarden k_{gh} (gemiddelde doorlatendheid van den grond voor een horizontale waterbeweging) resp. k_{gv} (gemiddelde doorlatendheid van den grond voor een verticale waterbeweging). De waarden van $k.d$ resp. $\frac{k}{d}$ zijn in de kolommen 14 en 15 aangegeven, waaruit dus k_{gh} resp. k_{gv} zijn berekend (zie ook onderaan tabel 11). Deze waarden zijn resp. 2,89 en 2,54 m per 24 uur en aangezien deze weinig verschillend zijn, kan het gemiddelde (vergelijking 95*a*) of rond 2,7 m per 24 uur als de gemiddelde doorlatendheid van de laag van 86 tot 700 cm onder het maaiveld worden aangenomen. De daarboven gelegen laag — afgezien van de bouwvoor — bestaat uit veen; de doorlatendheid daarvan is mede, gezien de geringe dikte daarvan, niet van belang, aangezien daarin geen slecht doorlatende lagen, en zeker niet onder den grondwaterspiegel, voorkomen. In verband met het bovenstaande kan hieraan nog worden toegevoegd, dat later uitgevoerde diepboringen in de omgeving, die tot grootere diepte zijn uitgevoerd, hebben aangetoond, dat de bedoelde zandlaag zich vermoedelijk tot ongeveer 13 m onder het maaiveld ter plaatse uitstrekt, terwijl daaronder slecht doorlatende lagen optreden. De dikte van de zandlaag met een doorlaatfactor van 2,7 m per 24 uur is dus op rond 12 m te stellen (41).

Aangezien in alle gevallen op analoge wijze de doorlaatfactoren van de diverse zandlagen en de gemiddelde doorlaatfactor daaruit bepaald worden, kan met dit voorbeeld worden volstaan; men zie echter ook hoofdstuk IV, sub A, § 2.

§ 4. Berekening van de drainafstanden en verdere gewenschte gegevens

a. Berekening van drainafstanden

Hieronder zullen we eerst voor de 3 perceelen, waarvan de resultaten van de doorlatendheidsbepalingen in § 3, sub *e*, zijn besproken, den drainafstand berekenen. Hierbij zullen we vasthouden aan den eisch, dat bij een afvoer van 5 mm overtolligen neerslag de grondwaterstand midden tusschen de drains niet hooger op mag loopen dan tot 50 cm onder het maaiveld. Hierbij kan er aan worden herinnerd, dat de gemiddelde diepteligging van de drainreeksen is afgeleid uit een waterpassing van het perceel op een voldoend aantal plaatsen en uit het meestal voorkomende en het hoogste slootpeil in het winterhalfjaar, voor zooverre althans nieuwe drains moeten worden gelegd (zie ook § 2 en § 3, sub *b*). Zijn reeds drains aanwezig, dan zijn deze zelf mede gewaterpast.

Eerste voorbeeld. Perceel van den heer H. D. Louwes, Westpolder, Ulrum.

Dit perceel was reeds gedraineerd op 10 m onderlingen afstand. De gemiddelde diepteligging van de drains is op 80 cm onder het maaiveld te stellen, zoodat $m_0 = 80 - 50 = 30$ cm $= 0{,}3$ m.

De doorlaatfactor van den grond tot zoo diep, als zij voor de drainage van belang is (zie § 3, sub *e*), is 0,24 m per 24 uur. De drainafstand — er komt geen water boven de drains voor — is te berekenen met behulp van de vergelijking 116*b*, waarin $k_1 = k_2 = k$ (de grond is homogeen doorlatend), nl.:

$$l = \sqrt{\left(\frac{8kdm_0 + 4km_0^2}{s}\right)}$$

Hierin is $s = 0{,}005$ m per 24 uur; $k = 0{,}24$ per 24 uur. De factor d moet uit de tabellen 5 ontnomen worden, waarbij $r_0 = 0{,}04$ m (zie § 3, sub *d*). Nu hangt de factor d van l af, terwijl in dit geval $H = \infty$ kan worden aangenomen (de drainafstand bij deze diepte blijkt niet groot te kunnen zijn: zie ook hieronder). Om l te berekenen nemen we voor de bepaling van den factor d voorloopig een waarde van l aan, bijv. 10 m (men leert na eenige oefening spoedig vrijwel direct juist schatten). Uit tabel 5–2 blijkt, dat de factor d dan gelijk is aan 0,90. De verdere bekende factoren in bovenstaande vergelijking ingevuld, geeft:

$$l = \sqrt{\left(\frac{8 \cdot 0{,}24 \cdot 0{,}90 \cdot 0{,}3 + 4 \cdot 0{,}24 \cdot (0{,}3)^2}{0{,}005}\right)} = 11 \text{ m.}$$

De waarde, die we voor het aangeven van den factor d hebben gebruikt, is niet geheel juist, nl. te klein. Stellen we deze nu op 11,5 m, dan is d (zie

tabel 5–2; interpoleeren verschil $l = 10$ en $l = 15$ m en $H = \infty$) $= 1{,}00$ en dus wordt l nu:

$$l = \sqrt{\left(\frac{8 \cdot 0{,}24 \cdot 1{,}00 \cdot 0{,}3 + 4 \cdot 0{,}24 \cdot (0{,}3)^2}{0{,}005}\right)} = \text{rond } 11{,}5 \text{ m.}$$

Aangezien we deze waarde ook voor het aangeven van den factor d hebben gebruikt, is deze afstand dus juist. De benoodigde drainafstand is dus 11,5 m.

Er is gedraineerd op 10 m onderlingen afstand, terwijl bekend is, dat de ontwatering voldoende is, hetgeen in overeenstemming is met den afstand, die hier — bij de gegeven draindiepte — werd berekend. Volgens onze gegevens had deze afstand echter wel iets grooter kunnen zijn.

Mocht dit perceel in de toekomst nog eens opnieuw worden gedraineerd, dan verdient een grootere draindiepte — gesteld althans, dat dit in verband met het polderpeil mogelijk is, hetgeen hier verder buiten beschouwing blijft — aanbeveling. Ware de gemiddelde draindiepte niet 80 maar 120 cm onder het maaiveld geweest, dan was $m_0 = 1{,}2 - 0{,}5 = 0{,}7$ m geweest. De drainafstand had dan 24 m kunnen bedragen, indien de grond ook nu tot de diepte, tot waar deze nog voor de drainage op dezen afstand van belang is, dezelfde doorlatendheid zou hebben behouden. Blijkens tabel 5–2 had dan $H = \pm 6$ m moeten zijn, d. w. z., dat tot 6 m onder het vlak door de drains de grond eenzelfde doorlatendheid zou moeten hebben behouden. Dat is in dit geval toch wel een gewaagde veronderstelling, aangezien de grondsoort tot die diepte wel dezelfde zal blijven, maar het niet vaststaat, of dit met de doorlatendheid ook het geval is. Tot een waarde van $H = 2$ m (dus tot 3,2 m onder het maaiveld) is dit echter in dit geval wel aan te nemen. Is dus H slechts 2 m, dan had deze drainafstand bij een gemiddelde draindiepte van 1,2 m onder het maaiveld rond 20 m kunnen bedragen, welke afstand dan geadviseerd zou kunnen worden. Overigens blijkt hieruit tevens, dat het feit, of de grond tot 2 dan wel tot 6 m onder de drains een doorlatendheid heeft van 0,24 m per 24 uur, slechts een verschil in den benoodigden drainafstand van 4 m (nl. resp. 20 en 24 m) uitmaakt, indien de draindiepte dus 1,2 m onder het maaiveld is.

Tweede voorbeeld. Perceel n°. 2 van de Proefboerderij te Nieuw-Beerta.

Ook dit perceel was reeds gedraineerd. De drainafstand varieert tusschen 7 en 9 m. De gemiddelde draindiepte is op 1 m onder het maaiveld te stellen (42). De doorlatendheid van den grond tot 2 m bedraagt 0,11 m per 24 uur, terwijl daaronder (zie ook § 3) de grond als ondoorlatend zal worden beschouwd. De factor H is hier derhalve 2—1 = 1 m. Aangezien ook nu de grond homogeen doorlatend is, kan ook nu vergelijking 116*b* worden gebruikt, aangezien we

den benoodigden drainafstand bij de gegeven draindiepte (1 m) willen bepalen, waarbij de drainage aan den reeds eerder genoemden eisch voldoet en **indien geen grondwater boven de drains voorkomt.**

De berekening kan op analoge wijze worden uitgevoerd, als voor het perceel van den heer H. D. LOUWES (zie eerste voorbeeld) is geschied. De benoodigde drainafstand blijkt rond 9 m te bedragen ($m_0 = 1{,}00 - 0{,}50 = 0{,}50$ m); de factor d (hier $= 0{,}65$) wordt weer uit de tabel 5–2 afgeleid, waarbij $H = 1$ m.

Nu is dit perceel reeds op een afstand van 7 tot 9 m gedraineerd, terwijl de ontwatering grootendeels (zie § 3, sub *e*) onvoldoende is. De eenige verklaring daarvan is, dat de drains tijdens ons onderzoek slecht functionneeren, doordat òf zij zelf gedeeltelijk verstopt zijn, òf (en) de stootvoegen gedeeltelijk verstopt zijn, òf (en) zich een slecht doorlatend laagje om de drainbuizen heeft gevormd en dus wel vooral met betrekking tot die drainreeksen, waartusschen hooge grondwaterstanden zijn waargenomen. Dit wil dus zeggen, dat ook boven de drains grondwater tot een niet onaanzienlijke hoogte daarboven moet hebben gestaan. Inderdaad bleek bij nadere informatie bij den bedrijfschef, den heer VAN CINGEL, dat de ontwatering sinds eenige jaren (de drains zijn gelegd in 1928) te wenschen overliet. Na een bekalking met poederkalk en na het schoonmaken van de drains, die dus na ons onderzoek zijn geschied, is de ontwatering overal voldoende. De drainbuizen bleken juist bij de stootvoegen hoopjes grond te bevatten.

Derde voorbeeld. Perceel Sectie B 939 van den heer A. K. DE BOER, te Pietersbierum (Fr.).

Dit perceel (43) was tijdens onze waarnemingen nog niet gedraineerd. De gemiddelde draindiepte kan, in verband met de kruinige ligging van dit perceel, meer in het midden van het perceel op 115 cm en dichter bij de dwarsslooten op 90 cm worden gesteld, waarmede bij het aangeven van den drainafstand rekening zal worden gehouden.

De gemiddelde doorlatendheid van den grond blijkt tot gemiddeld 103 cm onder het maaiveld 0,10 en daaronder tot 175 cm 0,85 m per 24 uur te bedragen, terwijl op grootere diepte de grond als ondoorlatend zal worden beschouwd (zie § 3, sub *e*). Aangezien de drainafstand bij een draindiepte van zoowel 115 als 90 cm onder het maaiveld aangegeven moet worden, volgt hieruit, dat niet precies de gemiddelde doorlatendheid van den grond boven resp. onder het verbindingsvlak door de drains bekend is. Door dit te veronderstellen, dus door telkens voor $k_1 = 0{,}85$ en $k_2 = 0{,}10$ m per 24 uur aan te nemen (zie de vergelijking 116*b*) bereiken we, dat de berekende drainafstand bij de draindiepte van 115 cm iets te klein en bij een gemiddelde

draindiepte van 90 cm iets te groot is. Met het eerste feit zal geen, met het tweede in zooverre rekening worden gehouden, dat de berekende drainafstand iets zal worden verkleind [1]).

Voor een gemiddelde draindiepte van 115 cm ($m_0 = 1{,}15 - 0{,}50 = 0{,}65$ m; $H = 1{,}75 - 1{,}15 = 0{,}60$ m) is de benoodigde drainafstand op de gewone wijze met behulp van vergelijking 116*b* te berekenen en blijkt deze, als de gewone eischen worden gesteld, 23 m ($d = 0{,}56$) te zijn. Voor een gemiddelde draindiepte van 90 cm ($m_0 = 0{,}90 - 0{,}50 = 0{,}4$ m; $H = 1{,}75 - 0{,}90 = 0{,}85$ m) is de benoodigde drainafstand rond 20 m ($d = 0{,}73$), welke afstand dus iets te groot is.

Nu is het perceel rond 140 m breed en rond 170 m lang en het heeft, zooals reeds is opgemerkt, een kruinige ligging, terwijl dit perceel aan twee zijden door buitenwater en aan de twee andere zijden door slooten met een onderbemaling (20 cm) is begrensd, waarin de drains (in de lengtesloot; de drains worden in de breedte gelegd) uitmonden.

In verband nu met een mogelijken doorslag van water en in verband met het feit, dat de berekende afstand van 20 m voor een gemiddelde draindiepte van 90 cm iets te groot is, werd geadviseerd in dit perceel 10 drainreeksen te leggen en wel de buitenste drainreeksen 10 m uit de slooten, dan 3 reeksen op 15 m onderlingen afstand en in het midden ten slotte 3 reeksen op 20 m onderlingen afstand. Hierdoor is er tevens rekening mee gehouden, dat het maaiveld vlak bij de slooten relatief het laagste ligt. De afstanden van de drainreeksen zijn dus van de eene tot de andere dwarssloot resp. 10, 15, 15, 15, 20, 20, 20, 15, 15, 15 en 10 m. Van de berekende drainafstanden werd hier dus iets afgeweken in verband met de kruinige ligging, de afmetingen van het perceel en het voorkomen van buitenwater langs twee zijden met een hooger peil dan in de twee andere slooten. De afstand van 20 m (gemiddelde draindiepte 90 cm) werd bovendien nog iets verkleind, doordat er op gerekend moet worden, dat onder deze drainreeksen nog een relatief veel minder doorlatend laagje dan de daaronder gelegen laag voorkomt.

Algemeene opmerking

Zooals reeds bij het laatst besproken geval is gebleken, moet men rekening houden met verdere bijzonderheden en den berekenden drainafstand dus soms iets veranderen. Een dergelijk geval, dat hier niet zoo duidelijk tot uiting is gekomen, maar dat ook vaak voorkomt, is het geval, dat de berekende drainafstand niet past in de afmetingen van het perceel.

[1]) Met behulp van de vergelijking 95 *a* of *b* kan echter met dit feit rekening worden gehouden, door namelijk de werkelijke gemiddelde doorlaatfactoren te berekenen, die dan als k_1 en k_2 in de vergelijking 116*b* worden ingevuld.

Heeft men bijv. voor een vlak liggend perceel van 92 m breedte en 200 m lengte een drainafstand berekend van 20 m, terwijl de drainreeksen in de lengterichting van het perceel worden gelegd (dit is het voordeeligste en derhalve vrijwel steeds — echter niet altijd — het geval), dan zal, als 3 drainreeksen in dit perceel worden gelegd, de drainafstand 92 : 4 = 23 m bedragen en dus te groot zijn. Door ons zou in dat geval geadviseerd zijn niet 3 maar 4 reeksen te leggen, of dus op een onderlingen afstand van 92 : 5 = 18,4 m; daarbij dus aan den veiligen kant blijvend.

Afgezien van het bovenstaande kan in verband met de foutengrenzen van de bepaling, die op 10 % kunnen worden gesteld, de berekende drainafstanden worden afgerond en wel bij drainafstanden onder 15 m tot op 1 m en daarboven tot op 2,5 m; daarbij als regel naar onderen afrondend. De afmetingen van het perceel spelen hierbij natuurlijk ook een rol, zooals boven reeds met een voorbeeld nader is toegelicht. Nu zijn slooten op te vatten als een bijzonder goed soort drains. In niet te slecht doorlatende perceelen, die tot de slooten een vlakke ligging behouden, kan men dan ook den afstand van de eerste drainreeks tot de sloot wel iets grooter nemen dan berekend is, wanneer de afmetingen van het perceel bijv. zoodanig zijn, dat daardoor een drainreeks kan worden bespaard.

Om een indruk te geven, welke afstand tot heden door ons werd geadviseerd, kan worden opgemerkt, dat voor gewoon bouwland op kleigrond de kleinste afstand 5 m en de grootste 40 m heeft bedragen; er zijn echter gevallen voorgekomen, waarbij drainage niet noodig werd geacht en andere maatregelen werden voorgesteld. Zooals duidelijk zal zijn, handelde het zich daarbij om een grond, waarbij onder een niet te dikke kleilaag een dikke laag niet te slecht doorlatend zand voorkomt en waarbij dus de afstrooming van het water naar de slooten op voldoend snelle wijze plaats kan vinden, als slechts een goede verbinding tusschen den slecht doorlatenden bovengrond en den goed doorlatenden ondergrond wordt gemaakt.

Ter voorkoming van misverstand kan hieraan ten slotte nog worden toegevoegd, dat alle bovenbedoelde adviezen, voor zooverre zij betrekking hadden op drainage van gewoon bouwland, in samenwerking met de betreffende consulenten werden gegeven (44).

b. Berekening van andere gegevens

Als voorbeeld voor de berekening van andere gegevens zal nu eens worden nagegaan, welke verschillen in den grondwaterstand midden op de perceelen 11 en 12 van de Proefboerderij te Borger-Compagnie (zie § 3, sub *e*) ten opzichte van het waterpeil in de wijk en de schei- en perceelslooten in den loop van het winterhalfjaar te verwachten zijn (45). Aangezien de dikte

van de doorlatende zandlaag (onder de bouwvoor en de veenlaag ter gezamenlijke dikte van rond 1 m) op rond 12 m kan worden verondersteld met een gemiddelden doorlaatfactor van 2,7 m per 24 uur, kan als bovenbegrenzing van het stroomingsveld zonder eenig bezwaar het vlak door de waterspiegels in de wijk en slooten worden beschouwd en het eventueel daar nog boven gelegen gedeelte van het stroomingsveld worden verwaarloosd. De factor H is derhalve 12 m en de berekeningen kunnen geschieden met behulp van de vergelijking 117, nl.:

$$s = \frac{8kdm_0}{l^2}$$

Deze perceelen zijn 80 m breed en 140 m lang en worden aan de eene lengtezijde begrensd door de wijk (natte omtrek naar schatting 5 m of r_0 dus rond 1,6 m), aan de andere lengtezijde door een scheisloot en aan de breedtezijden door perceelsscheidingsslooten (natte omtrek in het winterhalfjaar van alle slooten naar schatting 2 m of r_0 = rond 0,65 m).

Nemen we nu aan, dat een afvoer van 5 mm overtolligen neerslag optreedt (dit zal wel niet vaak geschieden) en nemen we verder aan, dat in de plaats van de scheisloot ook een wijk van dezelfde afmetingen aanwezig was (dus ook met r_0 = 1,6 m) dan is de factor d (zie tabel 5–23 en 5–24, waartusschen d bij H = 12 m en r_0 = 1,6 m geïnterpoleerd moet worden) gelijk aan 9,44 en dus:

$$0.005 = \frac{8 \cdot 2{,}7 \cdot 9{,}44 \cdot m_0}{(80)^2} \text{ of } m_0 = \text{rond } 0{,}16 \text{ m} = 16 \text{ cm.}$$

Kwam in plaats van de wijk een scheisloot voor (r_0 = 0,65 m), dan is (zie de tabellen 5–17 en 5–18, waartusschen geïnterpoleerd moet worden voor r_0 = 0,65 m en H = 12 m) d gelijk aan 7,41, of dus:

$$0{,}005 = \frac{8 \cdot 2{,}7 \cdot 7{,}41 \cdot m_0}{(80)^2} \text{ of } m_0 = \text{rond } 0{,}20 \text{ m} = 20 \text{ cm.}$$

Aangezien in werkelijkheid langs de eene zijde een wijk en langs de andere zijde een scheisloot voorkomt, zal m_0 in werkelijkheid bij een afvoer van overtolligen neerslag van 5 mm per 24 uur (16 + 20) : 2 = 18,0 cm kunnen bedragen.

Deze perceelen worden echter aan de breedtezijden ook nog begrensd door perceelsscheidingsslooten (afstand 140 m), waarheen ook overtollige neerslag wordt afgevoerd. Ofschoon deze waterbeweging niet onafhankelijk is van die naar de wijk en de scheisloot (de strooming is in werkelijkheid niet twee- maar drie-dimensionaal) kan dit hier in eerste instantie toch wel worden aangenomen. Bij een grondwaterstand in het midden van het perceel van 18,0 cm boven het waterpeil in deze slooten (m_0 = 0,18 m) wordt nog

een hoeveelheid water daarheen afgevoerd, die met dezelfde vergelijking kan worden berekend. De factor d_0 ($r_0 = 0{,}65$ m) wordt ook nu uit de tabellen 5–17 en 5–18 afgeleid en bedraagt nu ($l = 140$ m; $H = 12$ m) 8,88, zoodat:

$$s = \frac{8 \cdot 2{,}7 \cdot 8{,}88 \cdot 0.18}{(140)^2} = 0.0018 \text{ m} = 1{,}8 \text{ mm per 24 uur.}$$

In werkelijkheid zal, zooals reeds is medegedeeld, de strooming naar alle 3 slooten en de wijk elkaar beïnvloeden, hetgeen op deze wijze in rekening is te brengen, dat voor de afvloeiing van water naar de perceelsscheidingsslooten de waarde van m_0 de helft kleiner wordt genomen (tusschen wijk en scheisloot verandert m_0 immers van 0 tot 18,0 cm), zoodat de afvoer naar deze slooten op 0,9 mm per 24 uur kan worden aangenomen. In totaal zal dus bij een afvoer van 5 + 0,9 = rond 6 mm per 24 uur de grondwaterstand midden op het perceel niet hooger oploopen dan tot 18,0 cm boven den waterstand in de wijk en de slooten. Aangezien een afvoer van overtollig regenwater naar de wijk en slooten van 5 mm niet vaak en van 6 mm per 24 uur nog minder vaak zal voorkomen, was dus te voorspellen, dat de grondwaterstand midden op de betreffende perceelen in den loop van het winterhalfjaar niet hooger dan 18 cm boven den waterstand in de wijk en de slooten zal oploopen, terwijl gewoonlijk dit verschil veel geringer zal zijn.

Door metingen van dezen waterstand in wijk en slooten en van den grondwaterstand (zie noot 45) werd dit gecontroleerd (half September 1938 tot 1 Maart 1939), waarbij inderdaad bleek, dat de grondwaterstand midden op de perceelen niet hooger dan hoogstens 17,2 cm boven den waterstand in de wijk en de slooten heeft gestaan en dit verschil gewoonlijk veel geringer is geweest.

Het belang van dergelijke voorspellingen over de ligging van den grondwaterstand behoeft hier waarlijk niet nader toegelicht te worden (46). Voor Veenkoloniale gronden denke men slechts aan het van te voren kunnen voorspellen van het effect van heromzettingen (breking oerlagen) op den grondwaterstand en dus op de waterhuishouding van den grond; zoo ook op het effect van het dempen van perceelsscheidingsslooten, van wijken of het terugbrengen van de afmetingen daarvan tot gewone slooten op den grondwaterstand en dus op de waterhuishouding, enz. Hiervoor dient men echter de dikte en de doorlatendheid van de zandlaag, die overal in de Veenkoloniën onder de bovenste laag ter dikte van 60 à ruim 100 cm voorkomt, te kennen, met welk onderzoek wij met den steun van den Veenkolonialen Boerenbond, den Cultuurtechnischen Dienst en andere instanties en instellingen hebben kunnen beginnen.

Voor de proefboerderij te Borgercompagnie was voor de scheisloot langs de perceelen 11 en 12 verder te voorspellen, dat, indien de scheisloot zou worden afgedamd en hierin een niet onbelangrijk lager peil zou worden aangehouden dan in de wijk, de toevloeiing van water naar deze sloot groot zou zijn. Het plan om dezen toevoer eerst te berekenen en daarna ook rechtstreeks te bepalen is niet doorgegaan. Toen echter bij een heromzetting van perceel 11 het gewenscht was de scheisloot af te dammen en hierin een lager peil aan te houden, bleek inderdaad, dat deze toevloeiing van water groot was.

Met dit eene voorbeeld moge hier worden volstaan; andere gevallen worden, zij het dan ook met de benoodigde wijzigingen, op gelijksoortige wijze behandeld.

B. Infiltratie

Voor de hierbij te gebruiken vergelijkingen voor de berekening van de verlangde gegevens kan verwezen worden naar hoofdstuk IV, sub B. Hier zullen we volstaan met een voorbeeld te behandelen, dat wel is waar aan de practijk ontleend is, maar dat hier vereenvoudigd zal worden tot een denkbeeldig geval.

Gesteld eens, dat in een complex zandgronden, in gebruik als grasland, een poldertje ligt (bijv. een in cultuur gebrachten oorspronkelijken veenplas), waarin kwel optreedt en waarin de ontwatering onvoldoende is. Deze ontwatering wil men verbeteren door een dieper polderpeil aan te houden, waardoor de kwel uit den aard der zaak wordt vergroot. Aangezien dit kwelwater afkomstig is uit de omringende zandgronden en hieraan dus na de verlaging van genoemd polderpeil nog meer water wordt onttrokken, dan nu reeds het geval is, vreezen de om dit poldertje wonende landbouwers, dat hun perceelen ernstigen hinder van droogte zullen ondervinden. De vraag is dus, of deze vrees gerechtvaardigd is en of men dezen eventueelen hinder van droogte door het treffen van maatregelen kan opheffen. Verder is gegeven, dat de perceelen rondom genoemd poldertje een langgerekten vorm en een vlakke ligging hebben, terwijl de slooten in de lengterichting van de perceelen alle op rond 100 m onderlingen afstand voorkomen (de invloed van de dwarsslooten kan dus verwaarloosd worden). In deze slooten wordt verder in het zomerhalfjaar een peil van 40 cm onder het maaiveld aangehouden, terwijl de natte omtrek van deze slooten bij een peil van 40 cm onder het maaiveld bijv. 2,35 m is (r_0 = rond 0,75 cm).

Men begint dan met behulp van de maalstaten van het gemaaltje van genoemd poldertje, van de capaciteit daarvan, van den neerslag, enz. de kwel uit te rekenen. Door het verrichten van een voldoend aantal diepboringen in en rondom het poldertje wordt verder de opbouw van het profiel

en, met behulp van de genomen grondmonsters, de doorlatendheid daarvan nagegaan. Met behulp van beide en verder benoodigde gegevens kan men dan uitrekenen hoe groot de kwel bij het nieuwe peil zal worden en waar dit water vandaan komt. Op welke wijze deze berekeningen geschieden, kan hier niet verder worden uiteengezet; dit kan beter in een volgende publicatie behandeld worden (47). We zullen veronderstellen, dat deze berekeningen zijn uitgevoerd en zullen hieraan slechts ontleenen, dat voor de eerste 200 m buiten den polder de wateronttrekking bijv. 5 mm per 24 uur zal bedragen (dus als laag over dit geheele gebied gedacht). We zullen nu nagaan, of de genoemde slooten voldoende water in het land kunnen infiltreeren om den grondwaterstand midden tusschen deze slooten voldoende hoog te houden.

Uit de diepboringen is bijv. verder gebleken, dat op 6,4 m onder het maaiveld een slecht doorlatende laag voorkomt (bijv. een keileemlaag), die voor de strooming van het water uit de slooten naar het tusschen gelegen land als ondoorlatend kan worden beschouwd (voor de kwel is dit niet het geval, maar dit blijft hier verder buiten beschouwing). De daarbovenliggende laag blijkt verder tot bijna aan het maaiveld toe een gemiddelde doorlatendheid te bezitten van bijv. 4,0 m per 24 uur.

Om het genoemde probleem te kunnen oplossen moeten we verder over nog twee gegevens beschikken, nl. over het watergebruik van grasland in droge perioden, waarvoor hier (zie ook de in noot 1 aangehaalde literatuur, blz. 658 en 659) gemiddeld 5 mm per 24 uur zal worden aangenomen. De mogelijkheid, dat een dergelijke hoeveelheid iets aan den hoogen kant is, blijft hier verder buiten beschouwing, aangezien de **oplossingsmethode** van dergelijke vraagstukken, waarop het hier aankomt, niet verandert, als deze hoeveelheid lager mocht zijn, dan hier is aangenomen. Verder is het noodig te weten, wanneer het grasgewas in een dergelijken grond (de capillaire stijghoogte bedraagt in de natuurlijke ligging bijv. 60 cm) last van droogte ondervindt. Aangezien over dergelijke vraagstukken nog niet de resultaten van directe proefnemingen op proefvelden ter beschikking staan (zie ook hoofdstuk II), zullen we aannemen, dat geen hinder van droogte wordt ondervonden, indien de hoofdmassa van de plantenwortels zich nog minstens 10 cm in de capillaire laag bevindt (althans in gronden met een niet te groote capillaire stijghoogte, waarvan hier sprake is). Stellen we de dikte van de genoemde wortellaag op 25 cm, dan mag in droge perioden de grondwaterstand midden op de hier bedoelde perceelen dus niet dieper onder het maaiveld staan dan 25 + 60 — 10 = 75 cm onder het maaiveld. Aangezien het polderpeil in het zomerhalfjaar 40 cm onder het maaiveld staat is dus $m_0 = 0{,}75 - 0{,}40 = 0{,}35$ m en behoeven we dus voor de beantwoording van de genoemde vraag alleen

nog na te gaan, hoeveel water uit de slooten in het land zal infiltreeren, indien $m_0 = 0{,}35$ m, waardoor dit probleem dus ook weer tot een stroomingsvraagstuk is herleid. Deze hoeveelheid moet dus minstens gelijk zijn aan de onttrokken hoeveelheid water ten gevolge van de kwel (5 mm) vermeerderd met de hoeveelheid ten gevolge van het watergebruik door de planten (verdamping) of moet dus in totaal minstens 10 mm per 24 uur bedragen.

Aangezien de dikte van de doorlatende zandlaag onder het wateroppervlak in de slooten rond 6 m dik is (H = 6 m) kunnen we als bovenbegrenzing van het stroomingsveld het vlak door de waterspiegels in de slooten beschouwen, zoodat de vergelijking 109 kan worden toegepast, welke luidt:

$$s = \frac{8kdm_0}{l^2}$$

Aangezien $l = 100$ m en $r_0 = 0{,}75$ m is d (zie tabel 5–18 en 5–19 waartusschen geïnterpoleerd moet worden) 5,41 en is dus ($k = 4{,}0$ m per 24 uur):

$$s = \frac{8 \cdot 4{,}0 \cdot 5{,}41 \cdot 0{,}35}{(100)^2} = 0{,}006 \text{ m} = 6 \text{ mm per 24 uur.}$$

Deze hoeveelheid is geringer dan 10 mm per uur, d. w. z., dat de grondwaterstand in droge perioden dieper zal dalen. Ook deze daling is uit te rekenen (d. w. z. de waarde van m_0 bij $s = 0{,}010$ m per 24 uur), immers:

$$0{,}010 = \frac{8 \cdot 4{,}0 \cdot 5{,}41 \cdot m_0}{(100)^2} \text{ of } m_0 = 0{,}58 \text{ m} = 58 \text{ cm.}$$

Dit wil dus zeggen, dat de grondwaterstand in droge perioden op 58 + 40 = rond 1 m onder het maaiveld zal dalen, waarbij dus verdroging zal optreden.

Een verbetering in deze infiltratie is echter te verkrijgen door in de perceelen greppels te graven loodrecht de lengteslooten. Nemen we aan, dat deze onder den waterspiegel (eveneens 40 cm onder het maaiveld) een diepte hebben van 10 cm, de bodembreedte 20 cm en het talud 1 : 1 is, dan is de natte omtrek op rond 50 cm te stellen, zoodat r_0 = rond 16 cm = 0,16 m (48). De benoodigde greppelafstand is nu als volgt uit te rekenen:

Midden tusschen deze greppels mag de grondwaterstand niet dieper staan dan 75 cm onder het maaiveld of 35 cm onder de waterspiegels in deze greppels, zoodat ook nu $m_0 = 0{,}35$ m. Aangezien tusschen 2 opeenvolgende greppels m_0 varieert van 0 tot 0,35 m, kan dus voor de infiltratie vanuit de slooten m_0 gemiddeld op de helft of 0,175 m worden gesteld, hetgeen beteekent, dat na de totstandkoming van de begreppeling uit de slooten niet 6 maar slechts 3 mm per 24 uur infiltreert. Uit de greppels dienen dus nog 10 — 3 = 7 mm per 24 uur te worden geïnfiltreerd, zoodat $s = 0{,}007$ m

per 24 uur. Aangezien voor de greppels $m_0 = 0{,}35$ m is, kan de benoodigde afstand daarvan worden berekend worden (de dikte van de capillaire laag van 60 cm wordt nu niet verwaarloosd; aangenomen zal worden, dat de gemiddelde doorlatendheid van deze laag 2,5 m per 24 uur bedraagt). Hier treedt dus het geval op, dat bij de greppels de capillaire laag reikt tot het maaiveld, daarentegen ligt het capillaire oppervlak midden tusschen de greppels nog 15 cm daaronder. De berekening kan geschieden met behulp van de vergelijking 114, waarin de factor D door $D' = \frac{D + h - m_0}{2}$ is vervangen. Aangezien $D = 0{,}4$ m; $h = 0{,}6$ m en $m_0 = 0{,}35$ m is dus:

$$D' = \frac{0{,}4 + 0{,}6 - 0{,}35}{2} = 0{,}325 \text{ m.}$$

De bedoelde vergelijking luidt hier:

$$s = \frac{8k_1\, dm_0 + 8k'\, D'\, m_0 + 4(k' - k_1)m_0^2}{l^2},$$

waarin $k' = 2{,}5$ m per 24 uur; $k_1 = 4{,}0$ m per 24 uur; $D' = 0{,}325$ m; $s = 0{,}007$ m per 24 uur. Aangezien $H = 6$ m en $r_0 = 0{,}16$ m is en l niet bekend is, moet voor de bepaling van den factor d (zie de tabellen 5–9 en 5–10, waartusschen geïnterpoleerd moet worden) voor l voorloopig een zekere waarde worden aangenomen. Stel, dat $l = 40$ m, dan is $d = 3{,}19$ m, of dus:

$$0{,}007 = \frac{8 \cdot 4{,}0 \cdot 3{,}19 \cdot 0{,}35 + 8 \cdot 2{,}5 \cdot 0{,}325 \cdot 0{,}35 + 4\,(2{,}5 - 4{,}0)\,(0{,}35)^2}{l^2}$$

of $l = 73$ m.

Aangezien voor het aangeven van den factor d voor $l = 40$ m is aangenomen, hetgeen onjuist blijkt te zijn geweest, moet deze berekening dus worden herhaald. We zullen nu aannemen, dat $l = 80$ m, waardoor $d = 4{,}17$ m wordt en dus:

$$0{,}007 = \frac{8 \cdot 4{,}0 \cdot 4{,}17 \cdot 0{,}35 + 8 \cdot 2{,}5 \cdot 0{,}325 \cdot 0{,}35 + 4\,(2{,}5 - 4{,}0)\,(0{,}35)^2}{l^2}$$

waaruit volgt, dat $l =$ rond 83 m.

Ook in dit geval is voor het aangeven van d de waarde van l nog iets te klein verondersteld. Is $l = 85$ m, dan is $d = 4{,}24$ en dus:

$$0.007 = \frac{8 \cdot 4{,}0 \cdot 4{,}24 \cdot 0{,}35 + 8 \cdot 2{,}5 \cdot 0{,}325 \cdot 0{,}35 + 4\,(2{,}5 - 4{,}0)\,(0{,}35)^2}{l^2}$$

waaruit volgt, dat $l = 84$ m.

Voor het aangeven van den factor d is $l = 85$ m iets te groot en had op omstreeks 84 m aangenomen moeten worden, waarbij de berekende afstand ook 84 m bedraagt, wat dus de verlangde afstand van deze greppels is.

Stel nu, dat de bedoelde perceelen 200 m lang zijn en door dwarsslooten gescheiden zijn, die eveneens voor de infiltratie dienstbaar gemaakt kunnen worden. Verwaarloozen we nu den eventueelen grooteren natten omtrek van deze slooten ten opzichte van deze greppels, dan blijken nog 2 greppels in ieder perceel loodrecht de kavelslooten gegraven te moeten worden (afstand 200 : 3 = rond 67 m), waardoor dus de infiltratie in elk geval voldoende is om den grondwaterstand overal voldoende hoog te houden (1 greppel op ieder perceel is iets te weinig).

Om de eerste zône van 200 m breedte rondom genoemd poldertje zal echter ook nog water infiltreeren, dat door de diepere grondlagen naar genoemd poldertje afvloeit. Deze hoeveelheid is echter geringer dan die in de eerste zône en zij kan dus eveneens berekend worden. Op dezelfde wijze als voor de eerste zône is voor deze zône uit te rekenen, of de kavelslooten alleen voldoende water kunnen infiltreeren om den grondwaterstand in droge perioden op de gewenschte hoogte te houden dan wel ook hier nog greppels moeten worden gegraven. Hetzelfde is na te gaan voor de zône van 400—600 m rondom genoemd poldertje, enz. Nemen we nu aan, dat voor de zône van 200—400 m rondom het poldertje nog één greppel gegraven zou moeten worden, terwijl dit voor de zône van 400—600 m niet meer noodig is, dan had het advies aldus geluid, nl.: Het onderhouden van het bedoelde lagere peil in genoemd poldertje kan worden toegelaten, mits het zomerpeil in de slooten in de omringende zandgronden in het zomerhalfjaar 40 cm onder het maaiveld bedraagt; mits deze kavel- en dwarsslooten ieder jaar worden schoongemaakt en op de aangegeven afmetingen worden gehouden; mits in de eerste zône van 0—200 m rondom genoemd poldertje nog 2 greppels loodrecht de kavelslooten worden gegraven (onderlingen afstand 67 m) en in de tweede zône van 200—400 m nog een greppel loodrecht de kavelslooten midden over de perceelen (afstand 100 m) en mits al deze greppels ieder jaar worden schoongemaakt en op de aangegeven afmetingen worden gehouden.

Het schoonmaken van slooten en greppels dient er zoowel voor de slooten en greppels de aangegeven afmetingen te doen behouden als om het ontstaan van slecht doorlatende laagjes langs de wanden daarvan tegen te gaan.

Ofschoon in werkelijkheid dergelijke problemen gewoonlijk ingewikkelder zijn (bijv. de ligging van de gronden is niet vlak; de afmetingen van de perceelen zijn niet alle gelijk evenmin als de afmetingen van de slooten, enz.), verandert daardoor de oplossingsmethode in principe niet, maar moet alleen met deze factoren rekening worden gehouden.

Ofschoon voor dit voorbeeld niet van belang, kan in andere gevallen (geen infiltratie ten gevolge van afvloeiing van water naar elders) ook in het zomerhalfjaar in natte perioden de grondwaterstand te hoog oploopen,

zoodat men in die gevallen tevens moet overwegen, of in plaats van een constant peil, men niet eenigermate een wisselend peil in het zomerhalfjaar moet hebben, dan wel, of men in verband hiermede niet een wat kleineren onderlingen afstand der greppels moet nemen, hetgeen eveneens door berekening van den grondwaterstand is na te gaan.

Met het behandelen van dit voorbeeld moge hier worden volstaan. (49)

HOOFDSTUK VI

Samenvatting

Na een korte inleiding is in hoofdstuk II aangetoond, dat alle ontwaterings- en infiltratievraagstukken ten slotte herleid kunnen worden tot stroomingsvraagstukken van water in den grond. Dit wil zeggen, dat men bepaalde, scherp omschreven, eischen kan stellen, die door een beschouwing van de kwantitatieve strooming van het water in den grond opgelost kunnen worden. Zoo luidt bijv. voor een drainage in een grond zonder kwel deze eisch aldus, dat deze drainage (afstand en diepte) zoodanig moet worden uitgevoerd, dat een bepaalde hoeveelheid overtollige neerslag in een bepaalden tijd afgevoerd moet kunnen worden, zonder dat de grondwaterstand midden tusschen de drainreeksen hooger oploopt dan tot een bepaalde waarde onder het maaiveld, terwijl de drainreeksen dusdanig gelegd moeten worden, dat erboven geen grondwater resp. hoogstens tot een, van te voren bepaalde, hoogte komt te staan. In het tweede gedeelte van hoofstuk II zijn verder globaal de voornaamste methoden behandeld om deze stroomingsvraagstukken, zooals deze bij ontwaterings- en infiltratievraagstukken kunnen voorkomen, op te lossen.

In hoofdstuk III zijn de in hoofdstuk II globaal aangegeven oplossingen nader uitgewerkt, waarbij tevens bewezen werd, dat men niet-halfcirkelvormige ontwaterings- of infiltratiesystemen vervangen mag denken door dergelijke systemen met wel een halfcirkelvormigen vorm (onder den waterspiegel), mits de natte omtrek dezelfde blijft en mits men den grondwaterstand (potentiaal in het grondwater) midden tusschen deze ontwaterings-, resp. infiltratiesystemen, beschouwt, of althans grondwaterstanden (potentialen), die niet te dicht bij deze ontwateringssystemen liggen, waardoor deze vraagstukken op een uniforme wijze kunnen worden opgelost.

In hoofdstuk IV is nader aangetoond op welke wijze de in hoofdstuk III behandelde oplossingen onder gebruikmaking van een tabel (tabel 5) zoo sterk vereenvoudigd kunnen worden, dat zij voor een algemeen gebruik in de practijk geschikt zijn, hetgeen zoowel voor ontwaterings- als voor infiltratievraagstukken is geschied. In wezen berust deze vereenvoudiging hierop,

dat de werkelijk aanwezige laag doorlatenden grond onder het vlak door de assen van de drains, resp. onder het vlak, door de waterspiegels in andere ontwateringssystemen vervangen wordt gedacht door een aequivalente laag ter dikte d en van eenzelfde doorlatendheid, in welke aequivalente laag een zuiver horizontale strooming is verondersteld en waardoor evenveel water naar of vanuit deze ontwaterings-, resp. infiltratiesystemen, per tijdseenheid stroomt. De bedoelde oplossingsmethoden kunnen daardoor belangrijk worden vereenvoudigd, mits een tabel ter beschikking staat, waaraan de waarde van den factor d kan worden ontleend, welke tabel dan ook als tabel 5 aan deze publicatie is toegevoegd.

In hoofdstuk VI zijn ten slotte enkele voorbeelden behandeld om aan te toonen op welke wijze men deze oplossingsmethoden moet toepassen, welke gegevens men daarvoor ter beschikking moet hebben en hoe deze bepaald kunnen worden. Drie gevallen werden behandeld, waarbij de drainafstand werd bepaald. In één geval werd de ontwatering door middel van kanalen en slooten nagegaan, waarbij tevens werd aangetoond, dat men — mits de benoodigde gegevens ter beschikking zijn — van te voren kan voorspellen tot hoe hoog de grondwaterstanden in het land midden tusschen deze kanalen of slooten boven den waterstand in deze kanalen en slooten in het winterhalfjaar zullen oploopen. Een geval werd hierbij genomen, waarbij de genoemde water- en grondwaterstanden ook ter plaatse bepaald waren. Tenslotte werd uiteengezet op welke wijze men infiltratievraagstukken behandelen moet, waarbij als voorbeeld het volgende geval werd uitgekozen, nl.: In een poldertje, waarin kwel optreedt en dat omringd is door zandgronden, die als grasland in gebruik zijn, is de ontwatering onvoldoende en wil men het polderpeil verlagen. De landbouwers, die om dit poldertje hun landerijen gelegen hebben, vreezen, dat, ten gevolge van de verhoogde onttrekking van water uit deze gronden naar dit poldertje, deze gronden last van droogte zullen ondervinden. Zij wenschen derhalve eerst te weten, of het bedoelde lagere polderpeil toelaatbaar is en indien dit niet zonder meer het geval mocht zijn, welke maatregelen getroffen kunnen, resp. moeten, worden om dezen last van droogte, na de totstandkoming van dit lagere polderpeil, te voorkomen.

NOTEN

(1) HOOGHOUDT, Dr. S. B.: Bijdrage tot de kennis van eenige natuurkundige grootheden van den grond, N°. 6; *Verslagen van Landbouwkundige Onderzoekingen*, 43 (13) B, 1937.

(2) Zie de in noot 1 genoemde literatuur, hoofdstuk VI, blz. 648—652.

(3) Hierbij wordt dus uitsluitend rekening gehouden met het bestaande polderpeil. Niet ingegaan wordt op de vraag, of dit polderpeil in den laatsten tijd niet vaak dieper wordt genomen dan wellicht noodig zou kunnen blijken te zijn, indien men meer wist over het verband tusschen de waterhuishouding van den grond, en met name tusschen den grondwaterstand onder het maaiveld, en den plantengroei dan nu het geval is.

(4) Zie TULNER, Ir. H.: Het verband tusschen den sloot- en grondwaterstand en de productiviteit van den bodem. Uitgave van het L.E.B.-Fonds 1931.

(5) BLAAUW, Prof. Dr. A. H.: De beteekenis van den grondwaterstand voor de bloembollencultuur. *Mededeeling N°. 53 Laboratorium voor plantenphysiologisch Onderzoek*, Wageningen 1938.

(6) Zie de Verslagen van de Vereeniging tot Exploitatie van Proefboerderijen in de Klei- en Zavelstreken van de Provincie Groningen over de jaren 1918—1929; 1930—1934 en 1935—1939.

(7) Voor buitenlandsche onderzoekingen op dit gebied, zie A. KÖNEKAMP und F. KÖNIG; Untersuchungen über den Einfluss des Grundwassers auf die Entwicklung eines Kleegrasgemissches; *Landw. Jahrb. 69*, 209—252, *1929*; waarop mij door Dr. M. A. J. GOEDEWAAGEN attent werd gemaakt.

(8) Zooals bekend zal zijn wordt in de nabijheid van Amsterdam een bosch aangelegd in den Rietwijkeroorderpolder en den Schinkelpolder. De eisch, die men hier aan de ontwatering heeft gesteld, is deze, dat de grondwaterstand bij den aldaar heerschenden regenval niet hooger mag oploopen dan tot 1 m onder het maaiveld.

(9) Enkele resultaten op dit proefveld verkregen zijn medegedeeld in de in noot (1) genoemde publicatie, blz. 645 en 646.

(10) MASCHHAUPT, Ir. J. G.: Lysimeter-onderzoekingen aan het Rijkslandbouwproefstation te Groningen en elders; *Verslagen van Landbouwkundige Onderzoekingen* N°. 44 (1) A, 1938.

(11) Zie de in noot (1) genoemde literatuur.

(12) In de practijk geldt dit in verband met de heterogeniteit van den grond in horizontale richting meestal slechts gemiddeld genomen (bijv. gemiddelde van meerdere overeenkomstige waarnemingen).

(13) Het spreekt vanzelf, dat de probleemstelling niet verandert, wanneer men bijv. boven de drains een zekere grondwaterlaag toelaat, hetgeen bijv. het geval kan zijn, indien door bijv. een onvoldoende beheersching van het polderpeil er op gerekend moet worden, dat de drains een tijdlang onder water zullen komen te liggen en men hiermede bij het aangeven van den benoodigden drainafstand dus rekening moet houden. Ook in gronden, die zeer veel ijzerverbindingen afscheiden (het afgevoerde water is bruinrood gekleurd), zal men goed doen met er op te rekenen, dat de drainbuizen of de stootvoegen (ook bij herhaald schoonmaken) toch niet geheel open zullen blijven, waardoor water boven de drains kan voorkomen. Zie in dit verband ook de gecyclostyleerde lezing van schrijver voor den Landbouwkundigen Kring te Groningen gehouden op 9 Maart 1938, welke lezing op aanvrage ter inzage zal worden gezonden.

(14) Zie de in noot (13) genoemde lezing of de in noot (1) genoemde literatuur, hoofdstuk VI, blz. 643.

(15) HOOGHOUDT, Dr. S. B.: Bijdrage tot de kennis van eenige natuurkundige grootheden van den grond, N°. 2; *Verslagen van Landbouwkundige Onderzoekingen*, N°. 40 B, 1934.

(16) HOOGHOUDT, Dr. S. B.: Bijdrage tot de kennis van eenige natuurkundige grootheden van den grond, N°. 4; *Verslagen van Landbouwkundige Onderzoekingen*, N°. 42 (13), B. Op blz. 509 eersten regel van boven van deze publicatie staat: „r de doorsnede . . . enz.". Dit moet natuurlijk zijn: „r de straal . . . enz.".

(17) Zie de in noot (16) genoemde literatuur.

(18) Zie de in noot (15) genoemde literatuur.

(19) Feitelijk stelt p_o het „werkzaam poriënvolume" voor, waaronder verstaan wordt het poriënvolume verminderd met het sorptiewater en het luchtgehalte. In zandgronden met geringe gehalten aan klei en humus is de hoeveelheid sorptiewater te verwaarloozen gering, zoodat, als het eventueel nog aanwezige luchtgehalte eveneens te verwaarloozen is, dus $p = p_o$. Verder kan worden opgemerkt, dat achterin de, in noot (16) genoemde, publicatie zich een lijst van de viscositeiten van water van 0°—25° C, opklimmende met 0,1° C, is aangegeven. De temperatuur van het grondwater van dieper gelegen grondlagen is vrijwel steeds constant en kan op 12 à 13° C worden gesteld; voor de hooger gelegen lagen kan deze temperatuur in den winter op omstreeks 5° C worden gesteld, of althans zal deze temperatuur zeker worden bereikt (van belang voor drainage).

(20) Zie de in noot (15) genoemde literatuur, blz. 234, vergelijking 25.

(21) Dit is in werkelijkheid niet het geval; zie de in noot (15) genoemde literatuur, blz. 228—235.

(22) Deze stroomsnelheid heeft dus betrekking op de volle doorsnede van de kolom grond (schijnbare stroomsnelheid), waarbij de gronddeeltjes dus buiten beschouwing blijven. De gemiddelde stroomsnelheid van het water in de poriën van den grond (werkelijke stroomsnelheid) is gelijk aan de eerstgenoemde stroomsnelheid gedeeld door het werkzaamporiënvolume (zie ook noot (19)).

(23) Soms bevat het grondwater op niet steeds dezelfde diepte keukenzout van een niet te verwaarloozen concentratie (verandering s.g. water) en moet de lengte van de vloeistofkolom, die den druk van het water in het betreffende punt aangeeft, herleid worden tot de lengte, die deze kolom zou hebben, indien de vloeistof uit zuiver water zou bestaan. Deze kwestie, die overigens minder eenvoudig is dan uit het voorgaande blijkt, zal voor de hier behandelde vraagstukken wel nooit van belang zijn, waarom met deze opmerking zal worden volstaan.

(24) Een meer exacte definitie luidt als volgt: Potentiaalverhang in een bepaald punt van het stroomingsveld is het potentiaalverschil tusschen twee op oneindig kleinen afstand gelegen aequipotentiaalvlakken, waarvan één vlak door het betreffende punt gaat, gedeeld door den loodrechten afstand van dat punt tot het andere aequipotentiaalvlak.

(25) Zie in dit verband ook de in noot (15) genoemde literatuur, blz. 218—223.

(26) Zooals steeds wordt hiermede de schijnbare stroomsnelheid bedoeld. Deze beschouwing is overgenomen uit: Forchheimer Philipp: Ueber den Wasserdrang in Brunnen und Baugruben; *Zeitschrift der Oesterreichischen Ingenieur- und Architekten Vereines*, N°. *43*, 1905, blz. 585 e.v..

(27) In de in noot (1) genoemde literatuur is reeds op blz. 470 uiteengezet, dat voor gronden met een structuur in de natuurlijke ligging (gronden van de tweede soort; in het algemeen niet-zandgronden) de strooming van het grondwater in horizontale richting in de capillaire laag verwaarloosd mag worden.

(28) Ditzelfde — eveneens voor niet-zandgronden — geldt ook voor de strooming van het grondwater naar andere ontwateringssystemen als bijv. greppels, slooten, kanalen, enz. Dit geldt ook voor infiltratie vanuit drains, greppels, enz., voor zooverre deze in niet-zandgronden plaats vindt. Zoowel voor ontwatering als infiltratie in zandgronden (zie ook noot (27)) vormt echter het capillaire oppervlak de bovenbegrenzing van het stroomingsgebied.

(29) Zelfs indien er een hangkromme naar de sloot optreedt (zie de in noot (1) genoemde literatuur, hoofdstuk II, sub I A, § 7) kan de strooming naar de drains als tweedimensionaal worden opgevat. Ditzelfde geldt ook voor de strooming van het grondwater naar (of vanuit) greppels, slooten, kanalen, enz. resp. voor de strooming vanuit drains, voor zooverre deze ontwateringssystemen evenwijdig liggen en bij een gezamenlijk aanwezig zijn (bijv. slooten en drains) elkaar niet beïnvloeden.

(30) Soms is ook de onderkant van een ondoorlatende laag een begrenzingsvlak van het stroomingsveld. In de, in deze publicatie behandelde gevallen komt dit echter niet voor.

(31) De Glee, Dr. Ir. G. J.: Over grondwaterstroomingen bij wateronttrekking door middel van putten; dissertatie Delft, 1930.

(32) Ook indien geen regen meer valt, maar nog wel water naar de drains wordt afgevoerd, zal per oppervlakte-eenheid — althans in een niet te lang tijdsbestek — overal evenveel worden afgevoerd, zooals proefnemingen in een groote bak bij het Bodemkundig Instituut nader hebben bewezen; zie de in noot (1) genoemde .iteratuur, blz. 484.

(33) Vaak vindt men in de literatuur de potentiaal van een stroomingstoestand aangeduid door de Grieksche letter Φ of φ (phi) en de stroomingsfunctie door Ψ of ψ (psi). In deze publicatie zal de potentiaal aangegeven worden door P of p.

(34) Aangezien deze berekeningen nog al uitgebreid zijn, heb ik gemeend, dat in verband met het resultaat daarvan het niet noodig is deze hier uitvoerig weer te geven.

(35) Dit neemt niet weg, dat er altijd nog wel gevallen voorkomen, waarbij men aan de bovenaangegeven oplossingen niets heeft. Dit is het geval, wanneer de doorlatendheid van het grondprofiel door verschil in grondsoort of structuur op korten afstand zoo sterk wisselt, dat men geen gemiddelde doorlatendheid van het bodemprofiel van het betreffende perceel kan vaststellen of hiervoor het aantal bepalingen zoo groot zou moeten zijn, dat in de practijk de uitvoering daarvan ondoenlijk wordt. Ook als de doorlatendheid van den grond nà de drainage door inkrimping en scheurvorming ten gevolge van de indroging (of opheffing van den opwaartschen druk van het water door diepere grondwaterstanden) sterk toeneemt, hetgeen evenals het eerste geval echter alleen in pas ingedijkte of drooggelegde polders met een dikke zware kleilaag optreedt, heeft men aan de aangegeven oplossingsmethoden niet veel.

(36) Aangezien de berekeningen voor iedere doorsnede loodrecht de drains gelden, kan de helling van de drainreeksen hier buiten beschouwing blijven; in hoofdstuk V zal daarop echter worden teruggekomen.

(37) Zie de in noot (26) genoemde literatuur, blz. 587.

(38) Voor deze functies zie: Hayashi Keiichi: Fünfstellige Tafeln der Kreis- und Hyperbelfunktionen sowie der Funktionen e^x und e^{-x} mit den natürlichen Zahlen als Argument. Zie verder: Jahnke Dr. Eugen und Emde Frits: Funktionentafeln mit Formeln und Kurven.

(39) Op de voorwaarde, dat door alle aequipotentiaalvlakken om iederen drain en binnen het stroomgebied van den beschouwden drain evenveel water per tijdseenheid stroomt (zie ook hoofdstuk II), zal worden teruggekomen.

(40) Zie HOOGHOUDT, Dr. S. B.: Bijdragen tot de kennis van eenige natuurkundige grootheden van den grond N°. 3 en N°. 5; *Verslagen van Landbouwkundige Onderzoekingen* N°. 41 B, 1935 resp. N°. 43 (1) B, 1937. Zie ook: Hoofdcommissie voor de Normalisatie in Nederland; Indeeling en benaming van grondmonsters, bladen N°. N 209, N 210 en N 213.

(41) HOOGHOUDT, Dr. S. B.: Verslag van enkele onderzoekingen naar de waterhuishouding op een niet- en op een wel-omgezet perceel van de proefboerderij te Borgercompagnie in de maanden September 1938 tot 1 Maart 1939 (gestencild).

(42) HOOGHOUDT, Dr. S. B.: Verslagen van de Vereeniging tot Exploitatie van Proefboerderijen in de Klei- en Zavelstreken van de Provincie Groningen over de jaren 1935—1939, blz. 148.

(43) HOOGHOUDT, Dr. S. B.: Rapport van het onderzoek naar den benoodigden drainafstand (en draindiepte) van enkele perceelen gelegen in de provincie Friesland 1940 (getypt).

(44) Meerdere voorbeelden daarvan zijn te vinden in de door schrijver geschreven hoofdstukken in: Verslag van het onderzoek naar de bodemkundige gesteldheid en de detailontwatering van het in te dijken kweldergebied, gelegen in het Waterschap „De Slikken", Provincie Groningen (1938; gestencild).

(45) Voor meerdere voorbeelden van dergelijke berekeningen zie: HOOGHOUDT, Dr. S. B.: Resultaten van de onderzoekingen op enkele perceelen in de Veenkoloniën en de daarop te beseeren adviezen (1939; gestencild) en HOOGHOUDT, Dr. S. B.: Verslag van enkele onderzoekingen naar de waterhuishouding op een niet- en wel-omgezet perceel van de proefboerderij te Borgercompagnie in de maanden September 1938 tot 1 Maart 1939 (1939; gestencild).

(46) Zie ook HOOGHOUDT, Dr. S. B.: De waterhuishouding van de Veenkoloniale gronden en de middelen om hierin zoo noodig verbeteringen aan te brengen: Lezing voor het Hoofdbestuur van den Veenkolonialen Boerenbond op 5 Juli 1939 te Veendam (1939; gestencild).

(47) Zie ook HOOGHOUDT, Dr. S. B.: Rapport betreffende de kwel in den Nijkspolder en de veranderingen, die deze kwel eventueel zou ondergaan bij een vergrooting van den Nijkspolder met een westelijk daarvan gelegen complex verveende gronden en betreffende de grondgesteldheid van genoemden polder en het westelijk daarvan gelegen complex verveende gronden (1937; gestencild).

(48) Het spreekt vanzelf, dat men tevens nog moet nagaan, of wat grootere afmetingen nog niet voordeeliger zijn, hetgeen hier zal worden nagelaten.

(49) Ook bij een opstuwing van het water in beken door het plaatsen van stuwen, kunnen in wezen ook infiltratieproblemen optreden.

(50) Interessant zijn ook de waarnemingen van EMMERT, die tot hetzelfde resultaat, wat betreft den dagelijkschen afvoer van overtolligen neerslag door drains komt. Zie: De Ermittlung der Abfluszspende bei Dränungen von Provinzial-Kulturbaumeister ERMERT, Köningsberg; Deutsche Landeskultuur Zeitung, 1940, heft 12 (Ausgabe A), 9. Jahrgang, blz. 239.

(51) Voor bepaalde doeleinden beschouwt men ook wel eens het potentiaalverschil tusschen twee willekeurige punten in een stroomingsveld, die dan niet op dezelfde stroombaan behoeven te liggen; zie bijv. hoofdstuk I, § 10 van deze publicatie.

TABELLEN

TABEL 1

$$\triangle P = \frac{2{,}3026\ sl}{\pi\ k}\left\{ log\ \frac{\frac{1}{2}\,l}{r_o} - 0{,}197 \right\} = A \bullet \frac{sl}{k}$$

In de tabel is de factor A aangegeven.

r_0 in meters	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45
l in m															
5	1,264	1,172	1,102	1,044	0,994	0,951	0,914	0,880	0,751	0,660	0,589	0,530	0,481	0,440	0,408
10	1,484	1,393	1,322	1,264	1,214	1,172	1,135	1,101	0,972	0,880	0,809	0,751	0,702	0,660	0,622
20	1,705	1,614	1,542	1,484	1,435	1,393	1,355	1,322	1,192	1,101	1,030	0,972	0,923	0,880	0,843
30	1,834	1,742	1,673	1,612	1,564	1,522	1,484	1,451	1,322	1,230	1,159	1,101	1,052	1,009	0,972
40	1,926	1,834	1,763	1,705	1,656	1,613	1,576	1,542	1,413	1,322	1,251	1,193	1,143	1,101	1,064
50	1,997	1,905	1,833	1,776	1,727	1,684	1,647	1,613	1,484	1,393	1,322	1,264	1,214	1,173	1,135
75	2,125	2,033	1,963	1,905	1,864	1,813	1,776	1,743	1,613	1,521	1,451	1,393	1,343	1,301	1,264
100	2,217	2,126	2,055	1,997	1,947	1,905	1,867	1,834	1,705	1,613	1,542	1,484	1,435	1,393	1,355
150	2,346	2,255	2,184	2,125	2,077	2,034	1,997	1,963	1,834	1,742	1,671	1,613	1,564	1,521	1,484
200	2,438	2,346	2,275	2,217	2,168	2,126	2,088	2,054	1,925	1,836	1,763	1,705	1,656	1,613	1,576
250	2,509	2,417	2,346	2,288	2,239	2,197	2,159	2,125	1,996	1,905	1,834	1,776	1,727	1,684	1,647
300	2,567	2,475	2,404	2,346	2,297	2,255	2,217	2,183	2,054	1,963	1,892	1,834	1,785	1,742	1,705

r_0 = 0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00
0,368	0,310	0,261	0,218	0,181	0,148	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,589	0,531	0,481	0,439	0,401	0,368	0,297	0,239	0,190	0,147	—	—	—	—	—	—
0,809	0,751	0,702	0,660	0,622	0,589	0,518	0,459	0,410	0,368	0,297	0,239	0,190	0,147	—	—
0,938	0,880	0,831	0,789	0,751	0,718	0,647	0,589	0,540	0,497	0,427	0,368	0,319	0,276	0,239	0,205
1,030	0,972	0,923	0,880	0,844	0,809	0,738	0,680	0,631	0,589	0,518	0,459	0,410	0,368	0,330	0,297
1,101	1,043	0,994	0,951	0,914	0,880	0,809	0,751	0,702	0,660	0,589	0,531	0,481	0,439	0,401	0,368
1,230	1,175	1,123	1,080	1,043	1,009	0,939	0,880	0,831	0,789	0,717	0,660	0,611	0,568	0,531	0,497
1,319	1,264	1,214	1,172	1,134	1,101	1,030	0,972	0,923	0,880	0,809	0,751	0,702	0,660	0,622	0,589
1,451	1,393	1,343	1,301	1,264	1,230	1,159	1,101	1,052	1,009	0,938	0,880	0,831	0,789	0,751	0,718
1,542	1,484	1,435	1,393	1,355	1,321	1,250	1,194	1,143	1,101	1,030	0,972	0,923	0,880	0,843	0,809
1,613	1,555	1,506	1,464	1,426	1,393	1,322	1,264	1,214	1,172	1,101	1,043	0,994	0,951	0,914	0,880
1,671	1,613	1,564	1,522	1,484	1,451	1,379	1,322	1,272	1,230	1,159	1,101	1,052	1,009	0,972	0,938

TABEL 2

$$\triangle P = \frac{2{,}3026\ sl}{\pi\ k}\left\{ log. \bullet \frac{0{,}707\ H}{r_o} + \ .\ .\ \text{enz.} \right\} = B \bullet \frac{sl}{k}$$

In de tabel is de factor B voor r_o = 0,03 meter aangegeven.

H in meters	l = 5	l = 10	l = 20	l = 30	l = 40	l = 50	l = 75	l = 100	l = 150	l = 200	l = 250	l = 300
0,5	0,795	0,800	0,802	0,802	0,803	0,803	0,803	0,803	0,803	0,804	0,804	0,804
1	1,001	1,016	1,021	1,022	1,023	1,023	1,024	1,024	1,024	1,024	1,024	1,024
2		1,222	1,236	1,240	1,241	1,242	1,243	1,243	1,244	1,244	1,245	1,245
3			1,360	1,365	1,369	1,369	1,371	1,372	1,372	1,373	1,373	1,374
4			1,443	1,455	1,457	1,458	1,461	1,462	1,463	1,464	1,464	1,464
5				1,520	1,526	1,528	1,531	1,533	1,535	1,535	1,536	1,536
6				1,572	1,581	1,584	1,587	1,590	1,592	1,593	1,593	1,593
7				1,618	1,627	1,631	1,636	1,639	1,641	1,642	1,642	1,643
8					1,663	1,670	1,677	1,679	1,682	1,683	1,683	1,684
9					1,698	1,706	1,713	1,716	1,719	1,720	1,722	1,722
10						1,734	1,745	1,749	1,752	1,754	1,755	1,755
12,5							1,812	1,818	1,822	1,824	1,824	1,825
15							1,863	1,865	1,878	1,881	1,882	1,883
17,5							1,909	1,918	1,923	1,928	1,929	1,930
20								1,955	1,962	1,969	1,971	1,972
25								2,016	2,032	2,038	2,042	2,043
30									2,084	2,093	2,096	2,098
35									2,130	2,139	2,143	2,146
40										2,175	2,183	2,187
45										2,210	2,217	2,222
50										2,235	2,246	2,253
60											2,304	2,304

TABEL 3

$$\triangle P = \frac{sl}{k} \cdot \frac{(l - 1{,}414\,H)^2}{8\,Hl} = C \cdot \frac{sl}{k}$$

In de tabel is de factor C aangegeven

H in meters	$l = 5$	$l = 10$	$l = 20$	$l = 30$	$l = 40$	$l = 50$	$l = 75$	$l = 100$	$l = 150$	$l = 200$	$l = 250$	$l = 300$
0,5	0,922	2,159	4,653	7,150	9,650	12,15	18,40	24,65	37,15	49,65	62,15	74,65
1	0,3215	0,922	2,159	3,405	4,653	5,902	9,025	12,15	18,40	24,65	30,90	37,15
2		0,3215	0,922	1,538	2,159	2,781	4,341	5,902	9,025	12,15	15,27	18,40
3			0,5172	0,922	1,331	1,745	2,781	3,820	5,902	7,983	10,07	12,15
4			0,3215	0,6174	0,922	1,229	2,003	2,781	4,341	5,902	7,463	9,025
5				0,4382	0,6777	0,922	1,538	2,159	3,405	4,653	5,902	7,151
6				0,3215	0,5172	0,7181	1,229	1,745	2,781	3,820	4,860	5,902
7				0,2405	0,4045	0,5743	1,009	1,450	2,337	3,227	4,118	5,009
8					0,3215	0,4678	0,8450	1,229	2,003	2,781	3,561	4,341
9					0,2583	0,3858	0,7181	1,058	1,745	2,436	3,128	3,820
10						0,3215	0,6174	0,922	1,538	2,159	2,781	3,405
12,5							0,4382	0,6777	1,167	1,662	2,159	2,657
15							0,3215	0,5172	0,922	1,331	1,745	2,159
17,5							0,2405	0,4045	0,7471	1,097	1,450	1,804
20								0,3215	0,6174	0,922	1,229	1,538
25								0,2090	0,4382	0,6777	0,922	1,167
30									0,3215	0,5172	0,7181	0,922
35									0,2405	0,4045	0,5743	0,7471
40										0,3215	0,4678	0,6174
45										0,2583	0,3860	0,5172
50										0,2090	0,3215	0,4382
60											0,2273	0,3215

TABEL 4

Som radiale en rechtlijnige strooming,

$$\triangle P = (B + C)\frac{sl}{k} = D \cdot \frac{sl}{k}$$

In de tabel is de factor $D = B + C$ voor $r_0 = 0{,}03$ m aangegeven.

H in meters	$l = 5$	$l = 10$	$l = 20$	$l = 30$	$l = 40$	$l = 50$	$l = 75$	$l = 100$	$l = 150$	$l = 200$	$l = 250$	$l = 300$
0,5	1,717	2,959	5,455	7,952	10,453	12,953	19,203	25,453	37,953	50,454	62,954	75,454
1	1,322	1,938	3,180	4,427	5,676	6,925	10,049	13,174	19,424	25,674	31,924	38,174
2		1,543	2,158	2,778	3,400	4,023	5,584	7,145	10,269	13,394	16,515	19,645
3			1,877	2,287	2,700	3,114	4,152	5,192	7,274	9,356	11,444	13,524
4			1,764	2,072	2,379	2,687	3,464	4,243	5,804	7,366	8,927	10,489
5				1,958	2,204	2,450	3,069	3,692	4,940	6,188	7,438	8,687
6				1,893	2,098	2,303	2,816	3,335	4,373	5,413	6,453	7,495
7				1,859	2,032	2,205	2,645	3,089	3,978	4,869	5,761	6,652
8					1,984	2,137	2,522	2,908	3,685	4,464	5,245	6,025
9					1,956	2,092	2,432	2,774	3,464	4,156	4,850	5,542
10						2,055	2,362	2,671	3,290	3,913	4,536	5,160
12,5							2,250	2,496	2,989	3,486	3,983	4,482
15							2,184	2,382	2,800	3,212	3,627	4,042
17,5							2,150	2,323	2,670	3,025	3,379	3,734
20								2,276	2,579	2,891	3,201	3,510
25								2,225	2,470	2,716	2,964	3,210
30									2,405	2,610	2,816	3,020
35									2,371	2,544	2,717	2,893
40										2,496	2,655	2,804
45										2,468	2,608	2,739
50										2,444	2,568	2,691
60											2,531	2,626
∞	1,264	1,484	1,705	1,834	1,926	1,997	2,125	2,217	2,346	2,438	2,509	2,567

TABEL 5-1

In de tabellen 5 is de [illegible] d aangegeven

$r_0 = 0{,}03$

l in meters	5	7,5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
H in m											
0,5	0,36	0,40	0,42	0,45	0,46	*0,47*	0,47	*0,48*	[illegible]	*0,48*	0,48
0,75	*0,42*	0,51	*0,57*	*0,63*	*0,66*	*0,68*	*0,69*	*0,70*	[illegible]	*0,71*	*0,71*
1,00	0,47	0,58	0,65	0,73	0,78	*0,83*	0,85	*0,87*	[illegible]	*0,89*	0,90
1,25	0,48	*0,62*	*0,71*	*0,83*	*0,90*	0,96	*1,01*	*1,04*	[illegible]	*1,09*	*1,10*
1,50		0,65	*0,75*	0,91	*1,00*	*1,07*	1,13	*1,18*	[illegible]	1,23	*1,25*
1,75		*0,66* (1)	*0,78*	*0,97*	*1,09*	*1,18*	*1,25*	1,30	[illegible]	*1,40*	*1,43*
2,00			0,81	1,01	1,16	*1,26*	1,35	*1,42*	[illegible]	*1,52*	1,56
2,25			*0,83*	1,05	*1,21*	*1,34*	*1,43*	*1,51*	[illegible]	1,64	*1,69*
2,50			0,84	1,08	*1,26*	1,40	*1,51*	*1,60*	[illegible]	*1,75*	1,80
2,75				*1,11*	*1,30*	*1,45*	*1,58*	*1,67*	[illegible]	*1,84*	*1,91*
3,00				1,12	1,33	*1,49*	1,64	*1,75*	[illegible]	1,93	2,01
3,25				*1,14*	*1,36*	*1,54*	*1,69*	*1,81*	[illegible]	*2,01*	*2,10*
3,50				*1,15*	*1,38*	*1,58*	*1,74*	1,87	[illegible]	*2,09*	*2,17*
3,75				1,16	*1,40*	*1,60*	*1,78*	*1,91*	[illegible]	*2,15*	*2,24*
4,00					1,41	*1,62*	1,81	*1,97*	[illegible]	*2,21*	2,30
4,50					*1,44*	*1,66*	1,87	*2,04*	[illegible]	2,33	*2,44*
5,00					1,46	1,70	1,92	*2,10* (4)	[illegible]	*2,42*	2,55
5,50						*1,72*	*1,95*	*2,14*	[illegible]	*2,49*	*2,64*
6,00						*1,74* (2)	1,98	*2,18*	[illegible]	2,56 (6)	2,71
7,00						*1,75*	2,02 (3)	2,25	[illegible]	*2,66* (7)	2,83
8,00							*2,04*	*2,29* (5)	[illegible]	*2,74*	2,93
9,00								*2,31*	[illegible]	2,78	2,99
10,00									[illegible]	*2,81* (8)	3,04 (9)
∞	0,49	0,67	0,84	1,16	1,47	1,76	2,04	2,32	[illegible]	2,87	3,13

(1) Voor H = 1,875 m is d = 0,67
(2) Voor H = 6,25 m is d = 1,75
(3) Voor H = 7,5 m is d = 2,04
(4) Voor H = 5,25 m is d = 2,13
(5) Voor H = 8,75 m is d = 2,31

Opmerking. De gewoon gedrukte cijfers zijn berekend; de cursief gedrukte door grafische intrapolatie verkregen. Dit geldt voor alle tabellen 5.
Voor de toelichting van deze tabellen zie hoofdstuk IV, sub A, § 1 en hoofdstuk V.

l in meters	50	75	100	150	200	250	300
H in m							
0,5	0,48	0,48	0,49	0,49	0,50	0,50	0,50
1	0,90	0,93	0,95	0,97	0,97	0,98	0,98
2	1,56	1,68	1,75	1,83	1,87	1,89	1,91
3	2,01	2,26	2,41	2,58	2,67	2,73	2,77
4	2,30	2,71	2,95	3,23	3,39	3,50	3,58
5	2,55	3,06	3,39	3,80	4,04	4,20	4,32
6	2,71	3,33	3,75	4,29	4,62	4,84	5,00
7	2,83	3,55	4,05	4,71	5,14	5,42	5,64
8	2,93	3,72	4,30	5,09	5,60	5,96	6,22
9	2,99	3,86	4,51	5,41	6,02	6,45	6,77
10	3,04	3,97	4,68	5,70	6,39	6,89	7,27
12,5		4,17	5,01	6,27	7,17	7,85	8,27
15		4,29	5,25	6,70	7,78	8,62	9,28
17,5		4,36	5,38	7,02	8,27	9,25	10,—
20			5,49	7,27	8,65	9,76	10,7
25			5,62	7,59	9,21	10,6	11,7
30				7,80	9,58	11,1	12,4
35				7,91	9,83	11,5	13,0
40					10,—	11,8	13,4
45					10,1	12,—	13,7
50					10,3	12,2	13,9
60						12,4	14,3
∞	3,13	4,41	5,64	7,99	10,3	12,6	14,6

(6) Voor H = 6,75 m is d = 2,63
(7) Voor H = 7,5 m is d = 2,69
(8) Voor H = 11,25 m is d = 2,86
(9) Voor H = 12,5 m is d = 3,12

Opmerking: Bij intrapolatie en voor zooverre de waarden van d voor H = $\frac{1}{4}l$ niet zijn aangegeven, denke men er om, dat voor H = $\frac{1}{4}l$ de waarde voor d in eerste benadering gelijk is aan de waarde van d voor H = ∞ verminderd met $\frac{1}{2}$ à $\frac{3}{8}$ % van deze laatste waarde (dus voor H = ∞). Voor waarden van H grooter dan $\frac{1}{4}l$ is d practisch gelijk aan de waarde van d voor H = ∞.

TABEL 5-29 r_0 = 4,00

l in meters	75	100	150	200	250	300
H in m						
0,5	Voor alle afstanden 0,5 ←					
1	Voor alle afstanden 1,— ←					
2	Voor alle afstanden 2,— ←					
3	Voor alle afstanden 3,— ←					
4	Voor alle afstanden 4,— ←					
5	Voor alle afstanden 5,— ←					
6	Voor alle afstanden 6,— ←					
7	Voor alle afstanden 7,— ←					
8	Voor alle afstanden 8,— ←					
9	Voor alle afstanden 9,00 ←					
10	Voor alle afstanden 10,— ←					
12,5	Voor alle afstanden 12,5 ←					
15	Voor alle afstanden 15,0 ←					
17,5	15,8 (1)	16,3	16,8	17,—	17,2	17,2
20	↓	17,3	18,4	18,8	19,–	19,2
25	↓	18,7	20,5	21,6	22,2	22,7
30	↓	↓	22,1	23,8	24,9	25,7
35	↓	↓	23,— (2)	25,4	26,9	28,1
40	↓	↓	↓	26,7	28,5	30,1
45	↓	↓	↓	27,5	29,8	31,8
50	↓	↓	↓	28,2	30,7	33,1
60	↓	↓	↓	↓	32,1	35,1 (3)
∞	16,5	19,0	23,8	28,4	32,9	37,1

(1) Voor H = 18,75 m is d = 16,3
(2) Voor H = 37,5 m is d = 23,5
(3) Voor H = 75 m is d = 36,9

De cijfers voor afstanden kleiner dan 75 m zijn niet meer te berekenen.

TABEL 5-30 r_0 = 4,50

l in meters	75	100	150	200	250	300
H in m						
0,5	Voor alle afstanden 0,5 ←					
1	Voor alle afstanden 1,— ←					
2	Voor alle afstanden 2,— ←					
3	Voor alle afstanden 3,— ←					
4	Voor alle afstanden 4,— ←					
5	Voor alle afstanden 5,— ←					
6	Voor alle afstanden 6,— ←					
7	Voor alle afstanden 7,— ←					
8	Voor alle afstanden 8,— ←					
9	Voor alle afstanden 9,— ←					
10	Voor alle afstanden 10,— ←					
12,5	Voor alle afstanden 12,5 ←					
15	Voor alle afstanden 15,— ←					
17,5	16,5 (1)	17,2	17,4	17,5	17,5	17,5
20	↓	18,4	19,1	19,3	19,5	19,6
25	↓	19,8	21,4	22,3	22,8	23,2
30	↓	↓	23,2	24,6	25,6	26,3
35	↓	↓	24,2 (2)	26,4	27,8	28,9
40	↓	↓	↓	27,8	29,5	31,—
45	↓	↓	↓	28,6	30,9	32,8
50	↓	↓	↓	29,5	31,9	34,2
60	↓	↓	↓	↓	33,4	36,4 (3)
∞	17,7	20,1	25,—	29,7	34,2	38,6

(1) Voor H = 18,75 m is d = 17,4
(2) Voor H = 37,5 m is d = 24,7
(3) Voor H = 75 m is d = 38,3

De cijfers voor afstanden kleiner dan 75 m zijn niet meer te berekenen.

TABEL 5-31

$r_0 = 5{,}00$

l in meters	100	150	200	250	300
H in m					
0,5	Voor alle afstanden 0,5 ←				
1	Voor alle afstanden 1,— ←				
2	Voor alle afstanden 2,— ←				
3	Voor alle afstanden 3,— ←				
4	Voor alle afstanden 4,— ←				
5	Voor alle afstanden 5,— ←				
6	Voor alle afstanden 6,— ←				
7	Voor alle afstanden 7,— ←				
8	Voor alle afstanden 8,— ←				
9	Voor alle afstanden 9,— ←				
10	Voor alle afstanden 10,— ←				
12,5	Voor alle afstanden 12,5 ←				
15	Voor alle afstanden 15,— ←				
17,5	17,5	blijft verder 17,5 ←			
20	19,3	19,7	19,8	19,9	19,9
25	20,9	22,3	23,—	23,4	23,7
30	↓	24,1	25,5	26,3	27,—
35	↓	25,2 (1)	27,3	28,7	29,7
40	↓	↓	28,8	30,2	31,9
45	↓	↓	29,8	31,9	33,8
50	↓	↓	30,7	33,—	35,3
60	↓	↓	↓	34,7	37,6 (2)
∞	21,2	26,1	30,9	35,5	40,—

(1) Voor H = 37,5 m is d = 25,9
(2) Voor H = 75 m is d = 39,7

De cijfers voor afstanden kleiner dan 100 m zijn niet meer te berekenen.

TABEL 6

De waarden van $\frac{\triangle P_2}{\triangle P_1}$ zijn in de tabel vermeld.

$l = 5\ m$

n	$r_0 = 0{,}03$	0,04	0,05	0,06	0,07	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,75	1,00
0,25	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96	—	—	—	—	—	—
0,50	*1,14*	*1,12*	*1,10*	*1,08*	1,06	1,03	0,97	—	—	—	—	—
0,75	1,35	1,29	1,26	1,23	*1,20*	*1,13*	1,02	0,96	—	—	—	—
1,00	—	—	—	—	1,35	1,26	1,10	1,01	0,94	—	—	—
1,25	—	—	—	—	—	—	*1,19*	1,07	0,98	0,91	—	—
1,50	—	—	—	—	—	—	1,30	*1,15*	*1,05*	0,96	—	—
2,00	—	—	—	—	—	—	—	1,36	1,21	*1,08*	*0,88*	—

$l = 10\ m$

n	$r_0 = 0{,}03$	0,04	0,05	0,06	0,07	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,75	1,00
0,25	0,98	0,98	0,99	0,99	0,98	1,02	—	—	—	—	—	—
0,50	0,99	0,99	0,98	0,97	0,97	0,97	0,96	—	—	—	—	—
0,75	*1,11*	1,06	1,07	1,06	1,04	1,03	0,98	0,97	—	—	—	—
1,00	1,23	*1,20*	*1,17*	*1,15*	*1,13*	1,10	1,02	0,99	0,97	—	—	—
1,25	—	1,31	1,27	1.25	1,22	*1,18*	1,08	1,02	0,99	0,97	—	—
1,50	—	—	—	—	—	1,26	1,13	1,06	1,02	0,98	—	—
2,00	—	—	—	—	—	—	1,26	1,13	1,10	1,04	0,95	—

$l = 20\ m$

n	$r_0 = 0{,}03$	0,04	0,05	0,06	0,07	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,75	1,00
0,25	0,86	0,87	0,88	0,88	0,89	0,91	—	—	—	—	—	—
0,50	0,90	0,89	0,90	0,90	0,90	0,91	1,06	—	—	—	—	—
0,75	0,96	0,94	0,94	0,94	0,90	0,93	0,94	0,94	—	—	—	—
1,00	1,02	1,01	1,00	1,04	0,99	0,98	0,96	0,96	0,96	—	—	—
1,25	1,09	1,08	1,06	1,05	1,04	1,02	0,99	0,98	0,97	0,97	—	—
1,50	*1,16*	*1,14*	*1,12*	*1,10*	*1,09*	1,07	1,02	1,00	0,99	0,98	—	—
2,00	1,31	1,27	1,25	1,22	1,21	1,17	1,09	1,05	1,02	1,01	0,97	—

l = 30 m

n	r_0 = 0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,75	1,00
0,25	0,84	0,86	0,86	0,87	0,85	0,90	—	—	—	—	—	—
0,50	0,86	0,87	0,87	0,87	0,85	0,89	0,92	—	—	—	—	—
0,75	0,90	0,90	0,90	0,90	0,87	0,91	0,92	0,93	—	—	—	—
1,00	0,94	0,94	0,94	0,93	0,90	0,94	0,93	0,94	0,95	—	—	—
1,25	0,99	0,98	0,98	0,97	0,93	0,96	0,95	0,95	0,95	0,95	—	—
1,50	1,04	1,03	1,02	1,01	0,97	0,99	0,97	0,97	0,97	0,97	—	—
2,00	1,14	1,12	1,11	1,06	1,04	1,06	1,02	1,00	0,99	0,98	0,97	0,97

l = 40 m

n	r_0 = 0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,75	1,00
0,25	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	—	—	—	—	—	—
0,50	0,85	0,85	0,86	0,86	0,87	0,88	0,91	—	—	—	—	—
0,75	0,87	0,87	0,88	0,87	0,88	0,88	0,90	0,92	—	—	—	—
1,00	0,90	0,90	0,90	0,89	0,90	0,90	0,91	0,92	0,90	—	—	—
1,25	0,94	0,93	0,93	0,93	0,93	0,92	0,92	0,93	0,94	0,94	—	—
1,50	0,98	0,97	0,96	0,96	0,95	0,95	0,94	0,94	0,94	0,95	—	—
2,00	1,06	1,04	1,03	1,02	1,02	1,03	0,95	0,97	0,96	0,96	0,96	0,97

= 50 m

n	r_0 = 0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,75	1,00
0,25	0,82	0,85	0,86	0,87	0,87	0,89	—	—	—	—	—	—
0,50	0,84	0,84	0,85	0,85	0,86	0,86	0,90	—	—	—	—	—
0,75	0,85	0,85	0,86	0,86	0,86	0,87	0,89	0,90	—	—	—	—
1,00	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,90	0,90	0,93	—	—	—
1,25	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,91	0,90	0,93	0,93	—	—
1,50	0,90	0,93	0,93	0,93	0,92	0,92	0,92	0,93	0,93	0,94	—	—
2,00	1,00	0,99	0,98	0,98	0,97	0,97	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,96

l = 75 m

n	r_0 = 0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,75	1,00
0,25	0,82	0,84	0,85	0,85	0,86	0,88	—	—	—	—	—	—
0,50	0,82	0,83	0,82	0,84	0,85	0,86	0,90	—	—	—	—	—
0,75	0,83	0,84	0,85	0,84	0,86	0,86	0,89	0,90	—	—	—	—
1,00	0,83	0,83	0,84	0,84	0,85	0,85	0,87	0,89	0,90	—	—	—
1,25	0,86	0,86	0,86	0,86	0,87	0,87	0,88	0,90	0,91	0,92	—	—
1,50	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	—	—
2,00	0,98	0,91	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,91	0,91	0,93

l = 100 m

n	r_0 = 0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,75	1,00
0,25	0,83	0,84	0,84	0,86	0,87	0,89	—	—	—	—	—	—
0,50	0,81	0,82	0,83	0,84	0,84	0,86	0,89	—	—	—	—	—
0,75	0,82	0,82	0,83	0,83	0,84	0,85	0,88	0,90	—	—	—	—
1,00	0,82	0,83	0,83	0,83	0,84	0,85	0,87	0,89	0,91	—	—	—
1,25	0,83	0,84	0,84	0,84	0,84	0,85	0,87	0,88	0,90	0,91	—	—
1,50	0,84	0,85	0,85	0,85	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,91	—	—
2,00	0,87	0,88	0,88	0,87	0,88	0,88	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,94

l = 150 m

n	r_0 = 0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,75	1,00
0,25	0,83	0,85	0,85	0,86	0,87	0,89	—	—	—	—	—	—
0,50	0,80	0,81	0,82	0,82	0,83	0,85	0,88	—	—	—	—	—
0,75	0,80	0,81	0,82	0,82	0,83	0,84	0,87	0,89	—	—	—	—
1,00	0,80	0,81	0,81	0,82	0,83	0,83	0,86	0,88	0,90	—	—	—
1,25	0,81	0,81	0,82	0,82	0,83	0,84	0,86	0,87	0,89	0,90	—	—
1,50	0,80	0,82	0,82	0,83	0,83	0,84	0,86	0,87	0,88	0,89	—	—
2,00	0,83	0,83	0,83	0,84	0,84	0,84	0,86	0,87	0,88	0,89	0,91	0,92

(40) Zie HOOGHOUDT, Dr. S. B.: Bijdragen tot de kennis van eenige natuurkundige grootheden van den grond N°. 3 en N°. 5; *Verslagen van Landbouwkundige Onderzoekingen* N°. 41 B, 1935 resp. N°. 43 (1) B, 1937. Zie ook: Hoofdcommissie voor de Normalisatie in Nederland; Indeeling en benaming van grondmonsters, bladen N°. N 209, N 210 en N 213.

(41) HOOGHOUDT, Dr. S. B.: Verslag van enkele onderzoekingen naar de waterhuishouding op een niet- en op een wel-omgezet perceel van de proefboerderij te Borgercompagnie in de maanden September 1938 tot 1 Maart 1939 (gestencild).

(42) HOOGHOUDT, Dr. S. B.: Verslagen van de Vereeniging tot Exploitatie van Proefboerderijen in de Klei- en Zavelstreken van de Provincie Groningen over de jaren 1935—1939, blz. 148.

(43) HOOGHOUDT, Dr. S. B.: Rapport van het onderzoek naar den benoodigden drainafstand (en draindiepte) van enkele perceelen gelegen in de provincie Friesland 1940 (getypt).

(44) Meerdere voorbeelden daarvan zijn te vinden in de door schrijver geschreven hoofdstukken in: Verslag van het onderzoek naar de bodemkundige gesteldheid en de detailontwatering van het in te dijken kweldergebied, gelegen in het Waterschap „De Slikken", Provincie Groningen (1938; gestencild).

(45) Voor meerdere voorbeelden van dergelijke berekeningen zie: HOOGHOUDT, Dr. S. B.: Resultaten van de onderzoekingen op enkele perceelen in de Veenkoloniën en de daarop te beseeren adviezen (1939; gestencild) en HOOGHOUDT, Dr. S. B.: Verslag van enkele onderzoekingen naar de waterhuishouding op een niet- en wel-omgezet perceel van de proefboerderij te Borgercompagnie in de maanden September 1938 tot 1 Maart 1939 (1939; gestencild).

(46) Zie ook HOOGHOUDT, Dr. S. B.: De waterhuishouding van de Veenkoloniale gronden en de middelen om hierin zoo noodig verbeteringen aan te brengen: Lezing voor het Hoofdbestuur van den Veenkolonialen Boerenbond op 5 Juli 1939 te Veendam (1939; gestencild).

(47) Zie ook HOOGHOUDT, Dr. S. B.: Rapport betreffende de kwel in den Nijkspolder en de veranderingen, die deze kwel eventueel zou ondergaan bij een vergrooting van den Nijkspolder met een westelijk daarvan gelegen complex verveende gronden en betreffende de grondgesteldheid van genoemden polder en het westelijk daarvan gelegen complex verveende gronden (1937; gestencild).

(48) Het spreekt vanzelf, dat men tevens nog moet nagaan, of wat grootere afmetingen nog niet voordeeliger zijn, hetgeen hier zal worden nagelaten.

(49) Ook bij een opstuwing van het water in beken door het plaatsen van stuwen, kunnen in wezen ook infiltratieproblemen optreden.

(50) Interessant zijn ook de waarnemingen van EMMERT, die tot hetzelfde resultaat, wat betreft den dagelijkschen afvoer van overtolligen neerslag door drains komt. Zie: De Ermittlung der Abfluszspende bei Dränungen von Provinzial-Kulturbaumeister ERMERT, Köningsberg; Deutsche Landeskultuur Zeitung, 1940, heft 12 (Ausgabe A), 9. Jahrgang, blz. 239.

(51) Voor bepaalde doeleinden beschouwt men ook wel eens het potentiaalverschil tusschen twee willekeurige punten in een stroomingsveld, die dan niet op dezelfde stroombaan behoeven te liggen; zie bijv. hoofdstuk I, § 10 van deze publicatie.

TABEL 7

De waarden van $\frac{\triangle P_3}{\triangle P_1}$ zijn in de tabel vermeld.

n	$r_0 =$ 0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,75	1,00
0,25	1,03	1,03	1,02	1,02	1,03	1,02	—	—	—	—	—	—
0,50	1,06	1,06	1,05	1,05	1,05	1,05	1,04	—	—	—	—	—
0,75	1,09	1,09	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,06	—	—	—	—
1,00	1,12	1,12	1,11	1,11	1,11	1,10	1,09	1,08	1,07	—	—	—
1,25	1,15	1,15	1,14	1,14	1,14	1,13	1,11	1,10	1,09	1,09	—	—
1,50	1,18	1,18	1,17	1,17	1,16	1,15	1,13	1,12	1,12	1,11	—	—
2,00	1,25	1,24	1,22	1,22	1,22	1,20	1,18	1,17	1,16	1,15	1,14	1.13

TABEL 8

Perceel 4 van den Heer H. D. LOUWES, Westpolder, Ulrum.

N°. boorgat	Ondiepe boorgaten		Diepe boorgaten	
	Gemeten laag in cms onder het maaiveld	Doorlaatfactor K in meters per 24 uur	Gemeten laag in cms onder het maaiveld	Doorlaatfactor K in meters per 24 uur
1	89—131	0,29	95—191	0,30
2	82—129	0,38	88—164	0,28
3	89—129	0,22	90—164	0,27
4	93—137	0,48	95—176	0,17
5	86—122	0,20	90—169	0,35
6	88—127	0,23	93—175	0,23
7	110—154	0,23	112—188	0,24
8	107—139	0,22	104—164	0,23
9	90—133	0,18	90—158	0,28
10	87—126	0,21	83—163	0,29
11	88—126	0,19	87—175	0,42
12	73—127	0,24	78—195	0,28
13	78—131	0,41	84—181	0,23
14	90—149	0,18	95—174	0,11
15	96—152	0,15	94—182	0,12
16	100—144	0,17	95—172	0,08
17	79—142	0,32	82—159	0,24
18	90—134	0,18	88—158	0,17
19	84—142	0,32	84—165	0,35
20	86—132	0,44	91—174	0,24
21	109—148	0,18	120—174	0,15
Gem.	90—136	0,26	92—172	0,24

Opmerking. De temperatuur van het grondwater is niet bepaald; vermoedelijk is deze niet veel van 5° C verschillend geweest.

TABEL 9

Perceel 2 van de Proefboerderij te Nieuw-Beerta.

N°. boorgat	Ondiepe boorgaten		Diepe boorgaten	
	Gemeten laag in cms onder het maaiveld	Doorlaatfactor K in meters per 24 uur	Gemeten laag in cms onder het maaiveld	Doorlaatfactor K in meters per 24 uur
1	6—125	0,11	20—173	0,11
2	10—119	0,10	16—180	0,06
3	9—105	0,07	7—175	0,26
4	19—125	0,12	13—178	0,18
5	86—130	0,26	82—182	(0,93)
6	97—131	0,07	95—195	(0,78)
7	88—127	(1,45)	89—178	0,07
8	74—104	(0,32)	73—165	0,07
9	67—120	0,16	64—175	0,25
10	75—135	0,13	65—175	0,06
11	16—135	0,08	25—175	(0,49)
12	9—125	0,15	8—167	0,12
13	3—110	0,06	14—155	0,04
14	56—125	0,06	57—175	0,04
15	36—135	0,21	33—185	0,04
Gem.	43—123	0,12	44—176	0,11

De temperatuur van het grondwater tijdens de meting bedroeg 5° C, zoodat hier geen correctie van de doorlaatfactoren noodig is (zie hoofdstuk II).

TABEL 10

Perceel Sectie B 939 van den Heer A. K. DE BOER te Pietersbierum (Fr.).

N°. boorgat	Ondiepe boorgaten		Diepe boorgaten	
	Gemeten laag in cms onder het maaiveld	Doorlaatfactor K in meters per 24 uur	Gemeten laag in cms onder het maaiveld	Doorlaatfactor K in meters per 24 uur
1	50—104	0,07	51—146	0,28
2	53— 90	0,13	51—150	0,16
3	48—101	0,18	47—153	0,29
4	44— 97	0,09	37—153	0,46
5	39— 99	0,08	36—142	(1,05)
6	26— 99	0,07	26—153	0,22
7	2—107	0,08	5—154	0,63
8	6—107	0,05	3—153	0,56
9	3—107	0,06	2—153	0,73
10	2—100	0,15	4—153	0,77
11	35—100	0,24	21—150	0,29
12	8—107	0,09	6—154	0,66
13	5—100	0,08	6—153	0,47
14	6—107	0,02	5—154	0,31
15	30—100	0,16	34—153	0,56
16	41— 99	0,10	45—154	0,16
17	48—108	0,07	53—154	0,08
18	51— 98	0,10	50—154	0,32
19	39—111	0,16	39—154	0,24
20	37—110	0,11	33—153	(0,96)
21	5—103	0,31	2—154	0,64
Gem.	27—103	0,11	26—152	0,41
	bij 5° C	0,10	bij 5° C	0,39

De temperatuur van het grondwater tijdens de metingen was 7° C. De gemiddelde doorlaatfactoren zijn op een temperatuur van het grondwater van 5° C omgerekend (zie hoofdstuk II).

TABEL 11

Diepboringen op perceel 11 van de Proefboerderij te Borgercompagnie

Laag in cms onder maaiveld		Grammen water per 100 gram droge stof = A	pH	In procenten op droge stof				U	p uit A (kolom 3)	p bij de K-bepaling	K10/35	K op natuurlijke poriënvolume		$k \cdot d$	$\frac{d}{k}$
				$CaCO^3$	Humus	Klei	Zand								
0— 16	bouwvoor	44,0	4,7	0	20,8	10,5	68,7	—	—	—	—	—		—	—
16— 32	veen; gelaagd; plakken	197,5	3,8	0	89,3	5,9	4,8	—	—	—	—	—		—	—
32— 58	veen; vast	454,0	3,4	0	96,4	1,9	1,7	—	—	—	—	—		—	—
58— 82	veen; iets kleiig	613,5	3,3	0	94,9	2,4	2,7	—	—	—	—	—		—	—
82— 86	„smeerlaag"	443,0	3,6	0	86,8	2,9	10,3	—	—	—	—	—		—	—
86—150	zand	24,4	4,0	0	1,7	1,8	96,5	94	39,3	41,7	1,43	p = 39,3	1,3	0,83	0,49
150—200	zand	18,4	4,7	0	0,7	1,9	97,4	89	32,5	33,8	2,98		3,6	1,80	0,14
200—300	zand	17,0	4,9	0	0,5	2,7	96,8	105	31,1	33,5	1,70		2,1	2,10	0,48
300—400	zand	17,7	5,1	0	0,4	2,0	97,6	90	32,0	33,8	2,98	p = 32,7	3,6	3,60	0,28
400—500	zand	18,2	4,9	0	0,4	2,1	97,5	87	32,6	33,8	2,98		3,6	3,60	0,28
500—600	zand	20,7	4,8	0	0,3	2,7	97,0	101	35,4	33,5	1,70		2,1	2,10	0,48
600—700	zand	18,3	5,3	0	0,2	1,0	98,8	87	32,6	34,0	3,04		3,7	3,70	0,27
					Gemiddelden laatste 6				32,7				som	17,73	2,42

Opmerking. Volgens andere beschikbare gegevens blijkt, dat de ondoorlatende laag waarschijnlijk op rond 13 m onder het maaiveld kan worden gesteld.

Volgens vergelijking 91 is $k_{gh} = \frac{17,73}{6,14} = 2,89$ en volgens vergelijking 93 is $k_{gv} = \frac{6,14}{2,42} = 2,54$.

Aangezien k_{gv} en k_{gh} weinig verschillen, is $k_{gw} = \frac{2,89 + 2,54}{2}$ = rond 2,7 m per 24 uur (zie vergelijking 95*a*).

INHOUD

HOOFDSTUK I

Inleiding 515

HOOFDSTUK II

Oplossing van drainage- en overeenkomstige problemen door deze te herleiden tot stroomingsvraagstukken 517

A. De probleemstelling; herleiding van drainage- en overeenkomstige problemen tot stroomingsvraagstukken 517

B. Globale oplossing van het drainage- en dus tevens in het algemeen van het detailontwateringsprobleem 522

§ 1. De wet van DUPUIT-DARCY 522

§ 2. Uitbreiding van het begrip potentiaal 528

§ 3. Afleiding van een algemeene vergelijking, die voor iedere stroming in den grond geldt 531

§ 4. Nadere beschouwing van de randvoorwaarden. De begrenzing van een stroomingsveld; behandeling van een rechtlijnige, radiale, twee-dimensionale stroming 532

§ 5. Behandeling van een geval van een kromlijnige, radiale, twee-dimensionale stroming, waarbij een stroomvlak optreedt, zonder dat een ondoorlatende laag in het bodemprofiel aanwezig is. De „spiegelmethode" 537

§ 6. Nadere beschouwing van de begrenzingswijzen, zooals deze bij drainage kan voorkomen 540

§ 7. Opstelling van de potentiaalfunctie voor het geval de grond tot onbeperkte diepte onder de drains homogeen doorlatend is 543

§ 8. Opstelling van de potentiaalfunctie voor het geval de grond tot een bepaalde diepte onder de drains homogeen doorlatend is 551

§ 9. Bespreking van de voorwaarden, waaronder de in § 8 ontwikkelde potentiaalfunctie geldig is; opstelling van de potentiaalfunctie in het geval de drains op de ondoorlatende laag liggen 552

§ 10. Oplossing van detailontwateringsvraagstukken door samenstelling van een radiale en een rechtlijnig horizontale strooming 556

§ 11. Slotopmerking 558

HOOFDSTUK III

Uitwerking van de in hoofdstuk II globaal aangegeven berekeningsmethoden 558

§ 1. Opstelling van de potentiaalfunctie voor het geval de grond tot onbeperkte diepte homogeen doorlatend is en het phreatisch vlak zich slechts weinig boven het vlak door de assen van de drains verheft 558

a. Berekening van de potentiaalfunctie door gebruik te maken van een rechthoekig coördinatiestelsel 558

b. Berekening van de potentiaalfunctie door gebruik te maken van poolcoördinaten 562

c. Geldigheid van de opgestelde potentiaalfunctie 563

d. De potentiaalfunctie geldt met voldoende benadering tevens voor niet-halfcirkelvormige ontwateringssystemen 563

§ 2. Opstelling van de potentiaalfunctie voor het geval de grond onder het verbindingsvlak door de assen van de drains tot een zekere diepte homogeen doorlatend is 571

§ 3. Opstelling van de potentiaalfunctie voor het geval, dat de ondoorlatende laag niet diep genoeg onder het vlak door de assen van de drains, enz. ligt om de in § 2 aangegeven oplossing te mogen toepassen 575

§ 4. Opstelling van de potentiaalfunctie voor het geval de grond tot onbeperkte diepte homogeen doorlatend is en de welving van het phreatisch vlak boven het vlak door de assen van de drains resp. door de waterspiegels in andere ontwateringssystemen niet verwaarloosd mag worden 579

HOOFDSTUK IV

Vereenvoudiging van de in hoofdstuk III aangegeven berekeningen . . 581

A. Ontwatering 581

§ 1. Uiteenzetting van de wijze, waarop men de berekeningen kan vereenvoudigen door gebruik te maken van tabellen, in het geval de grond homogeen doorlatend is en de strooming boven het vlak door de assen van de drains resp. door de waterspiegels in andere ontwateringssystemen mag worden verwaarloosd 581

§ 2. Bespreking van de verandering, die de in § 1 aangegeven, vereenvoudigde berekening moet ondergaan in het geval de grond heterogeen doorlatend is 589

§ 3. Bespreking van de verandering, die de in § 1 aangegeven vereenvoudigde berekening moet ondergaan, indien de welving van den grondwaterspiegel boven het verbindingsvlak door de assen van de drains resp. door de waterspiegels in andere ontwateringssystemen zoo groot is, dat deze niet verwaarloosd mag worden en hierin de strooming niet tot een verticale strooming mag worden vereenvoudigd; de grond is homogeen doorlatend 592

§ 4. Bespreking van de verandering, die de in § 1 aangegeven vereenvoudigde berekening moet ondergaan, indien de welving van den grondwaterspiegel boven het verbindingsvlak door de assen van de drains resp. door de waterspiegels in andere ontwateringssystemen zoo groot is, dat deze niet verwaarloosd mag worden en hierin de strooming niet tot een verticale strooming mag worden vereenvoudigd; de grond is heterogeen doorlatend 601

B. Infiltratie 605

§ 1. Eenige algemeene opmerkingen 605

§ 2. Infiltratie in niet-zandgronden 605

§ 3. Infiltratie in zandgronden 608

a. Vergelijkingen, die zoowel bij gebruik van drains, als greppels, slooten enz. gelden, voorzoover althans niet anders is vermeld; de capillaire laag mag verwaarloosd worden 608

b. Behandeling van eenige vergelijkingen, die alleen gelden bij gebruik van drains en voor het geval de capillaire laag niet verwaarloosd mag worden 609

c. Vergelijkingen, die alleen gelden bij gebruik van greppels, slooten, enz., of dus van z.g. open infiltratiesystemen en voor het geval de capillaire laag niet verwaarloosd mag worden 612

d. Algemeene opmerking 615

HOOFDSTUK V

Enkele practische toepassingen 615

A. Ontwatering 615

§ 1. Korte bespreking van de belangrijkste formules, met behulp waarvan de verlangde factoren worden berekend . . . 615

a. Ontwatering door middel van drains 616

b. Ontwatering door middel van open ontwateringssystemen (greppels, slooten, kanalen, enz.) 618

c. Enkele opmerkingen 619

§ 2. De helling en de diepteligging van de drainreeksen . . . 619

§ 3. Bepaling van de benoodigde gegevens 622

a. De factor n 622

b. De factor m_0 623

c. De factor s 624

d. De factor l en de doorsnede van de ontwateringssystemen r_0 624

e. De factoren k_1 en k_2 626

1. Niet-zandgronden, d. w. z. gronden van de tweede soort (met een structuur in de natuurlijke ligging) . 626

2. Zandgronden, d. w. z. gronden van de eerste soort (zonder een structuur in de natuurlijke ligging) . . 630

§ 4. Berekening van de drainafstanden en verdere gewenschte gegevens 632

a. Berekening van drainafstanden 632

b. Berekening van andere gegevens 636

B. Infiltratie 639

HOOFDSTUK VI

Samenvatting 644

Noten 647

Tabel 1 652

Tabel 2 653

Tabel 3 654

Tabel 4 655

Tabel 5–1 tot en met 5–31 . . . . . 656—694

Tabel 6 . . . . . 695—697

Tabel 7 698

Tabel 8 699

Tabel 9 700

Tabel 10 701

Tabel 11 702