WATERBEHEERSING

Herziene uitgave 1972

LANDBOUWHOGESCHOOL Afd. Cultuurtechniek

WATERBEHEERSING.

Herziene Uitgave 1972.

INHOUD blz.

I Inleiding I - 1

1. Waterbeheersing als techniek I - 1
2. Enkele begrippen I - 2
3. Waterschappen I - 6

II Ontwatering II - 1

1. Vormen van ontwatering II - 1
2. Bovengrondse afvoer II - 1
3. Ontwateringsmiddelen II - 2
4. Werking van de drainage II - 5
5. Ontwateringscriteria II - 6

III De theorie van Hooghoudt over stationaire grondwaterstromingen naar kanalen en drains III - 1

1. Basisvergelijkingen III - 1
2. Stationaire stroming naar open kanalen III - 2
   2.1 Evenwijdige vrijwel droog staande kanalen reikend tot op ondoorlatende laag III - 2
   2.2 Evenwijdige waterhoudende kanalen, reikend tot op ondoorlatende laag III - 3
3. Stroming naar drains III - 5
   3.1 Evenwijdige drains, liggend op ondoorlatende laag III - 5
   3.2 Evenwijdige drains in de grond, die tot zeer grote diepte doorlatend is III - 5
   3.3 Evenwijdige drains in grond, die tot op een beperkte diepte doorlatend is III - 12
4. Berekening van drainafstanden III - 17

		blz.
IV.	Andere methoden ter bepaling van de drainafstand	IV - 1
	1. De drainagetheorie van Ernst	IV - 1
	2. Bepaling van drainafstanden in de Zuiderzeepolders	IV - 5
	3. Niet stationaire drainageformules	IV - 7
	4. Drainage van hellende terreinen	IV - 9
	4.1 Interceptiedrains	IV - 9
	4.2 Drainage met evenwijdige drains voor de afvoer van overtollig lokaal water	IV - 13
V.	Filtermateriaal en intreeweerstand	V - 1
	1. Filtermateriaal	V - 1
	2. Intreeweerstand	V - 2
VI.	Waterstroming door drains	VI - 1
	1. Gladde buizen en gebakken buizen	VI - 1
	2. Ribbelbuizen	VI - 4
	3. Helling van de drains	VI - 7
	4. Verstopping van drains	VI - 7
	5. Onderhoud van drains	VI - 8
VII.	Bijzondere drainages	VII - 1
	1. Sportvelden	VII - 1
	1.1 Inleiding	VII - 1
	1.2 Verschraling	VII - 3
	1.3 Bedekken met zand	VII - 4
	1.4 Grasmat	VII - 5
	2. Kampeerterreinen	VII - 6
	3. Grasland	VII - 7
	4. Bouwterreinen en bebouwde kommen	VII - 8
	5. Diepe drainage als bronbemaling	VII - 10
VIII.	Afwatering	VIII - 1
	1. Inleiding	VIII - 1
	2. Tracering van waterlopen	VIII - 2
	3. Vaststelling van peilen	VIII - 3
	4. Vaststelling van de hoogwaterlijn	VIII - 4

5. Vaststelling van de maatgevende afvoer VIII - 6

IX. Het niet-stationaire afvoerproces IX - 1
1. Inleiding IX - 1
2. Alleen radiale- en intreeweerstand van betekenis IX - 2
2.1 Het model van De Zeeuw en Hellinga IX - 2
2.2 Het verband tussen de reaktiefaktor α en de weerstanden W_{rad} en W_{intree} IX - 5
3. Alleen de horizontale stroming ondervindt weerstand; het model van Krayenhoff van de Leur IX - 6
4. Model met zowel horizontale als radiale- en intreeweerstand IX - 8
5. Toepassing op afvoeren van stroomgebieden IX - 9

X. Afwatering (vervolg) X - 1
1. Methode van de regenduurlijn voor bepaling van de maatgevende afvoerintensiteit X - 1
2. Empirische methoden X - 2
3. Berekening van waterlopen X - 3
3.1 Soorten van stroming in open waterlopen X - 3
3.2 Berekening van de permanente, eenparige stroming X - 4
4. Taludhelling en toelaatbare stroomsnelheid X - 7
5. Berekening van waterlopen in de Zuiderzeepolders X - 8
6. Beklede leidingen X - 9

XI. Onderhoud van waterlopen XI - 1
1. Algemeen: invloed op het ontwerp XI - 1
2. Mechanisch onderhoud XI - 1
3. Chemisch onderhoud XI - 2
4. Andere werkwijzen ter vermindering van onderhoud XI - 3

XII. Polderbemaling XII - 1
1. Inleiding XII - 1
2. Bemalingskapaciteit XII - 2
3. Jaarlijks waterbezwaar XII - 3
4. Invloed van de berging XII - 3

blz.

XIII. Waterkwaliteit XIII - 1

1. Betekenis van de waterkwaliteit XIII - 1

2. Normen voor de waterkwaliteit XIII - 1

3. Beheersing van de waterkwaliteit XIII - 5

XIV. Watervoorziening XIV - 1

1. Noodzaak van watertoevoer XIV - 1

2. Kunstmatige watervoorziening XIV - 3

I. Inleiding.

1. Waterbeheersing als techniek.

a) De reactie van de plant op de hydrologische gesteldheid van de groeiplaats wordt bepaald door:
- bodemfysische factoren (vochtgehalte, luchtgehalte, pF e.d.)
- plantenfysiologische processen (wateropname, transpiratie, invloed daarvan op ionenopname, fotosynthese en groei)

In de agrohydrologie worden de betrekkingen tussen groei van landbouwgewassen, bodem en vochtvoorziening besproken. Kent men deze betrekkingen, dan kan men eisen formuleren, waaraan het milieu moet voldoen.

b) Indien niet aan deze eisen wordt voldaan, dan kan men voorzieningen treffen tot verbetering. Tot de taak van de ingenieur behoort:
- het zoeken naar oplossingen
- het ontwerpen van voorzieningen
- het uitvoeren van de geprojecteerde werken.

Kennis van de fundamentele processen vormt daartoe de basis. Toch is deze kennis niet onmisbaar: in het verleden zijn de meeste werken zonder deze kennis tot stand gekomen.

c) Dit is mogelijk door gebruik te maken van ervaring, soms ook van intuïtie. Vaak zijn deze ervaringen gecodificeerd tot ontwerpregels (normen).
Voorbeelden:
- systemen van waterverstrekking en waterverdeling in oude irrigatiegebieden
- dijkshoogten in Nederland tot omstreeks 1950
- capaciteit van bemaling in Nederland

d) Deze ervaringsregels kunnen voor de praktijk zeer bruikbaar

zijn (bemalingscapaciteit in Nederlandse polders met weinig kwel: 10-12 mm/etm.)
Zij falen echter indien:
- men het statistische karakter niet voldoende onderkent (dijkshoogten in 1953)
- de omstandigheden zo snel veranderen, dat onvoldoende ervaring kan worden opgedaan
- men onder geheel andere omstandigheden moet werken (aanleg van polders in buitenland)

Vervanging van de ervaringsregels door normen, berustend op onderzoek is daarom urgent. Op het gebied van de waterbeheersing zijn daarbij in de laatste decennia grote vorderingen gemaakt. Het vraagstuk is echter gecompliceerd, vooral doordat het zeer vele facetten heeft.

e) Waterbeheersing kan worden beschouwd als de technische toepassing van principes, die uit de hydrologie en hydraulica bekend zijn. Daarbij is ook de economie belangrijk: de kosten moeten in redelijke verhouding staan tot de te verwachten baten. Deze laatste zijn vaak moeilijk te schatten.

2. Enkele begrippen

a) De waterhuishouding van een gebied omvat de hoedanigheid en het gedrag van het water, hetzij in rust, hetzij in beweging, bij het binnenkomen van, tijdens het verblijf in en bij het verlaten van dit gebied. Het begrip kan ook worden toegepast op een bodemprofiel, een plant etc., maar wordt meestal gebruikt voor een geografisch begrensd gebied.
Binnenkomen in een dergelijk geografisch begrensd gebied kan geschieden in de vorm van neerslag, maar ook door toestroming van water door de grond, via leidingen of over de oppervlakte. Verlaten kan geschieden in de vorm van verdamping, maar ook door afstroming van water door de grond, via de leidingen of over de oppervlakte.

Bij de waterhuishouding zijn van belang:

- de hoeveelheden in- en uitstromend water en de verandering in de hoeveelheid water binnen het beschouwde gebied. Deze hoeveelheden bepalen tesamen de waterbalans: deze waterbalans vormt dus een onderdeel van de waterhuishouding.
- de kwaliteit van het in- en uitstromende water en de verandering daarvan binnen het gebied (verontreiniging met organische en anorganische stoffen; voor de landbouw is het zoutgehalte van grote betekenis)
- de wegen, die het water volgt (zichtbaar en onzichtbaar, bovengronds en ondergronds of via de plantenwortels en -stengels).
- het niveau waarop het water zich bevindt op verschillende punten binnen het beschouwde gebied (peilen van het grondwater, van het water in drains, greppels, sloten en grotere leidingen).

b) Waterbeheersing is het samenstel van maatregelen, dat tot doel heeft de waterhuishouding in een gewenste toestand te brengen en te houden. Hierbij streeft men naar beheersing van de peilen en bewegingen van het water (zowel in de grond als in open waterlopen), terwijl daarnaast wordt getracht ook de kwaliteit van het water te beheersen.
De hydrologie van een gebied resulteert in een bepaalde waterhuishouding van dit gebied. Voldoet deze waterhuishouding niet aan de gestelde eisen dan is waterbeheersing noodzakelijk, welke op zijn beurt de waterhuishouding en ook de hydrologie van dit gebied beinvloedt.

c) Waterbeheersing omvat drie aspecten:

- het waterbeheersingsplan omvat een voorstel tot aanleg of verbetering van waterbeheersingsmiddelen. Het plan is gebaseerd op doelstellingen, die aangeven waaraan de toekomstige waterhuishouding moet voldoen.

- de waterbeheersingsmiddelen zijn rivieren en beken, gegraven leidingen en sloten, greppels en drains.
  Ook behoren hiertoe de kunstwerken, die in deze stelsels van waterlopen aanwezig zijn (zoals gemalen, sluizen, stuwen, bruggen, duikers) en de waterkeringen, die moeten voorkomen, dat water van elders op ongewenste wijze het gebied binnentreedt.
- het waterbeheer heeft tot doel de waterbeheersingsmiddelen zodanig te gebruiken, dat de waterbeheersing aan de in het plan genoemde doelstellingen voldoet.

d) Waterbeheersing kan worden onderscheiden in:
- ontwatering, de afvoer van water uit de grond en van het water, dat op het maaiveld in de vorm van plassen aanwezig is. Tot de ontwateringsmiddelen behoren drains en greppels. Zijn deze niet aanwezig (vele zandgebieden), dan rekent men meestal ook de sloten tot de ontwateringsmiddelen, in gedraineerde of begreppelde gebieden (polderland) meestal niet.
- afwatering is het ontlasten van een gebied van overtollig water door middel van open waterlopen van grotere afmetingen (in het polderland ook de sloten); deze waterlopen brengen het water naar één of meer lozingspunten.
- lozing of uitwatering: het verwijderen van overtollig water uit het gebied. Deze lozing is hetzij natuurlijk (door de zwaartekracht), hetzij kunstmatig (door bemaling). Bij natuurlijke lozing onderscheidt men vrije lozing (b.v. als een beek in een grotere rivier uitmondt) en lozing via een kunstwerk (b.v. via een uitwateringssluis).

- waterkering, de bescherming van het gebied tegen ongewenst water van elders.
- wateraanvoer in perioden, dat daarin binnen het gebied behoefte bestaat. Deze wateraanvoer omvat:
  = waterinlaat (natuurlijk) of inmaling (kunstmatig)
  = transport van het water van het inlaatpunt naar de terreinen, waar daaraan behoefte bestaat. Voor het transport van aan te

voeren water wordt soms een afzonderlijk leidingenstelsel gebruikt, soms hetzelfde systeem als voor de afvoer (gescheiden resp. gecombineerd stelsel).

= waterverstrekking, de toediening van water aan grond en gewas (beregening, bevloeiing, aanvulling van grondwater door "infiltratie")

- doorspoeling, te verkrijgen door combinatie van wateraanvoer op één of meer punten en lozing op één of meer andere punten. Deze doorspoeling is een belangrijk hulpmiddel tot handhaving van de waterkwaliteit in gebieden, waar de vervuiling niet al te erge vormen aanneemt
- waterzuivering beoogt de beheersing van de waterkwaliteit, voornamelijk met het oog op het voorkomen van te grote verontreiniging met organische stoffen.

e) Verbeteringen in de waterbeheersing komen meestal in verschillende fasen tot stand.

- voorlopig plan, opgemaakt op grond van algemene gegevens. Het omvat: het vaststellen van de gebreken, omgrenzing van het te verbeteren gebied en een globaal plan met globale kostenraming.
- nader uitgewerkt plan, waarbij de gebreken worden gelocaliseerd, de oorzaken worden nagegaan en verdere gegevens verzameld (o.a. door het maken van een hoogtekaart, verzamelen van gegevens over peilen, afvoeren e.d.)
- formulering van de doelstellingen (landbouwkundige en niet landbouwkundige eisen) tot gegevens, die kunnen dienen als technische grondslagen van het plan (maatgevende peilen en maatgevende afvoeren)
- uitwerken van alternatieve oplossingen en het doen van een keuze daaruit
- opmaken van een definitief plan, waarbij afmetingen en plaats

van de waterlopen gedetailleerd worden vastgesteld.
Op grond van deze afmetingen kan een begroting worden opgesteld.

- opmaken van bestekken. Voor de leidingen zijn de gegevens in voldoende mate beschikbaar, voor de kunstwerken moet nog veel worden gedetailleerd. In de bestekken staat nauwkeurig omschreven wat gemaakt moet worden, meestal tevens hoe dit moet geschieden en onder welke voorwaarden
- het houden van een aanbesteding en gunning van het bestek aan de aannemer of aannemers.
- uitvoering en toezicht op de uitvoering
- oplevering van het werk
- na de oplevering volgt de periode van het waterbeheer d.w.z. exploitatie en onderhoud van de werken.

f) Voor waterbeheersingswerken geschiedt dit beheer in de regel door waterschappen.

3. Waterschappen

a) Waterschappen zijn publiekrechtelijke lichamen, die belast zijn met de zorg voor de waterstaatsbelangen van bepaalde gebieden. Hun taak en omgrenzing worden aangewezen in reglementen, die door de Provinciale Staten worden vastgesteld.

b) In West-Nederland en in het rivierengebied dateert deze organisatievorm uit de Middeleeuwen; in de hoger gelegen zandgebieden zijn waterschappen veelal eerst in deze eeuw tot stand gekomen.

c) De vergadering van ingelanden (eigenaren van de grond) vormt de hoogste instantie. Het stemrecht is meestal naar rato van de grootte van de eigendom. Soms hebben ook pachters stemrecht. In grote waterschappen vindt getrapte verkiezing plaats, via een algemeen bestuur, het college van hoofdingelanden, dat op zijn beurt het dagelijks bestuur samenstelt.

d) De voorzitter van het dagelijks bestuur (dijkgraaf) wordt in de regel benoemd, de leden (heemraden) zijn verkozen.
In besturen van waterschappen met een belangrijk niet-agrarisch grondgebruik zijn vaak gemeenten (soms ook industrieën) vertegenwoordigd, vooral als het kwaliteitsbeheer een onderdeel van de taakstelling vormt.

e) De jaarlijkse lasten (afschrijving, rente, onderhoud, exploitatie) worden omgeslagen over de ingelanden naar rato van de grootte van hun bezit. Meestal is dit bezit geclassificeerd naar de belangen die de gronden hebben bij de waterbeheersing. Kosten van waterzuivering worden omgeslagen naar de mate van vervuiling.

f) Grote leidingen en kunstwerken zijn veelal in eigendom en beheer bij het waterschap en worden door dit waterschap onderhouden. Kleinere leidingen zijn vaak in beheer bij de aangrenzende landeigenaren (aangelanden); het waterschap oefent toezicht (schouw) uit op het onderhoud.

g) Een waterschap heeft verordenende bevoegdheid. De keuren of politieverordeningen behoeven goedkeuring van het provinciaal bestuur.

h) In sommige gebieden zijn in het verleden zeer talrijke kleine waterschappen ontstaan. Omdat deze onvoldoende bestuurskracht bezitten vinden thans op grote schaal concentraties van waterschappen plaats.

i) De waterzuivering is in sommige provincies opgedragen aan grote waterschappen, (b.v. Noord- en Zuid-Holland, Noord-Brabant); in andere provincies (b.v. Drente, Gelderland) zijn afzonderlijke zuiveringsschappen opgericht.

II. Ontwatering.

1. Vormen van ontwatering.

a) In humiede klimaten is afvoer van water nodig in tijden, dat de neerslag de verdamping overtreft. In ariede klimaten is de afvoer van zouten het primaire doel (ook in tuinbouwkassen heerst een aried klimaat).

b) Het ontwateringsstelsel verzorgt de afvoer van water van het perceel, het afwateringsstelsel de afvoer van een groter gebied (stroomgebied, polder e.d.).

c) Ontwatering kan geschieden
- over de oppervlakte (bovengrondse afvoer)
- door de grond

2. Bovengrondse afvoer.

a) Bovengrondse afvoer is ongewenst wegens:
- vorming van plassen op vlak terrein
- erosie, vooral op hellend terrein
- hoge topafvoeren in het afwateringsstelsel (geen tijdelijke berging in de grond mogelijk)
- zeer geringe bijdrage tot het transport van zouten.

b) Bovengrondse afvoer is kenmerkend voor:
- bebouwde gebieden (verharde oppervlakken, daken, tuinbouwkassen). Stedelijke gebieden en kassengebieden geven daarom zeer hoge topafvoeren.
- een combinatie van hellend terrein, hoge neerslagintensiteit en weinig doorlatende gronden.

c) In Nederland komt bovengrondse afvoer van onverharde oppervlakken (landbouwgronden in de ruimste zin) weinig voor (over het

algemeen vlak terrein, geringe neerslagintensiteit, goed doorlatende gronden), behalve:

- bij dooi, als de grond nog bevroren en daardoor ondoorlatend is. Water, afkomstig van smeltende sneeuw en regen, komt dan over het oppervlak tot afstroming
- op slempige gronden. Deze verliezen bij zware regenval gemakkelijk hun goede structuur en daarmede hun goede doorlatendheid (meest lichte zavelgronden met 8-12% lutum en uiterst fijn zand)
- op zeer ondoorlatende kleigronden (b.v. knipklei)
- in Zuid-Limburg (steile hellingen)

d) In Nederland overheerst de afvoer door de grond naar greppels, drains en sloten. In het buitenland komt bovengrondse afvoer veel voor.

3. Ontwateringsmiddelen.

a) In sommige gebieden is de afvoer van grondwater naar sloten, beken en rivieren voldoende (pleistocene zandgronden met dik, zeer doorlatend pakket zanden in de ondergrond).
In andere gebieden zijn bijzondere voorzieningen nodig voor een goede ontwatering: greppels, moldrains en drains.

b) Greppels zijn eenvoudig en goedkoop in aanleg, maar duur in onderhoud en hinderlijk bij de exploitatie. Op bouwland in Nederland zijn zij vrijwel verdwenen, op grasland verdwijnen zij langzaam. In de Zuiderzeepolders dienen greppels als voorlopige ontwatering. Na rijping van de grond worden zij door drains vervangen. In andere landen zijn greppels ook op bouwland nog zeer verbreid (b.v. de "trenzen" in de kustvlakte van Suriname).

c) Moldrains zijn gangen, gemaakt door een "mollichaam" dat door de grond wordt getrokken. Zij zijn goedkoop in aanleg, maar weinig bedrijfszeker. In zware klei en sommige veensoorten blijven molgangen jarenlang in stand, in zand storten zij vrijwel direct in.

In Nederland is de ondergrond meestal weinig geschikt en wordt de methode weinig toegepast,
Er zijn vele pogingen gedaan molgangen te bekleden, o.a. met stroken veerkrachtig materiaal, die onder de grond tot een buis worden gevormd (overgang naar de buizendrainage).

d) Drains zijn ondergrondse buisleidingen, die het water naar de sloten afvoeren. Het grondwater treedt binnen door openingen en wordt door de buis getransporteerd.Drainage was reeds aan de Romeinen bekend; deze gebruikten daarvoor natuurlijke materialen zoals takkebossen, stenen e.d. Zij kenden ook gebakken aarden buizen, maar deze werden voor riolering toegepast.
Ruim 100 jaar geleden werden in Engeland voor het eerst drainbuizen fabriekmatig vervaardigd en sindsdien nam de drainage een zeer grote vlucht. Aanvankelijk berustte de techniek geheel op empirische grondslagen, later is de theorie zeer uitvoerig bestudeerd.

e) Drains kunnen bestaan uit:
- buizen van gebakken klei (traditioneel materiaal)
  thans nog 1/3 van de in Nederland gelegde drainages).
  Er zijn buizen met en zonder kraag. Kraagbuizen zijn duurder, maar minder gevoelig voor verzakking.
- buizen van kunststof (vooral PVC, polyvinylchloride).
  Er zijn twee belangrijke typen: gladde buizen en ribbelbuizen. Gladde buizen zijn hydraulisch gunstiger, maar mechanisch minder sterk dan ribbelbuizen. De laatste zijn op rollen leverbaar en daardoor gemakkelijker te verwerken.
  In 1969 werden in Nederland ongeveer 18.000 km drains gelegd, waarvan ongeveer de helft met gebakken buizen, de andere helft met buizen van kunststof. Van deze laatste groep buizen was ongeveer 3000 km ribbelbuis; het gebruik van dit type neemt snel toe.
  Een overzicht van de drainagematerialen, gebruikt in ruilverkavelingen, geeft tabel II-1.

Tabel II-1. Materialen toegepast bij drainage in ruilverkavelingsverband. 1 okt. 1969 - 1 okt. 1970.

afdekmateriaal	buizenmateriaal geb. aarden buis km	(%)	glad plastiek km	(%)	ribbelbuis km	(%)	totaal km	(%)
turfmolm	446	(11)	618	(15)	15	(<1)	1079	(27)
turfband	125	(3)	338	(8)	12	(<1)	475	(12)
vlasband	1098	(27)	41	(1)	87	(2)	1226	(30)
glasvlies	-	(-)	731	(18)	219	(5)	950	(23)
overige	4	(<1)	-	(-)	15	(<1)	19	(<1)
zonder	221	(5)	-	(-)	74	(2)	295	(7)
totaal	1894	(47)	1728	(42)	422	(11)	4044	(100)

f) Meestal worden drainbuizen omgeven door een omhullingsmateriaal of filter, met als doel:
- verhinderen van het binnendringen van gronddeeltjes
- vergemakkelijken van de toestroming naar de stootvoegen of openingen van de drain.

Het filter moet gronddeeltjes tegenhouden, maar mag niet verstoppen met grond of met ijzerverbindingen. Het moet goed doorlatend zijn voor water.

Als materialen worden gebruikt:

1) losse filtermaterialen
   - turfmolm (traditioneel, zeer goed filtermateriaal)
   - heide (bij drains, die tevens voor wateraanvoer dienen)
   - grind (vooral in de U.S.A.)
2) materialen in bandvorm (gemakkelijk machinaal te verwerken)
   - glasvlies (blijkt in sommige gronden spoedig te verstoppen)
   - turfvezelband (turfmolm op kunststofvezels)
   - vlasband (afval van de vlasindustrie)
   - nylon doek
   - kokosvezel (zeer goed filtermateriaal)

3) omwikkelde buizen

Vaak worden buizen reeds in de fabriek omwikkeld met één van de genoemde filtermaterialen.

g) Drainage was tot ± 1950 handwerk, bestaande uit:
- sleuf graven
- buizen leggen (nauwkeurig op diepte)
- omhullingsmateriaal aanbrengen
- sleuf dichten.

Het werk wordt thans machinaal uitgevoerd; de machines werken daarbij in principe op dezelfde wijze. Een nieuwe ontwikkeling is de sleufloze drainage: het invoeren van een flexibele ribbelbuis in de grond via een molploeg met breed mes of via een molploeg, waarbij het mollichaam verbonden is aan twee in een wijde v-vorm staande holle messen. Door een van de beide messen wordt de flexibele ribbelbuis naar beneden gevoerd (Willner-systeem). Nog andere machines leggen de buis in een sleuf, gegraven door een schuin oplopend woellichaam (systeem Daiëntie). Deze methode is echter nog niet voor algemene toepassing bruikbaar: in vele gronden treden te hoge intreeweerstanden op (zie 4-b en V-2).

4. Werking van de drainage (fig. II-1)

a) De overtollige neerslag wordt afgevoerd langs de volgende weg:
- binnendringen door het maaiveld
- stroming door de onverzadigde zone van de bodem (vrijwel vertikaal)
- stroming door de verzadigde zone van de bodem (langs gebogen stroomlijnen)
- stroming in de onmiddellijke omgeving van de drain naar stootvoegen of openingen (door de losse grond in de drainsleuf of door het omhullingsmateriaal)
- stroming door de openingen
- afvoer door de drainbuis naar open water

b) Veel voorkomende storingen zijn:
- te geringe doorlatendheid nabij het maaiveld (slempige gronden, sportvelden)
- aanwezigheid van een weinig doorlatende laag, waarop water stagneert en een schijnspiegel vormt boven het eigenlijke freatisch vlak (knipklei, soms ook als gevolg van grondbewerking of egalisatie)
- te ruime drainafstand
- te hoge intreeweerstand
- verstopte drains
- te hoog slootpeil

De storing is te localiseren met piezometers of potentiaalsondes (fig. II-2).

5. Ontwateringscriteria

a) Hooghoudt formuleerde voor bouwland het volgende criterium:
- bij stationaire afvoer van 5 mm/etm. mag het grondwater niet hoger stijgen dan tot 50 cm beneden maaiveld (later veranderd in 7 mm/etm.).

  Dit laatste criterium wordt nog steeds gebruikt: enkele variaties (o.a. voor andere toepassingsgebieden) zijn vermeld in tab. II-2.

  Deze criteria berusten op ervaring.

b) In de Zuiderzeepolders zijn talrijke ontwateringsproefvelden aangelegd: de gegevens daarvan maakten een nadere toetsing mogelijk.

Uit deze proefvelden bleek:
- er treedt geen schade op aan gewas, grond of bedrijfsvoering als in de winter het grondwater niet hoger stijgt dan tot 30 cm beneden maaiveld
- bij stijging boven dit niveau is schade te verwachten; deze is groter naarmate de overschrijdingen groter, talrijker of langduriger zijn.

Tabel II-2. Stationaire ontwateringscriteria voor Nederlandse omstandigheden.

bodemgebruik	stationaire afvoer mm/etm	vereiste diepte grondwater cm-maaiveld	opm.
bouwland	5	> 50	Hooghoudt (1940) in onbruik
"	7	> 50	veel gebruikt
" (Zuiderzee-polders)	10	> 30	" "
" (")	7	> 30	Sieben (1964) overeenkomend met SOW-30 < 200 cm.etm
grasland	7	> 15 à 20	
"	10	> 20	bij dichte veebezetting
boomgaard*	7	> 70	Braams en Butijn (1958)
bouwterreinen	10	> 50	
bebouwde terreinen	10	> 70	beneden onderkant vloeren (50 cm kruipruimte)
sportvelden, kampeerterreinen	15	> 50	
militair oefenterrein	7	> 70	

* voor boomgaard in de Zuiderzeepolders: zie tabel II-4.

c) Sieben voerde als maat voor deze overschrijding in de SOW-30 waarde: de som van de overschrijdingen in de winter van het 30 cm niveau (in cm/etm.). Als SOW < 200 cm.etm. is de schade gering, daar boven wordt zij belangrijk.
In de Zuiderzeepolders komt de grenswaarde SOV-30 < 200 overeen met een stationaire afvoer van 7 mm/etm. bij een grondwaterstand van 30 cm.

d) De criteria van tabel II-2 zijn stationaire criteria. In werdelijkheid is de afvoer een niet-stationair, met de tijd veranderd proces, waarbij in de grond berging optreedt.

e) Van Hoorn onderzocht het ontwateringscriterium voor de komgronden van het rivierengebied, gebaseerd op een niet-stationaire stroming. Hij ging uit van:
- draindiepte 90 cm
- max. grondwaterdiepte 20 cm, dus opbolling max. 70 cm (op deze grondsoort komt bouwland weinig voor)
- berging 3.5%
- karakteristieke regenperioden met frequentie 1 x per n jaar (n = 1, 2, 5, 10)
- ontwateringssystemen, die bij een opbolling van 70 cm een stationaire afvoer kunnen verzorgen van s mm/etm. (s = 0,5, 1, 2, 3, 5, 7, 9, 11).

Berekend werd, hoe deze ontwateringssystemen reageren op de karakteristieke regenperioden en of zij voldoen aan de eis, dat het grondwater niet te vaak boven de vastgestelde grenswaarde stijgt. Het blijkt, dat een systeem met stationaire afvoer van 7 mm/etm. bij 70 cm opbolling redelijk voldoet: de maatgevende grondwaterstand wordt dan slechts eens per ± 4 jaar overschreden (tabel II-3).

f) Segeren en Visser (1971) stelden een uitvoerig onderzoek in naar de ontwateringseisen van appelboomgaarden in de Zuiderzeepolders. Het blijkt, dat het wortelstelsel van appelbomen in de winter wel 6 weken onder water kan staan, maar dat in de zomer reeds na 1 week een merkbare schade optreedt (afsterven van jonge wortels, verminderde opname van voedingsstoffen).
De eis is daarom, dat in een natte periode in het groeiseizoen het grondwater in 1 week tot beneden de bewortelingsdiepte moet dalen; deze diepte is bij de onderzochte boomgaarden ongeveer 1 meter.
Kort durende hoge waterstanden (tot 40 cm beneden maaiveld) hebben weinig schadelijke effecten.

Men kan dit niet-stationaire criterium (daling van 60 tot 100 cm diepte binnen 7 dagen) vervangen door een reeks stationaire criteria; deze zijn vermeld in tabel II-4.

Tabel II-3. Reactie van ontwateringssystemen in komgrond op karakteristieke regenperioden (van Hoorn)

stationaire afvoercapaciteit bij 70 cm opbolling mm/etm.	Regenperiode, eens per n jaar voorkomend			
	n = 1	2	5	10
s = 2	-	-	-	-
3	-	-	-	-
5	+	+	-	-
7	+	+	-	-
9	+	+	+	-
11	+	+	+	-

+: voldoet aan de eis, dat grondwaterdiepte > 20 cm blijft (opbolling < 70 cm)

-: voldoet niet aan deze eis.

Tabel II-4. Stationaire criteria voor de ontwatering van boomgaarden (Segeren en Visser, 1971).

Stationaire afvoer mm/etm.	Vereiste diepte grondwater cm beneden maaiveld
0	110
1	95
2	85
10	60

g) In gebieden met zware neerslagen (grote delen van USA) kan men technisch vaak niet voldoende afvoercapaciteit scheppen om het water nog tijdens de regen af te voeren. Men stelt dan eisen aan de snelheid, waarmede het grondwater na ophouden van de regen moet dalen b.v.

- na ophouden van de regen moet het grondwater in 1 etmaal dalen van maaiveld tot een diepte van 1½ voet (45 cm).

In Zuid-Spanje (incidentele, maar zware winterregens) wordt de minder zware eis gesteld dat:

- na ophouden van de regen het grondwater in 1 à 2 etmalen moet dalen van maaiveld tot een diepte van 25 cm.

Dergelijke niet-stationaire criteria moeten worden ingevoerd in een niet-stationaire afvoerformule (zie IV-3).

h) In bevloeide gebieden is ontwatering nodig voor:

- afvoer van onvermijdelijke verliezen
- afvoer van zouten

Ontwateringscriteria kunnen worden afgeleid uit de zoutbalans van de grond: bij gebruik van water met veel zouten dient meer te worden afgevoerd dan bij bevloeiing met water van goede kwaliteit.

Een diepe grondwaterstand is gewenst, vooral in tijden dat niet bevloeid wordt (capillaire opstijging !). Afvoercapaciteit meestal 1-4 mm/etm., bijbehorende grondwaterstanden tenminste 0.5 m diep tijdens bevloeiing, 1.5 à 2.5 m diep in perioden dat niet bevloeid wordt.

Ontwatering geschiedt meestal met open sloten, soms ook door drainbuizen.

Voorbeelden voor "mediterraan" klimaat (Cs volgens Köppen) zijn gegeven in tabel II-5.

Tabel II-5. Drainagecriteria voor ontwatering van bevloeide gebieden in een mediterraan klimaat.

Gebied	stationaire afvoer mm/etm	diepte grondwater cm beneden maaiveld
Nijldelta (zware gronden)	1	100
Griekenland	1 - 2	100
Tunis, Medjerda-vallei	2	100
USA, Imperial Valley, Calif.	1.6	100

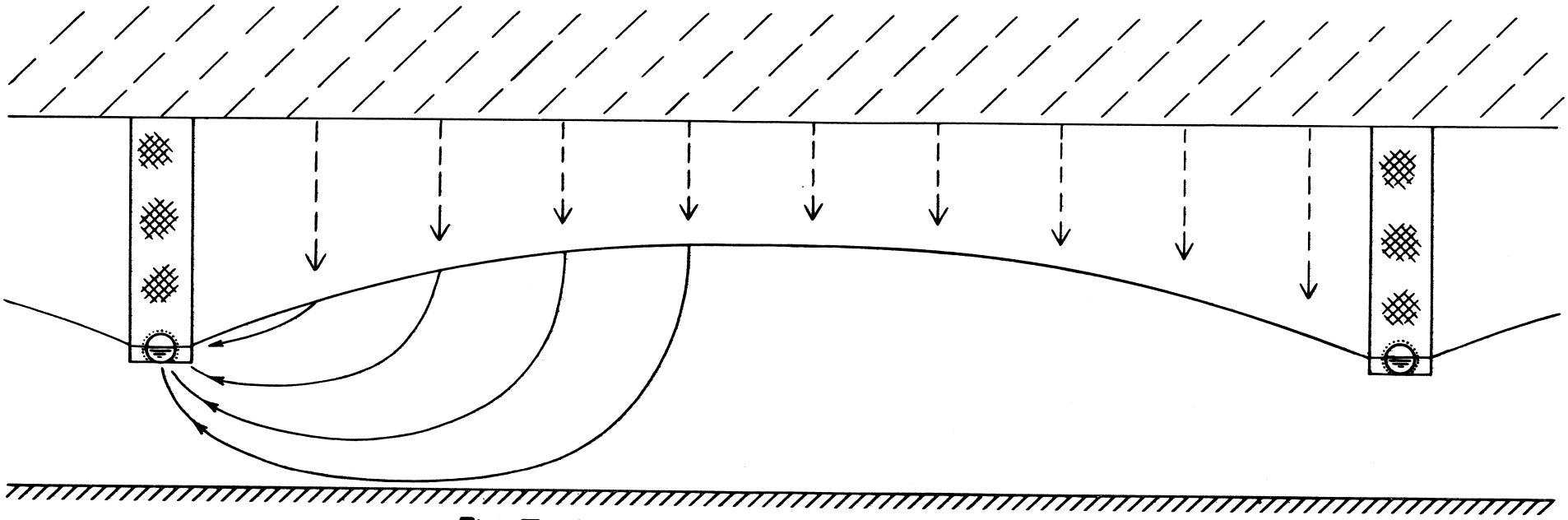
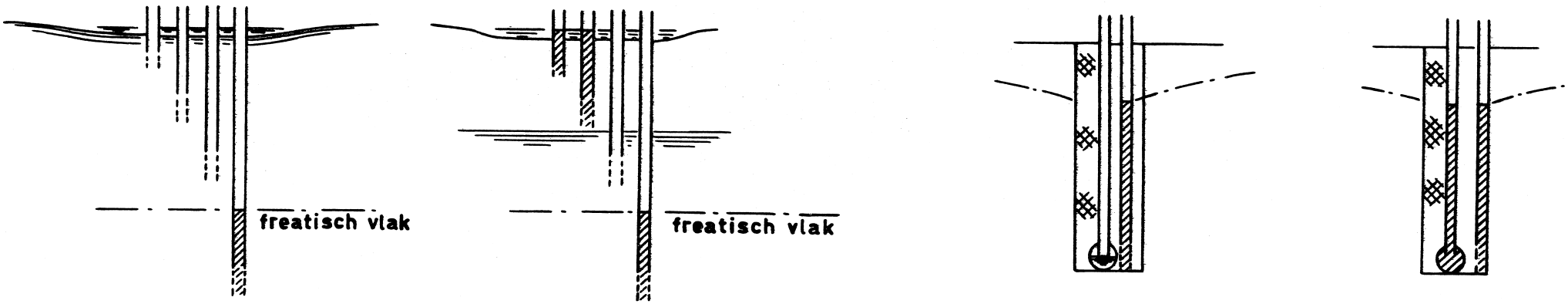


Fig. II - 1 Werking van de drainage



1. Ondoorlatend maaiveld

2. Schijnspiegel

3. Te hoge intreeweerstand nabij de drain

4. Verstopte drain of te hoog slootpeil

Fig. II - 2 Localisatie van storingen

III. De theorie van Hooghoudt over stationaire grondwaterstromingen naar kanalen en drains.

1. Basisvergelijkingen

a) Wet van Darcy:

$$Q = - k.i.F \qquad (1)$$

met i = grad $h = \nabla h$

Q:	debiet	m^3/etm.
k:	hydraulische doorlatendheid	m/etm.
i:	verhang	-
h:	stijghoogte	m
F:	oppervlak $\perp$ stroomrichting	m^2

b) Uit de wet van Darcy en de continuiteitsvergelijking volgt de vergelijking van Laplace:

$$\nabla^2 h = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \qquad \text{(driedimensionaal)} \qquad (2)$$

of:

$$\nabla^2 h = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \qquad \text{(tweedimensionaal)} \qquad (3)$$

c) De oplossing van de vergelijking van Laplace hangt af van de randvoorwaarden en is vaak moeilijk te vinden. Men gebruikt daarom vaak:
- benaderingen (o.a. veronderstelling van Dupuit)
- numerieke methoden
- modellen (o.a. electrische modellen)

d) Dupuit benaderde de werkelijk optredende grondwaterstroming door een horizontale stroming.
Bij vraagstukken waarbij de watervoerende laag dun is t.o.v. de uitgestrektheid van het stromingsveld is dit gewettigd.
In de omgeving van drains is de stroming eerder radiaal dan horizontaal en mag dus de benadering van Dupuit niet toegepast worden.

2. Stationaire stroming naar open kanalen.

2.1 Evenwijdige vrijwel droog staande kanalen reikend tot op ondoorlatende laag (fig. III-1).

a) Stroming is tweedimensionaal; wij gebruiken de benadering van Dupuit (hier een vrij ruwe benadering).

b) Voor het debiet per m^1 lengte van de kanalen geldt:

$$q_x = - s\ (\tfrac{1}{2}L - x) \qquad (4)$$

q_x	: tweedimensionaal debiet (eenzijdig naar kanaal)	m^2/etm.
s	: neerslag	m/etm.
L	: greppelafstand	m
x	: afstand tot linker greppel	m
y	: hoogte grondwater boven ondoorlatende laag	m

$q_x = 0$ als $x = L/2$ (midden tussen de greppels)

$q_x < 0$ als $x < L/2$ (stroming van rechts naar links)

$q_x > 0$ als $x > L/2$ (stroming van links naar rechts)

c) Voor een horizontale stroming (Dupuit) geldt volgens Darcy

$$q_x = - k.i.F = - k\ .\ \frac{dy}{dx}\ .\ y$$

zodat

$$s(\tfrac{1}{2}L - x) = k\ .\ y\ .\ \frac{dy}{dx}$$

$$- s\ .\ x\ .\ dx + \tfrac{1}{2}\ s\ .\ L\ .\ dx = k\ .\ y\ .\ dy$$

d) Integratie geeft:

$$- \tfrac{1}{2}\ s\ x^2 + \tfrac{1}{2}\ sLx = \tfrac{1}{2}\ ky^2 + C$$

met randvoorwaarde $x = 0$, $y = 0$, dus $C = 0$

$$ky^2 = sLx - sx^2 \qquad (5)$$

Het freatisch vlak heeft volgens deze theorie een <u>elliptische</u> vorm. Stel:

$\xi = x - L/2$ $\qquad\qquad$ $x = \xi + L/2$

$$ky^2 = sL\xi + \frac{sL^2}{2} - s\xi^2 - sL\xi - \frac{sL^2}{4}$$

$$s\xi^2 + ky^2 = \frac{sL^2}{4}$$

$$\frac{\xi^2}{(L/2)^2} + \frac{y^2}{sL^2/4k} = 1$$

Dit is een ellips met: halve grote as $L/2$

halve kleine as m_o

waarbij:

$$m_o^2 = \frac{sL^2}{4k} \quad \text{of} \quad s = \frac{4km_o^2}{L^2}$$

In werkelijkheid is deze vorm afwijkend van de ellips, omdat in dit geval de veronderstelling van Dupuit een vrij grove benadering levert.

e) Midden tussen de kanalen is $x = L/2$ en $y = m_o$

(m_o = opbolling)

$$k\, m_o^2 = \tfrac{1}{2}\, sL^2 - \tfrac{1}{4}\, sL^2 = \tfrac{1}{4}\, sL^2$$

$$\boxed{s = \frac{4\, km_o^2}{L^2}} \qquad (6)$$

f) In dit geval is s evenredig met m_o^2.

2.2 <u>Evenwijdige waterhoudende kanalen, reikend tot op ondoorlatende laag</u> (fig. III-2).

a) Stroming is tweedimensionaal; wij gebruiken weer de benadering van Dupuit (beter dan in vorig geval).

b) Er geldt weer voor het éénzijdige debiet naar een kanaal:

$$q_x = -\, s(\tfrac{1}{2}L - x) = -\, k \,.\, y \,.\, \frac{dy}{dx}$$

Na integratie volgt:

$$-\, \tfrac{1}{2}\, sx^2 + \tfrac{1}{2}\, sLx = \tfrac{1}{2}\, ky^2 + C$$

met randvoorwaarde $x = 0$, $y = D$, dus $C = -\, \tfrac{1}{2}\, kD^2$

zodat:

$$- sx^2 + sLx = k\ (y^2 - D^2) \qquad (7)$$

c) Midden tussen de kanalen is $x = L/2$, $y = D + m_o$
(m_o = de opbolling)

$$\tfrac{1}{4}\ sL^2 = k(2\ m_o D + m_o^2)$$

$$sL^2 = 8\ kDm_o + 4\ km_o^2$$

$$\boxed{s = \frac{8\ kDm_o + 4\ km_o^2}{L^2}} \qquad (8)$$

d) Voor $D = 0$ volgt hieruit de formule van het vorige stromingsgeval (freatisch vlak elliptisch).

e) Als k boven en beneden het niveau $y = D$ verschillend is, geldt:

$$\boxed{s = \frac{8\ k_{onder}\ D\ .\ m_o + 4\ k_{boven}\ .\ m_o^2}{L^2}} \qquad (9)$$

f) Is de tweede term te verwaarlozen t.o.v. de eerste (b.v. doordat $m_o << D$ of $k_{boven} << k_{onder}$) dan geldt:

$$s = \frac{8\ k_{onder}\ .\ D\ .\ m_o}{L^2} \qquad (10)$$

dus s evenredig met m_o

g) Uit:

$$- sx^2 + sLx = k(y^2 - D^2)$$
$$= k(y + D)\ (y - D)$$

volgt voor $m_o << D$: $y \simeq D$, dus $y + D \simeq 2D$

$$- sx^2 + sLx \simeq 2\ kD\ (y - D) \qquad (11)$$

Het freatisch vlak heeft dus een parabolische vorm als $m_o << D$

h) Zet men de afvoer s uit tegen m_o en geeft dit een rechte, dan verloopt de afvoer voornamelijk beneden het waterpeil in de kanalen.

i) Zet men de afvoer s uit tegen m_o^2 en geeft dit een rechte, dan verloopt de afvoer voornamelijk boven het waterpeil in de kanalen.

j) Is het verband tussen s en m_o of m_o^2 niet eenduidig, maar treden er lussen op, dan spelen niet-stationaire verschijnselen een belangrijke rol.

3. Stroming naar drains.

3.1 Evenwijdige drains, liggend op ondoorlatende laag (fig. III-3)

a) De drains liggen in een drainsleuf, die meestal zeer doorlatend is t.o.v. de omgevende ongestoorde grond.

b) Als er geen water boven de drains staat is de stroming dezelfde als in geval 2.1, dus:

$$s = \frac{4\, k_{boven}\, m_o^2}{L^2} \qquad (12)$$

waarin k_{boven} de doorlatendheid van de ongeroerde grond boven het vlak van de drains aanduidt.

3.2 Evenwijdige drains in grond, die tot zeer grote diepte doorlatend is.

a) De stroming boven het vlak van de drains kan (bij benadering) worden beschreven met de formule (12) van het vorige geval (3.1.)

b) De stroming beneden het vlak van de drains kan niet meer worden beschreven met formules, berustend op de veronderstelling van Dupuit: nabij de drains is de stroming radiaal en niet horizontaal.

c) Voor deze radiale stroming naar de onderzijde van de drain geldt:

$q' = - k \cdot i \cdot F$

Het minteken duidt alleen op de richting van stroming; als wij het weglaten betekent dit, dat wij <u>onttrekking</u> van water <u>positief</u> rekenen:

$$q = k \cdot i \cdot F \qquad (13)$$

d) Voor een halve cylinder met straal r geldt voor het debiet per m^1 drainlengte:

$$q = k \cdot \frac{dh}{dr} \cdot \pi r$$

$$dh = \frac{q}{\pi k} \cdot \frac{dr}{r}$$

$$h = \frac{q}{\pi k} \cdot \ln r + C \qquad (14)$$

e) In punt B op afstand $\frac{L}{2}$ uit de drain en in punt A op de omtrek van de drain geldt resp.:

$$h_B = \frac{q}{\pi k} \ln \frac{L}{2} + C$$

$$h_A = \frac{q}{\pi k} \ln r_o + C$$

$$h_B - h_A = \frac{q}{\pi k} \ln \frac{L}{2r_o} \qquad (15)$$

Bij beschouwing van <u>potentiaalverschillen</u> valt dus de integratieconstante C weg. Wij beschouwen voortaan alleen dergelijke verschillen.

f) Stel een aantal evenwijdige drains op onderlinge afstand L. Van grote diepte komt een kwelstroming, waarvan elke drain per m^1 lengte een debiet q afvoert (fig. III-4).

Als $r_o << L$ geldt:

Drain 0 geeft in B de stijghoogte $\frac{q}{\pi k} \ln \frac{L}{2}$ en in A: $\frac{q}{\pi k} \ln r_o$

" +1 " " B " " $\frac{q}{\pi k} \ln \frac{L}{2}$ " " A: $\frac{q}{\pi k} \ln L$

Drain -1 geeft in B de stijghoogte $\frac{q}{\pi k} \ln \frac{3L}{2}$ en in A: $\frac{q}{\pi k} \ln L$

" +2 " " B " " $\frac{q}{\pi k} \ln \frac{3L}{2}$ " " A: $\frac{q}{\pi k} \ln 2L$

" -2 " " B " " $\frac{q}{\pi k} \ln \frac{5L}{2}$ " " A: $\frac{q}{\pi k} \ln 2L$

enz.

Het verschil in stijghoogte tussen B en A wordt:

$$h_B - h_A = \frac{q}{\pi k} \left[\ln \frac{L}{2} - \ln r_o + \ln \frac{L}{2} - \ln L + \ln \frac{3L}{2} - \ln L + \ln \frac{3L}{2} - \ln 2L + \ln \frac{5L}{2} - \ln 2L + \ldots \right]$$

$$h_B - h_A = \frac{q}{\pi k} \left[\ln \frac{L}{2r_o} + \ln \frac{1}{2} + \ln \frac{3}{2} + \ln \frac{3}{4} + \ln \frac{5}{4} + \ldots\ldots \right]$$

$$= \frac{q}{\pi k} \left[\ln \frac{L}{2r_o} + \ln \frac{1 \,.\, 3 \,.\, 3 \,.\, 5 \ldots\ldots}{2 \,.\, 2 \,.\, 4 \,.\, 4 \ldots\ldots} \right]$$

g) Uit de wiskunde is bekend het produkt van Wallis:

$$\frac{2.2.4.4.6.6.8.8\ldots}{1.3.3.5.5.7.7.9\ldots} = \frac{4}{3} \times \frac{16}{15} \times \frac{36}{35} \times \frac{64}{63} \times \ldots\ldots\ldots = \frac{\pi}{2}$$

Dus:

$$h_B - h_A = \frac{q}{\pi k} \left[\ln \frac{L}{2r_o} + \ln \frac{2}{\pi} \right] = \frac{q}{\pi k} \ln \frac{L}{\pi r_o} \qquad (16)$$

Dezelfde uitkomst kan worden verkregen met behulp van complexe functies (zie onder m).

h) Hooghoudt toonde aan, dat hetzelfde verschil in stijghoogte tussen B en A geldt voor een gelijkmatig verdeelde invoer van boven i.p.v. de kwelstroming van beneden.

Wij denken aan 8 "aanvoerdrains" geplaatst tussen elke twee afvoerdrains (fig. III-5). Elke drain voert aan een debiet q/8. Het debiet van de afvoerdrains blijft q. Omdat de debieten van de eigenlijke drains niet veranderen blijft het verschil $h_B - h_A$, voor zover dit veroorzaakt wordt door de eigenlijke drains, hetzelfde. Daar komt in dit geval echter bij de invloed, die de denkbeeldige aanvoerdrains gezamenlijk uitoefenen op dit verschil. Deze laatste invloed blijkt nul te zijn; dit is als volgt aan te tonen:

Drain 1 geeft in A dezelfde verhoging als 4 in B, nl. $\frac{q}{8\pi k} \ln \frac{L}{16}$

" -1 " " A " " " 5 " B, " "

" 2 " " A " " " 3 " B, " $\frac{q}{8\pi k} \ln \frac{3L}{16}$

" -2 " " A " " " 6 " B, " "

" 3 " " A " " " 2 " B, " $\frac{q}{8\pi k} \ln \frac{5L}{16}$

" -3 " " A " " " 7 " B, " "

etc.

In het verschil $h_B - h_A$ compenseren deze verhogingen elkaar telkens twee aan twee, zodat $h_B - h_A$ niet wordt beïnvloed. Dit blijft geldig als wij het net van aanvoerdrains verdichten, totdat een continue aanvoer is verkregen.

i) Voor de ontwateringsstroming beneden het vlak van de drains geldt dus eveneens:

$$h_B - h_A = m_o = \frac{q}{\pi k} \ln \frac{L}{\pi r_o} \qquad (18)$$

Per m^1 drainlengte is $q = s \cdot L$ of

$$s = \frac{\pi k m_o}{L} \cdot \frac{1}{\ln \frac{L}{\pi r_o}}$$

of

$$s = \frac{8\ k d m_o}{L^2} \quad \text{met} \quad d = \frac{\pi L}{8 \ln \frac{L}{\pi r_o}} \qquad (19)$$

j) Voor kanalen, reikend tot een ondoorlatende laag, geldt voor de stroming beneden het peil in de kanalen formule (10):

$$s = \frac{8\ k D m_o}{L^2} \qquad (10)$$

De stroming beneden het vlak van de drains is dus equivalent met een stroming naar kanalen, mits D = d wordt gesteld

- D (kanalen) is een reële dikte van een doorstroomde laag
- d (drains) is een rekengrootheid, door Hooghoudt genoemd: dikte van de <u>equivalentlaag</u>.

k) Voorbeeld:

Stel $L = 100$ m, $r_o = 0.04$ m, $D = \infty$

D: dikte van het watervoerend pakket beneden de drains m

Dan is

$$d = \frac{\pi}{8} \times 100 \times \frac{1}{\ln \frac{100}{0.04\pi}} = 5.88 \text{ m}$$

l) Voor de totale toestroming naar de drains kunnen wij stellen, dat deze bestaat uit:

- een stroming beneden het vlak van de drains: vergelijking (19)
- " " boven " " " " " : " (12)

De totale afvoer is (bij benadering) de som van beide:

$$\boxed{s = \frac{8\, k_{onder} \cdot d \cdot m_o + 4\, k_{boven} \cdot m_o^2}{L^2}} \qquad (20)$$

de formule van Hooghoudt

s	: stationaire afvoer van neerslag	m/etm.
k_{onder}	: doorlatendheid beneden het vlak van de drains	m/etm.
k_{boven}	: " boven " " " " "	m/etm.
d	: dikke equivalentlaag	m
m_o	: opbolling (geen water boven de drain)	m
L	: drainafstand	m

Hieruit is omgekeerd L te berekenen als de andere grootheden bekend zijn.

m) Bij de afleiding van (16) is gebruik gemaakt van het product van Wallis.

Een andere afleiding berust op het gebruik van complexe functies (dict. Prof. van Rootselaar).

Als voorbeeld van deze rekenwijze diene het volgende:

Het stromingsvlak uit fig. III-4 is nogmaals afgebeeld in fig. III-10, nu echter "andersom" getekend. In fig. III-10 is deze

stroming afgebeeld in het complexe z-vlak, waarbij $z = x + iy$; de oorsprong van de coördinaten ligt daarbij in het middelpunt van de drain (punt 0). Verder rekenen wij weer een <u>onttrekking</u> q positief.
De berekening van de stroming in het z-vlak is moeilijk, omdat er bij de punten B en F twee rechte hoeken aanwezig zijn. Men kan deze storende hoeken verwijderen door toepassing van de z.g. transformatie van Schwarz-Christoffel.

n) Door de transformatie van Schwarz-Christoffel wordt het z-vlak afgebeeld op het w-vlak, waarbij $w = u + iv$. Doordat de hoeken bij B en F verdwenen zijn, is in het w-vlak een "halve radiale stroming" ontstaan, die gemakkelijk te berekenen is. Deze z.g. conforme afbeelding van het z-vlak op het w-vlak laat alle hoeken ongewijzigd (behalve in de punten B en F); zodoende blijven de stroomlijnen ook na transformatie loodrecht staan op de (eveneens getransformeerde) equipotentiaallijnen.
Verder blijft een klein figuurtje bij transformatie dezelfde vorm (maar niet dezelfde afmetingen) behouden. "Die Abbildung ist in den kleinsten Teilen ähnlich und winkeltreu". De drain in het z-vlak wordt voorgesteld door een kleine halve cirkel; wij vinden dus deze drain in het w-vlak ook weer terug als een kleine halve cirkel (althans bij benadering), echter met een andere straal. Liever redeneren wij andersom: wij stellen, dat in het w-vlak de drain exact een halfcirkelvormige vorm heeft en in het z-vlak een (iets vervormde) halve cirkel is.

o) Wij kiezen de transformatie zo, dat in het w-vlak punt F bij -1 komt te vallen, punt B bij $+1$.
Het blijkt dat de transformatie $w = \sin \frac{\pi z}{L}$ aan alle voorwaarden voldoet (daarbij is $BF = L$ de drainafstand in het z-vlak). Wij gaan dit nu punt voor punt na.

Punt	z-vlak	w-vlak
O	0	$w = \sin 0 = 0$
A	r_o	$w = \sin \frac{\pi r_o}{L}$ (de nieuwe "drainstraal")
B	$+L/2$	$w = \sin \frac{\pi}{2} = +1$
G	$-r_o$	$w = \sin (-\frac{\pi r_o}{L}) = -\sin \frac{\pi r_o}{L}$
F	$-L/2$	$w = \sin (-\frac{\pi}{2}) = -1$

p) Voor punt C geldt: $z = L/2 + im$

" " D " : $z = \quad + im$

Voor de berekening maken wij gebruik van de formules:

$\sin(\alpha + \beta) = \sin\alpha \cos\beta + \cos\alpha \sin\beta$

$\sin i\varphi = i \sinh \varphi$

$\cos i\varphi = \cosh \varphi$

Voor punt C wordt dus:

$$w = \sin \frac{\pi(L/2 + im)}{L} = \sin(\frac{\pi}{2} + i\frac{\pi m}{L}) = \overbrace{\sin\frac{\pi}{2}}^{\text{één}} \cos i\frac{\pi m}{L} + \overbrace{\cos\frac{\pi}{2}}^{\text{nul}} \sin i\frac{\pi m}{L}$$

$$= \cos i\frac{\pi m}{L} = \cosh\frac{\pi m}{L}$$

Voor punt D geldt

$w = \sin i\frac{\pi m}{L} = i \sinh\frac{\pi m}{L}$; dit punt ligt dus op de imaginaire v-as van het w-vlak.

q) In het w-vlak heerst een halve radiale stroming, waarvoor geldt:

$$\Delta h = \frac{q}{\pi k} \ln R/r = \frac{q}{\pi k} \left[\ln R - \ln r \right]$$

Voor de stroming van punt C naar de drain (punt A) geldt:

R = afstand OC = $\cosh\frac{\pi m}{L}$

r = afstand OA = $\sin \frac{\pi r_o}{L}$

zodat

$$h_C - h_A = \frac{q}{\pi k} \left[\ln\cosh\frac{\pi m}{L} - \ln\sin\frac{\pi r_o}{L} \right] \qquad (21)$$

Voor de stroming van punt B naar de drain geldt:

R = afstand OB = + 1 ; ln R = ln 1 = nul

$$r = \text{afstand OA} = \sin \frac{\pi r_o}{L}$$

$$h_B - h_A = \frac{q}{\pi k} \left[- \ln \sin \frac{\pi r_o}{L} \right]$$

Als $r_o << L$ is $\sin \frac{\pi r_o}{L} \simeq \frac{\pi r_o}{L}$, zodat:

$$h_B - h_A \simeq \frac{q}{\pi k} \left[- \ln \frac{\pi r_o}{L} \right] = \frac{q}{\pi k} \ln \frac{L}{\pi r_o} \qquad (16^a)$$

een resultaat dat eerder, als (16) is afgeleid via het produkt van Wallis.

Uit eenzelfde beschouwing volgt voor de stijghoogte in punt D:

$$h_D - h_A = \frac{q}{\pi k} \left[\ln \sinh \frac{\pi m}{L} - \ln \sin \frac{\pi r_o}{L} \right] \qquad (22)$$

3.3 Evenwijdige drains in grond, die tot op een beperkte diepte doorlatend is.

a) Stel: ondoorlatende laag PQ aanwezig op diepte D beneden het vlak van de drains (fig. III-6).

b) Het stromingsvraagstuk kan worden opgelost met de spiegelmethode: een tweede rij drains A_1' en A_2' ... gespiegeld gelegen t.o.v. PQ heeft dezelfde uitwerking als een ondoorlatende begrenzing PQ. Een waterdeeltje op PQ blijft nu aarzelen tussen stroming naar A_1 of stroming naar A_1' en volgt dus PQ; PQ wordt nu dus een stroomlijn, of liever een aaneenschakeling van afwisselen naar links en naar rechts gerichte stroomlijnen ter lengte van L/2.

c) De gespiegelde rij drains A_1', A_2' ... oefent wel een eenzijdige invloed uit langs A_1BA_2: de drains A_1' A_2' ... trekken hier eenzijdige waterdeeltjes naar beneden. Om deze invloed te compenseren moet een tweede rij drains A_1'' A_2'' ... worden aangebracht op af-

stand 2D boven A_1A_2 ...

d) Deze nieuwe rij oefent weer een eenzijdige invloed uit langs PQ, te compenseren door een rij A_1''', A_2''' ..... op afstand 4D beneden A_1BA_2. Deze rij ..... etc.

e) De invloed van de rij A_1A_2 .... in punt B volgt uit (18):

$$h_B - h_A = \frac{q}{\pi k} \ln \frac{L}{\pi r_o} \text{ voor reeks } A_1A_2 \ldots\ldots$$

De invloed van de rij A_1', A_2' ..... in punt B volgt uit (21)*):

$$h_B - h_{A'} = \frac{q}{\pi k} \left[\ln \cosh \frac{\pi m}{L} - \ln \sin \frac{\pi r_o}{L} \right]$$

f) De invloed van de rij $A_1'A_2'$ ..... in punt A volgt uit (22)**):

$$h_A - h_A' = \frac{q}{\pi k} \left[\ln \sinh \frac{\pi m}{L} - \ln \sin \frac{\pi r_o}{L} \right]$$

zodat de bijdrage van de rij $A_1'A_2'$ .... tot het verschil $h_B - h_A$ wordt:

$$h_B - h_A = (h_B - h_A') - (h_A - h_{A'}') = \frac{q}{\pi k} \left[\ln \cosh \frac{\pi m}{L} - \ln \sinh \frac{\pi m}{L} \right]$$

$$= \frac{q}{\pi k} \ln \coth \frac{\pi m}{L}$$

Voor de rij A_1', A_2' ... is m = 2D, dus de bijdrage tot $h_B - h_A$:

$$h_B - h_A = \frac{q}{\pi k} \ln \coth \frac{2\pi D}{L} \text{ voor reeks } A_1'A_2' \ldots\ldots$$

Voor de rij A_1'' A_2''.... is m = 2D, dus de bijdrage tot $h_B - h_A$ even groot. Voor beide rijen tesamen is dus:

$$h_B - h_A = \frac{2q}{\pi k} \ln \coth \frac{2\pi D}{L} \text{ voor reeksen } A_1'A_2' \ldots\ldots \text{ \underline{en} } A_1''A_2'' \ldots\ldots$$

g) Voor de reeksen $A_1'''A_2'''$ .... <u>en</u> $A_1^{IV} A_2^{IV}$ ..... is m = 4D, dus de bijdrage van beide tesamen:

$$h_B - h_A = \frac{2q}{L} \ln \coth \frac{4\pi D}{L} \text{ voor reeksen } A_1'''A_2''' \text{ \underline{en} } A_1^{IV} A_2^{IV} \ldots\ldots$$

---

*) Hierbij nemen de punten B en A' de plaats in van de punten C en A uit (21)

**) Hierbij nemen de punten A en A' de plaats in van de punten D en A uit (22)

h) In totaal wordt dus:

$$h_B - h_A = \frac{q}{\pi k} \left[\ln \frac{L}{\pi r_o} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \ln \coth \frac{2\pi nD}{L} \right] \qquad (23)$$

i) Schrijven wij wederom $q = sL$ en $h_B - h_A = m_o$

dan volgt voor de stroming beneden het vlak van de drains:

$$s = \frac{\pi k m_o}{L \left[\ln \frac{L}{\pi r_o} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \ln \coth \frac{2\pi nD}{L} \right]}$$

of

$$s = \frac{8kdm_o}{L^2}$$

met

$$d = \frac{\pi L/8}{\ln \frac{L}{\pi r_o} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \ln \coth \frac{2\pi nD}{L}} \qquad (24)$$

j) Hooghoudt berekende de waarde van d op een iets andere wijze. De stroming werd gesplitst in een nagenoeg horizontaal gedeelte (fig. III-7) en een radiaal gedeelte bij de drain. Voor het radiale gedeelte kan met één spiegeling ($A_1'A_2'$ ....) worden volstaan. De grens tussen beide stromingen ligt ongeveer bij
$x = D/\sqrt{2} = 0{,}707\ D$
Van deze uitkomsten bestaan uitvoerige tabellen; een voorbeeld voor sloten ($r_o = 0{,}40$ m) is gegeven in tabel III-1. Er bestaan dergelijke tabellen voor 31 waarden van r_o, variërend van 0,03 m tot 5,00 m. De waarden zijn vrijwel dezelfde als de uitkomsten van (24).

k) De Zeeuw vatte deze tabellen samen tot het verband tussen de dimensieloze grootheden:

$\delta = d/r_o$

$\Delta = D/r_o$

$\lambda = L/r_o$

Daardoor kan met één tabel worden volstaan (tab. III-2).

Tabel III-1. Dikte d van de equivalentlaag volgens Hooghoudt (1941). r_o = 0.40 m.

L in meters	5	10	20	30	40	50	75	100	150	200	250	300
D in m												
0,5	Voor alle afstanden 0,50 ←											
1	Voor alle afstanden 1,-- ←											
2	(1)	1,74	1,88	1,92	1,94	1,95	1,97	1,98	2,00	blijft verder 2,00		
3		(2)	2,38	2,57	2,67	2,73	2,82	2,86	2,91	2,93	2,94	2,95
4			2,66	3,01	3,22	3,35	3,55	3,66	3,77	3,82	3,86	3,87
5			2,82	3,31	3,63	3,84	4,18	4,36	4,57	4,66	4,73	4,77
6				3,50	3,93	4,23	4,70	4,98	5,30	5,45	5,55	5,62
7				3,63	4,14	4,53	5,15	5,52	5,95	6,18	6,33	6,44
8				(3)	4,31	4,76	5,52	6,00	6,56	6,87	7,07	7,21
9					4,42	4,93	5,83	6,41	7,11	7,51	7,75	7,95
10					4,51	5,08	6,10	6,77	7,61	8,10	8,42	8,65
12,5						5,30	6,57	7,48	8,66	9,39	9,90	10,3
15							6,89	8,02	9,41	10,5	11,2	11,7
17,5							7,07	8,35	10,2	11,4	12,2	12,9
20							(4)	8,61	10,7	12,1	13,2	13,9
25								8,92	11,4	13,2	14,6	15,7
30									11,9	14,-	15,7	17,1
35									12,1	14,6	16,5	18,1
40										15,-	17,1	19,0
45										15,2	17,5	19,6
50										15,4	17,9	20,1
60											18,3	20,8
∞	1,42	1,89	2,84	3,72	4,54	5,33	7,21	8,97	12,3	15,5	18,6	21,5

(1) Voor D = 1,25 m is d = 1,25

(2) Voor D = 2,50 m is d = 1,87

(3) Voor D = 7,5 m is d = 3,69

(4) Voor D = 18,75 m is d = 7,17

De waarden van d voor L = 5 m zijn slechts bij benadering geldig.

Tabel III-2 Verband tussen de dimensieloze grootheden δ, Δ en λ

$\delta = f(\Delta,\lambda)$

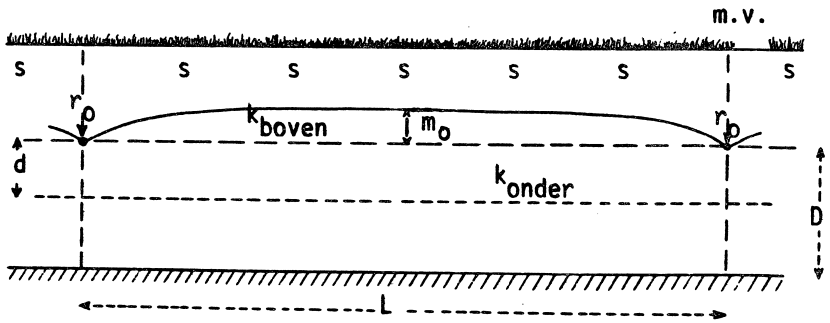
Δ \ λ	10	20	30	40	50	60	80	100	150	200	250	300	400	500	600	800	1000	1500	2000	2500	3000	4000	5000	6000	8000	10000
3	3.00 →	verder geldt: δ = Δ																								
4	3.40	3.86	3.92	3.96	3.98	3.99	4.00 →																			
5		4.20	4.46	4.60	4.69	*4.75*	*4.82*	4.85	4.90	4.92	4.94	4.95	4.96	4.97	4.98	5.00 →										
6		4.25	4.83	5.10	5.27	5.40	5.54	5.63	5.76	5.82	5.86	5.88	5.91	5.93	5.94	*5.96*	*5.97*	*5.99*	*6.00* →							
7			5.05	5.47	5.74	*5.93*	*6.18*	6.34	6.55	6.66	6.73	6.77	*6.82*	*6.86*	*6.89*	*6.92*	*6.94*	*6.97*	*6.98*	*6.99*	*7.00* →					
8			5.21	5.77	6.13	6.38	6.74	6.98	7.30	7.48	7.57	7.64	7.72	7.78	7.82	7.86	7.89	*7.92*	*7.95*	*7.97*	*7.98*	*8.00* →				
9			5.22	5.96	6.41	*6.74*	*7.20*	7.54	7.97	8.23	8.37	8.47	*8.60*	*8.68*	*8.73*	*8.78*	*8.83*	*8.88*	*8.92*	*8.94*	*8.96*	*8.98*	*9.00* →			
10				6.12	6.66	7.06	7.64	8.04	8.63	8.94	9.14	9.27	9.44	9.56	9.63	*9.72*	9.77	9.83	*9.87*	*9.90*	*9.92*	*9.96*	*9.98*	10.0 →		
15	blijven			6.18	7.10	7.92	*9.10*	9.87	11.1	11.9	12.5	12.8	13.3	13.7	13.9	14.1	14.3	14.5	*14.6*	*14.7*	*14.7*	*14.8*	*14.9*	*14.9*	*15.0* →	
20	verder					8.00	9.64	10.8	12.8	14.1	15.0	15.7	16.6	17.2	17.6	18.2	18.5	19.0	19.2	19.4	19.5	*19.6*	*19.7*	*19.8*	*19.9*	20.0
25	practisch						9.72	11.3	13.9	15.6	16.9	17.9	19.3	20.2	21.0	21.8	22.4	23.1	*23.6*	*23.8*	*24.0*	*24.2*	*24.4*	*24.6*	*24.8*	*24.9*
30	gelijk							11.4	14.6	16.7	18.4	19.7	21.6	22.8	23.8	25.1	26.0	27.2	27.9	28.3	28.5	*28.9*	*29.1*	*29.3*	*29.6*	*29.8*
35									14.9	17.5	19.5	21.1	23.4	25.2	26.4	28.2	29.3	31.0	*31.9*	*32.5*	*32.8*	*33.4*	*33.7*	*34.0*	*34.3*	*34.5*
40									15.1	18.1	20.3	22.2	25.0	27.2	28.8	30.9	32.4	34.6	35.8	36.6	37.1	37.8	38.2	38.5	*38.9*	*39.1*
50									15.3	18.8	21.4	23.9	27.4	30.2	32.4	35.6	37.8	41.2	43.1	44.3	45.2	*46.4*	47.0	*47.5*	*48.0*	*48.2*
60										18.9	22.1	24.9	29.2	32.6	35.4	39.4	42.3	47.0	49.7	51.5	52.7	54.4	55.4	56.1	*56.9*	*57.2*
70											22.3	25.5	30.4	34.4	37.6	42.4	46.2	52.2	55.7	58.1	59.8	*62.0*	*63.6*	*64.6*	*65.7*	*66.2*
80											22.4	25.8	31.2	35.6	39.4	45.2	49.6	56.8	61.3	64.3	66.5	69.4	71.4	72.6	*74.2*	*75.0*
90												25.9	31.8	36.6	40.8	*47.5*	52.3	60.9	66.3	70.0	72.7	*76.3*	*78.9*	*80.5*	*82.6*	*83.8*
100													32.2	37.2	41.8	49.2	54.8	64.5	70.9	75.3	78.5	83.0	86.0	88.0	*90.8*	92.3
150													32.4	38.7	44.6	*55.0*	62.5	77.5	88.4	96.4	103	*112*	118	*122*	*128*	*132*
200														38.8	44.8	56.4	66.5	85.5	99.7	111	120	133	143	150	*160*	167
250																56.7	67.9	90.0	107	121	133	150	164	174	*188*	*198*
300																56.8	68.1	92.7	113	129	142	164	180	193	*212*	226
350																	68.2	94.4	116	134	150	175	194	210	*235*	*253*
400																		95.2	118	138	155	183	206	224	*253*	*275*
500																		95.5	121	143	163	196	224	246	*282*	309
600																			122	146	167	204	236	262	*305*	*340*
700																				147	170	210	245	274	*323*	*364*
800																					172	214	251	284	*338*	*384*
900																						217	256	291	*349*	*400*
1000																						218	260	296	*358*	413
1500																						220	267	308	*384*	457
2000																								312	*396*	477
2500																									*400*	484

5.93 berekend
5.93 geïnterpoleerd

d (Hooghoudt) = $\delta . r_o$

$$s = \frac{8k_{onder}\delta\mu_o + 4k_{boven}\mu_o^2}{\lambda^2}$$

$$\Delta = \frac{D}{r_o}, \quad \lambda = \frac{L}{r_o}, \quad \delta = \frac{d}{r_o}, \quad \mu_o = \frac{m_o}{r_o}$$



4. Berekening van drainafstanden.

a) Uit (20) volgt:

$$L^2 = \frac{8k_{onder} \cdot d \cdot m_o + 4k_{boven} \cdot m_o^2}{s} \qquad (20a)$$

waarin $d = F(L, r_o, D)$.

Voor r_o wordt genomen de buitenwerkse straal van de drains. Is de drainsleuf zeer doorlatend of heeft men greppels of sloten als ontwateringsmiddel, dan wordt r_o berekend uit

$$r_o = \frac{\text{natte omtrek}}{\pi}$$

(d.i. de straal van de halve cirkel met dezelfde natte omtrek als het ontwateringsmiddel).

b) Voor d bestaan tabellen. De moeilijkheid is dat d afhangt van L. Men moet dus:

- d schatten
- L berekenen met geschatte waarde van d (20a)
- d corrigeren met gevonden waarde van L (tabel)
- L opnieuw berekenen

  etc.

c) Voorbeeld:

Stel s = 10 mm/etm. = 0.01 m/etm.

k = 1 m/etm.

D = 5 m

m_o = 0,5 m

r_o = 0.04 m

Uit de eerste schatting d = 4 m volgt:

$$L^2 = \frac{8 \times 1 \times 4 \times 0{,}5 + 4 \times 1 \times 0{,}5 \times 0{,}5}{0.01} = 1700$$

of $L \simeq 41$ m

De tabel voor d geeft voor $r_o = 0.04$, D = 5, L = 40:

d = 2.37

De schatting d = 4 was dus te hoog.

Een tweede schatting d = 2 m geeft

$$L^2 = \frac{8 \times 1 \times 2 \times 0{,}5 + 4 \times 1 \times 0{,}5 \times 0{,}5}{0.01} = 900$$

$L = 30$ m

De tabel voor d geeft voor $r = 0.04$, $D = 5$, $L = 30$:

$d = 2.01$

zodat $L = 30$ m de gevraagde drainafstand is.

d) In de praktijk werkt men meestal met nomogrammen (fig. III-8, 9)

In ons voorbeeld is $D/m_o = 10$

natte omtrek $u = \pi r_o \simeq 0.125$; $m_o/u = 4$

$K_2/s = 100$

Hieruit volgt: $L'/m_o = 53$; $L' = 26{,}5$ m

$K_1/s = 100$

Hieruit volgt: $a = 1.07$

en:

$L = 1.07 \times 26.5 = 28.4$ m.

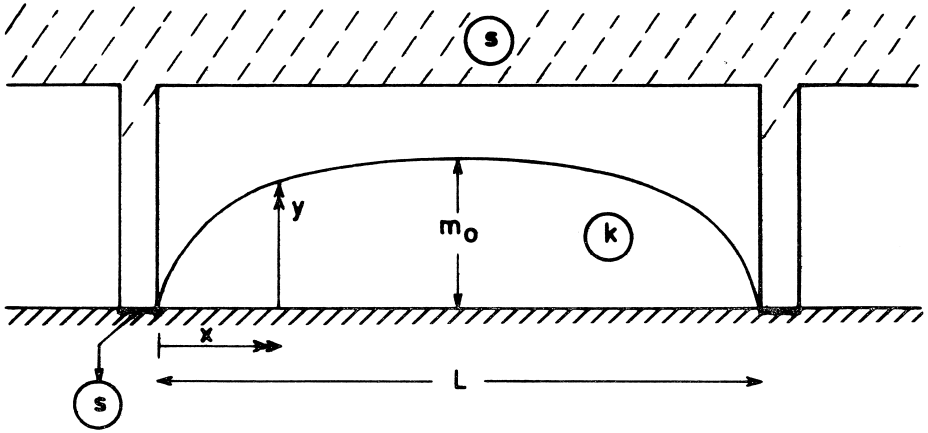


Fig. III – 1 Kanalen tot op ondoorlatende laag, vrijwel zonder water. $s = \frac{4\,k\,m_o^2}{L^2}$ (6)

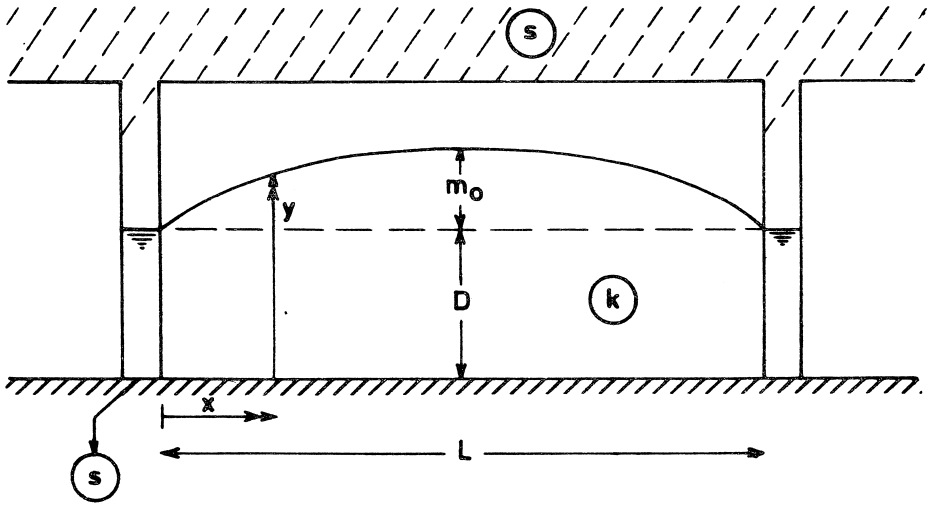


Fig. III – 2 Kanalen tot op ondoorlatende laag, waterhoudend.

$$s = \frac{8\,k\,D\,m_o + 4\,k\,m_o^2}{L^2} \quad (8)$$

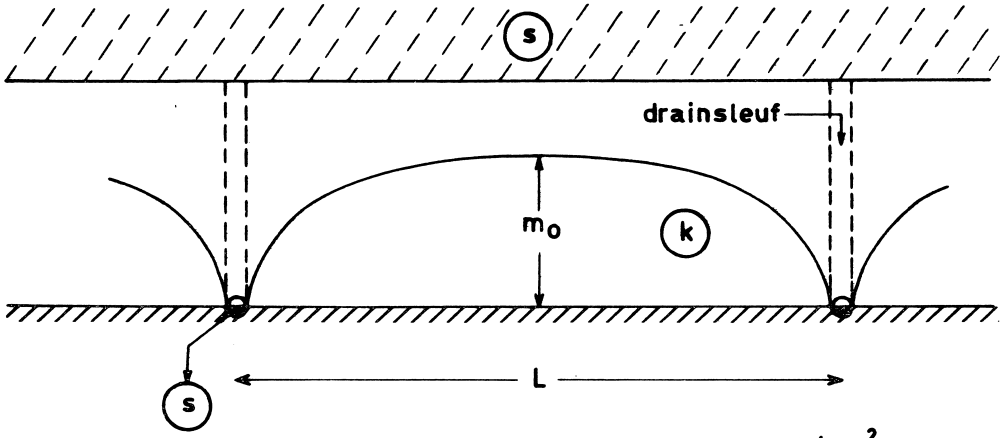


Fig. III – 3 Drains op ondoorlatende laag. $s = \frac{4\,k\,m_o^2}{L^2}$ (12)

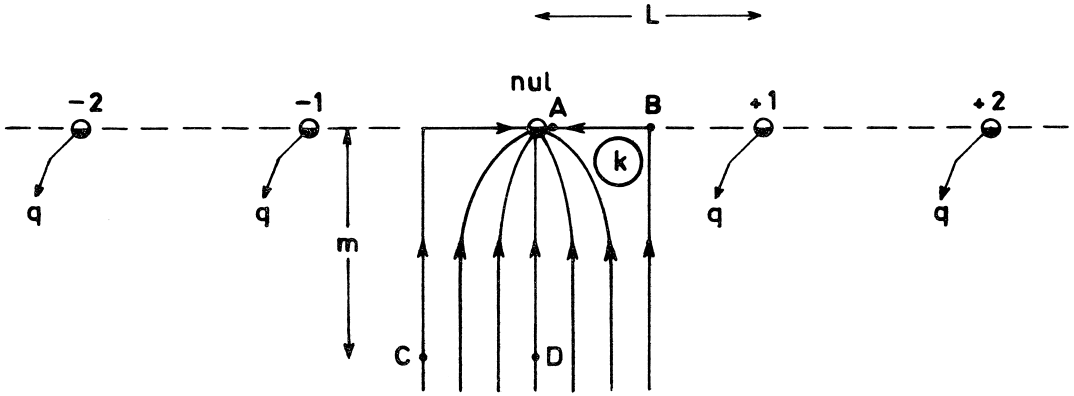


Fig. III – 4 Kwelstroming naar drains

$$h_B - h_A = \frac{q}{\pi k} \ln \frac{L}{\pi r_o} \quad (16)$$

$$h_C - h_A = \frac{q}{\pi k} \left\{ \ln \cosh \frac{\pi m}{L} - \ln \sin \frac{\pi r_o}{L} \right\} \quad (21)$$

$$h_D - h_A = \frac{q}{\pi k} \left\{ \ln \sinh \frac{\pi m}{L} - \ln \sin \frac{\pi r_o}{L} \right\} \quad (22)$$

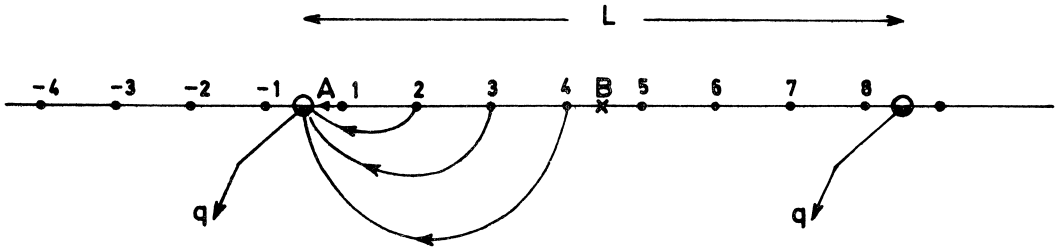


Fig. III – 5 Aanvoerdrains tussen de afvoerdrains

$$h_B - h_A = \frac{q}{\pi k} \ln \frac{L}{\pi r_o} \qquad (18)$$

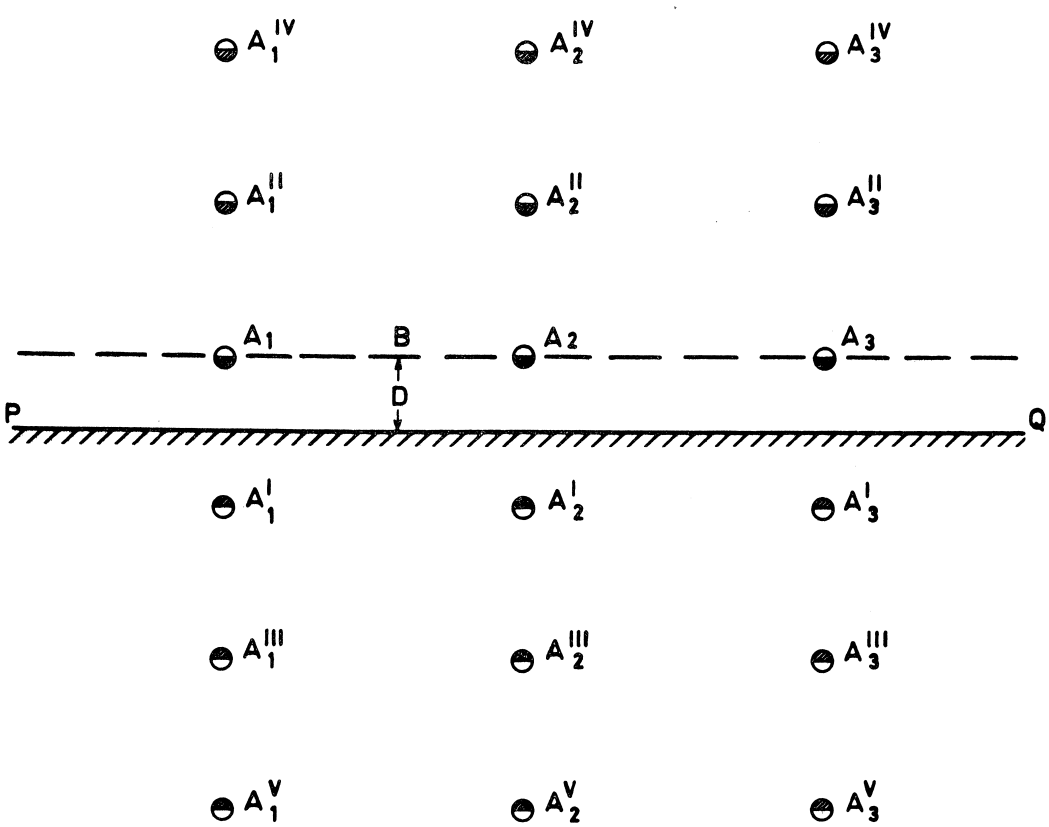


Fig. III – 6 Drains boven ondoorlatende laag (met spiegelbeelden)

$$h_B - h_A = \frac{q}{\pi k} \left\{ \ln \frac{L}{\pi r_o} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \ln \coth \frac{2\pi n D}{L} \right\} \qquad (23)$$

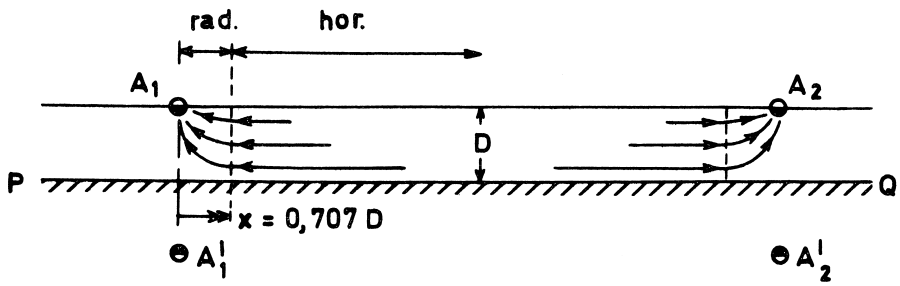


Fig. III – 7 Benadering van Hooghoudt

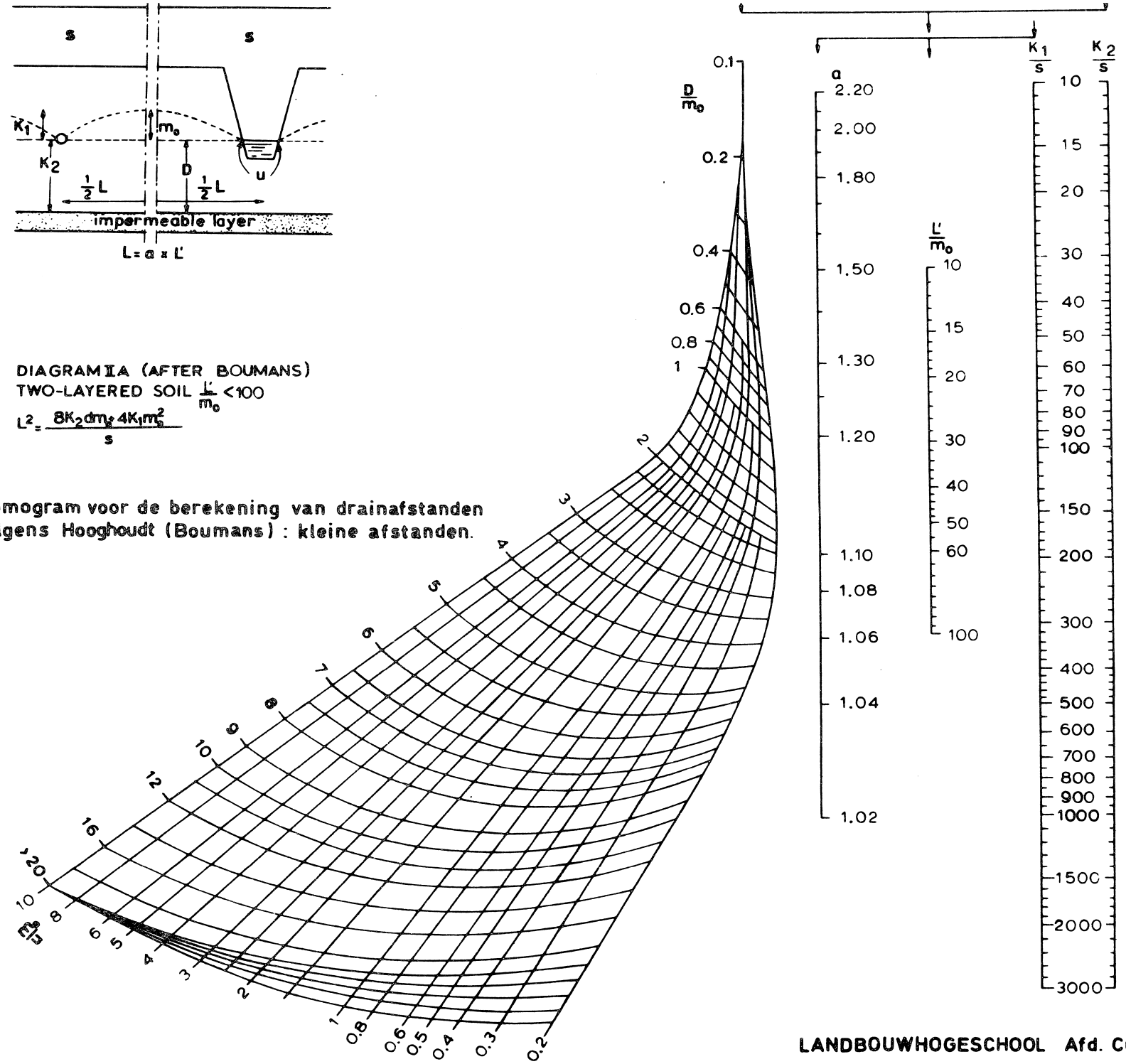


Fig. III – 8 Nomogram voor de berekening van drainafstanden volgens Hooghoudt (Boumans) : kleine afstanden.

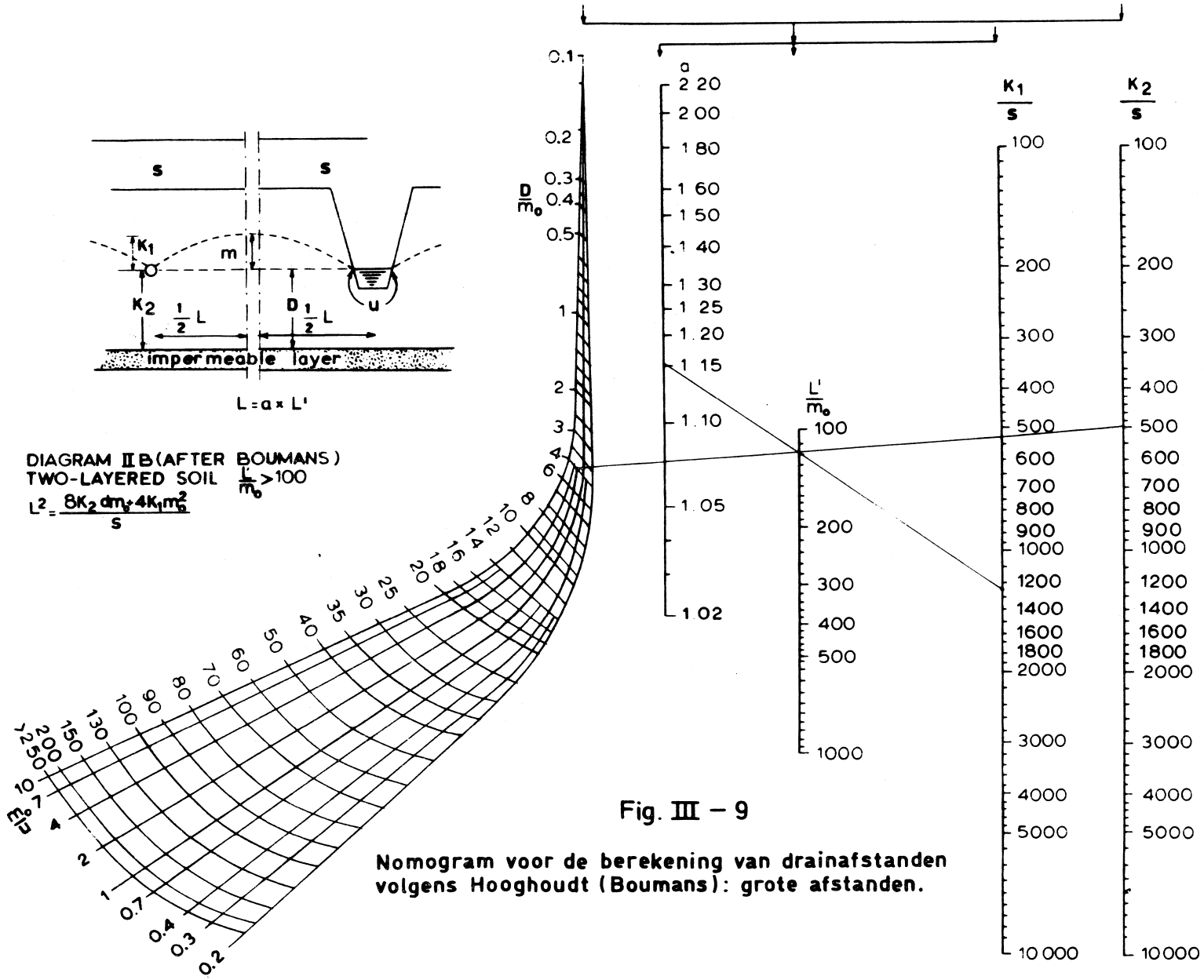


Fig. III – 9

Nomogram voor de berekening van drainafstanden volgens Hooghoudt (Boumans): grote afstanden.

65 a 98 3/3.5

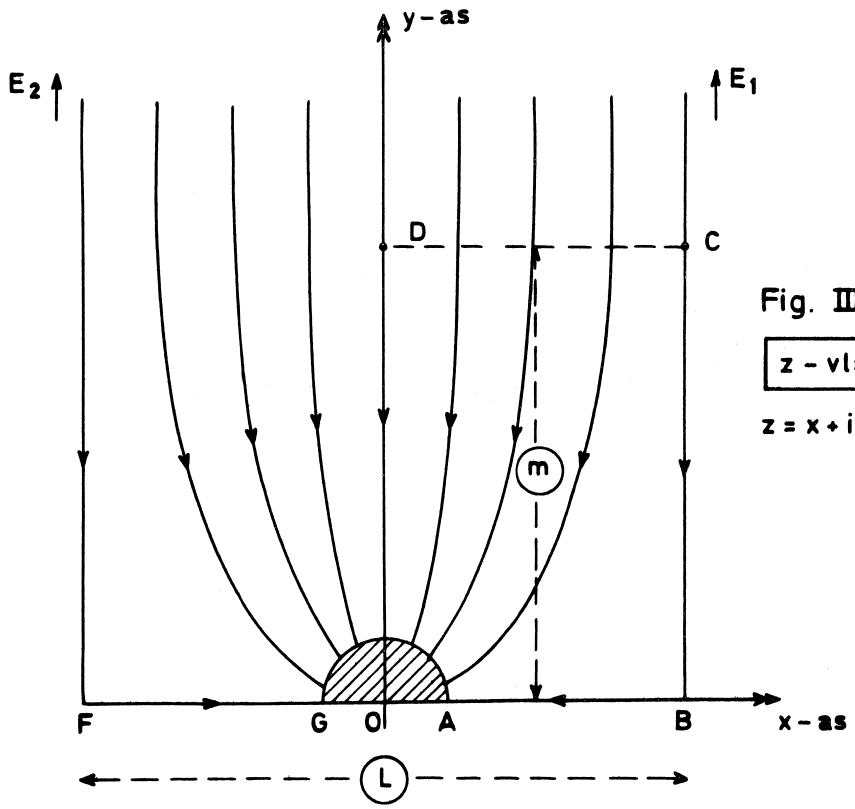


Fig. III - 10

z - vlak

$z = x + iy$

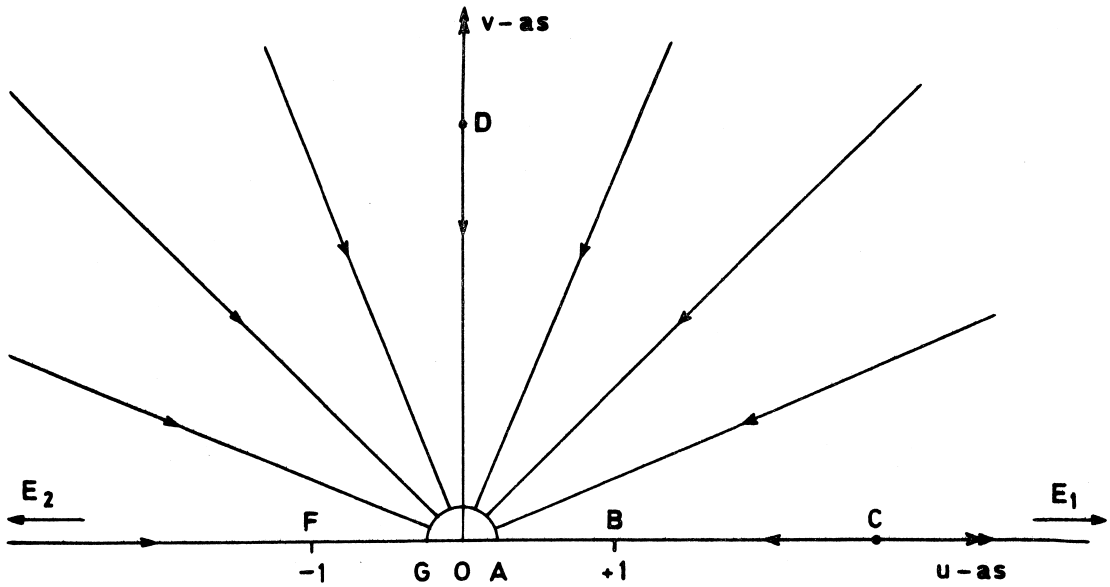


Fig. III - 11 w-vlak

$w = u + iv$

IV. Andere methoden ter bepaling van de drainafstand.

1. De drainagetheorie van Ernst.

a) De methode Hooghoudt geeft in de praktijk voldoende nauwkeurige uitkomsten voor:
- een homogene grond, rustend op een ondoorlatende basis
- twee lagen met verschillende doorlatendheid, waarvan de scheiding ongeveer op draindiepte ligt.

Voor sommige situaties (meer dan twee lagen met sterk uiteenlopende doorlatendheid of een scheiding van dergelijke lagen, die niet ongeveer met de draindiepte samenvalt) is deze methode minder geschikt. In de praktijk geldt dit laatste voor ongeveer 10 à 20% van de gevallen.

b) Ernst verdeelde de stroming in drie gedeelten (fig. IV-1)
- vertikale stroming tussen drains of kanalen
- horizontale " naar " " "
- radiale " nabij " " "

Hieraan kan worden toegevoegd:
- intrede in de drains.

Elk van deze stromingen gaat gepaard met een verlies aan stijghoogte:

$h_1 - h_2 = \Delta h_v$ (vertikaal)

$h_2 - h_3 = \Delta h_h$ (horizontaal)

$h_3 - h_4 = \Delta h_r$ (radiaal)

$h_4 - h_5 = \Delta h_i$ (intrede)

$h_1 - h_5 = \Delta h_t$ (= m_o) (totaal)

zodat

$$\Delta h_t = \Delta h_v + \Delta h_h + \Delta h_r + \Delta h_i \qquad (1)$$

Deze beschouwing is zeer algemeen toepasbaar op stromingen naar evenwijdige leidingen (zowel stationair als niet-stationair).
Wij behandelen de stationaire stroming door een profiel met slecht

doorlatende bovenlaag op goed doorlatende ondergrond (S.G. profiel), waarbij wij de intreeweerstand voorlopig zullen verwaarlozen.

c) Dergelijke profielen komen o.a. voor in de komgronden (poldervaaggronden) van het rivierengebied. Zij bestaan meestal uit:
- bovengrond (20 cm dik), goed doorlatend, maar voor de verzadigde stroming van weinig betekenis omdat grondwater dieper moet blijven dan 20 cm
- slecht doorlatende laag (50 - 80 cm dik) $k \simeq 0.05$ m/etm.
- goed doorlatende laag $kD \simeq 1$ m^2/etm.
- ondoorlatende laag

d) De stroming (fig. IV-1) wordt geschematiseerd tot:
- vertikale stroming door slechte laag 1
- horizontale " " goede " 2
- radiale " nabij de drains

e) Voor de <u>vertikale stroming</u> geldt volgens Darcy (met weglating van minteken):

$$Q = k_1 \cdot i \cdot F \text{ of } v = \frac{Q}{F} = k_1 \cdot i$$

De filtreersnelheid v is bij stationaire stroming gelijk aan de neerslag N (bij Hooghoudt s); verder is:

$$i = \frac{\Delta h_v}{D_1}$$

Uitwerken geeft:

$$\Delta h_v = N \cdot \frac{D_1}{k_1} \qquad (2)$$

Δh_v	: verschil in stijghoogte bij vert. stroming	m
N	: neerslag	m/etm.
D_1	: doorstroomde dikte slechte laag	m
k_1	: doorlatendheid " "	m/etm.

f) Voor de <u>horizontale stroming</u> geldt, dat deze vergelijkbaar is met de stroming naar twee waterhoudende kanalen en wel met het ge-

deelte beneden de waterspiegel in deze kanalen.

Daarvoor geldt:

$$s = \frac{8kDm_o}{L^2}$$

In ons geval is $k = k_2$ $\quad s = N$

$m_o = \Delta h_h$ $\quad D = D_2$

zodat:

$$\Delta h_h = \frac{NL^2}{8k_2D_2} \qquad (3)$$

g) Zijn er meer lagen, waardoor het water ongeveer horizontaal kan stromen, dan geldt hiervoor:

$$\Delta h_h = \frac{NL^2}{8(k_2D_2 + k_3D_3 + \ldots)} \qquad (3a)$$

h) Voor de radiale stroming geldt:

$$\Delta h_r = N \cdot L \cdot W_{rad} \qquad (4)$$

met W_{rad}: radiale weerstand etm/m

Voor de berekening van W_{rad} worden verschillende gevallen onderscheiden (fig. IV-2).

i) Geval I: drainsleuf <u>niet</u> tot in de goed doorlatende ondergrond reikend. <u>Groot</u> contrast in doorlatendheid:

$k_2/k_1 > 20$

$$W_{rad} = \frac{1}{\pi k_1} \ln \frac{4a}{u} \qquad (5)$$

W_{rad}	: radiale weerstand	etm/m
k_1	: doorlatendheid slechte laag	m/etm
a	: afstand drain tot goed doorlatende laag	m
u	: natte omtrek	m

Voor u neemt men meestal de natte omtrek van de <u>drainsleuf</u> (fig. IV-3). De inhoud van deze sleuf bestaat uit los materiaal dat in kleigronden meestal veel doorlatender is dan de ongeroerde grond.

De formule kan worden afgeleid met behulp van complexe functies.

j) Geval II: drainsleuf niet tot in de goed doorlatende ondergrond reikend. Gering contrast in doorlatendheid:
$k_2/k_1 < 20$

$$k_1 W_{rad} = k_1 W' + \frac{1}{\pi} \ln \frac{\pi a}{4u} \qquad (6)$$

Voor $k_1'w'$ heeft Ernst een grafiek gegeven (fig. IV-4), berustend op de uitkomsten van numerieke berekeningen (relaxatiemethode).
De grootheid $k_1 w'$ hangt af van:
- de verhouding k_2/k_1
- de verhouding D_2/D_1

D_2: dikte goed doorlatende laag m
$D_1 = a$: afstand drain tot goed doorlatende laag m

k) Geval III: drainsleuf juist reikend tot aan de goed doorlatende ondergrond

$$W_{rad} = \frac{1}{\pi k_2} \ln \frac{4D_2}{\pi b} \qquad (7)$$

b: breedte drainsleuf
Omdat $k_2 >> k_1$ is in dit geval de radiale weerstand aanzienlijk kleiner dan bij de voorgaande gevallen.

l) Geval IV: drainsleuf reikend tot in de goed doorlatende ondergrond

$$W_{rad} = \frac{1}{\pi k_2} \ln D_2/u \qquad (8)$$

m) Het rekenwerk is vrij omslachtig, maar het leidt rechtstreeks (zonder iteratie) tot een oplossing.
Men verkrijgt een vierkantsvergelijking in L:

$$\Delta h_t = m_o = \frac{NL^2}{8k_2D_2} + NLW_{rad} + N\frac{D_1}{k_1} \qquad (9)$$

waaruit L kan worden bepaald.

n) Door van Someren is voor het SG-profiel een grafiekenalbum samengesteld, geldend voor Nederlandse omstandigheden (afvoer 0.007 m/etm; natte omtrek drainsleuf u = 0.30 m). Een voorbeeld geeft fig. IV-5; daarin is

$\Delta h = \Delta h_t$	: totaal verlies aan stijghoogte				m
k_1	: doorlaatfactor	slecht	doorlatende	bovenlaag	m
k_2	: "	goed	"	onderlaag	m
D_2	: dikte	goed	"	onderlaag	m
a	: afstand bodem drainsleuf tot goed doorlatende onderlaag				m
L	: drainafstand				m

Voorbeeld (fig. IV-5)
Als Δh = 0.6 m; D_2 = 1.0 m; k_1 = 0.1 m/etm; k_2 = 1.5 m/etm;
a = 0.4 m,
dan geldt voor de drainafstand
L = ruim 12 m.

2. Bepaling van drainafstanden in de Zuiderzeepolders.

a) Zavel- en kleigronden, die onder water zijn afgezet bezitten aanvankelijk een zeer losse opbouw (dus een laag volumegewicht) en een zeer hoog watergehalte. Deze slikvaaggronden verkeren in gereduceerde toestand en zijn blauwzwart van kleur.

b) Na droogvallen treedt rijping op: de grond verliest water en krimpt daardoor. Dit leidt tot:
- inklinking (door krimp in vertikale richting)
- scheurvorming (door krimp in horizontale richting)

De scheuren vormen een min of meer zeshoekig patroon.
Door oxydatie verandert de kleur van blauwzwart in grijs.

c) Ongerijpte zavel- en kleigronden zijn vrijwel ondoorlatend voor water. Door de vorming van scheuren wordt hun doorlatendheid zeer groot (100 m/etm en meer).

d) In nieuw gewonnen gronden blijven de scheuren zeer lang bestaan (minstens 100 jaar: Y-polders).
In oude kleigronden (komklei, knipklei) worden bij droogte eveneens scheuren gevormd, maar deze zwellen in natte tijden weer dicht (dit geldt nog in sterkere mate voor Vertisolen in semi-ariede klimaten).
In jonge gronden komen scheuren voor op grote onderlinge afstand (25 - 100 cm). Doorlatendheidsbepaling met boorgaten is niet mogelijk: de gevonden waarden variëren van onmeetbaar klein tot onmeetbaar groot, al naar het boorgat aansluiting heeft met een scheur.

e) Drainafstanden worden empirisch vastgesteld op proefvelden met uiteenlopende drainafstand. Dit gegeven wordt gecorreleerd met het scheurenpatroon (breedte, diepte en onderlinge afstand), dat in profielkuilen wordt vastgesteld.

f) Via deze ijking wordt op onbekend terrein bepaling van de drainafstand mogelijk door het scheurenpatroon op te meten.

g) Zandgronden, die onder water zijn afgezet vertonen geen krimp (wel enig waterverlies en oxydatie). Hun doorlatendheid blijft dezelfde als bij droogvallen en kan b.v. met de boorgatenmethode worden bepaald.
Meestal maakt men gebruik van een correlatie tussen doorlatendheid en textuur (granulaire samenstelling).

h) Zwaardere gronden bezitten bij droogvallen een hoger watergehalte, naarmate hun lutumgehalte (deeltjes < 2μ) groter is. Kleien scheuren dus meer dan zavels. Lichte zavel (8 - 12% lutum) scheurt nauwelijks en wordt op kleine afstand gedraineerd (8 - 12 m.). Zware, goed gerijpte kleigronden kunnen op afstanden van 50 m en meer worden gedraineerd.

i) Dezelfde principes zijn geldig voor overeenkomstige gronden in het buitenland. Wel is daarbij een voorwaarde, dat het volumegewicht van het ongerijpte sediment laag moet zijn en dus het vochtgehalte

hoog, anders treedt geen irreversibele krimp op.

3. Niet-stationaire drainageformules.

a) In klimaten met felle neerslag, gevolgd door droogte (b.v. het Westen van de U.S.A. of het Mediterrane klimaat) worden meestal niet-stationaire formules gebruikt in combinatie met een niet-stationair drainagecriterium. Enkele formules van dit type zijn (zonder afleiding) onder b) en c) opgenomen.

b) Stroming (geheel of grotendeels) beneden het vlak van de drains verlopend; ondoorlatende laag ver beneden draindiepte.

$$L^2 = \frac{\pi^2 k(d + h_o/2)t}{\mu \ln (1.27\, h_o/h_t)}$$ formule van Tapp-Moody

Voorwaarde: $h_o/h_t \geqq 1.25$ of $h_t/h_o \leqq 0.8$

De factor 1.27 is gelijk aan $4/\pi$

c) Stroming geheel boven het vlak van de drains verlopend; drains liggend op een ondoorlatende laag.

$$L^2 = \frac{9\, k\, h_o\, t}{2\mu\, (h_o/h_t - 1)}$$ formule van Glover-Boussinesq

d) In deze formules is:

L	: drainafstand	m
k	: doorlaatfactor	m/etm
d	: dikte equivalentlaag volgens Hooghoudt	m
h_o	: opbolling midden tussen drains voor t = o	m
h_t	: idem, op tijdstip t	m
t	: tijd	etm
μ	: bergingscoëfficient	-

e) Voorbeeld: voor een appelboomgaard wordt als eis gesteld, dat het grondwater in 8 dagen van 60 cm beneden maaiveld moet dalen tot 100 cm diepte. De drains liggen op een ondoorlatende ondergrond op 110 cm diepte. Voor de grond boven de drains geldt k = 4.0 m/etm,

terwijl $\mu = 0.05$.

Gevraagd wordt de drainafstand.

Uit de gegevens volgt: $h_o = 0.50$ m; $h_t = 0.10$ m

De formule van Glover geeft dus:

$$L^2 = \frac{9 \times 4 \times 0.50 \times 8}{0.10\ (5 - 1)} = 360;\ L = 19 \text{ m}$$

f) De formule van Tapp-Moody is gemakkelijk af te leiden uit de formule voor de niet-stationaire stroming naar twee kanalen na een plotselinge regenval.

$$h(x,\ t) = h_t = \frac{4}{\pi} h_o \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{n} \cdot e^{-\frac{n^2\pi^2 kDt}{\mu L^2}} \cdot \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$$

(zie diktaat Agrohydrologie).

Midden tussen de drains is $x = L/2$ en is de sinusterm afwisselend +1 en -1.

Voor niet te kleine t (zie g) is alleen de eerste term van betekenis, zodat

$n = 1$ en $\sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) = +1$

$$h_t = \frac{4}{\pi} h_o\, e^{-\frac{\pi^2 kDt}{\mu L^2}}$$

$$L^2 = \frac{\pi^2 kDt}{\mu \ln (1.27\ h_o/h_t)}$$

Stelt men $D = d + h_o/2$ dan volgt de formule van Tapp-Moody.

g) Aan de voorwaarde "niet te kleine t" is in de praktijk wel voldaan indien:

$$\frac{\pi^2 kDt}{\mu L^2} \geqq 0.44$$

De tweede term is dan ongeveer 1% van de eerste.

Dan is

$$\frac{h_t}{h_o} = \frac{4}{\pi} e^{-0.44} \simeq 0.8$$

h) De formule van Glover-Boussinesq volgt uit de oplossing van een bepaald niet-stationair stromingsgeval met veranderend doorstromingsprofiel. Daarbij is nodig, dat de vorm van het freatisch vlak aan bepaalde voorwaarden voldoet.

4. Drainage van hellende terreinen.

4.1. Interceptiedrains

a) In hellende gebieden loopt vaak water over een ondoorlatende ondergrond (b.v. rots) door een daarop aanwezige beter doorlatende laag (b.v. een verweringslaag). Deze stroming staat in de hydrologie bekend als "interflow": het is a.h.w. een tussenvorm tussen oppervlakkige afstroming en de afvoer via diep gelegen watervoerende lagen (fig. IV-6).

b) Dit langs de helling stromende water geeft vaak op bepaalde punten overlast b.v. waar de helling een knik vertoont (fig. IV-6A) of waar de ondergrond een opwelving heeft (fig. IV-6B).
Ook diep grondwater kan op bepaalde plaatsen aan de dag treden en overlast veroorzaken (fig. IV-6C, D). In droge klimaten treedt op dergelijke plekken vaak verzilting op (vooral als de hoger gelegen terreinen bevloeid worden, waardoor de afvoer sterk toeneemt).

c) In dergelijke gevallen tracht men vaak het water boven de bedreigde punten op te vangen met interceptiedrains. Deze kunnen uit buizendrains bestaan, maar ook als sloot of als greppel worden uitgevoerd.

d) Vaak zijn de geo-hydrologische omstandigheden erg gecompliceerd. Men moet allereerst trachten door veldonderzoek de gunstigste plaats voor de drains vast te stellen.

e) Dit veldonderzoek kan omvatten:
- opsporen van natte plekken (ook mogelijk met luchtfoto's)

- onderzoek naar voorkomen, dikte en doorlatendheid van watervoerende lagen
- vervaardigen van een isohypsenkaartje (geeft richting van de grondwaterstromingen aan)
- geo-fysisch (elektrisch of seismisch) onderzoek voor het opsporen van onregelmatigheden in de bodemgesteldheid (b.v. rotsdrempels)

f) Voor eenvoudige gevallen is een theoretische benadering mogelijk. De analyse van Glover-Donnan (1959) is gebaseerd op de veronderstelling van Dupuit.
Stel een ondoorlatende laag met helling $S = tg\ \alpha$ (fig. IV-7).
Het oorspronkelijk freatische vlak heeft dezelfde helling, d.w.z. er stroomt langs de helling een constant debiet q.
Wij kiezen een coördinatenstelsel x - y, zoals aangegeven in fig. IV-7, waarbij de x-as langs de ondoorlatende laag wordt gelegd.
Er geldt nu in elke doorsnede

$$q = k\ y\ S \qquad (1)$$

terwijl in de oorspronkelijke toestand geldt:

$$q_o = k\ H\ S \qquad (2)$$

q:	tweedimensionaal debiet	m^2/etm
q_o:	oorspronkelijk debiet	m^2/etm
k:	doorlaatfactor	m/etm
y:	dikte doorstroomde laag	m
H:	oorspr. dikte " "	m
S:	helling doorstroomde laag	-

g) In de watervoerende laag wordt een drain gelegd, waarvan het middelpunt als coördinaten heeft
$x = o,\ y = h_o$
<u>Bovenstrooms</u> van deze drain geldt nu (fig. IV-8):
$q = q_o = k\ y\ tg(\alpha + \beta)$
waarin $\alpha + \beta$ de hoek is, die het freatisch vlak maakt met een horizontaal vlak.

Er geldt: $\operatorname{tg} \alpha = S = dz/du$

$\operatorname{tg} \beta = dy/dx$

$\operatorname{tg}(\alpha + \beta) = \dfrac{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta}{1 - \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta} \simeq \operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta$ als α en β klein zijn

Bij benadering is dus (voor kleine α en β):

$$q = q_o = k\, y(\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta) = k\, y(S + dy/dx) \qquad (3)$$

Uit (2) en (3) volgt:

$HS = y(S + dy/dx)$

$(H - y)S = y\, dy/dx$

$S\, dx = \dfrac{y\, dy}{H - y} = (-1 + \dfrac{H}{H - y})\, dy$

Integratie geeft:

$Sx = -y - H \ln (H - y) + C$

Uit de randvoorwaarde $x = o$, $y = h_o$ volgt:

$C = h_o + H \ln (H - h_o)$, zodat:

$$x = \frac{1}{S}\left[H \ln \frac{H - h_o}{H - y} - (y - h_o)\right] \qquad (4)$$

h) De drain is "effectief" over een zekere afstand bovenstrooms; stel als grens daarvoor $y = 0.9\, H$ en stel verder $h_o = \alpha H$, dan volgt uit (4):

$$x_{eff} = \frac{H}{S}\left[\ln \frac{1 - \alpha}{0.10} - (0.9 - \alpha)\right] = \beta \frac{H}{S} \qquad (5)$$

Voor de factor β geldt:

α	β	α	β
0	1.40	0.5	1.21
0.1	1.40	0.6	1.09
0.2	1.38	0.7	0.90
0.3	1.35	0.8	0.59
0.4	1.29	0.9	0.00

Legt men de drain zo, dat $h_o < 0.5\, H$ dan geldt dus bij benadering voor de "invloedsafstand" bovenstrooms:

$$x_{eff} \simeq 4/3\, H/S \qquad (5a)$$

i) Benedenstrooms van de drain geldt:

$$y = h \simeq h_o \qquad (6)$$

mits de drain een kleine radiale weerstand heeft. Bij grote radiale weerstand (of intreeweerstand) is $h > h_o$.

j) Voor het debiet van de interceptiedrain (per m' lengte) geldt:

$$q_i = q_o - q_1$$

q_i:	debiet	interceptiedrain	m^2/etm
q_o:	"	bovenstrooms	"
q_1:	"	benedenstrooms	"

Omdat $q_o = kHS$

$q_1 = khS$

is $q_i = k(H - h)S = \frac{H - h}{H} kHS = \frac{H - h}{H} q_o$

$$\boxed{q_i = \frac{H - h}{H} q_o} \qquad (7)$$

H: dikte doorstroomde laag, ver bovenstrooms m

h: idem, ver benedenstrooms m

Voor drains met geringe radiale en intreeweerstand is $h \simeq h_o$

k) Bij een aanzienlijke radiale weerstand van de drain loopt een gedeelte van de flux onder de drain door, maar keert later naar de drain terug (fig. IV-9). Benedenstrooms van de drain ligt het punt P, waar het freatisch vlak een maximale hoogte t.o.v. een horizontaal vergelijkingsvlak (b.v. NAP) heeft. Rechts van P stroomt water langs het freatisch vlak naar de drain, links van P helling-afwaarts. Ook voor dit geval geldt (7), nu echter met $h > h_o$.

Onderzoek van dit soort vraagstukken geschiedt het eenvoudigst met behulp van modellen (vloeistofmodellen of elektrische modellen).

4.2 Drainage met evenwijdige drains voor de afvoer van overtollig lokaal water.

a) Voor afvoer van regenwater, smeltwater of overtollig irrigatiewater legt men in hellend terrein meestal samengestelde drainagestelsels aan, waarbij de zuigdrains ongeveer evenwijdig met de hoogtelijnen worden gelegd, de hoofddrains in de dalplooien. De dimensionering van dergelijke stelsels is vaak gebaseerd op plaatselijke ervaring.

b) Door Schmid & Luthin (1964) is een theoretische behandeling gegeven voor deze drainage, berustend op de veronderstelling van Dupuit. Deze theorie is verwant aan de theorie van de stationaire stroming naar open kanalen (III-2).
Stel (zie fig. IV-10):

a: helling ondoorlatende laag (positief, indien afhellend)	-
z: hoogte freatisch vlak boven ondoorlatende laag	m
y: " " " boven horizontaal vlak door punt x = L z = o	m
x: afstand, gemeten langs horizontaal vlak	m
p: neerslag intensiteit	m/etm.
k: doorlaatfaktor doorlatende laag	m/etm.
$H = z_{max}$: maximale waarde van z	m

Deze maximale opbolling ligt niet "midden tussen de drains".

Er liggen drains bij x = o en x = L; daarbij geldt:

$x = o \qquad z = H_o$

$x = L \qquad z = H_L$

N.B. In tegenstelling tot het in 4.1 behandelde geval is nu de x-as horizontaal, de y-as vertikaal.

c) Voor de stroming geldt volgens Dupuit-Forchheimer (hier een vrij grove benadering):

$$q = - kiF = - kz \frac{dy}{dx}$$

$$y = z + a\,(L - x) \quad ; \quad \frac{dy}{dx} = \frac{dz}{dx} - a$$

$$q = -\,kz\,(\frac{dz}{dx} - a) = -\,k\left[z\frac{dz}{dx} - az\right]$$

Toepassing van de continuïteitsvoorwaarde levert:

$\frac{dq}{dx} = p$, zodat:

$$p = -\,k\,\frac{d}{dx}\left[z\,\frac{dz}{dx} - az\right]$$

$$k\,\frac{d}{dx}\left[z\,\frac{dz}{dx}\right] - k\,a\,\frac{dz}{dx} + p = o \qquad (1)$$

(Boussinesq, 1904)

d) Integratie van (1) over x geeft, met c_1, als integratieconstante:

$$k\,z\,\frac{dz}{dx} - k\,a\,z + p\,x + c_1 = o \qquad (2)$$

Zonder de constante c_1 zou deze vergelijking "homogeen van de eerste graad" zijn in x en z en daardoor gemakkelijk oplosbaar. Wij verwijderen daarom de hinderlijke constante door de substitutie:

$$v = x + c_1/p \quad ; \quad dv = dx \quad ; \quad px + c_1 = pv$$

zodat:

$$k\,z\,\frac{dz}{dv} - k\,a\,z + p\,v = o \qquad (3)$$

e) Deze vergelijking is homogeen in v en z en kan daarom worden opgelost door de substitutie

$$w = z/v \quad ; \; z = vw \quad ; \quad \frac{dz}{dv} = v\,\frac{dw}{dv} + w$$

Invullen geeft:

$$k\,v\,w\,(w + v\,\frac{dw}{dv}) - k\,a\,v\,w + p\,v = o$$

of na delen door v en splitsing van de variabelen w en v:

$$-\,\frac{dv}{v} = \frac{w\,d\,w}{w^2 - a\,w + p/k}$$

Integratie geeft:

$$-\,\ln|v| + c_2 = \int \frac{w\,d\,w}{w^2 - aw + p/k} \qquad (4)$$

f) De verdere uitwerking is niet eenvoudig, vooral omdat de constante c_1 "verborgen" aanwezig is in v en dus ook in $w = z/v$. De constanten c_1 en c_2 worden bepaald door de randvoorwaarden

$$x = o \qquad z = H_o$$

$$x = L \qquad z = H_L$$

maar het verband is bijzonder gecompliceerd. Bovendien heeft de integraal verschillende oplossingen al naar de discriminant van $w^2 - aw + p/k$ negatief, nul of positief is.

g) Voor $H_o = o$ en $H_L = o$ (dus goed werkende drains, liggend op de ondoorlatende laag) geven Schmid & Luthin een nomogram voor L/H als functie van p/k bij verschillende helling a.

h) Voor a = o (vlak terrein) en $H_o = o$ geldt formule (6) van III-2.1:

$$s = \frac{4k\, m_o^2}{L^2} \qquad \text{of} \qquad \frac{L}{m_o} = 2\sqrt{k/s}$$

of - in de hier gebruikte notatie:

$$L/H = 2\sqrt{k/p} \qquad (5)$$

De bijbehorende grondwaterspiegel heeft theoretisch een <u>elliptische</u> vorm.

i) Voor deze "elliptische grondwaterstand" is de veronderstelling van Dupuit reeds een vrij grove benadering; deze benadering wordt nog minder juist, naarmate de helling a groter is.

j) Toch blijkt uit modelproeven van Guitjens & Luthin (1965) een goede overeenkomst met de uitkomsten van het nomogram van Schmid & Luthin, maar eveneens - zo niet beter - <u>met de uitkomsten van de eenvoudige formule (5) geldend voor vlak terrein</u>.

k) Voor praktische doeleinden kan men daarom voor hellingen tot 20% de rekenwijze voor vlak terrein ook voor hellende terreinen toepassen.

Tabel IV-1. Vergelijking van verschillende bepalingsmethoden voor het quotiënt L/H bij drainage van een helling.

Helling a %	p/k	L/H		
		modelproef	Schmid & Luthin	formule (5)
0	0.0157	16.2	16.0	16.0
	0.0343	11.1	10.8	10.8
	0.0452	9.4	9.4	9.4
	0.0660	7.5	7.8	7.8
	0.0864	6.3	6.8	6.8
10	0.0263	13.3	12.9	12.3
	0.0439	9.3	9.7	9.5
	0.0615	7.9	8.3	8.1
	0.0909	6.3	6.8	6.6
20	0.0289	12.5	12.5	11.8
	0.0432	9.6	10.1	9.6
	0.0593	7.7	9.6	8.2
	0.0822	6.3	7.2	7.0
30	0.0277	13.7	15.2	12.0
	0.0446	10.1	11.0	9.5
	0.0625	7.6	8.8	8.0
	0.0885	6.1	7.2	6.7

a: helling -
L: drainafstand m
H: max. hoogte freatisch vlak boven ondoorlatende laag m
p: neerslag = afvoer m/etm
k: doorlaatfaktor doorlatende laag m/etm

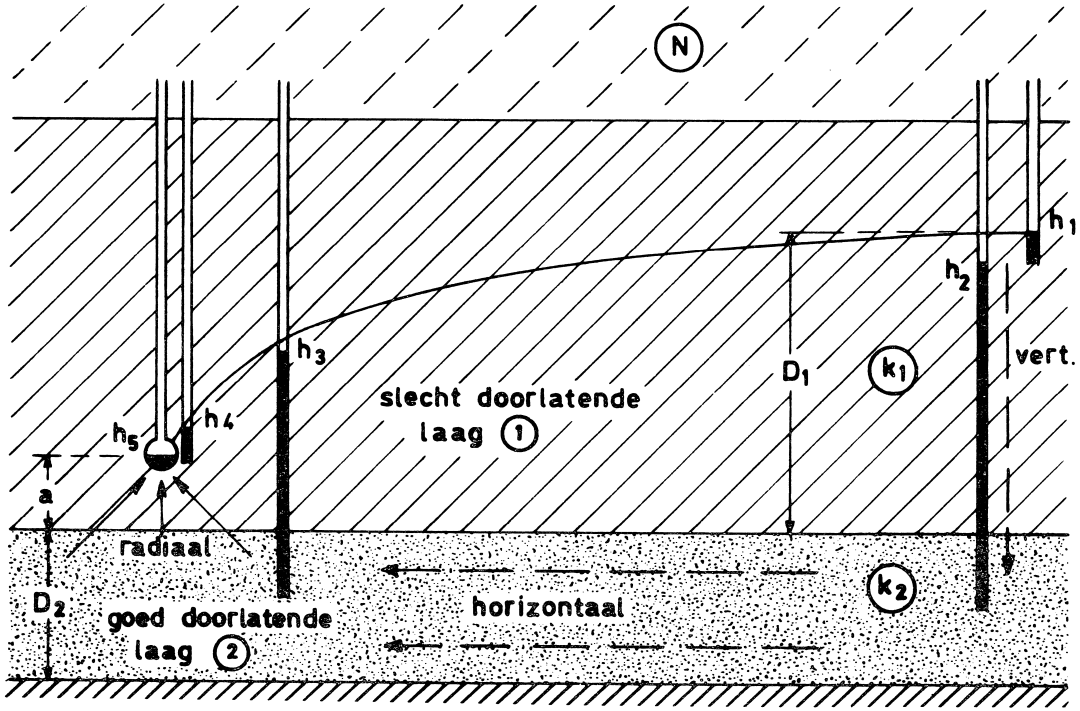
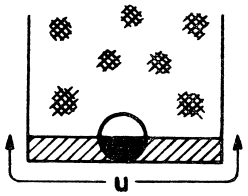
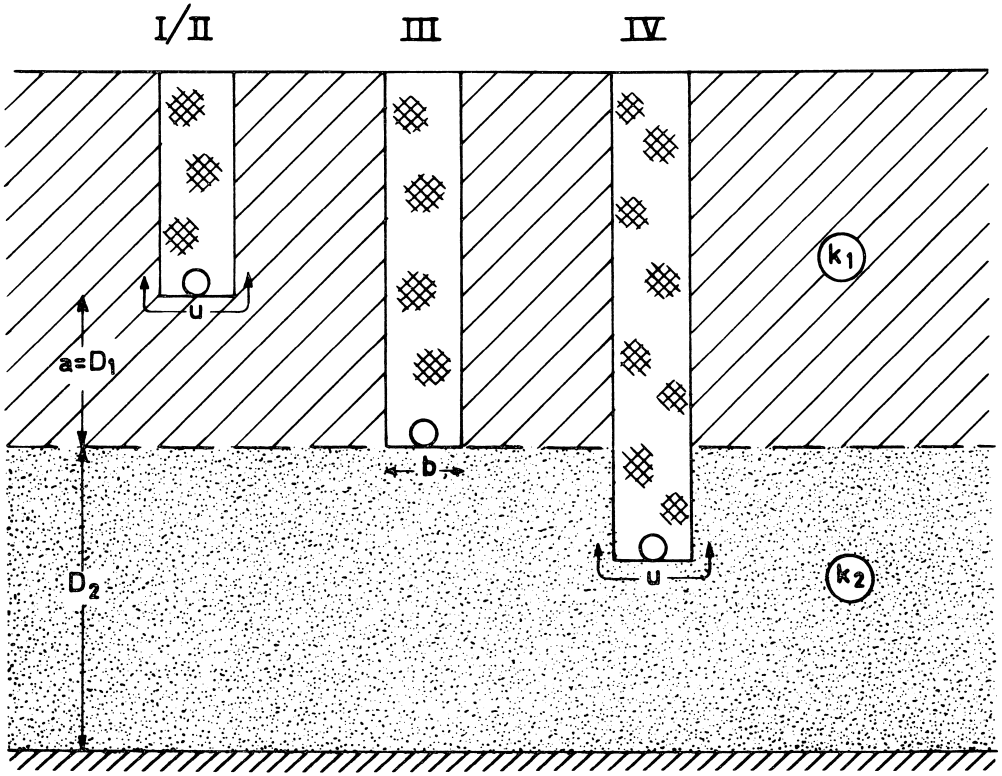


Fig. IV - 1 Stroming naar een drain volgens ERNST
(S.G. – profiel)



u = 0,30 m

Fig. IV - 3 Natte omtrek van een drainsleuf



I : $k_2/k_1 > 20$ $\quad W_{rad} = \frac{1}{\pi k_1} \ln \frac{4a}{u}$

II : $k_2/k_1 < 20$ $\quad k_1 W_{rad} = k_1 w^1 + \frac{1}{\pi} \ln \frac{\pi a}{4u}$

III : $\quad W_{rad} = \frac{1}{\pi k_2} \ln \frac{4 D_2}{\pi b}$

IV : $\quad W_{rad} = \frac{1}{\pi k_2} \ln \frac{D_2}{u}$

Fig. IV - 2 Radiale weerstanden in het S.G. profiel
(volgens ERNST)

RADIALE WEERSTAND VOLGENS ERNST

Waarden voor k_1w'

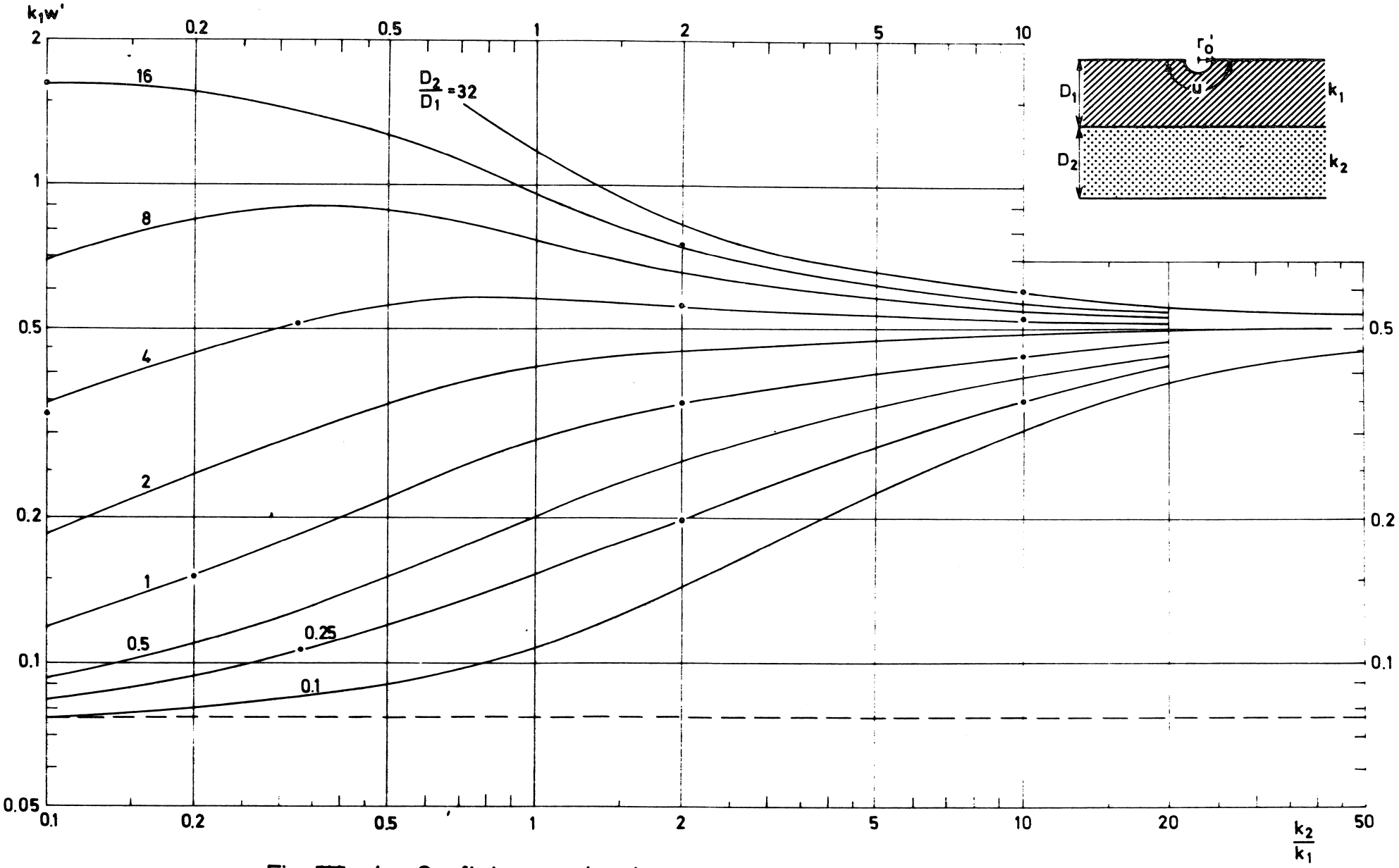


Fig. IV - 4 Grafiek voor k_1w'

N - 204/7

LANDBOUWHOGESCHOOL Afd. Cultuurtechniek

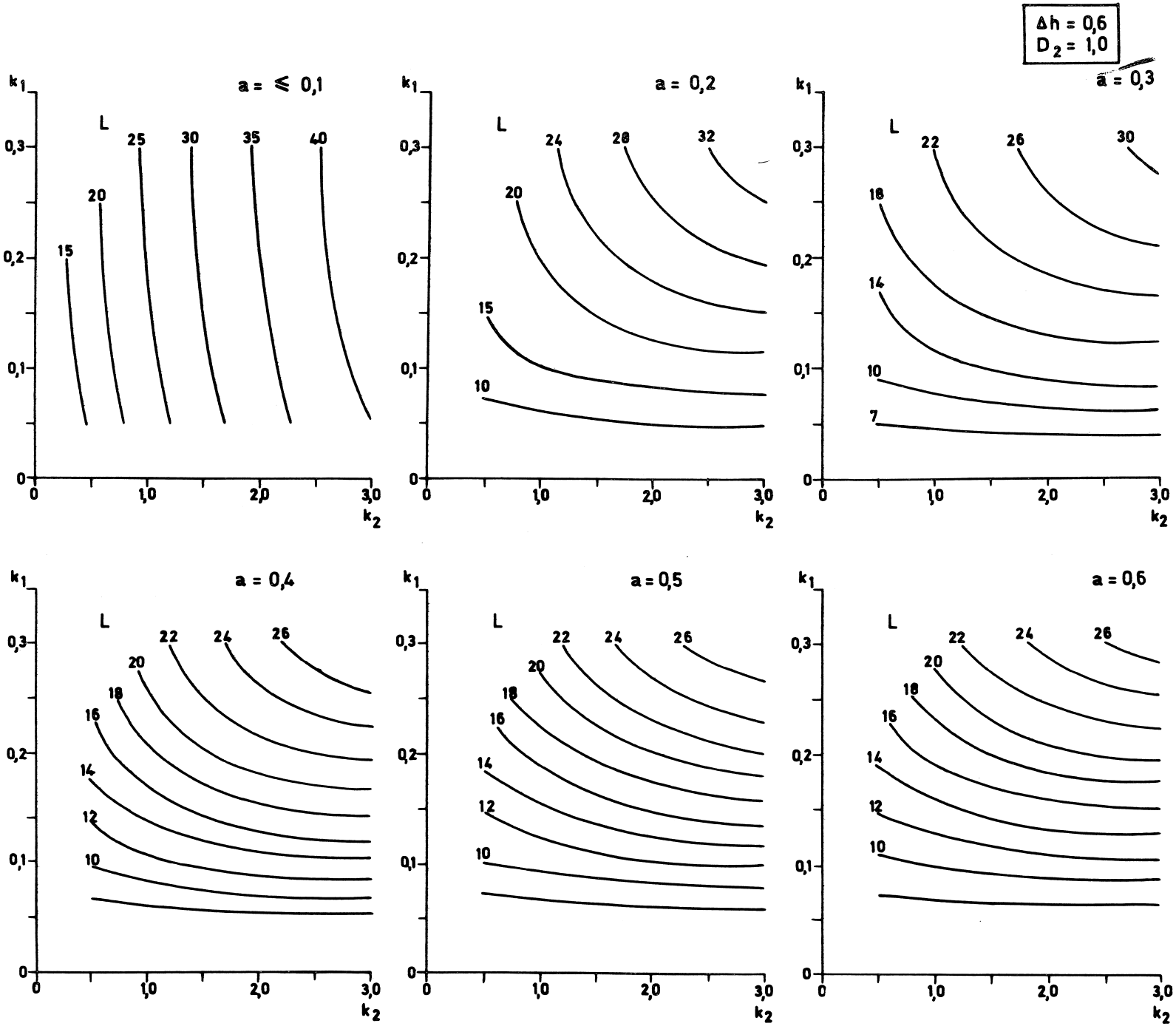


Fig. IV - 5 Drainafstanden voor het s.g.-profiel volgens ERNST - Van SOMEREN (voorbeeld voor Δh = 0,6 ; D = 1,0)

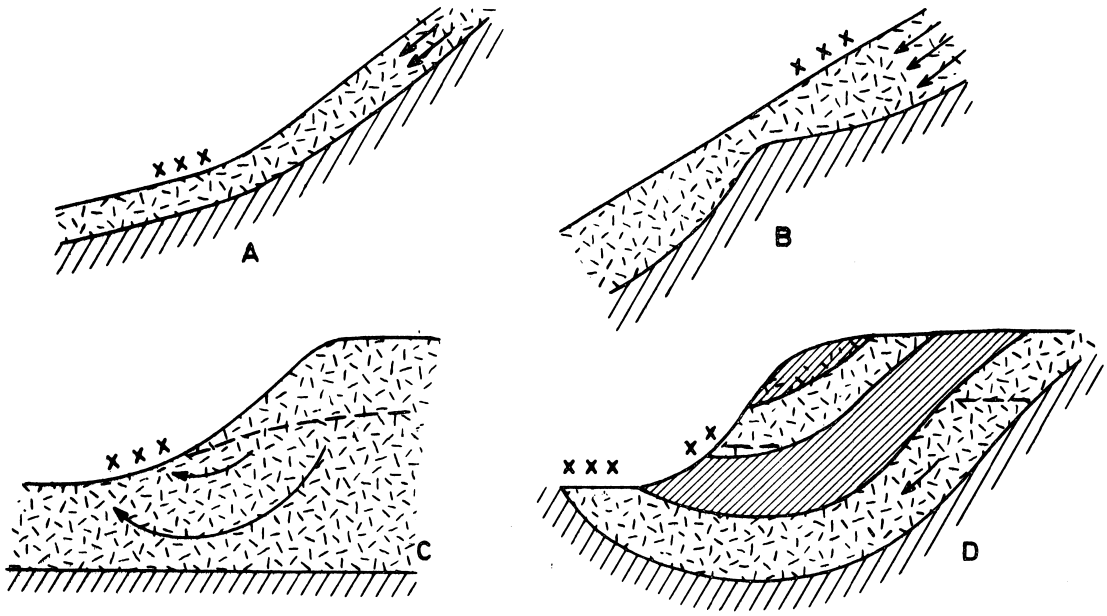


Fig. IV - 6 **Wateroverlast in hellende gebieden.**

xx: Punten met wateroverlast

A: "Interflow"; wateroverlast bij de knik van de helling

B: "Interflow"; wateroverlast bij een opwelving van de ondoorlatende ondergrond

C: Wateroverlast aan de voet van een helling, veroorzaakt door uittredend diep grondwater

D: Wateroverlast door grondwater, dat op bepaalde bronniveaus uittreedt.

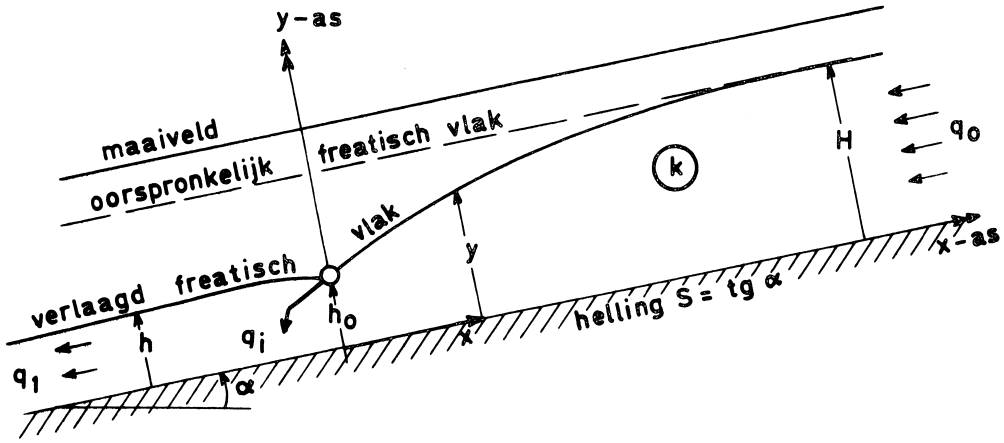


Fig. IV - 7 Interceptiedrain in een hellende watervoerende laag (volgens GLOVER-DONNAN)

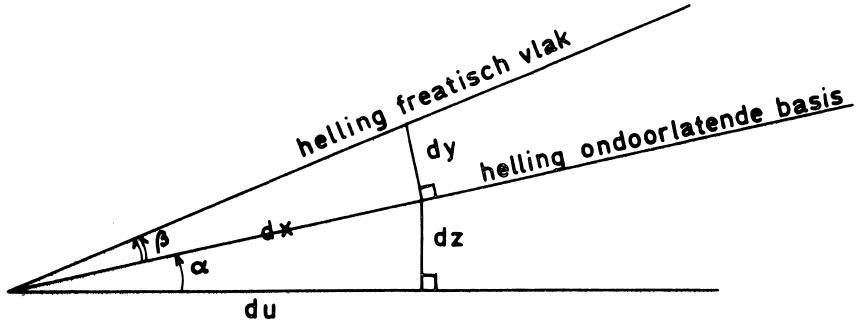


Fig. IV - 8 Helling van het freatisch vlak

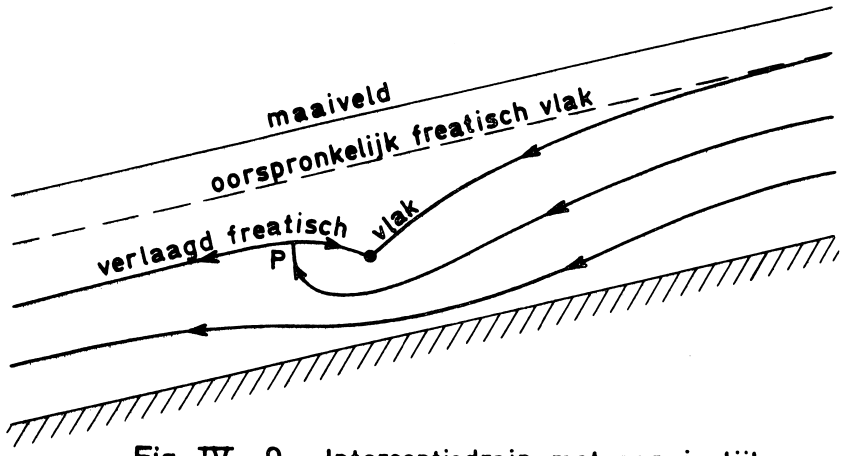


Fig. IV - 9 Interceptiedrain met aanzienlijke radiale weerstand

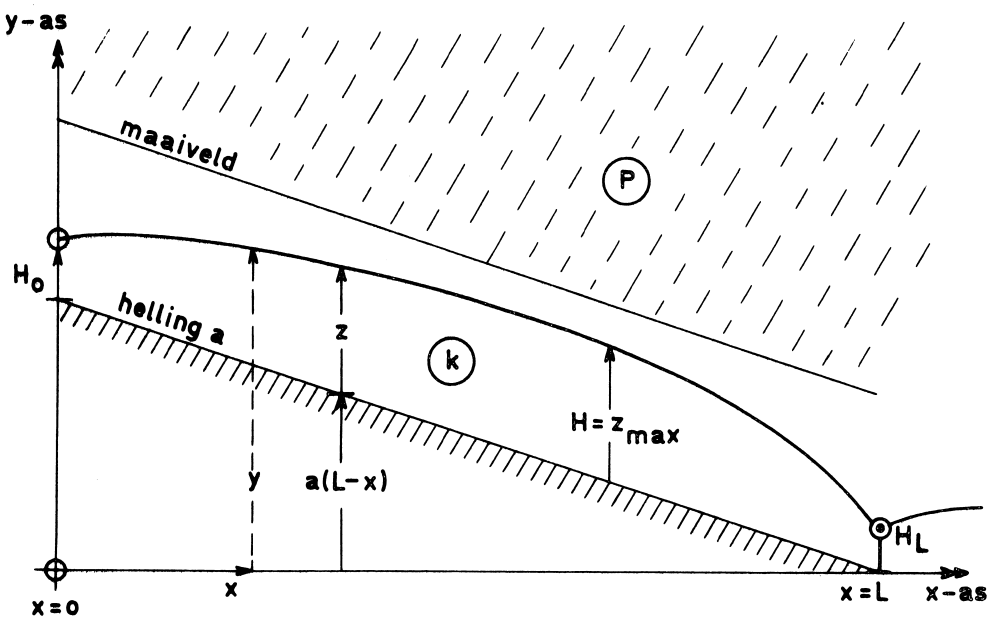


Fig. IV - 10 Drainage van een hellend watervoerende laag (volgens SCHMID - LUTHIN)

V. Filtermateriaal en intreeweerstand.

1. Filtermateriaal.

a) Filtermateriaal heeft tot doel:
- tegengaan van inspoeling van gronddeeltjes
- vermindering van de intreeweerstand

b) Uit de grondmechanica is bekend:

$w = c + \sigma_k \text{ tg } \varphi$

w:	wrijvingskracht	$N\ m^{-2}$
c:	kohesie	"
σ_k:	korrelspanning	"
φ:	hoek inwendige wrijving	

Bij klei is alleen c van belang. Zand vertoont geen kohesie, zodat $c \simeq 0$

c) Bij klei is de kohesie vaak zo groot, dat geen verplaatsing van materiaal optreedt t.g.v. de krachten die nabij de drain werkzaam zijn (zwaartekracht en stromingsdruk). In kleigronden laat men soms het filtermateriaal achterwege (Zuiderzeepolders).

d) Bij zand is het gevaar van binnendringen veel groter, vooral als:
- turbulente stroming optreedt
- het zand in contact is met openingen, die groter zijn dan ongeveer 3 à 4 korreldiameters.

e) Bij openingen kleiner dan 3 à 4 korreldiameters worden stabiele gewelven gevormd (fig. V-1).

f) Onder Nederlandse omstandigheden (geringe helling van de drains en daardoor geringe stroomsnelheden) worden in de drains de gronddeeltjes niet of nauwelijks getransporteerd (tab. V-1). Het gevaar voor verstopping is dus zeer groot. Bij drainage in hellend terrein kan wel grondtransport plaats vinden.

Tabel V-1. Grondtransport in drains bij verschillende stroomsnelheden.

	geen transport	matig transport	volledig transport
leem < 50μ	0 - 16	16 - 22	> 22 cm/sec.
zand > 50μ	0 - 20	20 - 25	> 25 cm/sec.

2. Intreeweerstand.

a) Nabij de drains is een extra weerstand aanwezig doordat de drains niet over de gehele oppervlakte doorlatend zijn. Het water komt slechts plaatselijk binnen (stootvoegen bij gebakken buizen, perforaties bij buizen van kunststof).

b) In korrelig materiaal (b.v. zand) kan nabij dergelijke openingen gewelfvorming optreden als de wijdte van de perforaties 1 à 4 x de diameter van de korrels bedraagt. De intreeweerstand wordt hierdoor verlaagd.

c) Voor drains in homogene grond geldt:

$$\Delta h_i = N \cdot L \cdot W_{intree} \qquad (1)$$

$$W_{intree} = a/k \qquad (2)$$

W_{intree}: intreeweerstand etm/m

k : doorlatendheid medium m/etm

a : faktor, afhankelijk van type buis (meestal 2-2.5)

Engelund heeft hiervoor een theoretische berekening gegeven voor enkele eenvoudige gevallen.

Voor een klassifikatie van W_{intree}-waarden zie tabel V-2.

d) De stroming nabij perforaties of stootvoegen is drie-dimensionaal en moeilijk te berekenen. De faktor a kan het eenvoudigst worden bepaald door metingen aan een electrisch model (electrolyt-tank).

e) Een goed filtermateriaal kan a verlagen tot 0.1 of minder.

Tabel V-2. Klassificatie van W_{intree}-waarden

W_{intree} etm/m	klassifikatie weerstand	beoordeling werking drain
< 0.5	gering	goed
0.5 - 1	laag	
1 - 2	matig	matig
2 - 5	hoog	slecht
> 5	zeer hoog	zeer slecht

f) In zand vervloeit het losse materiaal in de drainsleuf in natte tijden. De doorlatendheid wordt daarbij dezelfde als in ongeroerde grond of zelfs lager (lemig dekzand). Een goed filter geeft hier dus een aanzienlijke verbetering; het is tevens nodig tegen indringen van zand in de drain.

g) In klei blijft de losse ligging van de grond in de drainsleuf veel beter bewaard (grotere kohesie). Bij drainage onder zeer natte omstandigheden kan echter een zo sterke verdichting optreden, dat de drainage onwerkzaam blijft.

h) Ongerijpte klei (Zuiderzeepolders) is zeer weinig doorlatend. Ongerijpte klei rondom de drains geeft dan ook zeer slechte resultaten. "Sleufloze" drainage is daardoor in Oostelijk Flevoland aanvankelijk mislukt. Na 1 - 2 jaar verdere rijping begon deze drainage plotseling te werken omdat het in de grond gevormde scheurenstelsel de drains had bereikt.
Bij normale drainage in de Zuiderzeepolders brengt men een laag gerijpte bovengrond op de drains en stelt het verdere opvullen van de sleuven vaak nog enige tijd uit.

i) In de laatste jaren is veel onderzoek verricht naar de intreeweerstand. Dit komt door:

- nieuwe buistypen en filtermaterialen
- drainage wordt steeds meer toegepast, ook op grondsoorten die vroeger niet werden gedraineerd (lemig dekzand, beekeerdgronden, rivierkleigronden)
- met machines kan ook bij ongunstig weer worden gewerkt. Dan bestaat echter gevaar voor ondoorlatend worden van de grond in de drainsleuf, vooral bij lemig zand en bij klei
- de opkomst van "sleufloze" drainage.

j) Op 40 proefvelden, aangelegd door de Cultuurtechnische Dienst werden verschillende buizen- en omhullingsmaterialen vergeleken. Tussen verschillende buistypen (gebakken klei, glad plastiek of plastiek ribbelbuis) bestaat nauwelijks verschil, maar het omhullingsmateriaal blijkt een belangrijke invloed uit te oefenen op de werking van de drainage (tab. V-3).

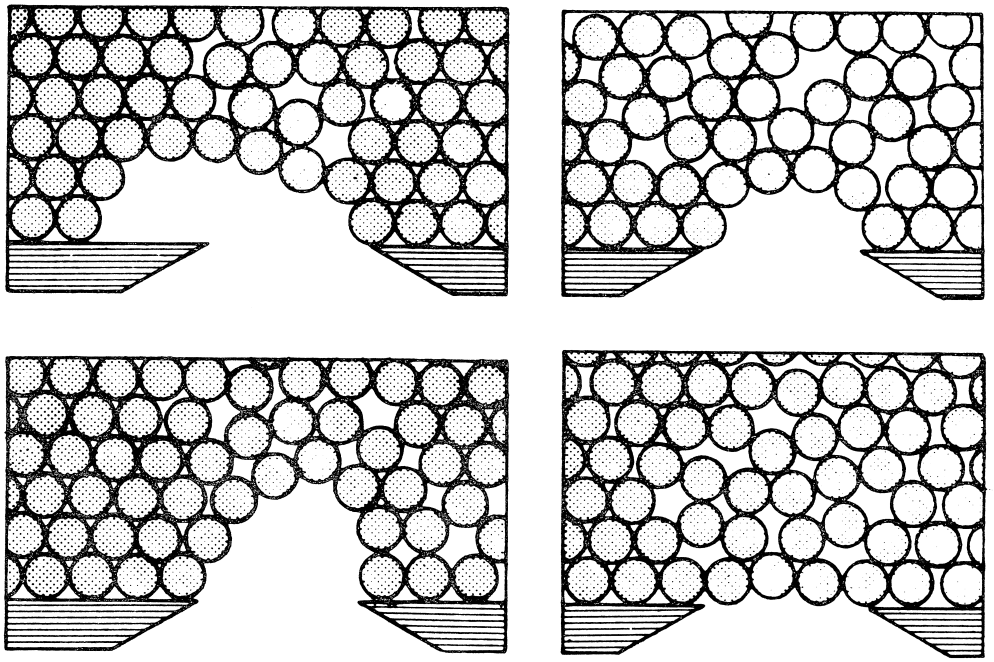
k) Bij <u>putfilters</u> (voor waterwinning) komen analoge problemen voor; ook hier kan door omhulling (in dit geval met filtergrind) een sterke verlaging van de intreeweerstand worden bereikt (Kruytzer, 1971).

Tabel V-3. Invloed van het omhullingsmateriaal op de gemeten waarden van de intreeweerstand (proefvelden C.D.)

Grondsoort en omhullings-materiaal	Aantal gemeten waarden voor W_{intree}	Aantal W_{intree}-waarden in etm/m				Beoordeling
		<1	1-2	2-5	>5	
zand						
- (geen)	19	1	3	9	6	zeer slecht
t	11	6	3	2	-	matig
T	32	10	13	9	-	slecht
vb + vlas	20	12	8	-	-	goed
tb + fb	13	3	6	4	-	matig
glvl + glw	14	5	3	4	2	slecht
"zand"	6	2	1	3	-	slecht
klei en zavel						
- (geen)	24	10	5	4	5	slecht
T	23	13	5	4	1	matig
glvl + glw	28	7	7	13	1	slecht
vb + heide	4	3	1	-	-	goed
tb + fb	8	3	3	2	-	matig
veen						
- (geen)	7	1	-	5	1	slecht
T	4	-	1	2	1	slecht
vb	4	-	1	2	1	slecht
glvl	5	-	-	-	5	zeer slecht
hvz+st+heide	11	7	4	-	-	goed
tb + fb	8	3	1	4	-	slecht

t : turfmolm, fijn
T : " , grof
vb : vlasband
vlas: los vlasafval (bolraap)
tb : turfband
fb : filtan-band
glvl: glasvlies
glw : glaswol
heide : losse heide
st : styromull
"zand": grof zand
hvz : houtvezels

Fig. V – 1 Verschillende vormen van stabiele gewelven in korrelig materiaal nabij een vlakke spleet, volgens PESCHL (1969)



VI. Waterstroming door drains.

1. Gladde buizen en gebakken buizen.

a) Na de intrede stroomt het water door de buis naar de sloot. Het debiet wordt daarbij steeds groter: de drainbuis is een verzamelleiding.

b) De stroming in de drain is bij hoge afvoeren turbulent. Bij turbulente stroming is de snelheid v niet evenredig met het verhang i (bij deze stromingen meestal als I of J aangeduid).

c) Voor berekening van drains gaat men meestal uit van vol lopende buizen. Vol lopende buizen komen alleen bij hoge afvoeren voor: bij lagere afvoer is de buis slechts ten dele met water gevuld.

d) Het getal van Reynolds is:

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \qquad (1)$$

V: gemiddelde stroomsnelheid $m\ s^{-1}$

D: diameter buis (inwendig) m

(bij ribbelbuizen de kleinste inwendige diameter)

terwijl voor vol lopende buizen:

$$Q = \tfrac{1}{4}\pi D^2 V$$

Q: debiet $m^3 s^{-1}$

of

ν: kinematische viskositeit van water $m^2 s^{-1}$

$$V = \frac{4Q}{\pi D^2} \qquad (2)$$

$\nu = 1.31 \times 10^{-6}$ bij $10^{o}C$

e) Bij gladde buizen wordt de stroming turbulent als Re > 2300, bij ribbelbuizen reeds beneden 2000. Bij hoge afvoeren worden deze grenswaarden over het grootste gedeelte van de buis overschreden.

f) Gladde buizen van PVC en goed gelegde aarden buizen zijn te beschouwen als "hydraulisch glad", d.w.z. de kleine oneffenheden in de wand oefenen geen invloed uit op de stroming.
Ribbelbuizen zijn "hydraulisch ruw".

g) Voor de helling van de energielijn in hydraulisch gladde buizen geldt:

$$J = \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \qquad (3)$$

met $\lambda = a \cdot Re^{-0.25}$ (Blasius) (4)

a = 0.3164 voor ongeperforeerde PVC buizen

a = 0.32 - 0.36 voor aarden buizen

Uit (1), (2), (3) en (4) volgt voor gladde PVC buizen:

$$J = 8.33 \times 10^{-4} \cdot D^{-4.75} \cdot Q^{1.75} \qquad (5)$$

Dit geldt voor een <u>transportleiding</u>, d.w.z. een buis waardoor van begin tot eind hetzelfde debiet Q passeert.

h) Een drain is een <u>verzamelleiding</u> (fig. VI-1). Het debiet wordt naar de sloot toe steeds groter.

$$q_x = \frac{Q}{L_D} \cdot (L_D - x) \qquad (6)$$

met

$$Q = S \cdot B \cdot L_D \qquad (7)$$

q_x:	debiet op punt x	$m^3\ s^{-1}$
Q :	totaal debiet drain	$m^3\ s^{-1}$
L_D:	totale lengte drain	m
x :	afstand tot sloot	m
S :	afvoerintensiteit	$m\ s^{-1}$
B :	akkerbreedte (drainafstand)	m

i) Als de drain vol loopt, dan zal boven het grootste gedeelte van de buis enig water staan, ook als de intreeweerstand nul is (fig. VI-1). Als:

h_x: stijghoogte water in drain m

dan is bij benadering op het punt x:

$$J = \frac{dh_x}{dx} \qquad (8)$$

(de benadering wordt veroorzaakt door het verwaarlozen van de snelheidshoogte van het stromende water in de drain,

$\frac{V^2}{2g}$; deze is bij de optredende stroomsnelheden zeer gering).

j) Combinatie van (5), (6) en (8) levert:

$$\frac{dh_x}{dx} = 8.33 \times 10^{-4} \cdot D^{-4.75} \cdot \left(\frac{Q}{L_D}\right)^{1.75} \cdot (L_D - x)^{1.75}$$

Integratie tussen de grenzen 0 en x geeft:

$$h_x = 8.33 \times 10^{-4} \cdot D^{-4.75} \cdot \left(\frac{Q}{L_D}\right)^{1.75} \cdot \frac{-1}{2.75} (L_D - x)^{2.75} \Big|_0^x$$

of

$$h_x = 3.03 \times 10^{-4} \cdot D^{-4.75} \left(\frac{Q}{L_D}\right)^{1.75} \left[L_D^{2.75} - (L_D - x)^{2.75}\right] \qquad (9)$$

Voor het begin van de drain (midden op de kavel) is $x = L_D$, dus

$$h = 3.03 \times 10^{-4} \cdot D^{-4.75} \cdot Q^{1.75} \cdot L_D \qquad (10)$$

k) Invoering van (7) leidt tot:

$$h = 3.03 \times 10^{-4} \cdot D^{-4.75} \cdot (SB)^{1.75} \cdot L_D^{2.75} \qquad (11)$$

Hieruit is de drainlengte L_D te berekenen als de andere grootheden bekend zijn.

l) Voor de helling van de drain geldt:

$$I = \frac{h}{L_D} = 3.03 \times 10^{-4} \cdot D^{-4.75} (SB)^{1.75} \cdot L_D^{1.75} \qquad (12)$$

Bij metingen te velde is gebleken, dat onder praktijkomstandigheden h ongeveer 1.28 x zo groot is als (11) aangeeft.
Hiermee rekening houdend is door Zuidema een nomogram geconstrueerd voor:

$$I = 3.88 \times 10^{-4} \cdot D^{-4.75} \cdot S^{1.75} \cdot (BL_D)^{1.75} \qquad (13)$$

waarbij $BL_D = A$ het oppervlak is, dat door de drain ontwaterd wordt (in m^2).

Bij gegeven:	helling van de drain	I	-
	diameter " " "	D	m
	afvoer " " "	S	$m\ s^{-1}$

kan men dus bepalen welk oppervlak A kan worden ontwaterd (fig. VI-2).

m) Onder ongunstige omstandigheden (enige verslibbing en wortelgroei) dient op L_D een reductie van 25% te worden toegepast: hetzelfde geldt voor het oppervlak A (tabel bij fig. VI-2).

n) Vaak is niet de helling I bepalend, maar de stijghoogte h bij het begin van de drain. Deze stijghoogte mag niet dichter dan een bepaald bedrag (b.v. 80 cm) beneden maaiveld komen. Ook hiervoor bestaan nomogrammen (fig. VI-3).

2. Ribbelbuizen.

a) Ribbelbuizen zijn hydraulisch ruw, d.w.z. de stroming wordt beinvloed door de oneffenheden van de wand, die groot zijn t.o.v. de dikte van de laminaire grenslaag. Toch is door de gegolfdheid van de wand de stroming anders dan bij buizen met minder regelmatige wandruwheid (technisch ruwe buizen, waarvoor b.v. de formule van Colebrook kan worden toegepast).

b) Voor de stroming kan men b.v. de formule van Manning gebruiken:

$$v = k_M \cdot R^{2/3} \cdot J^{1/2} \qquad (14)$$

	v: gemiddelde stroomsnelheid	$m\ s^{-1}$
met	k_M: coëfficient (≃ 71)	
	R: hydraulische straal	m
	J: verhang energielijn	-
	D: kleinste inw. diameter (fig. VI-4)	m
	Q: debiet	$m^3\ s^{-1}$

Voor een vol lopende buis is:

$$R = \frac{D}{4}$$

Van der Beken vond voor deze buizen:

$$u = \sqrt{2g}\ (6.35 + 2 \log D) \cdot D^{1/2} \cdot J^{1/2} \qquad (15)$$

d.i. de formule van Nikuradse met "zandruwheid" 2.5×10^{-3} m
Latere metingen van Zuidema en Scholten (1971) aan drains te velde geven weerstanden, overeenkomend met een "zandruwheid" 3.9×10^{-3} m.
In deze formule is:

u:	gemiddelde stroomsnelheid	m/sec
g:	versnelling zwaartekracht	$m\ s^{-2}$
D:	kleinste inw. diameter	m

De overeenkomst met de formule van Manning met $k_M = 71$ is goed (tabel VI-1).

Tabel VI-1. Overeenkomst tussen formule van Manning en de gegevens van Van der Beken.

kleinste inw. diameter (cm)	4	5	8
k_M berekend via (15)	68	69	71

c) Zuidema en Scholten (1971) vonden in O. Flevoland, dat de ribbelbuizen ook direct kunnen worden vergeleken met buizen van glad plastiek. Berekent men de drukhoogte h_x met behulp van (9) dan blijkt dat bij ribbelbuizen de gemeten waarden voor h_x gemiddeld 2.42 x zo groot zijn als de voor gladde buizen berekende.
Dit houdt in, dat de waarde a = 0.3164, die aan (9) ten grondslag ligt, voor plastiek ribbelbuizen ongeveer 2.42 x zo groot moet zijn, zodat voor ribbelbuizen a = 0.765.

d) Overeenkomstige beschouwingen over de hydraulische ruwheid van geribbelde buizen zijn gegeven door Huisman (1969). Volgens Huisman geldt voor dergelijke buizen:

$$\lambda = W \cdot \lambda_g$$

waarin λ_g de λ-waarde is voor een hydraulisch gladde buis, waarvoor formule (4) geldt:

$$\lambda_g = a\ Re^{-0.25} \qquad \text{met} \qquad a = 0.3164.$$

Voor geribbelde drainbuizen is dus blijkbaar W = 2.42.

e) Op grond van deze metingen is door Zuidema en Scholten een nomo-

gram vervaardigd (fig. VI-2), evenals een tabel, die voor de gangbare maten ribbelbuizen de maximaal te ontwateren oppervlakte aangeeft (tabel VI-2). In de praktijk worden deze oppervlakten gereduceerd met 25% voor enige verslibbing en wortelgroei.

Tabel VI-2. Maximale oppervlakte, te ontwateren met ribbelbuizen (in ha), zonder reductie voor enige verslibbing en wortelgroei.

kleinste binnendiameter mm	i = 0.5 o/oo		0.8 o/oo		1 o/oo		1.5 o/oo		2 o/oo	
	7 mm/etm	10 mm/etm	7	10	7	10	7	10	7	10
44	0.20	0.14	0.28	0.19	0.32	0.21	0.38	0.27	0.46	0.31
54	0.37	0.25	0.48	0.33	0.55	0.37	0.70	0.47	0.80	0.55
57	0.42	0.28	0.58	0.39	0.63	0.43	0.84	0.54	0.94	0.63
72	0.78	0.52	1.00	0.70	1.20	0.78	1.45	0.98	1.75	1.17

3. Helling van de drains.

a) In vlak terrein geeft men aan de drains in de regel enige helling: 10 à 20 cm/100 m (1-2 o/oo).

b) Bij een vol lopende reeks heeft deze helling geen invloed op de transportcapaciteit: deze wordt bepaald door het verschil in drukhoogte tussen begin en uitmonding (fig. VI-1).

c) Berekening van hellende drains geschiedt onder aanname, dat bij de ontwerp-afvoer boven het begin van de drainreeks geen water mag staan. Bij horizontale drains specificeert men de maximale drukhoogte bij het begin van de drain.

d) Bij de genoemde hellingen zijn de stroomsnelheden zo gering, dat geen belangrijk transport van gronddeeltjes plaats vindt. Men kan daarom drains ook wel geheel horizontaal leggen. Om redenen van uitvoeringstechniek geeft men echter de voorkeur aan enige helling.

4. Verstopping van drains.

Verstopping van drains kan worden veroorzaakt door:

a) Inkomende grond, vooral in zandgronden. Dit indringen van zanddeeltjes is te voorkomen door toepassing van een goed filtermateriaal.

b) IJzerverbindingen, vooral ferri-hydroxide $Fe(OH)_3$. Dit vormt een gelachtige bruine massa, die drains geheel kan verstoppen. Het neerslag ontstaat doordat opgeloste ferroverbindingen in de drain met zuurstof in aanraking komen en na oxydatie tot ferriverbindingen neerslaan. Deze verstopping treedt vooral op:
- in kwelgebieden
- in infiltratiegebieden, waar in de grond rondom de drains beurtelings oxydatie en reductie voorkomt
- in katteklei-gronden, waarin het ijzer zeer beweeglijk is.

c) Slib, vooral in Na-rijke kleigronden. In normale kleigronden is de accumulatie van slib in de drains een zeer langzaam proces. Bij het normale onderhoud wordt dit slib verwijderd.

d) Zwavel, ontstaan door oxydatie van H_2S tot H_2O en S (zwavelbacteriën). Vooral in veengronden treedt S op als een wit, vliezig neerslag, dat een enkele maal verstopping veroorzaakt.

e) Wortels, bij bouwland zeldzaam, vaker bij drainage van bos of onder windsingels.*) Bij niet te brede windsingels te voorkomen door het leggen van dichte buizen op bedreigde plaatsen (vaak toegepast bij sportvelden). Bij drainage van bos bleek, dat wortelgroei in drains vooral optrad als de buis gedurende lange tijd gedeeltelijk waterhoudend was. Storing door ingroei van wortels is het best te voorkomen door de drains regelmatig door te steken.

5. Onderhoud van drains.

a) Als preventieve maatregel: regelmatig doorsteken met doorsteekapparaat (plastiek buis met "krabber") ter verwijdering van slib, ijzerverbindingen en fijne wortels.

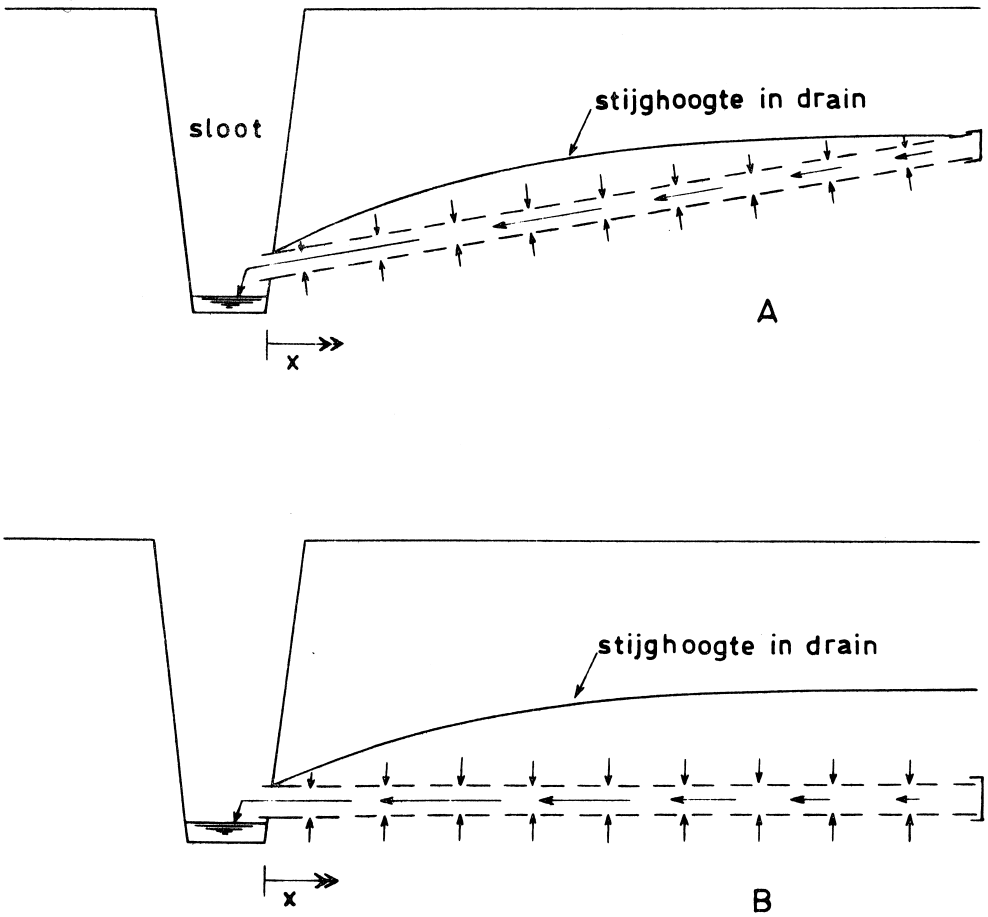
b) Bij geconstateerde verslibbing doorsteken ter verwijdering van lichte verstoppingen (ijzer, slib e.d.).

c) Doorspuiten met spuitkop bij zware verstoppingen. Hiervan twee uitvoeringen:
- lage druk 10 - 20 atm. 20 - 40 l/min.
- hoge druk 60 - 80 atm.

De lage-druk apparatuur is het eenvoudigst en het goedkoopst (6 à 12 ct/m') Alleen bij zeer zware verstoppingen (b.v. zandverstopping) is toepassing van hoge druk aan te bevelen.

---

*) In Suriname is wortelgroei van het groenbemestingsgewas Kudzu in drains gekonstateerd.



A : drain met helling, midden op de kavel
geen water boven de drain

B : horizontale drain

Fig. VI - 1 Drains als verzamelleiding

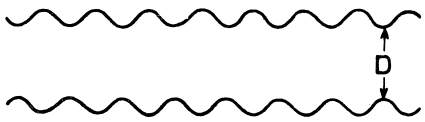
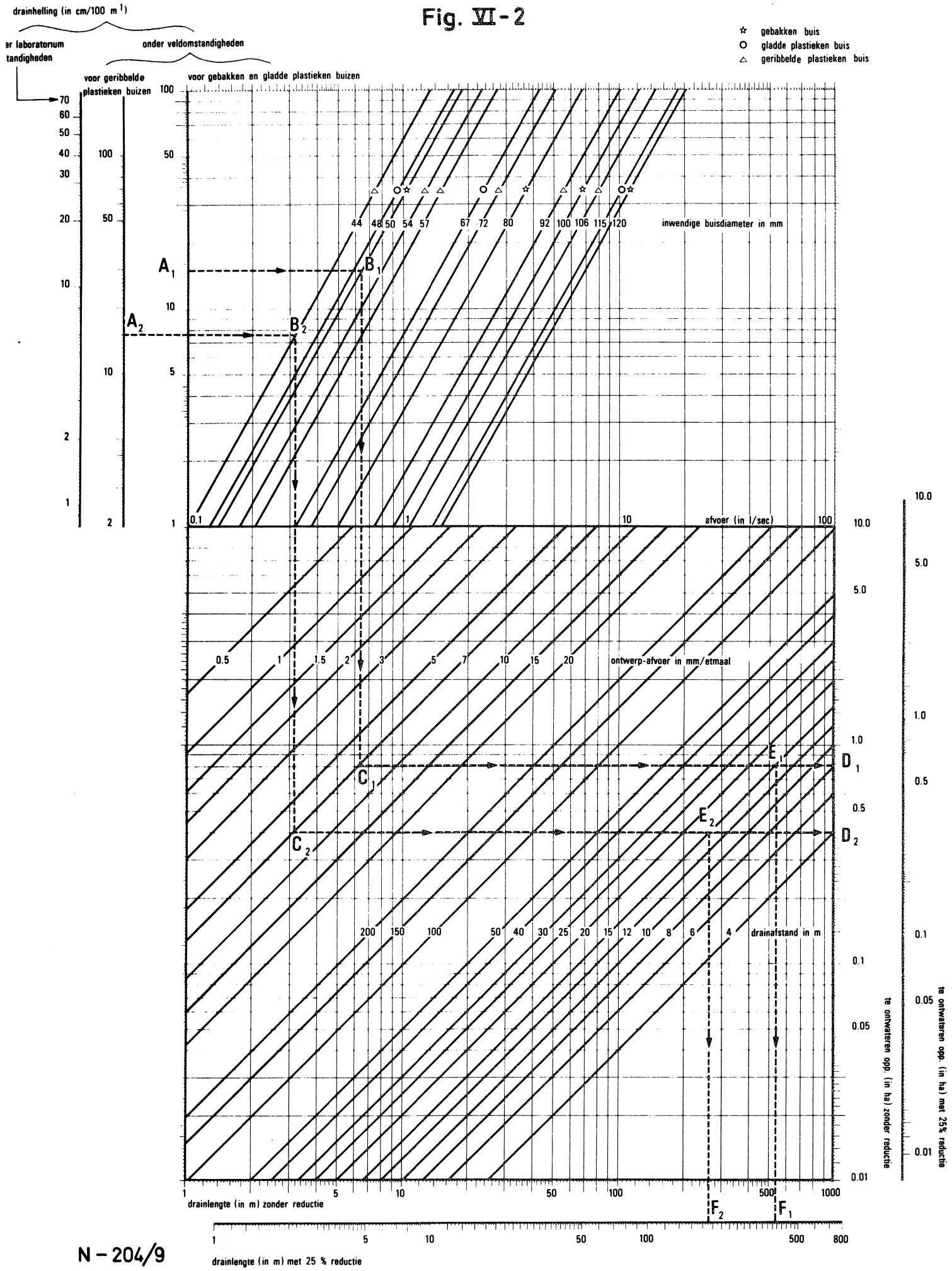


Fig. VI - 4 Kleinste inwendige diameter
van een ribbelbuis

Fig. VI-2



N – 204/9

MOMOGRAM VOOR DE BEPALING VAN DE MAXIMAAL TE ONTWATEREN OPPERVLAKTE EN DE MAXIMALE DRAINLENGTE VAN GEBAKKEN BUIZEN, GLADDE EN GERIBBELDE PLASTIEKEN BUIZEN BIJ UITEENLOPENDE HELLING, BUISDIAMETER EN ONTWERPAFVOER

toelichting

Met behulp van dit nomogram kan in eerste instantie de oppervlakte worden bepaald die een draineerbuis met een gegeven diameter en een gegeven helling maximaal kan ontwateren. Voor de gewoonlijk toegepaste drainafstanden kan voorts de toelaatbare drainlengte direct in het nomogram worden afgelezen.

Daar de afvoercapaciteit van geribbelde plastieken buizen aanzienlijk kleiner is dan van gebakken en gladde plastieken buizen is in het nomogram een aparte as voor de drainhelling van de geribbelde plastieken buizen opgenomen, vanwaaruit de te ontwateren oppervlakte en drainlengte voor deze buissoort bepaald kunnen worden. De te ontwateren oppervlakte en de drainlengte kunnen ieder worden afgelezen op twee assen. De ene as geeft de maximaal te ontwateren oppervlakte resp. de maximaal toelaatbare drainlengte aan, de andere 75% hiervan. Een reductie van 25% op de te ontwateren oppervlakte en dus ook op de toelaatbare drainlengte dient te worden toegepast, indien verwacht moet worden dat de drainage onder ongunstige omstandigheden zal plaatsvinden (kans op inslibbing, moeilijke uitvoering enz.).

De formule die één van de basiselementen vormt van dit nomogram, is aan de hand van laboratoriumproeven ontwikkeld door WESSELING (I.C.W. Wageningen).

De formule luidt:

$$h = 9{,}55.10^{-4}.a.D^{-4{,}75}.\left(\frac{q}{L}\right)^{1{,}75}.\left\{L^{2{,}75}-(L-X)^{2{,}75}\right\}$$

waarin h = drukhoogte berekend op een afstand X vanaf de uitmonding (in m)

a = coëfficiënt, afhankelijk van het type buis

D = draindiameter (in m)

q = debiet (in m^3/sec.)

L = drainlengte (in m)

X = afstand van de uitmonding tot het punt in de drainreeks waarvoor h wordt berekend.

De omwerking van de formule voor de veldomstandigheden, waardoor deze geschikt werd voor een in de praktijk bruikbaar nomogram, kon geschieden met behulp van metingen aan in het veld gelegde drainreeksen in Oostelijk Flevoland (Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders Kampen).

Er is uitgegaan van een (bij de ontwerpafvoer) volstromende, d.w.z. op ieder punt geheel gevulde buis.

Ten behoeve van het gebruik van het nomogram voor drainage in irrigatiegebieden zijn ook lage ontwerpafvoeren (0,5 tot 3 mm/etm.) en grote drainafstanden (tot 200 m) opgenomen. Aangezien bij zéér lage afvoeren een ander stromingsbeeld ontstaat, zou in die gevallen met een kleinere diameter kunnen worden volstaan dan het nomogram aangeeft. Voor de praktijk wordt aangeraden ook dan het nomogram volledig te gebruiken.

voorbeeld

(zie letters en gestreepte lijnen met pijlen in nomogram).

Hoeveel bedraagt de oppervlakte die door een drain van 5 cm diameter, gelegd onder een helling van 15 cm/100 m kan worden ontwaterd?

Op de verticale as zoekt men de helling van 15 cm/100 m op (A_1 voor gebakken en gladde plastieken buizen, A_2 voor geribbelde plastieken buizen) en vandaar gaat men langs een horizontale lijn naar rechts tot het snijpunt met de lijn van 50 mm buisdiameter (B_1, B_2). Vanaf dit punt gaat men in verticale richting naar de lijnen die de ontwerpafvoer in mm/etm. aangeven. Door het snijpunt C_1, C_2 van de verticaal met de lijn van 7 mm/etm. trekt men vervolgens een horizontale lijn. Het snijpunt van deze lijn met de verticale as geeft de maximaal te ontwateren oppervlakte aan (D_1, D_2).

Het onderste gedeelte van het nomogram biedt de mogelijkheid om de maximale drainlengte te bepalen bij gegeven buisdiameter en drainafstand. Bij een drainafstand van 15 m (E_1, E_2) bedraagt de toelaatbare drainlengte onder de eerder vermelde omstandigheden 540 resp. 250 m dan wel 400 resp. 180 m, afhankelijk van het niet of wel invoeren van een reductiefactor van 25% (F_1, F_2).

tabel

In onderstaande tabel zijn de maximale oppervlakten vermeld die door drains met de in het nomogram aangegeven diameters kunnen worden ontwaterd, bij ontwerpafvoeren van 7 en 10 mm/etm. en bij veel voorkomende hellingen van de drainreeksen.

Maximaal te ontwateren oppervlakte in ha per drain bij ontwerpafvoeren van 7 en 10 mm per etmaal en een helling van 5, 8, 10, 15 en 20 cm per 100 m (i resp. 0.5; 0.8; 1.0; 1.5; 2.0°/oo) met 25% reductie.

binnendiameter drain	i=0.5°/oo		i=0.8°/oo		i=1°/oo		i=1.5°/oo		i=2°/oo	
	mm/etmaal		mm/etmaal		mm/etmaal		mm/etmaal		mm/etmaal	
	7	10	7	10	7	10	7	10	7	10
gebakken buis										
50	0.32	0.22	0.41	0.29	0.47	0.32	0.61	0.41	0.72	0.49
80	1.13	0.83	1.5	1.05	1.76	1.16	2.18	1.46	2.6	1.8
120	3.45	2.3	4.2	2.8	5.1	3.4	6.45	4.4	9.75	5.1
gladde plastieken buis										
48	0.29	0.19	0.38	0.26	0.43	0.29	0.54	0.36	0.64	0.43
67	0.70	0.47	0.90	0.63	1.02	0.70	1.32	0.90	1.55	1.07
geribbelde plastieken buis										
44	0.15	0.10	0.21	0.14	0.24	0.16	0.29	0.19	0.34	0.23
54	0.27	0.18	0.36	0.25	0.40	0.27	0.50	0.35	0.59	0.41
57	0.31	0.21	0.43	0.29	0.47	0.32	0.62	0.40	0.70	0.47
72	0.58	0.39	0.78	0.52	0.87	0.58	1.1	0.72	1.3	0.87

RIJKSDIENST VOOR DE IJSSELMEERPOLDERS
WETENSCHAPPELIJKE AFDELING KAMPEN

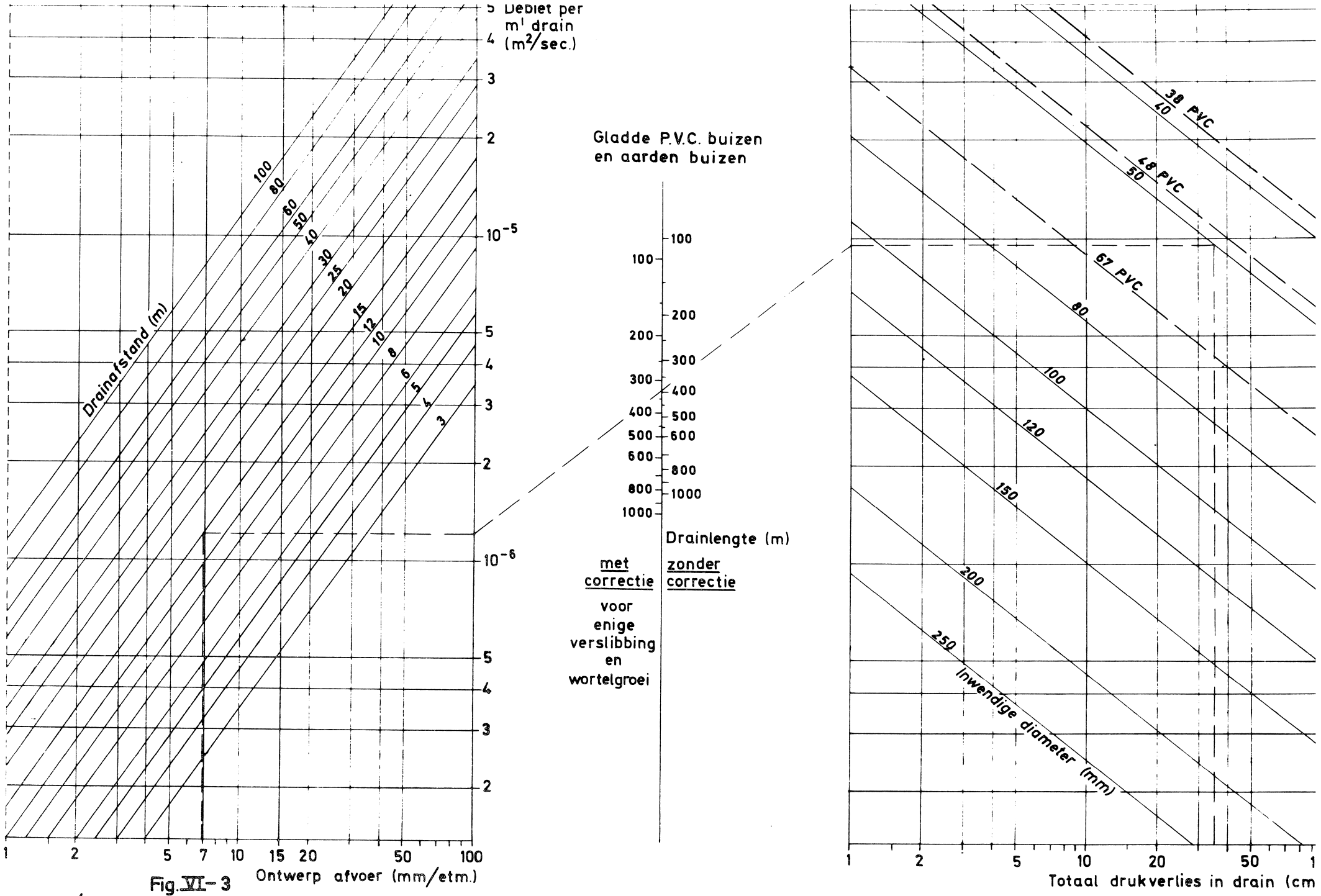


Fig. VI-3

N - 204/12 TOELAATBARE DRAINLENGTEN VOLGENS WESSELING, HOMMA EN ZUIDEMA. LANDBOUWHOGESCHOOL Afd. Cultuurtechnie

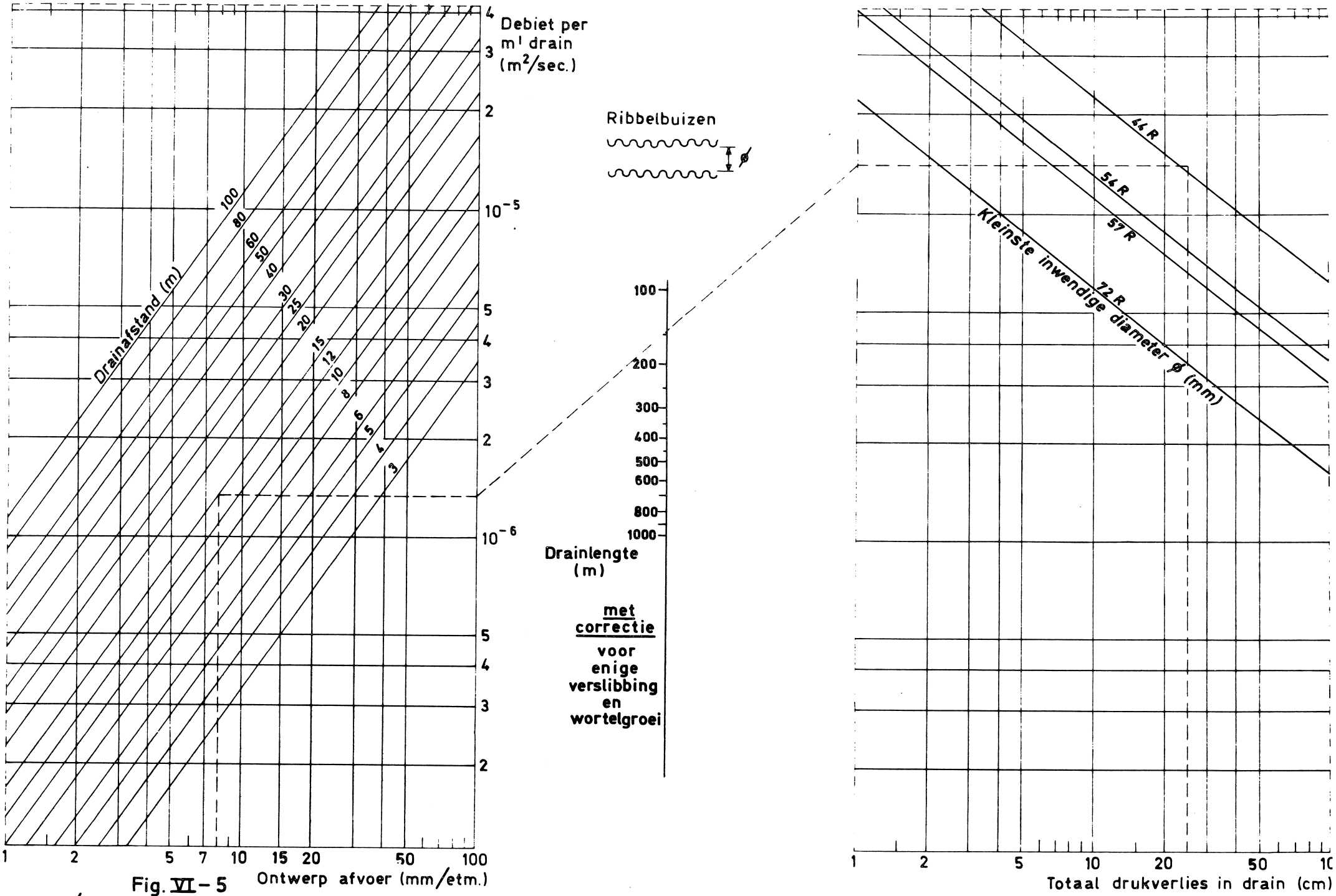


Fig. VI – 5

N – 204/11 TOELAATBARE DRAINLENGTEN VAN RIBBELBUIZEN VOLGENS VAN DER BEKEN e.a. LANDBOUWHOGESCHOOL Afd. Cultuurtechnie

VII. Bijzondere drainages.

1. Sportvelden.

1.1. Inleiding.

a) Sportvelden worden zeer intensief betreden, bij vele sporten (zoals voetbal) voornamelijk in de winter. Bij beroepssport moet als eis worden gesteld, dat het terrein onder vrijwel alle omstandigheden bespeelbaar moet zijn.

b) In tegenstelling tot bouwland is grondbewerking nauwelijks mogelijk; alleen "prikrollen" behoort tot de mogelijkheden. Organische bemesting is niet mogelijk, wormen zijn ongewenst en er kan geen tussenteelt met diep wortelende gewassen worden toegepast.
Daardoor is het moeilijk bij de intensieve betreding een voldoende doorlatendheid van de bovenlaag in stand te houden.

c) De investeringen in sportterreinen zijn zeer hoog (tot *f* 100.000.-- per ha, nog afgezien van gebouwen en tribunes). Van deze investeringen maken de kosten voor drainage slechts een gering gedeelte uit.

d) Om deze redenen is de drainage zeer intensief; gebruikelijk is een afvoercapaciteit van 15 mm/etm bij een grondwaterdiepte - midden tussen de drains - van 50 cm beneden maaiveld. De draindiepte is ten minste 80 cm, liefst 100 cm of meer, terwijl de drains boven het slootpeil moeten uitmonden. Is dit laatste in natte perioden niet mogelijk, dan wordt een onderbemaling (klein automatisch gemaaltje) aangebracht.

e) Wordt aan de genoemde eisen voldaan, dan treedt onder Nederlandse omstandigheden vrijwel nooit overlast van grondwater op. Toch komen in de praktijk hoge grondwaterstanden ook bij intensieve drainage nog wel voor op zeer ongunstige terreinen en wel als gevolg van:
- zeer geringe doorlatendheid (knipklei; sterk humeus, lemig zand)
- verdichtingen ontstaan als gevolg van de voor het egaliseren noodzakelijke diepe grondbewerking, vooral indien deze bij slechte weersomstandigheden wordt uitgevoerd.
- te hoge intreeweerstanden nabij de drains als gevolg van ondoorlatende drainsleuven of verstopping van het omhullingsmateriaal
- aanwezigheid van sterke kwel. Vooral in zandgebieden kan bij onderbemaling de kwel naar het aldus gevormde kleine "poldertje" zo sterk zijn, dat het effekt van de onderbemaling grotendeels te niet wordt gedaan.

f) Op zeer ongunstige terreinen kan daarom <u>ophoging met grof zand</u> nodig zijn om een voldoende doorlatend profiel of een gewenste hoogteligging te verkrijgen. Een zanddikte van 60 cm moet daarbij als minimaal worden beschouwd.

g) Tussen het maaiveld en de laag, waarin de drains zijn gelegd kunnen moeilijk doorlatende lagen voorkomen, die de vertikale waterbeweging belemmeren.
Voorbeelden:
- zware kleilagen (b.v. knipklei)
- lagen die door de bewerking zijn verdicht
- verdichtingen nabij het maaiveld als gevolg van de bespeling (zie h).

h) Door de zeer intensieve bespeling in een ongunstig seizoen wordt op klei- en veengrond en op humeuze zandgrond de <u>bovenlaag</u> verdicht. Dergelijke gronden zijn goed doorlatend, zolang zij een goede

structuur bezitten. Door het bespelen wordt deze structuur vernield, vooral op de meest intensief gebruikte gedeelten van het veld (middencirkel, doelgebieden); daardoor worden deze grondsoorten vrijwel ondoorlatend.

i) Een voldoende doorlatendheid van de bovenlaag wordt verkregen door verschraling of door afdekken met een zandlaag in kombinatie met een goede grasmat. Deze maatregelen bevorderen bovendien de gewenste stroefheid van het oppervlak, terwijl de grasmat aan dit oppervlak een zekere veerkracht verleent.

f) Bovendien is het gewenst, dat in de bovenlaag voldoende water kan worden geborgen. Een berging van 20 mm in de bovengrond is voldoende om ook zeer zware buien tijdelijk op te vangen (Stuurman, 1969).

1.2 Verschraling.

a) Zand is voldoende doorlatend, ook als de grond in dichte pakking verkeert. Een bezwaar is de gevoeligheid voor verstuiven en een gering vochthoudend vermogen; daardoor kan zuiver zand niet dienen als substraat voor een goede grasmat (zie echter 1.3).

b) Bij aanleg van sportvelden op klei- en veengronden past men verschraling toe, waarbij aan de bovenlaag de volgende eisen worden gesteld:
maximaal 10% leem (deeltjes < 50 μm)
" 5% humus

c) Bij het "verschralen" vermengt men de bestaande bovengrond over een dikte van 8 à 10 cm met aangevoerd zand. Aan dit zand worden de volgende eisen gesteld:
maximaal 5% leem (deeltjes < 50 μm)
maximaal 30% korrels boven 200 μm
bij verschraling van humeuze gronden: max. 1% humus.

Bij verschraling van humusarme gronden (klei, löss) kan een gering humusgehalte van het aangevoerde zand (tot 4%) een voordeel zijn.

d) Het verschralen bestaat uit:
- opbrengen van 8 - 12 cm zand
- enigszins vermengen met de onderliggende grond

Vroeger werd dit vermengen met de frees verricht, tegenwoordig vaak met een mechanisch aangedreven schudeg.
Op deze wijze wordt een geleidelijke overgang bereikt tussen de zandige bovenlaag en de ondergrond.

1.3 Bedekken met zand.

a) Aanbrengen van een zanddek is eenvoudiger en goedkoper dan verschralen. Het blijkt, dat bij een zanddikte van 10 - 20 cm de beworteling van het gras tot in de onderliggende beter vochthoudende grond doordringt, zodat ook in droge tijden een voldoende vochtvoorziening wordt verkregen.

b) Een zanddikte van 10 à 20 cm is in de regel voldoende om de gewenste berging van 20 mm te verkrijgen.

c) Grof zand (b.v. rivierzand met M - 50 = 300 à 400 µm) voldoet niet; het heeft een te geringe mechanische stabiliteit en blijft daardoor "mul". Deze stabiliteit is te bepalen met een z.g. Florida-proef.
Dekzand is in dit opzicht veel gunstiger, vooral als het enigszins humeus of leemhoudend is.

d) Evenals goed verschraalde gronden behouden dergelijke zanddekken onder alle omstandigheden (behalve bij dooi) een voldoende doorlatendheid.

1.4 Grasmat

a) Sportvelden worden ingezaaid met een grasmengsel; hiervoor neemt men grassen, die resistent zijn tegen betreding en tegen frequent maaien en die bovendien een dichte en vlakke zode vormen. Een voorbeeld (Rassenlijst 1971) geeft tabel VII-1.

Tabel VII - 1. Grasmengsels voor sportvelden

	Normale en weinig vocht-houdende gronden	Zeer droge gronden
mengsel	SV 4	SV 5
Veldbeemdgras	60%	50%
Engels raaigras weidetype	30%	20%
Timothee weidetype	10%	-
Uitlopervormend roodzwenk	-	20%
Gewoon roodzwenk	-	10%
Zaaizaad kg/ha	80-120	80-120

Voor hockeyvelden komt een mengsel van 60% Engels raaigras en 40% veldbeemdgras in aanmerking.

b) Om een goede groei te verkrijgen wordt reeds bij de aanleg een zware bemesting toegepast (vooral fosfaat) die door de bovenlaag wordt vermengd.
Op sterk verschraalde humusarme gronden of bij zanddekken kan stikstofgebrek optreden, omdat er opbouw van humus (die N bevat) plaats vindt.
Bij goed ontwaterde zandige grond wordt op den duur een evenwicht tussen humusopbouw en -afbraak bereikt bij een gehalte van ongeveer 4% organische stof in de bovengrond. Is het humusgehalte

lager, dan overweegt de opbouw waarbij veel N wordt vastgelegd. Door deze humusopbouw wordt het humusgehalte van de zode vaak te hoog, waardoor versmering gaat optreden bij bespeling in natte perioden. Dit moet worden tegengegaan door het regelmatig opbrengen van een zandlaagje (½ à 1 cm per jaar): "topdressing". Bemesting van sportvelden dient te geschieden met kunstmest; alleen bij de aanleg worden wel organische meststoffen toegepast.

2. Kampeerterreinen.

a) Kampeerterreinen worden alleen in het zomerhalfjaar gebruikt. Omdat ook in natte zomers het grondwater voldoende diep moet blijven worden desondanks de ontwateringseisen gelijk gesteld aan die voor sportvelden:
afvoer van 15 mm/etm en een grondwaterdiepte (midden tussen de drains) van ten minste 50 cm beneden maaiveld.

b) In de zomer komen hogere regenintensiteiten voor dan in de winter (in Nederland soms boven 2 mm/min). Dergelijke buien kunnen zelfs op stuifzand bovengrondse afvoer en tijdelijke plasvorming veroorzaken.
Bovendien moet het water, dat van tenten en caravans afstroomt in de omgeving daarvan de grond binnendringen of zonder hinder te veroorzaken wegstromen; dit versterkt de eisen aan de infiltratiesnelheid van de grond.

c) Op klei- en veengrond is verschraling of aanbrengen van een zanddek gewenst voor het verkrijgen van voldoende draagkracht en stroefheid. Toch is deze maatregel niet voldoende om tijdens zware buien tijdelijke wateroverlast te voorkomen.

d) Het drainagestelsel moet daarom worden aangevuld met een systeem van oppervlakte-ontwatering. Men geeft aan de tentplaatsen enige ronding en laat het overtollige water door brede, ondiepe laagten afstromen naar een sloot of naar een plantstrook (waar het zonder bezwaar kan infiltreren).

e) Bij intensief gebruikte terreinen kan men deze laagten (of greppels) vervangen door "molgoten" (betonnen goten, voorzien van deksel met openingen).

f) Wegen en paden moeten tonrond worden gelegd en voorzien van een afwatering aan de zijkanten (molgoot of drainsleuf, tot aan maaiveld opgevuld met grof materiaal). Een variant is een hol liggend pad met molgoot in het midden.

3. Grasland.

a) Slecht ontwaterd grasland op klei-, veen- of humeuze zandgrond is zeer gevoelig voor vertrapping door het vee. Ook hier zou bezanding een voordeel zijn, maar in vele gebieden is deze maatregel te kostbaar.

b) Ontwatering door drains werd vroeger weinig, maar thans in toenemende mate toegepast. Daardoor wordt het kostbare onderhoud van een greppelsysteem vermeden en een betere ontwatering bereikt. Het risiko van vertrappen wordt daarbij veel geringer.

c) Op zware klei kan ook bij drainage nog een verdichting van de bovengrond optreden als gevolg van beweiding in natte perioden, vooral bij jong grasland. Hierdoor ontstaat bovengrondse afvoer, die tot vorming van plassen en verdere vertrapping aanleiding kan geven.

d) Bestrijding is mogelijk door:
- een greppelsysteem dat nu alleen deze bovengrondse afvoer moet verzorgen
- ronde akkers: in de tussenliggende laagten wordt een afscheiding aangebracht. Hier vindt dus geen vertrapping plaats, waardoor het afgevoerde water gemakkelijk in de grond kan dringen.

e) Goede ontwatering van grasland bestrijdt de leverbotziekte

bij schaap en rund (schade in Nederland ongeveer *f* 150 mill. per jaar). De parasiet heeft een tussengastheer, het slakje Lymnea truncatula, dat in plassen en in slecht onderhouden greppels voorkomt.

4. Bouwterreinen en bebouwde kommen.

a) Vroegere bebouwing is voornamelijk aangelegd op van nature droge plaatsen (terpen, oeverwallen van rivieren, iets hogere gedeelten in de zandgebieden). Tegenwoordige uitbreidingen vaak op van nature weinig geschikte terreinen.

b) Bouwterreinen worden in lage gebieden veelal opgehoogd met zand: dit is kostbaar. Vaak kan met een geringere ophoging worden volstaan, indien het terrein wordt gedraineerd.

c) Afvoereis veiligheidshalve 10 mm/etm bij de volgende drooglegging:

Bouwterreinen, algemeen	0.70 m beneden maaiveld
Gebouwen	0.20 m beneden vloer van kruipruimten
Industrieterreinen	1.00 m beneden maaiveld

d) Meestal wordt samengestelde drainage toegepast. Uitmonding bij voorkeur op open water (b.v. op singels of bergingsvijvers) of op een bemalen put. Het waterpeil dient ten minste 1.30 à 1.50 m beneden maaiveld te liggen i.v.m. wrijvingsverliezen in lange hoofddrains. Afwatering op riolering is minder gewenst; steeds terugslagklep aanbrengen (waarom ?).

e) Voor drainage van kruipruimten onder gebouwen (fig. VII-1) is door Reynders een variant van de formule van Ernst toegepast. Rondom het gebouw wordt een drain gelegd; omdat onder het gebouw geen neerslag valt, ontvangt deze drain alleen water afkomstig van de buitenzijde. Door de radiale weerstand van de drain zal echter ook onder het gebouw een opbolling m ontstaan. Toepassing

van de formule van Ernst levert (vgl. IV-1):

$$m = \Delta h_{rad} = NLW_r$$

waarbij nu L = A (breedte vanggebied van de drain buiten het gebouw)

Voor geval IV (drainsleuf reikend tot in doorlatende ondergrond of slecht doorlatende laag afwezig) geldt:

$$W_r = \frac{1}{\pi k} \ln \frac{D}{u}$$

Voor een drain met straal r_o, die alleen aan de onderzijde werkzaam is geldt:

$$u = \pi r_o$$

m :	opbolling onder gebouw	m
N :	af te voeren neerslag	$m.etm^{-1}$
A :	breedte vanggebied drain buiten gebouw	m
W_r:	radiale weerstand	$etm.m^{-1}$
k :	doorlaatfaktor	$m.etm^{-1}$
D :	dikte watervoerende laag beneden drainniveau	m
u :	natte omtrek ontwateringsmiddel	m
r_o:	straal drain	m

f) Aan de buitenzijde van het gebouw geldt voor de opbolling (bij verwaarlozing van Δh_{vert}):

$$M = \Delta h_{hor} + \Delta h_{rad} = \Delta h_{hor} + NAW_r$$

Voor Δh_{hor} geldt in dit geval van eenzijdige stroming volgens Darcy:

$$|q| = k(D + M/2) \frac{dh}{dx}$$

$$dh = \frac{|q|}{k(D + M/2)} dx \qquad \text{waarbij } |q| = Nx$$

$$\text{en } o \leq x \leq A$$

$$\Delta h_{hor} = \frac{N}{k(D + M/2)} \int_{o}^{A} x\,dx = \frac{NA^2}{k(2D + M)}$$

zodat

$$M = \frac{NA^2}{k(2D + M)} + NAW_r$$

met

M: opbolling buiten gebouw m

Hieruit is de afstand A te bepalen, waarover de drain werkzaam mag zijn om niet te veel opbolling onder het gebouw te veroorzaken.

g) In ingewikkelder gevallen kan men met voordeel gebruik maken van een elektrisch model.

h) Veelal worden dergelijke drainages zonder berekening aangelegd. Bij belangrijke gebouwen brengt men vaak een dubbele ringleiding aan: twee drains op ongeveer 1 m afstand.

5. Diepe drainage als bronbemaling.

a) Met behulp van speciale draineermachines, uitgerust met een lange graafketting is het mogelijk drains op veel grotere diepte te leggen dan voor landbouwdoeleinden gebruikelijk is (tot 4 à 5 m beneden maaiveld). Het is daardoor mogelijk drains te gebruiken als horizontale bronbemaling; deze is eenvoudiger en vooral sneller aan te brengen dan de klassieke bemaling met vertikale filters.

b) Als drainbuis wordt PVC ribbelbuis gebruikt, met nylondoek als omhulling. De einden van de buis zijn niet geperforeerd en dienen als zuigbuis.

c) Toepassingen:
- graven van diepe sleuven t.b.v. de aanleg van transportleidingen voor aardgas
- graven van zeer diepe tochten in zandgrond (Lauwerszee)

- drainage van bouwterreinen in zandgebieden. De diepe drainage kan als eerste ontwateringsmiddel in het terrein worden gelegd en daardoor als bronbemaling dienen voor de later te leggen riolering. Later verzorgt de diepe drainage de ontwatering van het terrein.

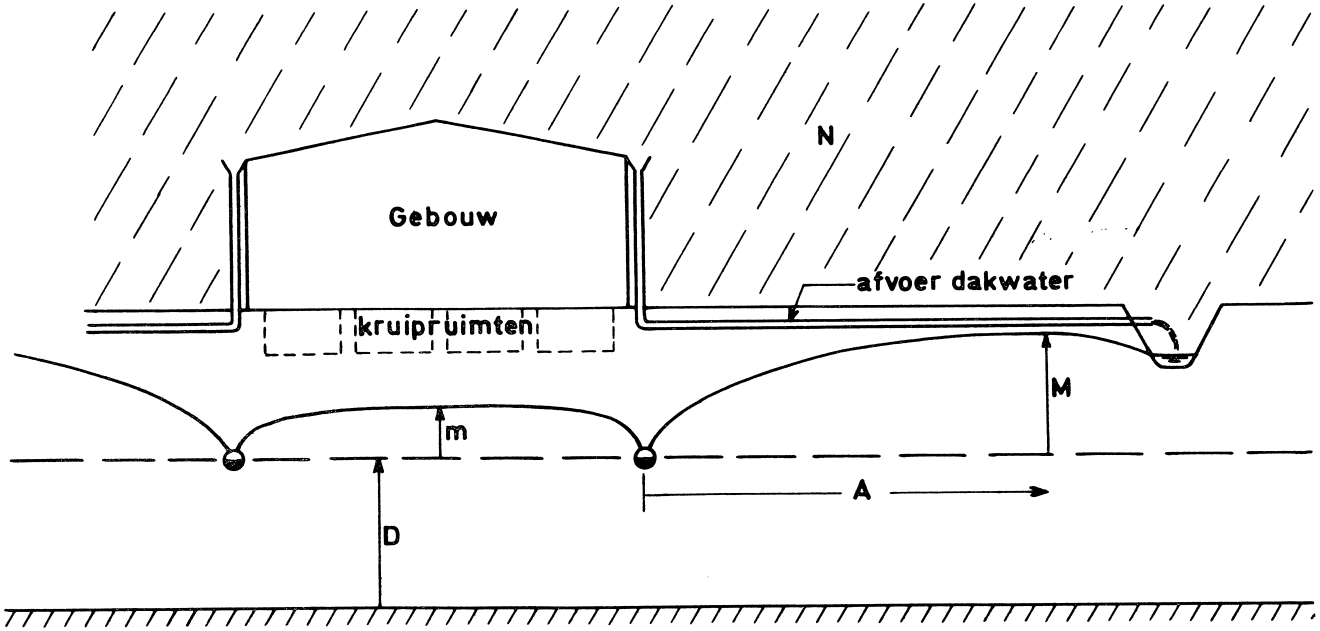


Fig. VII-1 Drainage van een gebouw (schematisch)

VIII. Afwatering.

1. Inleiding.

a) Het afwateringsstelsel bestaat uit sloten en grotere waterlopen. In het polderland zijn dit gegraven tochten en kanalen, in de hogere gedeelten van Nederland al dan niet verbeterde beken.

b) In Nederland is een afwateringsstelsel overal aanwezig, behalve in nieuwe polders. De waterstaatskaart geeft een overzicht van dit stelsel: in het polderland is dit zeer ingewikkeld geworden, op de hoge gronden is het beeld eenvoudiger, omdat hier de afvoer minder kunstmatig is.

c) Vele systemen voldoen niet meer aan de eisen. In de hogere delen is de kapaciteit vaak onvoldoende, in het polderland zijn de eenheden te klein voor een goed beheer. De toenemende verstedelijking oefent grote invloed uit op deze systemen.

d) Het beheer geschiedt door waterschappen, publiekrechtelijke lichamen, die binnen hun gebied de zorg voor de waterhuishouding uitoefenen (I - 3).

e) Bij een waterbeheersingsplan worden vastgesteld:
- de tracé's
- de peilen
- de hoogwaterlijn
- de maatgevende afvoer
- de afmetingen van de waterlopen
- de benodigde kunstwerken

2. Tracering van waterlopen.

a) De tracé's worden voornamelijk bepaald door de hoogteligging, daarnaast door planologische en andere eisen.
Een gedetailleerde hoogtekaart vormt de basis van het ontwerp.

b) In de hogere delen van Nederland volgen de waterlopen van nature reeds de laagste plekken. In detail is hun beloop vaak ver van ideaal: vele beken verlopen sterk kronkelend. De beken werden vroeger genormaliseerd tot vrijwel rechte kanalen. Indien zij voor natuur en landschap van grote betekenis zijn, worden thans vaak omleidingskanalen aangelegd: bij lage afvoer wordt het oude tracé gebruikt, bij hoge afvoer volgt het meeste water de nieuwe leiding.

c) In vlak polderland is men veel vrijer in de keuze van het tracé.Door inklinking kunnen ook hier verschillen in hoogteligging optreden, waardoor sommige oude tracé's thans technisch niet meer voldoen. Vaker voldoen de tracé's niet meer aan planologische eisen.
Men moet steeds rekening houden met ongelijke inklinking en dus niet uitgaan van de huidige hoogteligging, maar van de te verwachten toekomstige maaiveldshoogte. De inklinking wordt bepaald door:
- de bodemgesteldheid
- de te handhaven peilen,

d) Bij ingrijpende wijzigingen in de tracering is meestal ruilverkaveling onmisbaar. Omgekeerd geeft ruilverkaveling vaak aanleiding tot een geheel nieuwe opzet van het afwateringsstelsel. Deze opzet is vervat in het "plan van wegen en waterlopen".
In nieuwe polders staat een dergelijk plan bekend als "verkavelingsplan".

3. Vaststelling van peilen.

a) In polders streeft men naar handhaving van een bepaald polderpeil. Voor gedraineerd bouwland stelt men meestal de eis, dat de drains boven water moeten uitmonden, ook in natte tijden. In graslandgebieden zijn de peilen vaak zeer hoog (vooral bij veengronden; dit staat in verband met inklinking).

b) Voorbeeld: in de Zuiderzeepolders monden de drains uit op 1.20 m. beneden maaiveld. Het polderpeil is tenminste 1.40 m. beneden maaiveld: de toelaatbare overschrijding is dus 0.20 m. Dit kriterium is intuïtief vastgesteld (Commissie Lovink, 1924) en later door onderzoek voor bouwland op klei bevestigd.

c) Op andere grondsoorten is een te diep peil even ongewenst als een te hoog peil; er bestaat een optimale waterstand, afhankelijk van:
- landgebruik: grasland, bouwland, boomgaard
- bodemgesteldheid: grof zand, veen: vrij hoog (50-80 cm)
  kleigronden diep (> 100 cm)
- graad van mechanisatie: toenemende mechanisatie eist vaak diepere peilen.

d) Optimale waterstanden kunnen afgeleid worden uit de relatie opbrengst-ontwateringsdiepte. Niet elk perceel zal een eigen optimale waterstand kunnen krijgen: men zoekt een kompromis, dat als geheel optimaal is. In polders vaak enige differentiatie mogelijk door afdelingen te kreëren, ieder met eigen peil. Erg lage stukken van beperkte omvang kan men voorzien van een onderbemaling.

e) In polders is het handhaven van de peilen in de regel eenvoudig: in natte tijden wordt water uitgemalen, in droge tijden uit de omgeving water ingelaten. Bij een goede inrichting zijn de peilschommelingen gering (enkele decimeters). Desgewenst kan men ook opzettelijk variaties aanbrengen (zomer- en winterpeil).

f) In hellende gebieden is peilbeheersing moeilijker. Bij natuurlijke beken zijn de winterstanden bij hoge afvoer veel te hoog, de zomerstanden redelijk. Worden beken verbeterd, dan dreigen zij 's zomers te lage peilen te verkrijgen.

g) Door stuwen kan men dit tegengaan:
- landbouwkundige stuwen handhaven hogere peilen die nodig zijn voor de landbouw: in de beekdalen vindt men vaak grasland op gronden, die gevoelig zijn voor verdroging.
- technische stuwen handhaven hogere peilen, nodig om technische redenen, voornamelijk ter voorkoming van te hoge stroomsnelheden.

h) Met regelbare stuwen bereikt men een zekere waterkonservering: men begint in het voorjaar het peil te verhogen om in de zomer nog redelijke waterstanden te kunnen handhaven.
In droge zomers gelukt dit vaak niet door te geringe afvoer van water uit de bovenstroomse gedeelten van het stroomgebied.

i) Inlaten van water is moeilijker dan in het polderland en wordt alleen in gunstige situaties toegepast.

j) Door deze oorzaken zijn de peilschommelingen in hellende gebieden veel groter dan in het polderland.

4. Vaststelling van de hoogwaterlijn.

a) Tijdens natte perioden zijn de afvoeren - en dus ook de waterstanden - hoger dan normaal. Bij maatgevende afvoer stijgt het water in de leidingen tot de hoogwaterlijn (HW-lijn).
Dit mag geen aanleiding geven tot ernstige schade, zodat ook bij maatgevende afvoer nog een zekere drooglegging is vereist.

b) Deze drooglegging wordt bepaald door:
- landgebruik
- bodemgesteldheid

- te nemen risiko

Een voorbeeld geeft tabel VIII-1.

c) Soms specificeert men ook nog de drooglegging bij een afvoer, die de helft bedraagt van de maatgevende afvoer. Terwijl de maatgevende afvoer eens per jaar verwacht mag worden, heeft deze halve afvoer een frequentie van ongeveer 15x per jaar (tabel VIII-1)

Tabel VIII-1. Drooglegginggseisen in Noord-Brabant in cm beneden maaiveld

grondsoort	gebruik	drooglegging bij maatgevende afvoer[1)]	drooglegging bij halve maatgevende afvoer
klei	bouwland	80 (60)[3)]	130 (110)
	grasland	60 (40)	100 (80)
	tuinbouw	80 (60)	130 (110)
zand	bouwland	50 (30)	100 (80)
	grasland	50 (30)	100 (80)
	tuinbouw	80 (60)	120 (100)

1) maatgevende afvoer: frequentie 1 x per jaar
2) halve maatgevende afvoer: frequentie ongeveer 15 x per jaar
3) getallen tussen ( ) gelden voor de laagste plekken.

d) In de Zuiderzeepolders eist men voor bouwland op klei een drooglegging van 120 cm bij maatgevende afvoer.

e) Over de schade, die bij kort durende overschrijding van deze normen optreedt is nog weinig bekend. Ervaring en onderzoek wijzen uit, dat overstroming van grasland in de winter weinig schade veroorzaakt, in de zomer veel schade teweegbrengt (ijsbanen, uiterwaarden, potproeven). In voorjaar en herfst veroorzaken hoge

waterstanden op vele grondsoorten vertrapping van de zode door het vee (humeus zand, veen, klei).
Op bouwland belemmeren hoge waterstanden een goede werking van de drainage.

f) Kombinatie van droogleggingseisen en hoogtekaart geeft nu de HW-lijn.

g) Men onderscheidt bij een waterloop:
verval = verschil in hoogte van de waterspiegels op twee punten van een leiding (m)
verhang= verval per eenheid van lengte (dimensieloos)
Het verhang wordt vaak uitgedrukt in 0/00 (m/km).

h) In vlakke gebieden is het verhang van de HW-lijn gering (b.v. 0.05 m/km, in de Zuiderzeepolders nog minder). Dit leidt tot grote leidingen en lage stroomsnelheden.
Meestal is er daarbij geen gevaar voor grondtransport.

i) In hellende gebieden is het verhang meestal veel groter (b.v. 0.5 m/km of meer); dit leidt tot kleinere waterlopen met grotere stroomsnelheid. Men moet vaak stuwen plaatsen:
- ter voorkoming van te lage waterstanden bij geringe afvoer in de zomer (landbouwkundige stuwen)
- ter voorkoming van te hoge stroomsnelheden, die grondtransport teweeg zouden brengen (technische stuwen)
Vaak dient een stuw voor beide doeleinden tegelijk.

5. Vaststelling van de maatgevende afvoer.

a) In het waterlopenplan worden de eenheden systematisch genummerd, beginnend bij het verst bovenstroomse uiteinde. De leidingen worden verdeeld in leidingvakken.
Als grens tussen leidingvakken neemt men:
- een knooppunt

- een wegkruising
- een stuw

Waar een zijleiding in de hoofdleiding uitmondt, verspringt de nummering naar het verst bovenstroomse uiteinde van deze zijleiding (fig. VIII-1). Lange leidingvakken worden soms in twee delen gesplitst.
Door deze nummering "van boven naar beneden" behoudt men al werkend een overzicht over de hoeveelheden toestromend water.

b) De hoeveelheid water, die door een leidingvak stroomt, hangt af van:
- de hoeveelheid water uit bovenstrooms gelegen vakken (m^3s^{-1}), vermeerderd met:
- de hoeveelheid water, die rechtstreeks op het betreffende vak wordt geloosd (m^3s^{-1})

Deze laatste hoeveelheid wordt berekend uit:
- de oppervlakte van het op het leidingvak afwaterende onderdeel (ha), vermenigvuldigd met:
- de maatgevende afvoerintensiteit*) van dit afwaterende onderdeel ($m^3s^{-1}ha^{-1}$). Meestal wordt deze afvoerintensiteit uitgedrukt in $ls^{-1}ha^{-1}$ (liters per seconde per hectare) of in m^3s^{-1} per 100 ha. Daarbij komt 1 $ls^{-1}ha^{-1}$ overeen met 8.64 mm/etm.

c) De afwaterende oppervlakte is in de meeste gevallen te vinden door de <u>waterscheidingen</u> te bepalen. In gebieden met zichtbare afvoer zijn deze meestal eenvoudig vast te stellen.
Moeilijker is deze omgrenzing in gebieden zonder zichtbare afvoer: de ondergrondse waterscheiding behoeft dan niet samen te vallen met de topografische waterscheiding en kan alleen uit een isohypsenkaart van het grondwater worden afgeleid (fig. VIII-2).

---

*) de maatgevende afvoerintensiteit wordt ook wel genoemd afvloeiingsfaktor, afvoercoëfficient, afvoernorm of specifieke afvoer.

Doordat dergelijke gebieden een zeer lage afvoerintensiteit bezitten, is een kleine fout niet ernstig.

d) Voor de bepaling van de maatgevende afvoerintensiteit bestaan verschillende methoden:
- empirische methoden
- statistische analyse van gemeten afvoeren
- theoretische methoden, gebaseerd op de regenduurlijn
- idem, gebaseerd op analyse van het afvoerproces (i.c. niet-stationaire grondwaterstroming)

Wij zullen de laatstgenoemde, meest recente methode het eerst bespreken.

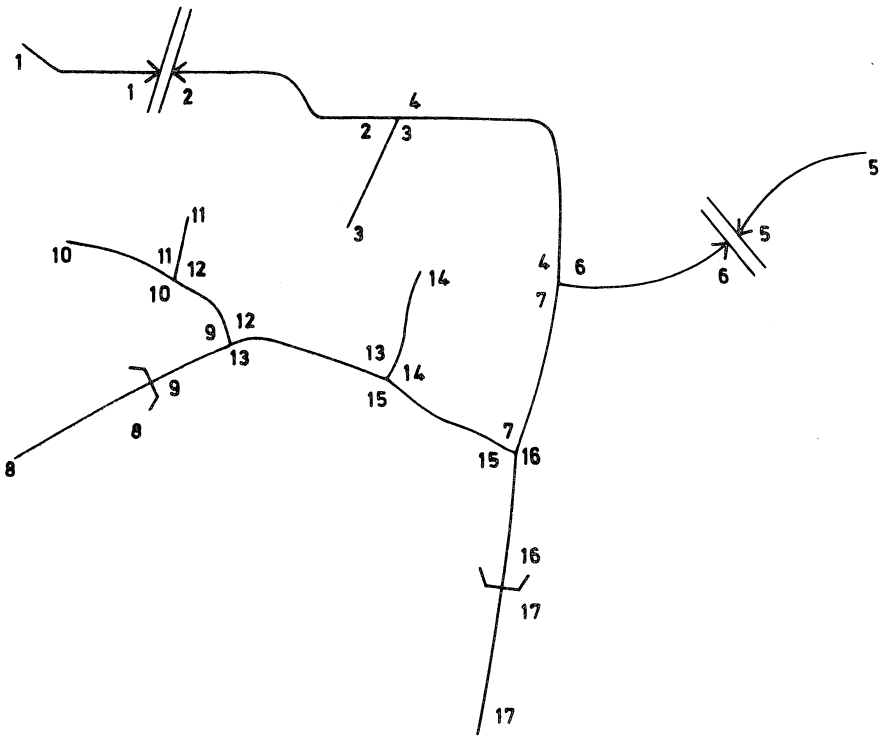


Fig. VIII – 1 Nummering van leidingvakken.

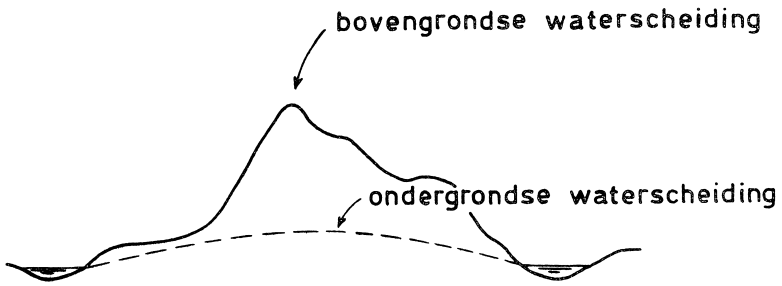


Fig. VIII – 2 Bovengrondse en ondergrondse waterscheiding in een heuvelrug zonder zichtbare afvoer.

IX. Het niet-stationaire afvoerproces.

1. Inleiding.

a) In Nederland verloopt de afvoer van neerslag vrijwel steeds door de grond. Hierdoor zijn Nederlandse beschouwingen over de afvoer bijna steeds gebaseerd op de afvoer van grondwater. In het buitenland (maar ook in steden en kassengebieden en tijdens dooi) is bovengrondse afvoer vaak belangrijker dan grondwaterafvoer.

b) Afvoer van neerslag is een niet-stationair proces; bij afvoer van grondwater speelt de berging van water in de grond een belangrijke rol.

c) Bij afvoer van neerslag door de grond kan de stroming volgens Ernst worden geschematiseerd tot:
1^{e}) vertikale stroming tussen de drains of kanalen
2^{e}) horizontale stroming naar de drains of kanalen
3^{e}) radiale stroming nabij de drains of kanalen
4^{e}) intrede van water in de drains of kanalen.

d) Elk van deze komponenten ondervindt daarbij een zekere weerstand. In de meeste gevallen is de vertikale weerstand het geringst: wij zullen deze verwaarlozen. Voorts worden de radiale- en de intreeweerstand samengevoegd en nabij de drain gekoncentreerd gedacht.

e) Er zijn nu voor de niet-stationaire stroming twee grensgevallen te onderscheiden:
- alleen de radiale weerstand (en de intreeweerstand) zijn van betekenis: de horizontale stroming verloopt onbelemmerd
- alleen de horizontale stroming ondervindt weerstand: de radiale- en intreeweerstand zijn gelijk aan nul

In het algemene geval zijn beide soorten van weerstanden van betekenis en zal de stroming zich tussen deze grensgevallen in-

stellen.

2. Alleen radiale- en intreeweerstand van betekenis.

2.1. Het model van De Zeeuw en Hellinga.

a) Een reservoir R heeft een oppervlak O: het kan leeg lopen door een capillair buisje K (fig. IX-1). Dit buisje vertegenwoordigt de radiale- en intreeweerstand nabij de drains of kanalen.

b) Als het buisje niet te wijd is, is de stroming door dit buisje laminair en is het debiet Q evenredig met de drukhoogte m.

$Q = c.m$ — Q: debiet m^3/etm; m: drukhoogte m

Per eenheid van oppervlakte is de afvoerintensiteit

$q = \frac{Q}{O} = \alpha m$ — q: afvoerintensiteit m/etm; α: evenredigheidskonstante etm^{-1}

c) Op het tijdstip t = 0 begint een regenval p (m/etm). De waterbalans gedurende een tijd dt is dan:

$(p-q) \cdot dt = dm$

of

$$(p - \alpha m)\, dt = dm \; ; \quad \frac{dm}{p - \alpha m} = dt \qquad (1)$$

$$-\frac{1}{\alpha} \ln (p - \alpha m) = t + c_1 ; \; \ln (p - \alpha m) = -\alpha t + c_2$$

$$p - \alpha m = e^{-\alpha t + c_2} = c_3 \cdot e^{-\alpha t}$$

Als $t = 0$ is $q = q_0$: hieruit volgt $c_3 = p - q_0$

$$p - q = (p - q_0) \cdot e^{-\alpha t}$$

of

$$\boxed{q = q_0 e^{-\alpha t} + p\,(1 - e^{-\alpha t})} \qquad (2)$$

De constante α (etm^{-1}) wordt <u>reaktiefaktor</u> genoemd.

d) Als de neerslag niet konstant is, kan men het neerslagpatroon opgebouwd denken uit konstante regens, die positief of negatief kunnen zijn (tabel IX-1).

Tabel IX-1. Analyse van een regenpatroon.

etm.nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
mm neerslag	0	10	5	8	7	0	0	0
analyse p1	0	0	0	0	0	0	0	0
p2		+10	+10	+10	+10	+10	+10	+10
p3			- 5	- 5	- 5	- 5	- 5	- 5
p4				+ 3	+ 3	+ 3	+ 3	+ 3
p5					- 1	- 1	- 1	- 1
p6						- 7	- 7	- 7

Voor elke komponent kan men de reaktie van het reservoir berekenen volgens (2), waarbij t de tijd is verstreken sinds het begin van optreden van deze komponent.
Omdat de differentiaalvergelijkingen (1) lineair is, mag men de uitkomsten optellen: beginsel van <u>superpositie</u> (tabel IX-2).

e) Uit tabel IX-2 blijkt, dat het reservoir het aanvoerpatroon dempt en vervormt (fig. IX-2)

f) Deze rekenwijze is echter omslachtig. Een veel eenvoudiger beschouwing wordt verkregen door de afvoer dag voor dag te bepalen.
Voor t = 1 wordt (2):

$$q_s = q_{s-1} \cdot e^{-\alpha} + p_s \, (1 - e^{-\alpha}) \qquad (3)$$

q_s: afvoer op einde van dag s (mm/etm)
q_{s-1}: " " " " " s-1 (")
p : neerslag gedurende dag s (")

Stellen wij $e^{-\alpha} = \varepsilon$, dan wordt dit:

$$q_s = q_{s-1} \cdot \varepsilon + p_s (1 - \varepsilon) \qquad (4)$$

Dit geldt voor elke waarde van de index s. Een voorbeeld geeft tabel IX-3.

Tabel IX-2. Berekening van de afvoer van een reservoir met $\alpha = 0.5$

etm.nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	
t	0	1	2	3	4	5	6	7	8
αt	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
$e^{-\alpha t}$	1.000	0.607	0.368	0.223	0.135	0.082	0.050	0.030	0.018
$1-e^{-\alpha t}$	0.000	0.393	0.632	0.777	0.865	0.918	0.950	0.970	0.982
$q_0 = 1$	1.00	0.61	0.37	0.22	0.14	0.08	0.05	0.03	0.02
p1 = 0	x	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
p2 = 10	x	x	3.93	6.32	7.77	8.65	9.18	9.50	9.70
p3 = -5	x	x	x	-1.96	-3.16	-3.88	-4.32	-4.59	-4.75
p4 = +3	x	x	x	x	1.18	1.89	2.34	2.60	2.76
p5 = -1	x	x	x	x	x	-0.39	-0.63	-0.78	-0.86
p6 = -7	x	x	x	x	x	x	-2.75	-4.42	-5.44
Totaal	1.00	0.61	4.30	4.58	5.93	6.35	3.87	2.34	1.43

Tabel IX-3. Berekening van de afvoer van tabel IX-2 volgens de dag-voor-dag methode.

etm.nr.s	1	2	3	4	5	6	7	8
neerslag P_s	0	10	5	8	7	0	0	0
$p_s (1-\varepsilon)$		0.00	3.93	1.96	3.14	2.75	0.00	0.00
$q_{s-1} \cdot \varepsilon$		0.61	0.37	2.61	2.78	3.60	3.86	2.34
	1.00	0.61	4.30	4.57	5.92	6.35	3.86	2.34

$\alpha = 0.5$; $\varepsilon = e^{-\alpha} = 0.607$; $1 - \varepsilon = 0.393$; $q_0 = 1.00$

2.2. Het verband tussen de reaktiefaktor α en de weerstanden W_{rad} en W_{intree}

a) Past men het zojuist beschreven model toe op de afvoer van een kavel, dan moet rekening worden gehouden met de bergingsfaktor μ van de bodem.
Wij denken het reservoir R gevuld met grof grind. De stroming in het reservoir blijft nagenoeg onbelemmerd, maar slechts een fraktie μ van de inhoud bestaat uit poriën, die bij daling van de grondwaterstand leeg lopen.

b) Er geldt nu voor de waterbalans:

$$(p - q) \cdot dt = \mu \cdot dm \qquad (1^a)$$

Per eenheid van oppervlakte is de afvoerintensiteit wederom evenredig met de drukhoogte, dus:

$q = \beta m$	q: afvoerintensiteit	m/etm
	β: evenredigheidskonstante	etm^{-1}
	m: drukhoogte	m

Uitwerking geeft:

$$p - \beta m = c_3 \cdot e^{-\beta t/\mu} \qquad \text{met} \qquad c_3 = p - q_0$$

Als wij stellen $\alpha = \beta/\mu$ volgt hieruit wederom vergelijking (2):

$$\boxed{q = q_0\, e^{-\alpha t} + p\,(1 - e^{-\alpha t})} \qquad (2)$$

waarbij $q = \beta m = \alpha \mu m$

c) Bij zeer langdurige regen met konstante intensiteit p ($t \to \infty$) wordt de stationaire toestand bereikt, waarbij $q = p$. De afvoerintensiteit q wordt dus gelijk aan de neerslagintensiteit p, welke laatste bij de theorie van Ernst wordt aangeduid als N (IV-1).
De "opbolling" m wordt bij het besproken model geheel veroorzaakt door de radiale- en intreeweerstanden, zodat:

$$m = \Delta h_{rad} + \Delta h_{intree}$$

en

$$N = q = \alpha\mu m = \alpha\mu(\Delta h_{rad} + \Delta h_{intree})$$

of

$$\alpha = \frac{N}{\mu(\Delta h_{rad} + \Delta h_{intree})}$$

Nu is $\Delta h_{rad} = NLW_{rad}$ (IV-1, vgl. 4)

$\Delta h_{intree} = NLW_{intree}$ (V-2, vgl. 1)

zodat

$$\boxed{\alpha = \frac{1}{\mu L\ (W_{rad} + W_{intree})}} \qquad (5)$$

α	: reaktiefaktor	etm^{-1}
μ	: bergingsfaktor	-
L	: afstand drains of kanalen	m
W_{rad}	: radiale weerstand	etm/m
W_{intree}	: intreeweerstand	etm/m

d) Bij het besproken model is de "opbolling" van de grondwaterspiegel evenredig met de afvoer. Omdat de weerstanden nabij de drains sterk overwegen, is de grondwaterspiegel tussen de drains horizontaal. Bij neerslag doorloopt de grondwaterspiegel achtereenvolgens een reeks van deze toestanden. Van het volume V tussen twee van deze toestanden wordt de fraktie μ voor waterberging gebruikt (fig. IV-3).

3. Alleen de horizontale stroming ondervindt weerstand; het model van Krayenhoff van de Leur.

a) Indien de radiale- en intreeweerstanden te verwaarlozen zijn t.o.v. de weerstand, die de horizontale stroming ondervindt, kan het volgende model worden gebruikt:
Stel twee kanalen, reikend tot aan een ondoorlatende laag (fig. IX-4). In de kanalen staat zoveel water, dat de dikte van de doorstroomde laag D bij hoge benadering konstant geacht mag wor-

den. Op tijdstip t = 0 begint een regenval met konstante intensiteit p m/etm, die via een aantal tussenstadia (b.v. II) leidt tot een stationaire eindtoestand (III).

b) Onder deze omstandigheden geldt voor de afvoerfaktor q:

$$q = p \left[1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1,3,5..}^{\infty} \frac{1}{n^2} \cdot e^{-n^2 t/j} \right] \qquad (6)$$

en voor opbolling van het grondwater midden tussen de kanalen:

$$m_o = \frac{\pi^2}{8} \cdot \frac{p}{\mu} \cdot j \left[1 - \frac{32}{\pi^3} \sum_{n=1,-3,5,-7,..}^{\infty} \frac{1}{n^3} \cdot e^{-n^2 t/j} \right] \qquad (7)$$

met $j = \frac{\mu L^2}{\pi^2 KD}$ (8)

De konstante j (etm) wordt de <u>reservoirkoëfficient</u> of <u>karakteristieke tijd</u> genoemd.

c) Eenvoudig is aan te tonen, dat op den duur ($t \to \infty$)

$$q \to p$$

en

$$q \to s = \frac{8kD\ m_o}{L^2} \quad \text{de stationaire afvoer}$$

zodat voor $t \to \infty$ de stroming stationair is geworden.

d) Het verband tussen q en m_o is bij dit model niet meer eenduidig. Zet men de opbolling uit tegen de afvoer dan vindt men lussen; Een voorbeeld daarvan geeft fig. IX-6, curve I. Soms vindt men dergelijke lussen ook in het veld, in andere gevallen echter niet.

e) Ook bij deze beschouwing mag men het beginsel van <u>superpositie</u> toepassen, mits D ≃ constant. Is D zeer variabel (b.v. als de waterstand in de kanalen zeer laag is), dat wordt de differentiaalvergelijking niet-lineair, waardoor:
- oplossing alleen mogelijk is met numerieke methoden
- superpositie niet meer is toegestaan

f) De Jager heeft deze theorie toegepast op afvoeren van stroomgebieden. Hij berekende daartoe de afvoeren en de opbollingen, die zouden ontstaan indien men de neerslag Utrecht - De Bilt 1913 - 1963 in zou voeren in reservoirs met verschillende j-waarden (computer).
Uit deze uitkomsten konden de frequenties van hoge afvoeren worden bepaald (fig. IX-5).

4. Model met zowel horizontale als radiale- en intreeweerstand.

a) Beide voorgaande modellen gaan uit van een sterk vereenvoudigd stromingsbeeld. Het eerste model verwaarloost de weerstand, die de horizontale stroming ondervindt, het tweede de radiale- en intreeweerstanden. In werkelijkheid zal de stromingstoestand "ergens" tussen beide uitersten in liggen.

b) Voor een kombinatie van beide typen van weerstanden is eveneens berekening mogelijk. Voor de afvoerintensiteit q blijkt te gelden:

$$q = p \left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin^2 \beta_n}{\beta_n(\beta_n + \sin\beta_n \cos\beta_n)} e^{-\frac{4\beta_n^2 kDt}{\mu L^2}} \right] \qquad (9)$$

waarin β_n de positieve wortels zijn van de vergelijking

$$\beta \operatorname{tg} \beta = \frac{L}{4\, kDW_{rad}} \qquad (10)$$

q:	afvoerintensiteit	m/etm
p:	neerslagintensiteit	m/etm
k:	doorlaatfaktor watervoerende laag	m/etm
D:	dikte	m
t:	tijd	etm
μ:	bergingsfaktor	-
L:	afstand tussen kanalen, sloten of drains	m
W_{rad}:	radiale weerstand volgens Ernst	etm/m

c) Het blijkt daarbij dat de "lussen", die ontstaan in de curven m_o tegen q smaller worden naarmate de invloed van de radiale- en intreeweerstanden groter is (fig. IX-6). In vele gevallen zijn deze weerstanden zo groot, dat met het model van De Zeeuw en Hellinga kan worden volstaan. In de praktijk is dit het geval als $\Delta h_{rad} + \Delta h_{intree} \geq \Delta h_{hor}$

d) Op eenvoudige wijze is aan te tonen, dat voor $W_{rad} = 0$ de vergelijking (9) overgaat in (6). Dan is n.l.

$$\beta \text{ tg } \beta = \infty$$

met wortels $\beta_1 = \pi/2$; $\beta_2 = 3\pi/2$; $\beta_3 = 5\pi/2$ etc.

e) Voor $kD \to \infty$ blijkt (9) bij limietovergang te konvergeren tot:

$$q = p\ (1 - e^{-\alpha t})$$

met

$$\alpha = \frac{1}{\mu L W_{rad}}$$

de reaktiefaktor volgens De Zeeuw-Hellinga voor het geval, dat alleen een radiale weerstand aanwezig is.

f) Ook bij dit model is superpositie geoorloofd, zolang men D als konstant mag beschouwen.

5. <u>Toepassing op afvoeren van stroomgebieden</u>.

a) De afvoer van een stroomgebied wordt dus in belangrijke mate bepaald door de grootheden α of j. Voor de afvoer van een stroomgebied, dat door grondwater wordt gevoed, blijken zowel (2) als (6) in de praktijk zeer redelijke uitkomsten te geven.

b) De grootheden α of j worden meestal niet bepaald via (5) of (8), maar afgeleid uit het verloop van de afvoer. Vooral het "staartverloop" (de afvoer welke optreedt na het ophouden van de neerslag) leent zich goed voor een dergelijke analyse.
Het blijkt, dat voor stroomgebieden de uitkomsten van de formules

(2) en (6) niet veel uiteenlopen indien men stelt

$$\alpha \simeq 1/j \qquad (11)$$

Wel moet men bij deze benadering afzien van de fysische betekenis van deze grootheden, omdat beide - strikt genomen - immers door een ander type weerstand worden bepaald.

c) Tabel IX-4 geeft enkele waarden voor α en j, zoals deze uit afvoermetingen zijn afgeleid.

Tabel IX-4. Waarden voor α en j.

α etm^{-1}	j etm	stromingstype
500 - 700	0.0014 - 0.002	afvoer van 1000 - 4000 m^2 verhard oppervlak
100 - 200	0.005 - 0.01	oppervlakte-afvoer van sterk hellend terrein
1 - 10	0.1 - 1.0	oppervlakte-afvoer; afvoer van gronden met zeer ondiep gelegen ondoorlatende lagen
0.3 - 0.7	1.5 - 3.0	gedraineerde goed ontwaterde landbouwgrond
0.03 - 0.07	15 - 30	slecht ontwaterd grasland met dichtgegroeide sloten ("moerasafvoer")
0.0005 - 0.003	300 - 2000	afvoer van kwelwater uit hoge, zeer doorlatende terreinen (Veluwe, Z.Limburg)

d) Naarmate de afvoer feller reageert op de neerslag (grote α, kleine j) moet men de beschouwde berekeningsintervallen korter nemen. Voor afvoer van verharde oppervlakken moet men de regenval over perioden van enkele minuten kennen, voor de berekening van kwelafvoer kan met decadecijfers of zelfs maandcijfers worden volstaan.

e) Vele stroomgebieden bestaan uit verschillende onderdelen, ieder met een eigen reaktiefaktor. Fig. IX-7 schetst een situatie, waarin de afvoer bepaald wordt door:

A: een heuvelrug met zeer lage α (grote j), waaruit de overtollige neerslag zeer traag en sterk gedempt tot afvoer komt.

B: een beekdal met veel sloten en greppels, dat snel reageert op de neerslag (hoge α, lage j).

C: een overgangszone met sloten, die alleen bij hoge grondwaterstanden watervoerend zijn. Bij geringe vulling van het reservoir in de heuvelrug behoort dit gebied dus tot A; bij sterke vulling van dit reservoir tot B.
De verhouding van de oppervlakten A en B varieert dus met de vullingsgraad van reservoir A.

f) De Renkumse Beek wordt gevoed door een zeer groot kwelreservoir (een gedeelte van de Veluwe). In overeenstemming daarmee (zeer lage α) is het debiet zeer weinig aan schommelingen onderhevig. Scherpe afvoerpieken komen niet voor.

g) De Barneveldse Beek wordt ten dele gevoed door een kwelreservoir (een gedeelte van de Veluwe), maar ontwatert bovendien grote oppervlakten lage gronden met veel sloten.
Deze laatste veroorzaken scherpe afvoerpieken in natte perioden. Tussen deze twee gebieden bevindt zich een overgangszone.
Toen na enkele natte jaren het Veluwe-reservoir sterk gevuld was geraakt, ging ook deze zone zich als "lage grond" gedragen: dit veroorzaakte ook bij minder extreme regenperioden in 1966 en 1967 zeer hoge afvoeren.

h) Ideaal zou zijn de formule (9) toe te passen en daarbij in te voeren:

- de KD-waarde van het watervoerende pakket
- de bergingsfaktor μ
- de radiale weerstand W_{rad}, te berekenen volgens de methoden besproken in IV-1 (eventueel te vermeerderen met W_{intree})

- de afstand L tussen de ontwateringsmiddelen
Dit is echter bijzonder omslachtig en bovendien niet met voldoende nauwkeurigheid uitvoerbaar.

i) In de praktijk bepaalt men meestal α of j uit een kort lopende reeks afvoermetingen. Daarna kan de afvoerfrequentie worden vastgesteld door een lange reeks neerslagwaarnemingen door het aldus bepaalde "reservoir" te laten passeren.
Men kan aldus de maatgevende afvoerintensiteit (b.v. 1 x per jaar of desgewenst 1 x per 5 jaar of per n jaar) vaststellen.
Een moeilijkheid is, dat door verbetering van een stroomgebied ook de hydrologische ontsluiting verandert, zodat verbetering invloed uitoefent op de reaktiefaktor.

j) Tot nu toe geschiedt de bepaling van de maatgevende afvoerintensiteiten nog vaak empirisch, of via een analyse van de regenduurlijn. De onder i genoemde werkwijze wordt echter in toenemende mate als standaardmethode ingevoerd.

k) In een aantal proefgebieden (o.a. het gebied van de Leerinkbeek) worden uitvoerige metingen verricht over het afvoerproces.
Naar de afvoer van stedelijke gebieden wordt te Lelystad een uitgebreid onderzoek vericht.

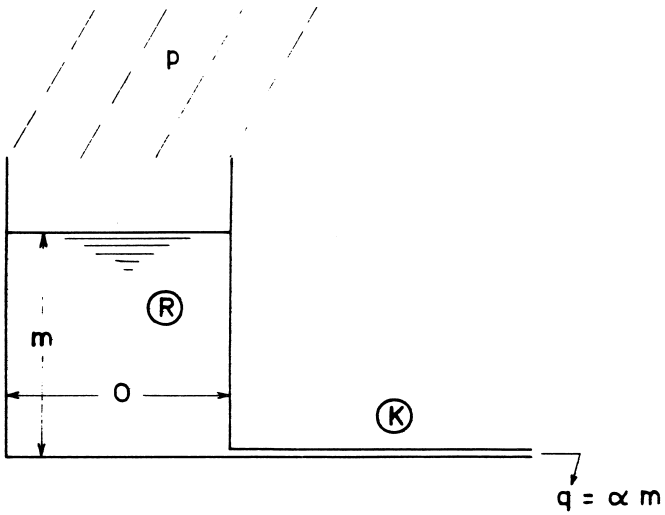


Fig. IX – 1 Reservoir met aan- en afvoer.

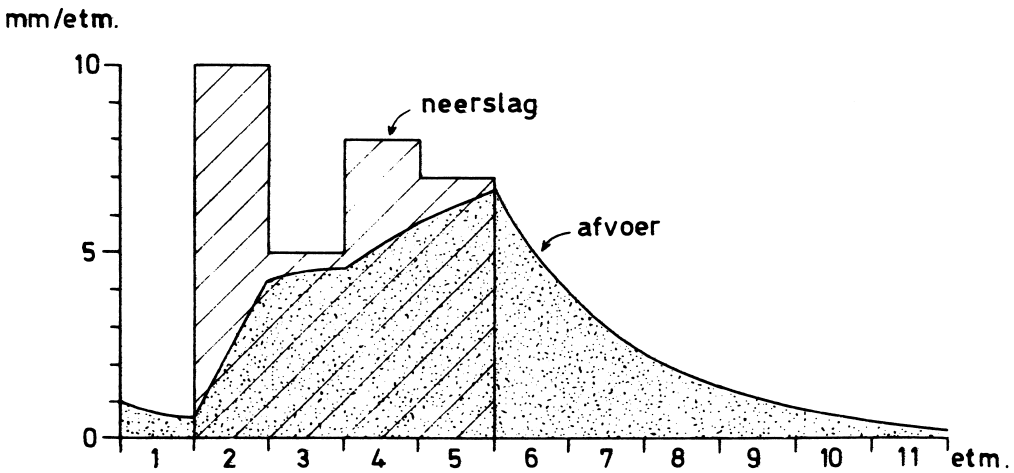


Fig. IX – 2 Afvoer van een reservoir met $\alpha = 0.5$ etm.$^{-1}$

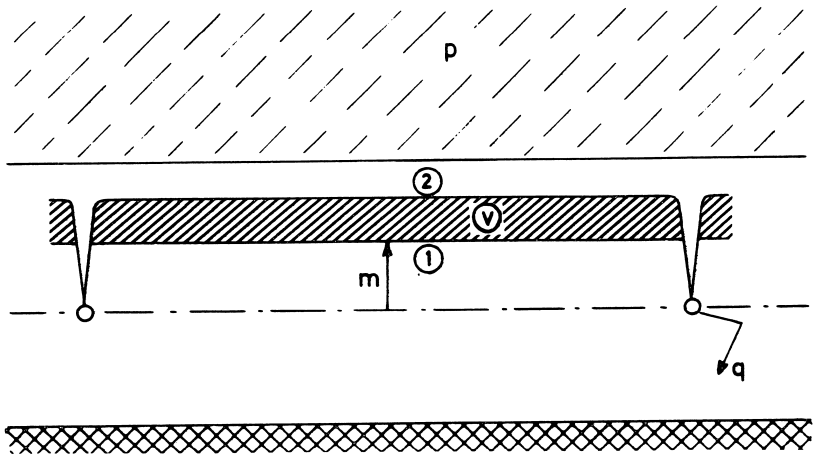


Fig. IX – 3 Grondwaterafvoer via een grote weerstand nabij de drains

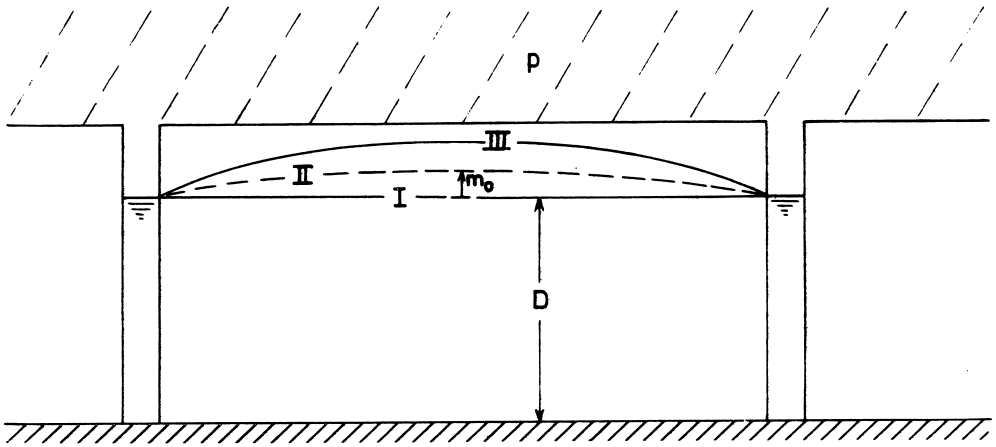


Fig. IX – 4 Niet stationaire stijging van het freatisch vlak onder invloed van een neerslag met constante intensiteit.

I : begintoestand
II : toestand op tijdstip t
III : eindtoestand ($t \rightarrow \infty$) : stationair

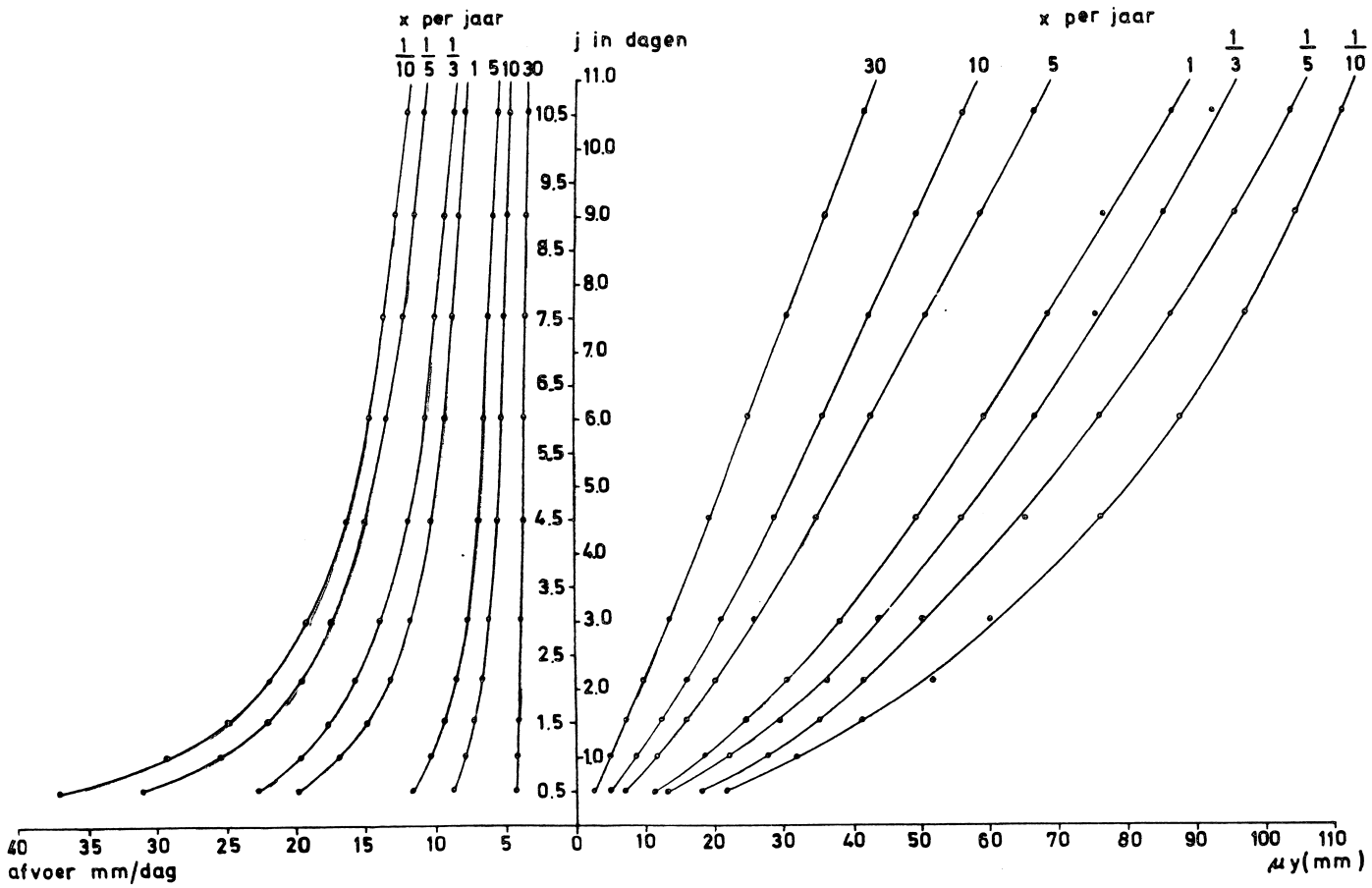


Fig. IX – 5 Frequentie-diagram voor de afvoer q en de hoogte van de berging midden tussen de drains μy, berekend voor verschillende j-waarden uit de dagsommen van de neerslag te Utrecht in de maanden oktober t/m maart over de jaren 1913 tot 1963. (de Jager)

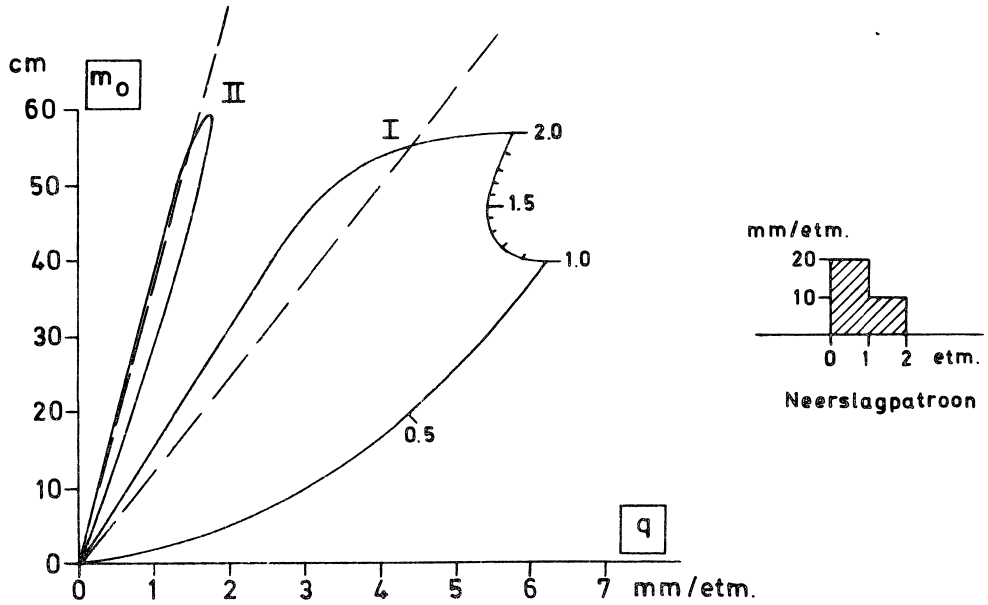


Fig. IX - 6 Invloed van de weerstand in de omgeving van het ontwateringsmiddel op de breedte van de lussen in de curve m_o tegen q

I : geen radiale + intreeweerstand

II : grote radiale + intreeweerstand

—— —— verband volgens model DE ZEEUW en HELLINGA

$kD = 10^2$ m/etm.

L = 100 m

μ = 0.05

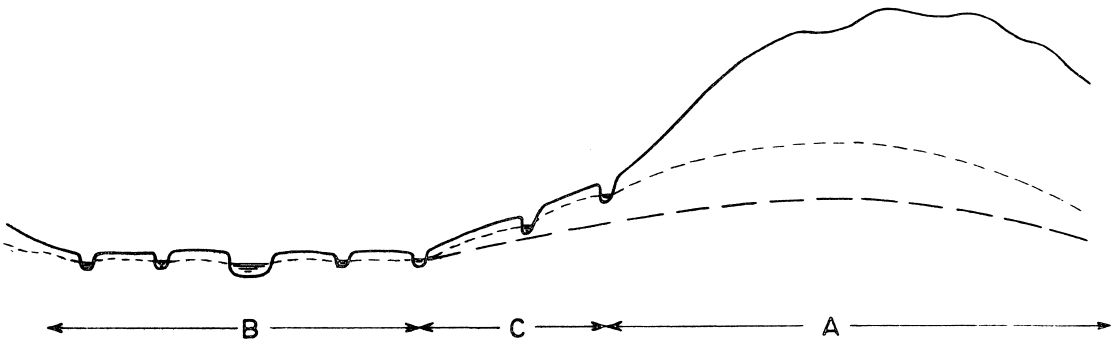


Fig. IX - 7 Stroomgebied, bestaande uit verschillende onderdelen.

A : heuvelrug met kleine α (grote j)

B : beekdal met grote α (kleine j)

C : overgangszone, bij hoge waterstand in A behorend tot B, bij lage waterstand in A tot A

X. Afwatering (vervolg)

1. Methode van de regenduurlijnen voor bepaling van de maatgevende afvoerintensiteit.

a) Men maakt een curve van de hoeveelheid neerslag die met een bepaalde frequentie (b.v. 1 x per jaar) te verwachten is in 1, 2, ... n dagen (regenduurlijn, fig. X-1).

b) Op de ordinaat zet men de berging uit,die gevuld mag worden voordat overlast ontstaat. Trekt men uit dit punt een raaklijn aan de curve, dan geeft de helling van deze lijn de maatgevende afvoerintensiteit. Op de abscis leest men de maatgevende regenduur af.

c) Het effekt van de berging is aanzienlijk.

- berging 5 mm:	afvoerintensiteit (1 x per jaar)	33 mm/etm
	maatgevende regenduur	0.2 etm
- berging 20 mm:	afvoerintensiteit (1x per jaar)	9.5 mm/etm
	maatgevende regenduur	1.4 etm

d) Deze oude methode van afvoerbepaling is zeer eenvoudig. Het bezwaar is, dat bij grote reservoirs ook de voorgeschiedenis gaat meespelen; de afvoer hangt dan sterk af van de vullingsgraad van het reservoir (vgl. de beschouwing over de Barneveldse Beek, IX, 5 e). Bovendien wordt geen rekening gehouden met de volgorde, waarin de neerslagen optreden.
De methode geeft dus een eerste benadering.

e) Als de regenduurlijn door een (empirische) formule wordt benaderd kan men de maatgevende afvoerintensiteit berekenen als funktie van de berging.

f) Varianten van deze methoden worden toegepast in de rioleringstechniek. De berging is hier klein en α groot, zodat de invloed

van de voorgeschiedenis betrekkelijk gering is.

2. Empirische methoden.

a) In Noord-Brabant gebruikt men de normen van Blauw:

$q = 0.333\ a$ voor $F < 10.000$ ha

$q = a\ (0.533 - 0.05 \log F)$ voor $F > 10.000$ ha

q: maatgevende afvoerintensiteit $ls^{-1}ha^{-1}$

F: oppervlak ha

a: faktor, afhankelijk van de terreingesteldheid

Voor a geldt:

- gebieden zonder zichtbare afwatering a = 1
  (gem. wintergrondwaterstand > 140 cm - m.v.)
- hoge zandbouwlanden met incidentele sloten a = 2
  (gem. wintergrondwaterstand 70 - 100 cm - m.v.)
- gebieden met sloten a = 3
  (gem. wintergrondwaterstand < 70 cm - m.v.)

b) Een tweetal andere systemen is vermeld in tabel X-1.

Tabel X-1. Empirische normen voor de maatgevende afvoerintensiteit in Nederland.

Drente	$ls^{-1}ha^{-1}$	KNHM	$ls^{-1}ha^{-1}$
lage veengraslanden dalgronden met wijken lage zandgronden	1.2	lage gronden met intensief slotenstelsel	1.3
middelhoge zandgronden met leem binnen 80 cm dalgronden zonder wijken	1.0	complex van lage en middelhoge zandgronden	1.0
		complex van hoge en middelhoge zandgronden	0.7
middelhoge zandgronden essen	0.7	hoge zandgronden: bouwland, geen sloten	0.5
bossen stuifzanden	0.5	bos, " "	0.3

c) Voor polders rekent men meestal met een bemalingskapaciteit van 10 - 12 mm/etm (1.15 - 1.4 $ls^{-1}ha^{-1}$) vermeerderd met de te verwachten kwel.

3. Berekening van waterlopen.

3.1. Soorten van stroming in open waterlopen.

a) Stroming in waterlopen kan worden onderscheiden in permanente en niet-permanente stroming. Bij de permanente stroming verandert de stroomsnelheid niet met de tijd, bij de niet-permanente stroming wel.

b) De permanente stroming wordt verdeeld in:
- eenparige stroming in een prismatisch kanaal: de stroomsnelheid (gemiddeld over het dwarsprofiel) blijft konstant over de lengte van het beschouwde kanaalvak
- niet-eenparige stroming: de stroomsnelheid verandert over de lengte van het kanaalvak.
  Deze verandering kan geleidelijk zijn (b.v. door een geleidelijke verandering van de waterdiepte) of plotseling (b.v. bij stroming door een duiker).

c) Bij de niet-permanente stroming onderscheidt men:
- een geleidelijke verandering van de stroomsnelheid met de tijd (b.v. bij hoogwatergolven in een rivier)
- een plotselinge verandering van de stroomsnelheid met de tijd (b.v. bij golven die tegen het strand oplopen).

d) Stel:

Q	: debiet	m^3s^{-1}
F	: oppervlakte dwarse doorsnede	m^2
v = Q/F	: gemiddelde stroomsnelheid m	ms^{-1}
t	: tijd	s
x	: afstand gemeten langs de lengte-as van het kanaal	m

Men kan nu bovengenoemde stromingsgevallen als volgt definiëren:

1. Permanent $\frac{\partial v}{\partial t} = 0$

   a) Eenparig $\frac{\partial v}{\partial x} = 0$

   b) Niet eenparig

      b-1: geleidelijk veranderend: $\frac{\partial v}{\partial x} \simeq 0$ (d.w.z. klein)

      b-2: plotseling veranderend: $\frac{\partial v}{\partial x} \neq 0$ (d.w.z. groot)

2. Niet permanent

   a) geleidelijk veranderend $\frac{\partial v}{\partial t} \simeq 0$ (d.w.z. klein)

   b) plotseling veranderend $\frac{\partial v}{\partial t} \neq 0$ (d.w.z. groot)

e) Bij berekening van waterlopen rekent men meestal met een permanente, eenparige stroming (1-a). In bepaalde gevallen - bijvoorbeeld bij gestuwde waterlopen - wordt voor meer verfijnde berekening gebruik gemaakt van formules, die de permanente, niet-eenparige stroming met geleidelijke verandering beschrijven (1-b-1).

f) Voor berekening van stroming over stuwen, overlaten, door duikers en sluizen e.d. rekent men met formules, die betrekking hebben op de permanente, niet-eenparige stroming met plotselinge verandering van de stroomsnelheid (1-b-2).

3.2. Berekening van de permanente, eenparige stroming.

a) Voor de berekening van de permanente, eenparige stroming in waterlopen bestaan vele formules (Bazin, Kutter, Manning-Strickler, Colebrook, de "Delftse" formule e.a.). Voor aarden leidingen waarin begroeiing kan optreden gebruikt men algemeen de formule van Manning.

$$\boxed{Q = k_M \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2}} \qquad (1)$$

Q	: debiet	m^3s^{-1}
k_M	: konstante van Manning	$m^{1/3}s^{-1}$
A	: oppervlak natte doorsnede	m^2
R	: hydraulische straal	m
S (of J)	: verhang	-(m/m)

$$R = \frac{\text{nat oppervlak } (m^2)}{\text{natte omtrek } (m)}$$

b) Het verhang S wordt bepaald door de eisen, te stellen aan de hoogwaterlijn.
Het debiet Q wordt bepaald door de grootte van het afwaterend oppervlak en de maatgevende afvoerintensiteit.
Voor k_M wordt meestal een bepaalde waarde aangenomen.

c) De waarde van k_M wordt sterk bepaald door de mate van begroeiing.
In de zomer in kleine leidingen vaak veel begroeiing, daardoor lage k_M.
In de winter sterft de begroeiing in Nederland af, waardoor k_M van nature sterk toeneemt.

d) Voor een zeer schone leiding is k_M 40 of groter, voor een dichtgegroeide sloot minder dan 10. Meestal rekent men met standaardwaarden voor "normaal" onderhoud (tab. X-2).

Tabel X-2. Waarden voor k_M ($m^{1/3}s^{-1}$)

		winter	zomer
I	Kleine leidingen		
	(waterdiepte < 0.80 m)		
	a) lichte grond	35	20
	b) zware grond of vruchtbaar water	25	15
II	Middelgrote leidingen		
	(waterdiepte 0.70 - 1.70 m)		
	a) lichte grond	40	30
	b) zware grond of vruchtbaar water	30	20
III	Grote leidingen		
	(waterdiepte > 1.50 m)	40-50	-

e) Volgens Bos & Bijkerk kan de afhankelijkheid van de waterdiepte als volgt worden uitgedrukt:

$$k_M = \gamma h^{\delta}$$

met

h: waterdiepte m

δ: konstante (1/4 à 1/3)

$\gamma = k_M$ voor h = 1 m: faktor afhankelijk van seizoen, grondsoort en waterkwaliteit

f) Het oppervlak A en de hydraulische straal R hangen beide af van vorm en afmetingen van het dwarsprofiel.

g) Voor zeer kleine leidingen heeft men een minimum-profiel.
Bodembreedte b minimaal 0.70 m
Waterdiepte d " 0.35 m
In de Zuiderzeepolders hebben de sloten een minimumprofiel met b = 1.00 m en d = 0 in de zomer (droog lopend).
Voor tochten geldt hier d minimaal 1.00 m.

h) De verhouding b/d is ongeveer:

bij min. profiel	b/d	1 à 2
bij d = 1.0 à 1.5 m	b/d	2 à 4

Bij grotere leidingen b/d vaak 4 of meer.

i) Voor afwateringskanalen neemt men in Nederland d zelden groter dan 2 m wegens gevaar voor instabiliteit van de taluds.

j) Voor de berekening gebruikt men nomogrammen (een voorbeeld geeft fig. X-2). Men vindt verschillende oplossingen, afhankelijk van:
- de verhouding bodembreedte/waterdiepte
- de helling van de taluds

4. Taludhelling en toelaatbare stroomsnelheid.

a) De taludhelling wordt bepaald met empirische regels. In samenhangende grondsoorten (stevige klei, vast veen), steile taluds (b.v. 1:1).
In zeer weinig samenhangende grondsoorten (fijn zand, slap veen) zeer flauwe taluds (b.v. 1:3).

b) In Nederland noteert men de taludhelling als
$\frac{\text{hoogte talud}}{\text{horizontale afstand}}$ (fig. X-3)
In het buitenland (o.a. U.S.A.) soms andersom !

c) Aanbevelingen voor taludhellingen geeft tab. X-3: nadere bestudering is gewenst.
Schade treedt meestal op kort na de aanleg. Is er eenmaal een begroeiing aanwezig, dan kunnen boven de waterspiegel veel steilere taluds in stand blijven. Slootkanten worden daardoor op den duur steeds steiler (fig. X-3).

Tabel X-3. Taludhelling en toelaatbare stroomsnelheid in verschillende grondsoorten.

Grondsoort	V max (m s^{-1})	taluds
Samenhangende zware grond		
(klei, leem, löss)	0.6 - 0.8	1:3/4 à 1:2
zavel, samenhangende zandgrond	0.3 - 0.6	1:1½ à 1:2½
fijn zand	0.15 - 0.30	1:2 à 1:4 of flauwer
grof zand	0.20 - 0.50	1:1½ à 1:3
vast veen	0.3 - 0.6	1:1 à 1:2
slap veen	0.15 - 0.30	1:2 à 1:4 of flauwer

d) De stabiliteit van taluds wordt beïnvloed door:
- begroeiing ++
- sterk wisselende waterstanden -

- kwel	--
- hoge stroomsnelheid, bochten, golfslag	-
- diepe leidingen	-
- weg of bereden pad naast waterloop	-

e) In zandgronden treedt erosie van het talud het eerst op nabij of even boven de waterlijn. Hier bevindt zich een "kwelzone", waar water uittreedt onder een zeer kleine hoek met het talud. Bovendien hier veel invloed van golfslag. Men brengt daarom nabij de waterlijn vaak een oeverbescherming aan ("betuining").

f) Is de taludhelling en de verhouding b/d vastgesteld, dan kan de waterloop worden berekend. Dit geschiedt:
- grafisch, met behulp van nomogrammen
- numeriek, met computer. Voor deze berekening is een zeer uitvoerige omschrijving van de instrukties noodzakelijk !

g) De <u>stroomsnelheid</u> mag niet te groot worden.
Voor de gemiddelde stroomsnelheid V geldt:

$V = Q/A$	V: gem. stroomsnelheid	$m\ s^{-1}$
	Q: debiet	$m\ s^{-1}$
	A: opp. dwarsdoorsnede	m^2

h) De maximaal toelaatbare waarde van V hangt af van de grondsoort (tab. X-3). Erosie treedt het eerst op in bochten en aan de benedenstroomse zijde van kunstwerken.
Hier brengt men meestal een extra bescherming aan.

5. <u>Berekening van waterlopen in de Zuiderzeepolders</u>.

a) Het berekeningsschema is zeer eenvoudig: men berekent de tochten op een maximale stroomsnelheid (0.25 m/sec) bij maatgevende afvoer. Hieruit volgt het natte oppervlak van de dwarsdoorsnede A:

$$A = \frac{Q}{V_{max}}$$

A: opp. natte doorsnede m^2
Q: maatgevende afvoer $m^3 s^{-1}$
V_{max}: maximale stroomsnelheid $m\ s^{-1}$

b) Het minimumprofiel heeft 6 m^2 nat oppervlak, 1 m waterdiepte.

c) De afmetingen van de grotere kanalen zijn bepaald door scheepvaart-eisen: zij zijn ruim voldoende voor de afwatering.

d) De bijbehorende verhangen zijn gering en alleen in zeer lange tochten geven zij aanleiding tot hinderlijke opstuwingen. Deze kan men voorkomen door dwarstochten te graven naar een kanaal.

e) Werkwijze is dus anderom als elders in Nederland:
normaal gaat men uit van het verhang, berekent de afmetingen en kontroleert of de stroomsnelheid aan de eisen voldoet. In de Zuiderzeepolders gaat men uit van de stroomsnelheid, en kontroleert of het verhang aan de eisen voldoet.

6. Beklede leidingen.

a) In hellende gebieden past men vaak beklede leidingen toe. Deze hebben de volgende voordelen:
- geen erosie, daarom geen technische stuwen nodig ter beperking van de stroomsnelheid
- zeer weinig onderhoud; alleen de onbeklede gedeelten van de taluds moeten gemaaid worden
- gladdere wand: daardoor en door de veel grotere toelaatbare stroomsnelheden geringere afmetingen.

Is de helling van de waterspiegel meer dan 2 à 3o/oo dan worden daardoor beklede leidingen meestal voordeliger dan onbeklede waterlopen.

b) Berekening geschiedt volgens de z.g. Delftse formule. Uitgegaan wordt van de formule van De Chézy:

$$V = C\sqrt{RS}$$

en

$$Q = V \cdot A$$

Voor C geldt:

$$C = 18 \log \frac{12\ R}{k_D}$$

waarbij men meestal aanneemt $k_D = 0.024$ m

V:	gemiddelde stroomsnelheid	$m\ s^{-1}$
R:	hydraulische straal	m
S:	helling	-
C:	coëfficient van De Chézy	$m^{\frac{1}{2}}s^{-1}$
Q:	debiet	m^3s^{-1}
A:	oppervlak dwarse doorsnede	m^2
k_D:	ruwheidsparameter	m

c) Nu is

$R = f$ (dwarsprofiel)

$C = f$ (dwarsprofiel, wandruwheid)

$A = f$ (dwarsprofiel)

zodat

$Q = f$ (dwarsprofiel, wandruwheid). $\sqrt{S}$

Voor een bepaalde uitvoeringswijze is k_D een konstante. Standaardiseert men nu tevens de dwarsprofielen, dan geldt:

$$Q = P\sqrt{S}$$

waarin P voor elk type beklede leiding een bepaalde waarde bezit. Een voorbeeld voor het leidingtype van fig. X-4 geeft tabel X-4.

Tabel X-4. Kleine leidingen, tot de HW-lijn bekleed met IPRO-keien.

aantal keien	7	9	11	13	15	17	19
natte omtrek U (m)	0.88	1.13	1.38	1.63	1.88	2.13	2.38
waterdiepte bij HW (m)	0.18	0.27	0.36	0.45	0.53	0.62	0.71
natte doorsnede A (m^2)	0.10	0.17	0.26	0.37	0.49	0.63	0.78
hydr. straal R (m)	0.11	0.15	0.19	0.23	0.26	0.30	0.33
P uit $Q = P\sqrt{S}$ (m^3s^{-1})	1.00	2.25	4.07	6.48	9.52	13.37	17.7

d) Meestal wordt de bekleding niet doorgetrokken tot aan de HW-lijn, maar tot een lijn, behorende bij 1/2 tot 1/4 van de maatgevende afvoer (fig. X-5). De ervaring leert, dat de taluds boven de bekleding met gras begroeien en niet aan erosie onderhevig zijn.

e) In dergelijke gevallen rekent men bij maatgevende afvoer met de formule van Manning. Men stelt:

- voor het beklede gedeelte van het dwarsprofiel $K_M = 60$
- voor de met gras begroeide taluds $K_M = 25$ of $K_M = 30$ en neemt het gewogen gemiddelde.

f) Voorbeeld:

Bij maatgevende afvoer (HW-lijn) geldt voor het dwarsprofiel:

- beklede gedeelte	$3\ m^2/m^1$	met $K_M = 60$; produkt	180
- begroeide taluds	$2\ m^2/m^1$	met $K_M = 25$; "	50
Natte omtrek	$5\ m^2/m^1$	met produkt	230

$$K_M = \frac{230}{5} = 46$$

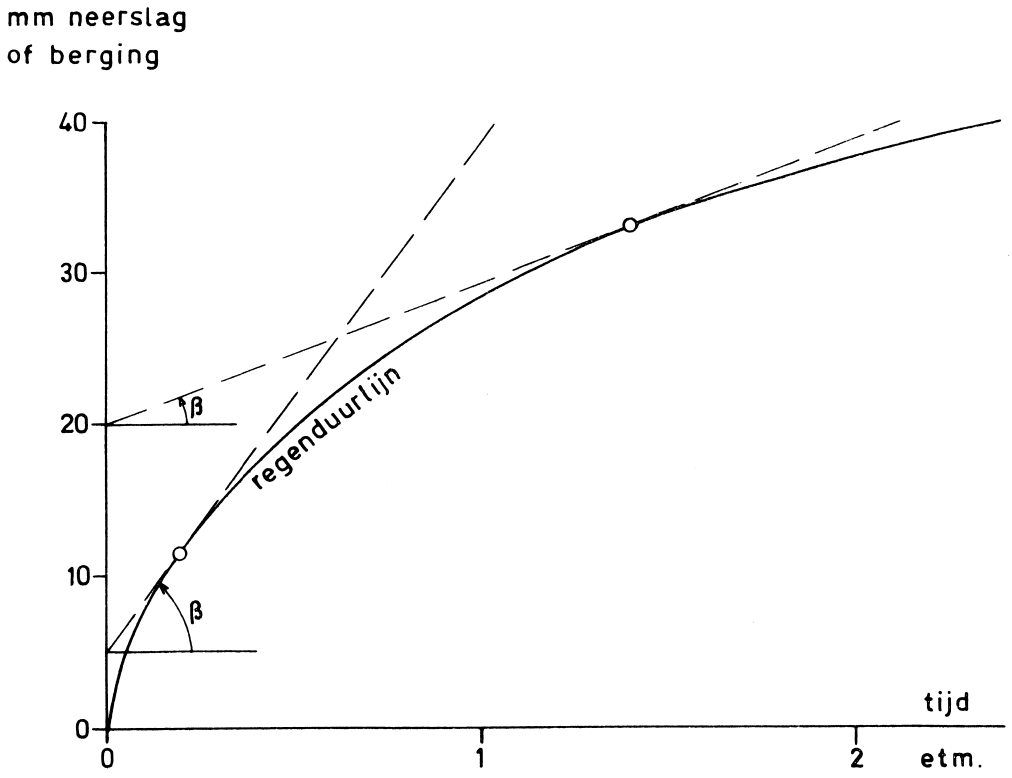
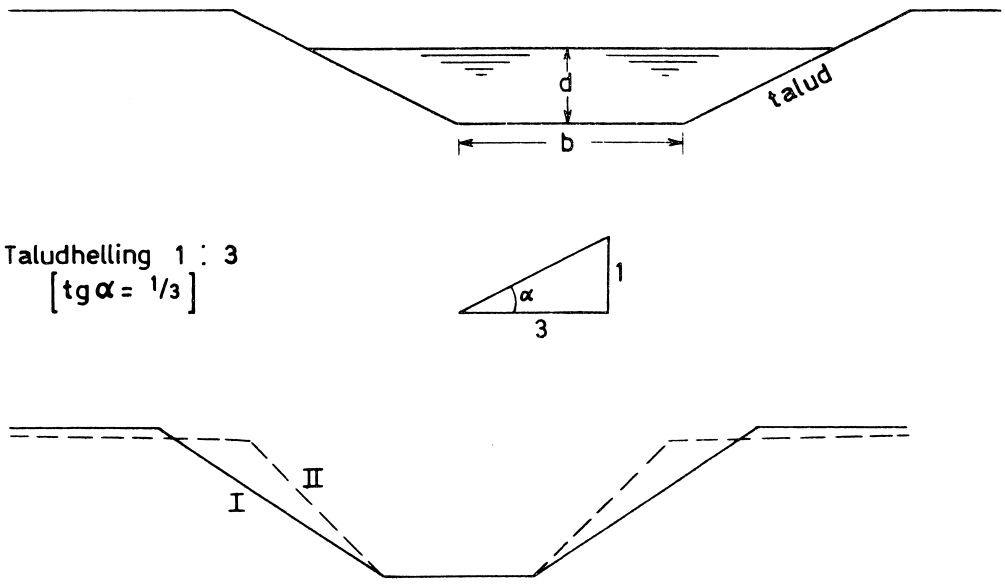


Fig. X – 1 Methode van de regenduurlijn.



Steiler worden van taluds
I : oorspronkelijk dwarsprofiel
II : dwarsprofiel na enige tijd

Fig. X – 3 Doorsneden van waterlopen

BELOPEN 1 : 1 ½

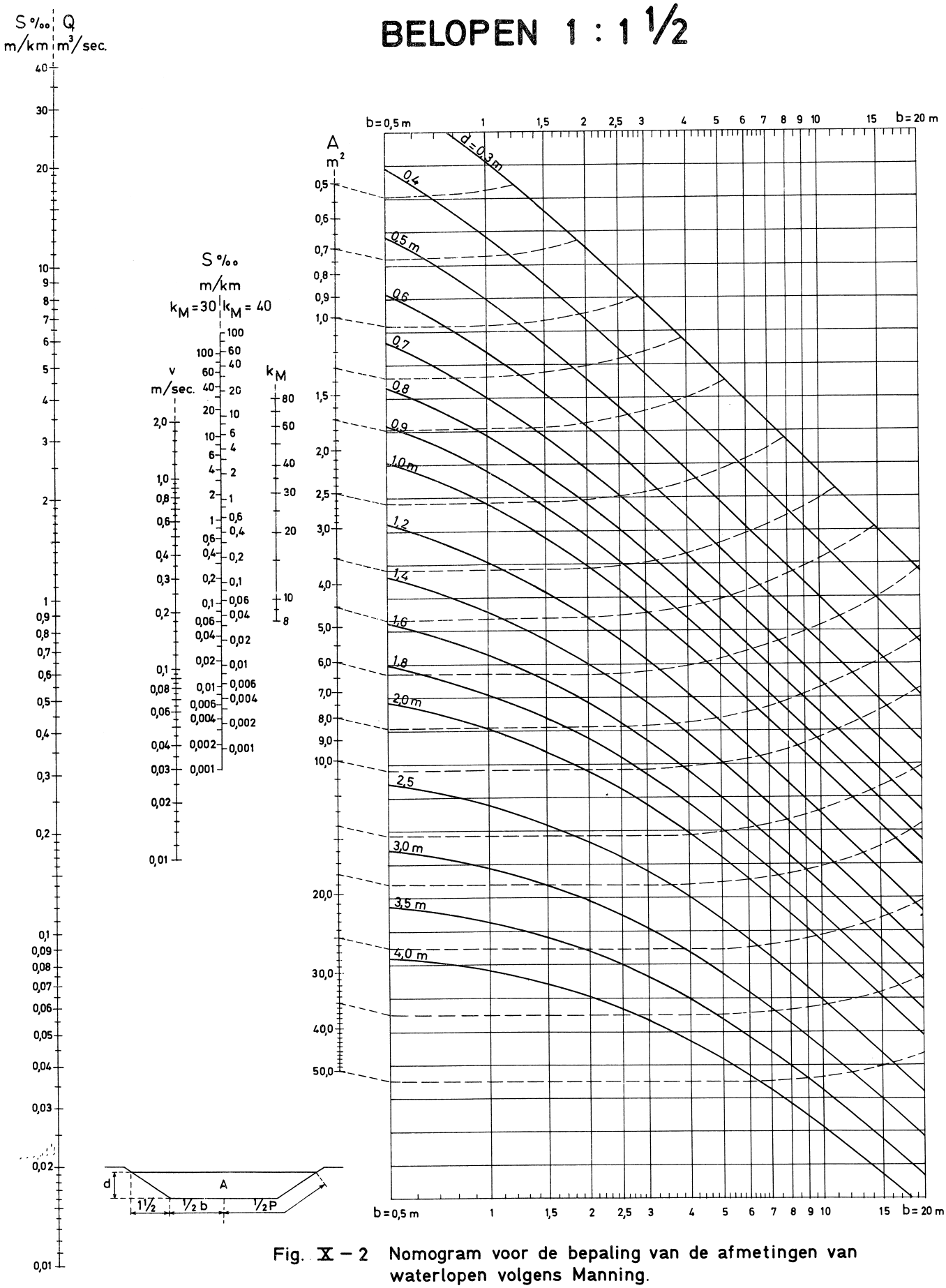


Fig. X – 2 Nomogram voor de bepaling van de afmetingen van waterlopen volgens Manning.

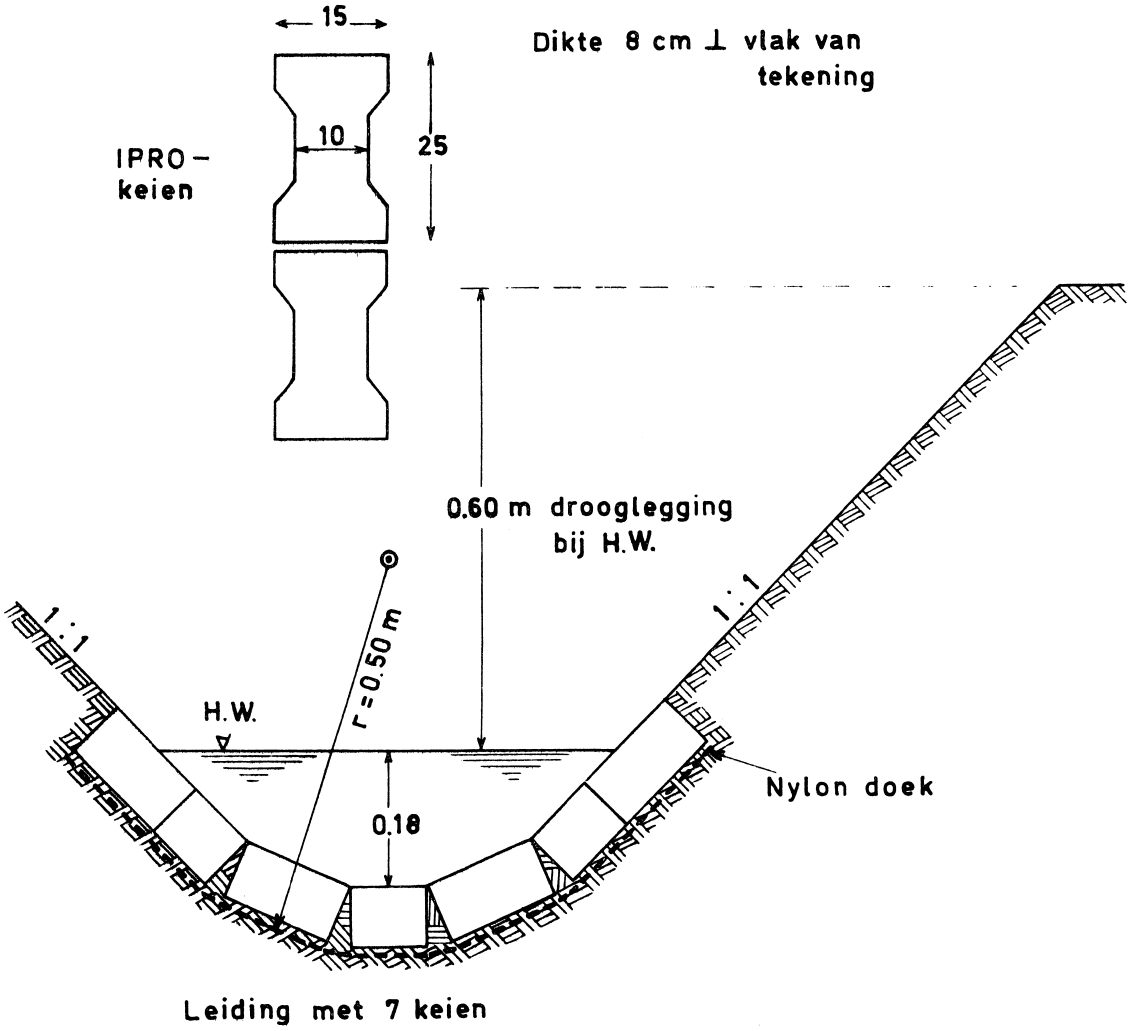


Fig. X-4 Voorbeeld van een beklede leiding.

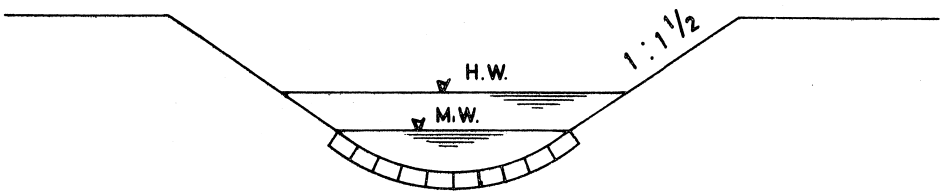


Fig. X - 5 Leiding bekleed tot een vrij frequent voorkomende waterstand

H.W. : hoogwaterlijn, behorend bij de maatgevende afvoer

M.W. : waterlijn, behorend bij 1/4 van de maatgevende afvoer

XI. Onderhoud van waterlopen.

1. Algemeen: invloed op het ontwerp.

a) Door stijging van loonkosten wordt onderhoud van waterlopen een steeds belangrijker vraagstuk, dat ook op het ontwerp invloed uitoefent.

b) Direkte invloed:
- frequent onderhoud geeft hòge k_M, dus geringe aanlegkosten
- minder intensief onderhoud geeft lage k_M, dus hogere aanlegkosten, maar geringere onderhoudskosten
- diepe leidingen (waterdiepte > 1 m) hebben weinig bodembegroeiing.

c) Indirekte invloed: de uitgevoerde werken moeten aangepast zijn aan het toekomstige onderhoud. Niet eenvoudig: de onderhoudsmethoden ontwikkelen zich snel, terwijl een eenmaal aangelegd stelsel een zeer lange levensduur heeft (b.v. 50 jaar).

2. Mechanisch onderhoud.

a) Taluds (vooral boven water en nabij de waterlijn) worden gemaaid. Hiervoor allerlei werktuigen, meest trekkers met lange maaibalk (taludmaaiers).

b) Bodem en onder-water taluds meest met veegboten: bootjes, voorzien van V-vormig mes, dat met rukjes over de bodem wordt bewogen en zo de planten afsnijdt.

c) Onderhoud van kleine waterlopen vaak met zeis (duur) of kettingzeis (veel goedkoper).
Kettingzeis of schakelmes wordt door 2 man bediend.

d) Het losgemaakte "vuil" wordt benedenstrooms verzameld b.v. bij het krooshek van een gemaal. Het uitharken wordt steeds meer

gemechaniseerd.

e) De ontwikkeling gaat in de richting van universele, grote machines, die b.v. tegelijk bodem en taluds kunnen bewerken.
Voor mechanisch onderhoud zijn speciale voorzieningen gewenst:
- een pad langs de waterloop
- bij lange taluds: een tussenberm
- bij duikers en stuwen: voorzieningen voor het passeren van veegboten.

3. Chemisch onderhoud.

a) Chemisch onderhoud geschiedt met herbiciden. Voor planten, die boven water uitsteken (riet, liesgras, e.d.) gebruikt men meestal dalapon (15 kg/ha in 400 l water), tegen dicotylen vaak gemengd met 2 kg/ha MCPA.

b) Voor ondergedoken waterplanten meestal paraquat (0.4 - 0.8 g per m^3 water). Dit middel is niet giftig voor vissen noch voor vee en wordt spoedig afgebroken (halveringstijd < 1 etm). Het helpt niet tegen draadwieren, die door deze behandeling indirekt bevorderd worden.

c) Algemener werkzaam is diuron (0.2 - 1.0 g per m^3), dat echter zeer persistent is en daarom slechts bij uitzondering gebruikt mag worden.

d) Chemische bestrijding kan bezwaarlijk zijn
- voor zeldzame water- en oeverplanten benedenstrooms (natuurbescherming)
- voor gewassen, die met het behandelde water worden beregend of bespoten (tuinbouw)
- voor bomen langs de waterlopen

Uiteraard mogen de middelen niet giftig zijn voor vissen of voor vee.

4. Andere werkwijzen ter vermindering van onderhoud.

a) Licht is een zeer belangrijke faktor. Troebele wateren hebben daardoor geen begroeiing op de bodem. Ook beschaduwing door bomen vermindert de plantengroei zeer sterk.

b) Ongezuiverd afvalwater laat geen bodembegroeiing toe. Zeer vuile wateren behoeven alleen taludonderhoud. Dit is uiteraard geen reden om zuivering achterwege te laten !

c) Gezuiverd afvalwater bevat zeer veel voedingsstoffen en bevordert daardoor de plantengroei. Verwijdering van voedingsstoffen (vooral fosfaten en nitraten) uit het water zou daarom het onderhoud van de waterlopen verminderen.

XII. Polderbemaling

1. Inleiding.

a) Het water van de hoge gronden komt zonder kunstmatige hulpmiddelen tot afvloeiing. In polders zijn daarentegen lozingsmiddelen nodig: dit zijn
- uitwateringssluizen
- gemalen

b) Oorspronkelijk loosden de polders via uitwateringssluizen, die bij laag buitenwater werden geopend. Later paste men bemaling toe, aanvankelijk met windkracht (16e eeuw) en stoom (eind 18e eeuw). Tegenwoordig bijna uitsluitend gebruik van elektriciteit en dieselolie.

c) Vaak vindt men getrapte afwateringssystemen: de polders slaan hun overtollig water niet direkt uit op het buitenwater, maar op een stelsel van boezemwateren. Dit stelsel loost (hetzij natuurlijk, hetzij via bemaling) op het buitenwater.

d) Natuurlijke lozing van polders en boezems wordt steeds bezwaarlijker vanwege:
- toenemende eisen van de landbouw
- inklinking van de grond (in West Nederland ongeveer 2 m sinds de eerste ontginning ± 1200)
- rijzing van de zeespiegel t.o.v. het land (ongeveer 10 à 20 cm per eeuw)
- verdwijnen van eb en vloed door afsluiting van zeearmen

e) In Zuidwest Nederland zijn thans veel aanpassingswerken in uitvoering in verband met het Deltaplan. Dit gebied kende grote getijverschillen en had daardoor nog veel natuurlijke lozing, vaak ondersteund door een klein gemaal voor gebruik tijdens uitzonderlijke omstandigheden.

f) Boezembemaling neemt steeds toe. Enkele voorbeelden:

gemaal	Stavoren (Friesland's boezem)	gereed	
"	Zwartsluis (Meppelerdiep)	in uitvoering	112.5 m^3s^{-1}
"	Muiden (Vechtboezem)	in voorbereiding	60 m^3s^{-1}

g) Daarnaast worden thans gemalen gebouwd, die ten dele of zelfs hoofdzakelijk dienen voor de handhaving van de waterkwaliteit of voor wateraanvoer.

Gemaal	IJmuiden (boezem Noordzeekanaal) voor peilbeheersing en zoutbestrijding	150 m^3s^{-1}
"	Eefde (wateraanvoer naar Twente-kanalen)	10 "
"	Jutfaas (wateraanvoer)	12 "
"	Kreekraksluizen (zoutbestrijding, zie XII-3)	50 "

2. Bemalingskapaciteit; maaluren.

a) Bij bemalen polders is de kapaciteit van het gemaal meestal 10 - 12 mm/etm, bij sterke kwel echter hoger.

b) Het jaarlijks waterbezwaar in polders zonder kwel is ongeveer 200 - 300 mm. Dit komt overeen met het gebruik van de volle kapaciteit gedurende 20 à 30 etm.

c) De bemalingskapaciteit wordt dus alleen volledig benut tijdens zeer regenrijke perioden. Het totale aantal draaiuren van een gemaal is daardoor vrij gering.

d) Meestal heeft men per gemaal meer dan één pompeenheid: dit verkleint het risiko van storing en maakt tevens een betere werkverdeling mogelijk bij geringere afvoeren.

e) Kleine elektrische gemalen zijn gemakkelijk te automatiseren (vlotter met schakelaar).

3. Jaarlijks waterbezwaar.

a) De kosten aan brandstof (of elektriciteit) hangen af van:
- de opvoerhoogte
- de hoeveelheid water, die per jaar moet worden uitgeslagen (het jaarlijks waterbezwaar)
- het rendement van de installatie

De rendementen zijn tegenwoordig zeer hoog; voor de pompen soms meer dan 85%.

b) Het jaarlijks waterbezwaar hangt zeer sterk af van de kwel (tab. XII-1). Bij sterke kwel wordt de bemaling zeer kostbaar door het grote aantal maaluren.

Tabel XII-1. Jaarlijks waterbezwaar in Nederland.

	Kwel mm/etm	Jaarlijks waterbezwaar mm	Bemalings-kapaciteit mm/etm
------	geen	200 - 300	10 - 12
IJsselmeerpolders	1	600 - 700	11 - 13
Groot Mijdrecht	> 10	> 3800	20

4. Invloed van de berging.

a) Voor inrichting van polders in het buitenland zijn meestal geen ervaringscijfers bekend over de benodigde bemalingskapaciteit. Men maakt noodgedwongen gebruik van de methode van de regenduurlijnen of van een daarmee verwante werkwijze.

b) Regencijfers zijn vaak wel aanwezig: de verdamping kan worden geschat. Het moeilijkst is een schatting van de berging.

c) In polders heeft men bergingsmogelijkheden:
   - in open waterlopen
   - in de grond

d) In polders met een moderne verkaveling beslaat het open water slechts 1 - 2% van het totale oppervlak. Een neerslagoverschot van 10 mm geeft dus - als dit in de waterlopen vloeit - een peilstijging van 50 - 100 cm.
   In polders met veel kassen (geen berging in de grond) kunnen daarom zeer grote schommelingen in het polderpeil ontstaan.

e) De berging in de grond is vaak veel belangrijker. Een eerste schatting van de berging kan worden verkregen uit de pF-curve nl. als het verschil in vochtgehalte bij pF - ∞ (grondwater) en bij pF 2.0 (veldkapaciteit), vgl. fig. XII-1.

f) Men kan op deze wijze een schatting van de berging maken; een voorbeeld geeft tab. XII-2.

Tab. XII-2. Schatting van de berging in een polder.

	toelaatbare stijging	% berging	aandeel in berging
open water	20 cm = 200 mm	2%	4 mm
grondwater	40 cm = 400 mm	7%*	28 mm
		Totaal	32 mm

* Als μ = 7%, dan is dit bedrag eigenlijk 0.98 x 7%, omdat slechts 98% van de oppervlakte voor deze vorm van berging wordt benut.

g) Via de regenduurlijn volgt een eerste schatting van de benodigde kapaciteit. Vaak is deze in het buitenland aanzienlijk groter dan onder Nederlandse omstandigheden.

h) Vermindering van de bemalingskapaciteit is mogelijk door:
   - verbreding van de kanalen

- ontlenen van specie voor de dijk aan de polderzijde, waardoor een breed ringkanaal ontstaat
- toestaan, dat bij zware neerslag het laagste gedeelte tijdelijk onder water staat.

i) Steeds is een onderzoek nodig naar de te verwachten kwel, omdat deze in hoge mate de bemalingskosten bepaalt. Sterke kwel kan inpoldering onrendabel maken. Soms is kwel van betekenis voor de vochtvoorziening van de gewassen (polders in Tsjaad-meer). In droge klimaten bestaat daarbij echter een groot gevaar voor verzilting (fig. XII-2).

j) Als een rechte dijk een zeer uitgestrekte polder begrenst geldt voor de kwelstroom onder de dijk (zie diktaat agrohydrologie):

$$s_o = \frac{\beta \cdot z}{2 + B/\lambda}$$

s_o	kwelstroom onder dijk	m^2/etm
z	peilverschil tussen binnen- en buitenwater	m
B	aanlegbreedte dijk	m
$\lambda = \sqrt{kDc}$		
$\beta = \sqrt{kD/c}$		
k	doorlaatfaktor watervoerende laag	m/etm
D	dikte	m
c = d'/k'	weerstand afsluitende lagen	etm
d'	dikte afsluitende lagen	m
k'	doorlaatfaktor " "	m/etm

Voor kleinere polders van langgerekte vorm en voor ronde polders bestaan eveneens formules ter berekening van de kwel. Kleine afwijkingen van dergelijke "ideale" vormen hebben weinig invloed. De onzekerheid schuilt eerder in de bodemkonstanten, met name in de weerstand c van de afsluitende lagen.

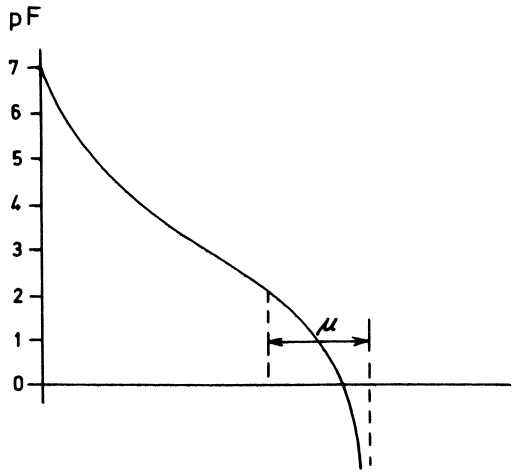


Fig. XII – 1 Schatting van de bergingsfactor μ uit de pF - curve.

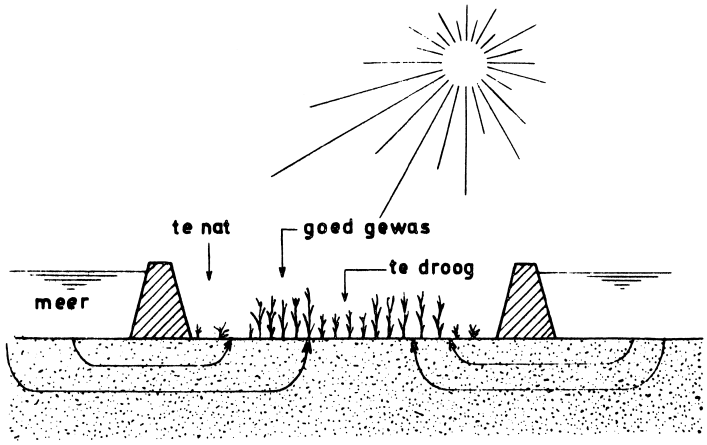


Fig. XII – 2

Inpoldering in het Tsjaad - meer. Waar de kwel ongeveer gelijk is aan de waterbehoefte van het gewas is de groei zeer goed. Op den duur is ver-verzilting van de grond te verwachten.
Geen bemaling aanwezig : in dit zeer droge klimaat wordt gebruik gemaakt van de verdamping.

XIII. Waterkwaliteit.

1. Betekenis van de waterkwaliteit.

a) Schoon zoet water is voor vrijwel alle doeleinden een ideale grondstof: drinkwatervoorziening, industrie, landbouw. Zeewater is voor de meeste doeleinden onbruikbaar.

b) De eisen van de gebruikers lopen sterk uiteen. Sterk vervuild afvalwater is voor de drinkwaterbereiding ongeschikt, voor de landbouw veel minder schadelijk. Het wordt soms wel verregend op landbouwgronden, al zijn aan deze methode veel secundaire bezwaren verbonden.

c) Zowel voor de landbouw als voor drinkwatervoorziening is het gehalte aan opgeloste zouten vaak doorslaggevend voor de bruikbaarheid. De eisen lopen in dit opzicht parallel. In de landbouw zijn zouten vooral schadelijk onder ariede omstandigheden.

d) In de volgende gevallen worden hoge eisen gesteld aan de waterkwaliteit.
- kaskulturen (aried klimaat, b.v. in West Nederland)
- bevloeide landbouw in ariede tot semi-ariede gebieden, b.v. Irak, Pakistan.

2. Normen voor de waterkwaliteit.

a) In gebieden, die aan zee grenzen, is het gehalte aan chloriden een goede maatstaf voor de kwaliteit. Chloriden vormen dan het grootste deel van de opgeloste anionen; bovendien zijn zij zeer schadelijk voor de planten. Het gehalte wordt titrimetrisch bepaald.

b) In kontinentale, droge gebieden is vaak de samenstelling van de zouten sterk afwijkend van zeezout: vaak zijn sulfaten, soms ook bicarbonaten veel belangrijker dan chloriden. De kwaliteit wordt

dan gebaseerd op totaal zoutgehalte of op elektrisch geleidingsvermogen. Dit laatste is zeer eenvoudig te meten.

c) Er bestaat een nauwe korrelatie tussen totaal zoutgehalte (milliequivalent per liter) en elektrisch geleidingsvermogen, EC. In Nederland, waar Cl' in de regel domineert, geldt tevens een goede korrelatie tussen EC en Cl-gehalte (fig. XIII-1, 2).

d) EC (electrical conductivity) wordt uitgedrukt in reciproke ohms per cm (mho of Siemens per cm). Voor water gebruikt men meestal micromhos per cm. De temperatuur heeft grote invloed: meestal wordt EC omgerekend op een standaardtemperatuur van 25°C, soms ook van 18°C.

e) Voor watermonsters geldt bij benadering:

$$EC\ (\mu\ mhos/cm) \simeq \frac{ppm}{0.66} \simeq 100 \times meq/l$$

$$\simeq 2800 \times osm.\ druk\ (atm.)$$

f) Nederlandse normen voor de bruikbaarheid van water in de landbouw zijn vermeld in tab. XIII-1.
Tuinbouw onder glas is het meest gevoelig:
vooral het Westland is door zijn ligging zeer kwetsbaar. Er zijn kostbare maatregelen uitgevoerd of in voorbereiding om hier de waterkwaliteit te handhaven.

g) De eisen van de glastuinbouw (< 200 mg/l Cl') komen dicht bij de eisen voor drinkwater (max. 125 - 150 mg/l Cl'); overigens is dit niet steeds realiseerbaar.

h) In ariede gebieden is water met 400 ppm opgeloste stoffen van zeer goede kwaliteit. Toch geeft een watergift van 1000 mm per jaar een zoutaanvoer van 4000 kg/ha per jaar. Dit zal op den duur tot verzilting leiden, tenzij het zout wordt afgevoerd.
Door deze akkumulatie zijn in Irak uitgestrekte gebieden verzilt.

Tabel XIII-1. Nederlandse normen voor de bruikbaarheid van water in de landbouw.

mg/l Cl'	kwalifikatie	gebruikswaarde
< 200	zoet	geschikt voor alle doeleinden
200-300	zoet	in toenemende mate ongeschikt als gietwater voor tuinbouw in kassen
300-500	enigszins brak	geschikt voor volle gronds-tuinbouw
500-1000	licht brak	in toenemende mate ongeschikt voor volle gronds-tuinbouw
1000-2000	matig brak	in toenemende mate ongeschikt voor alle landbouwdoeleinden, behalve voor veedrenking
2000-5000	brak	geschiktheid voor vee twijfelachtig
> 5000	zeer brak tot zout	onbruikbaar

i) De eisen aan irrigatiewater hangen af van:

- de samenstelling van de zouten
  - = Na^+ schadelijk voor struktuur van de grond, vooral in kombinatie met HCO_3'
  - = Cl' schadelijk voor de plantengroei
  - = water met veel opgelost gips ($CaSO_4$) heeft vrij hoog geleidingsvermogen, maar is onschadelijk, vaak zelfs gunstig.
- de verbouwde gewassen:
  - = gerst, bieten, in mindere mate tarwe zijn zeer resistent
  - = aardappelen, erwten, bonen, mais en de meeste vruchtbomen zeer gevoelig.
- mogelijkheden tot doorspoeling:
  - = hoe beter de ontwatering, des te hoger toleratie tegen zoutschade
- de grondsoort
  - = bij zandige textuur is gebruik van enigszins brak water vaak goed mogelijk. Kleigronden vertonen daarbij spoedig struktuurbederf.

j) De eisen hangen verder af van de beschikbare waterkwaliteit: in gebieden met goed water zijn zij strenger dan in gebieden waar alleen water van matige kwaliteit aanwezig is (N. Afrika).

k) Het U.S. Salinity Laboratory (Riverside) hanteert de normen van tab. XIII-2. In N. Afrika stelt men de eisen veel lager. Bij voldoende doorspoeling wordt hier met tamelijk brak water (C_3 à C_4) nog een goed resultaat bereikt.

Tabel XIII-2. Klassifikatie van bevloeiingswater (U.S. Salinity Laboratory).

Class	Salinity	μ mhos/cm: 25°C
C1	low	100 - 250
C2	medium	250 - 750
C3	high	750 - 2250
C4	very high	> 2250

l) Meer inzicht wordt verkregen uit zoutbalansen van de grond, opgesteld uit bepaling van aanvoer (met irrigatiewater) en afvoer (door perkolatie naar de ondergrond en afvoer via het grondwater).

m) IJzer kan zeer hinderlijk zijn. In Nederland komt het in sommige gebieden (o.a. N. Limburg) in grote hoeveelheden in het grondwater voor.
De opgeloste ferro-verbindingen oxyderen aan de lucht tot moeilijk oplosbare ferri-verbindingen.

n) Sterk ijzerhoudend water is ongeschikt voor beregening in de tuinbouw. Bij fruit veroorzaakt het een ruwe schil, bij groenten een bruine verkleuring. De produkten worden daardoor onverkoopbaar. Soms treedt ook bladverbranding op of belemmering van de groei.

o) Voor fruitteelt : max. 1 - 2 mg/l Fe^{++}
Voor groenteteelt: max. 10 - 15 mg/l Fe^{++}
Soms gebruikt men een eenvoudige ontijzeringsinstallatie. (Fig. XIII-3).

p) Bij rekreatie-objekten kan veel hinder worden ondervonden van ijzer. Vijvers kunnen aan één zijde ijzerrijk grondwater ontvangen, aan de andere zijde water verliezen (fig. XIII-4). In de vijver vindt dan oxydatie en neerslag van bruine ijzerverbindingen plaats. In gebieden met hellend grondwater dient de lengte-as van vijvers dan ook evenwijdig met de isohypsen te worden gelegd.

3. Beheersing van de waterkwaliteit.

a) Verwacht mag worden, dat door sterk toenemende waterzuivering het gehalte aan organische verontreinigingen zal verminderen. Het gezuiverde water bevat veel nitraten en fosfaten, die een entrofiëring teweeg brengen. Deze kan b.v. leiden tot het optreden van hinderlijke groei van algen ("algenbloei").

b) Voor de landbouw is vooral van belang de verontreiniging met chloriden. Hiervan zijn twee belangrijke bronnen:
- afvalzouten, geloosd in de Rijn
- zeewater

c) Voor verdere voorziening in de waterbehoefte is Nederland grotendeels aangewezen op de afvoer van de Rijn. Deze rivier is sterk verontreinigd met allerlei afvalstoffen.
Voor de koncentratie aan chloriden geldt:

$c = c_n + c_k$ c: zoutkoncentratie g/l of kg/m^3
c_n: natuurlijke koncentratie g/l of kg/m^3
c_k: kunstmatige koncentratie g/l of kg/m^3

waarbij $c_n \simeq 0.020$ g/l (20 mg/l) chloride

$c_k = \frac{A}{Q}$ A: chloride-aanvoer kg s^{-1}
Q: debiet rivier m^3 s^{-1}

Omdat A minder varieert dan Q, is de zoutkoncentratie in het Rijnwater bij hoge afvoeren redelijk laag, bij lage afvoeren veel te hoog.

d) De kunstmatige zoutafvoer A bedroeg:

in 1960	264.5 kg s^{-1}	chloride
in 1965	337 "	"

De herkomst van dit zout was:

kalimijnen Elzas	41%
industrie Moezel-Saar	13%
kolenmijnen Duitsland	17%
soda e.a. industrieën	26%

Bij lage afvoeren ($Q < 1500$ $m^3 s^{-1}$) stijgt daardoor het chloridegehalte van het Rijnwater tot boven 200 mg/l.

e) Schommelingen in chloridegehalte worden afgevlakt als men het water door een groot reservoir laat stromen. Het IJsselmeer dient op deze wijze als buffer: de Deltameren zullen een overeenkomstige funktie gaan vervullen.

f) Voor drinkwatervoorziening zijn verdere maatregelen gewenst. Met spaarbekkens kan men een aktief beheer voeren: vullen in tijden van goede waterkwaliteit.

g) In ondiepe bekkens (b.v. IJsselmeer) is de menging vrijwel volledig. In diepe meren treedt in de zomer een stratifikatie op als gevolg van dichtheidsverschillen.

h) Bij volledige menging geldt voor het zoutgehalte in een met zout water gevuld bekken onder invloed van doorstroming met zoet rivierwater:

$c = c_o \cdot e^{-t/T}$ (1) c: zoutkoncentratie g/l
c_o: beginkoncentratie g/l

$T = \frac{V}{Q}$ (2)

t:	tijd	etm
T:	verblijftijd in bekken	etm.
V:	volume bekken	m^3
Q:	debiet	m^3/etm.

Heeft het instromende water een zoutkoncentratie c_i, dan is:

$$c - c_i = (c_o - c_i) \cdot e^{-t/T} \qquad (3)$$

of

$$\boxed{c = c_o \cdot e^{-t/T} + c_i \, (1 - e^{-t/T})} \qquad (4)$$

De formule is analoog aan die voor een niet-stationaire grondwaterstroming via een weerstand (model van De Zeeuw en Hellinga, nu met $\alpha = 1/T$).
Bij beide processen is de afgevoerde hoeveelheid (zout resp. water) evenredig met de nog in het reservoir aanwezige voorraad.

i) Nabij de zee dringt zout water landinwaarts. In riviermonden wordt dit binnendringen sterk bevorderd door het verschil in dichtheid tussen zoet en zout water. Zeewater dringt als onderstroom de riviermonden binnen en vormt een zouttong, die zich slechts langzaam met het zoete water vermengt (fig. XIII-5). De verzilting in landinwaartse richting blijkt evenredig te zijn met de derde macht van de waterdiepte. Verdieping van toegangsgeulen brengt daardoor een sterke toeneming van de verzilting teweeg (Nieuwe Waterweg), verondieping werkt gunstig (Nieuwe Maas).

j) Bij schutsluizen dringt eveneens zout water binnen, vooral door uitwisseling tussen zoet en zout water bij geopende sluisdeuren (fig. XIII-6). Bij sluizen kan dit proces worden tegengegaan door schermen van luchtbellen nabij de sluisdeuren.
De gevormde wervel vormt een scheiding tussen zoet en zout water (fig. XIII-7), waardoor de uitwisseling vertraagd wordt.

k) Bij de Kreekraksluizen (Schelde-Rijnverbinding) zal een nieuw systeem worden toegepast om doordringen van zout of brak water

naar het Zeeuwse Meer te voorkomen. De zoute sluisinhoud zal tijdens het schutten geheel door zoet water worden vervangen; eerst daarna worden de binnendeuren geopend. Het zoute water uit de sluiskolk wordt door openingen onderin afgelaten op een laag gelegen voorraadbekken en daaruit door een gemaal in het brakke kanaal teruggepompt.

1) Het meest effektieve middel is verkorting van de kustlijn. Door de aanleg van de Afsluitdijk is het zoutgehalte van het water in Friesland en Noord-Holland aanzienlijk gedaald. Hetzelfde kan in Zuidwest Nederland worden verwacht na het gereedkomen van het Deltaplan.

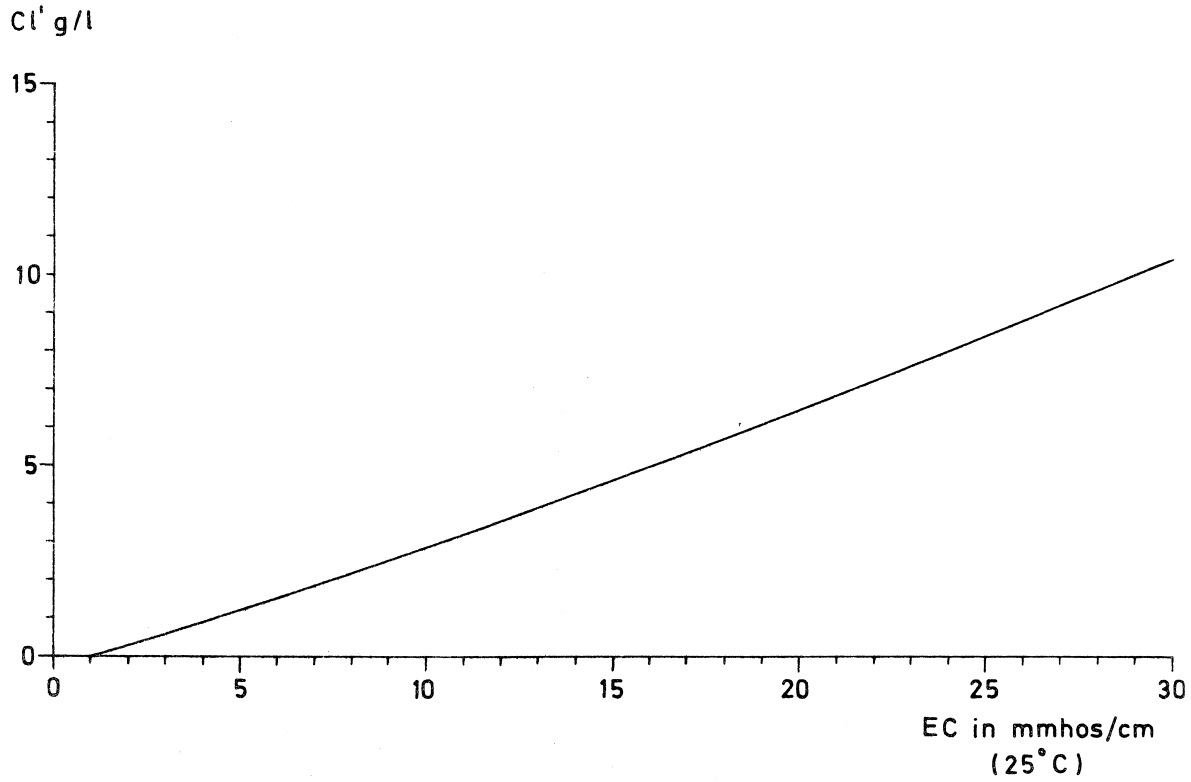


Fig. XIII – 1 Verband tussen gehalte aan Cl'-ionen en electrisch geleidingsvermogen van watermonsters in Nederland.

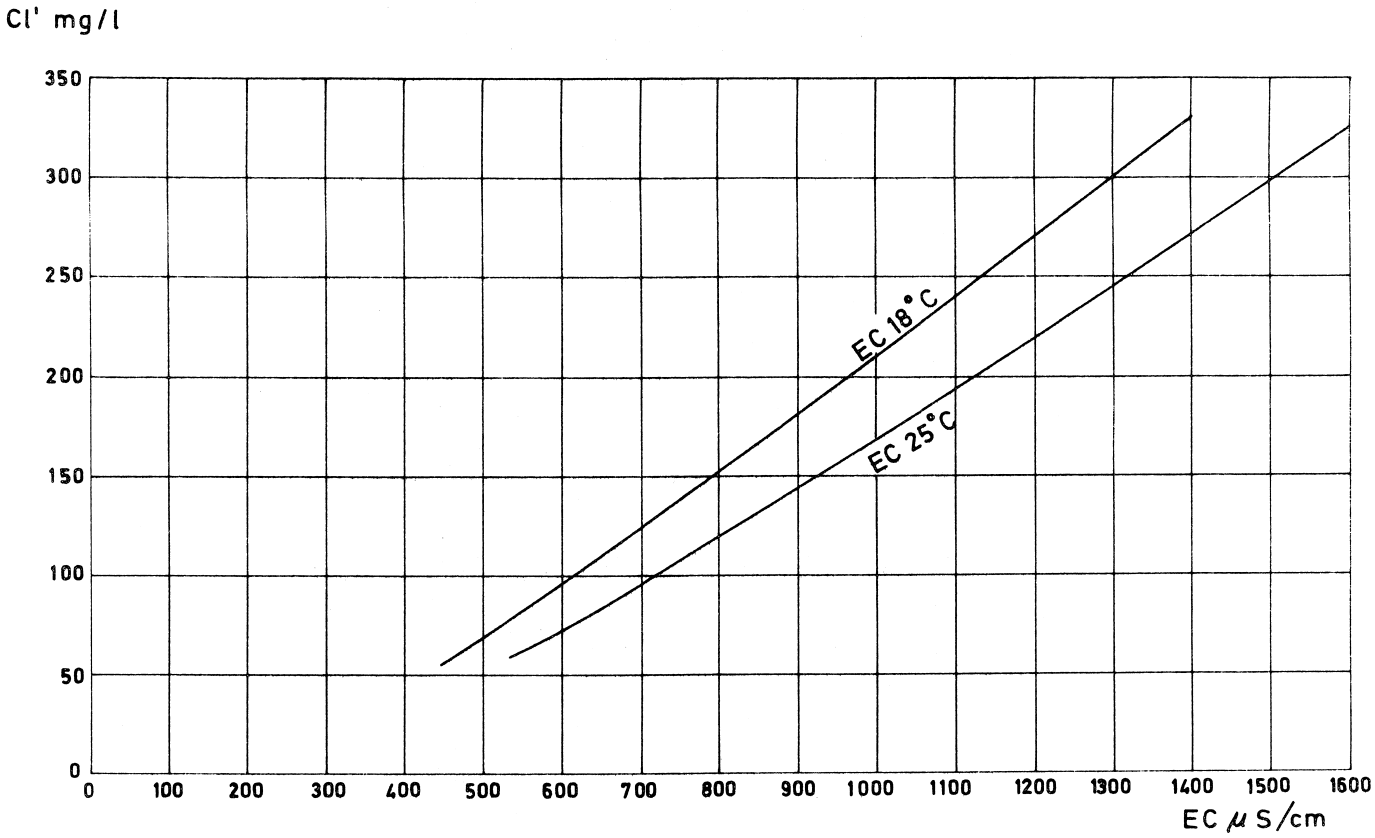


Fig. XIII – 2 Verband tussen Cl' in mg/l en EC (18°C en 25°C) in het water van de Rijn.

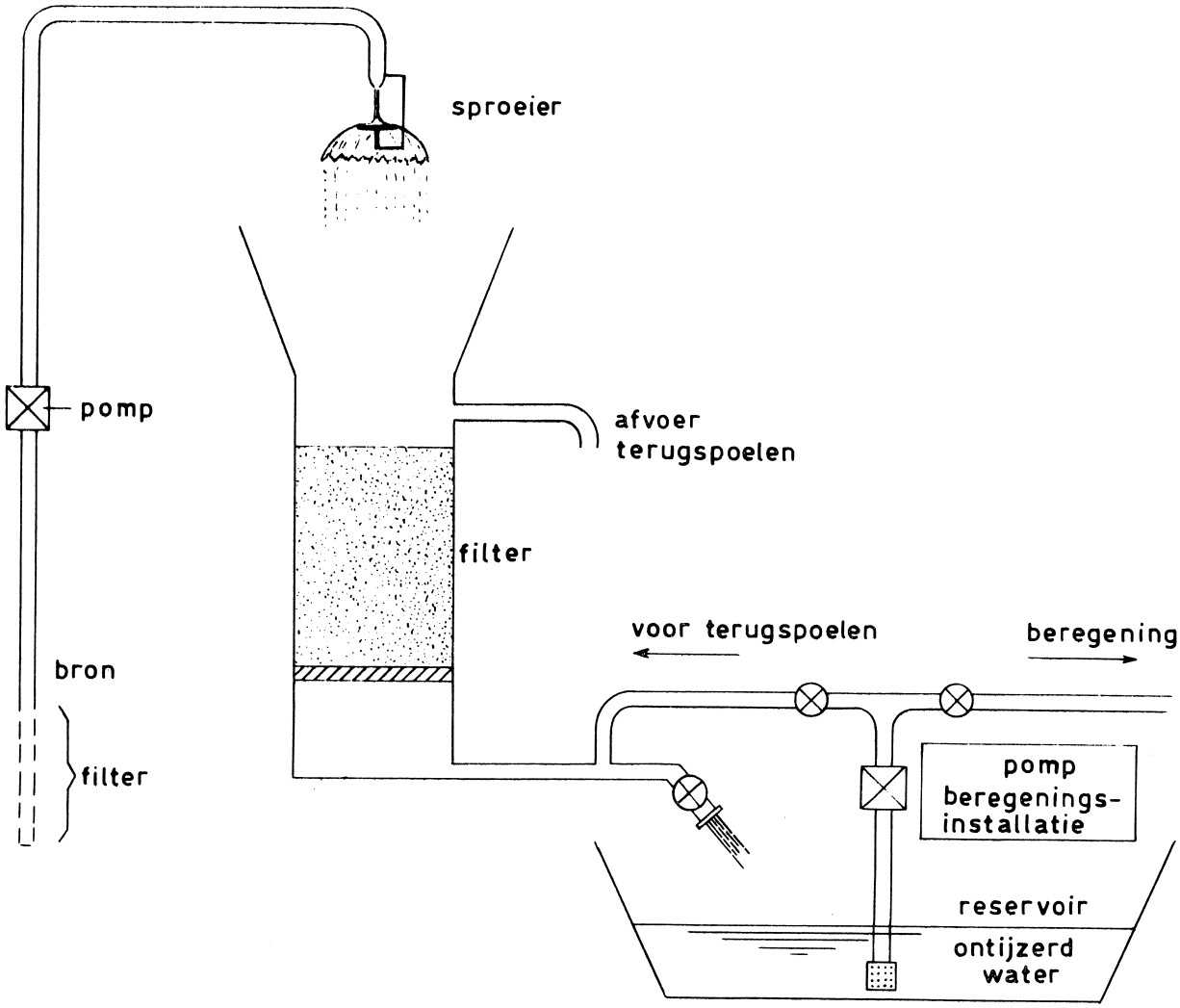


Fig. XIII – 3 Eenvoudige ontijzeringsinstallatie voor beregeningswater in de tuinbouw.

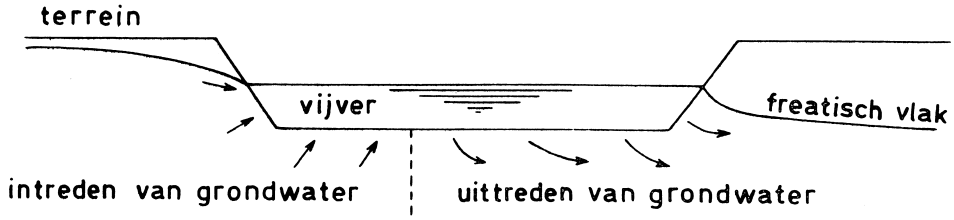


Fig. XIII – 4 Stroming van grondwater in de omgeving van een vijver.

Fig. XIII-5 Vorming van een zouttong in een riviermonding.

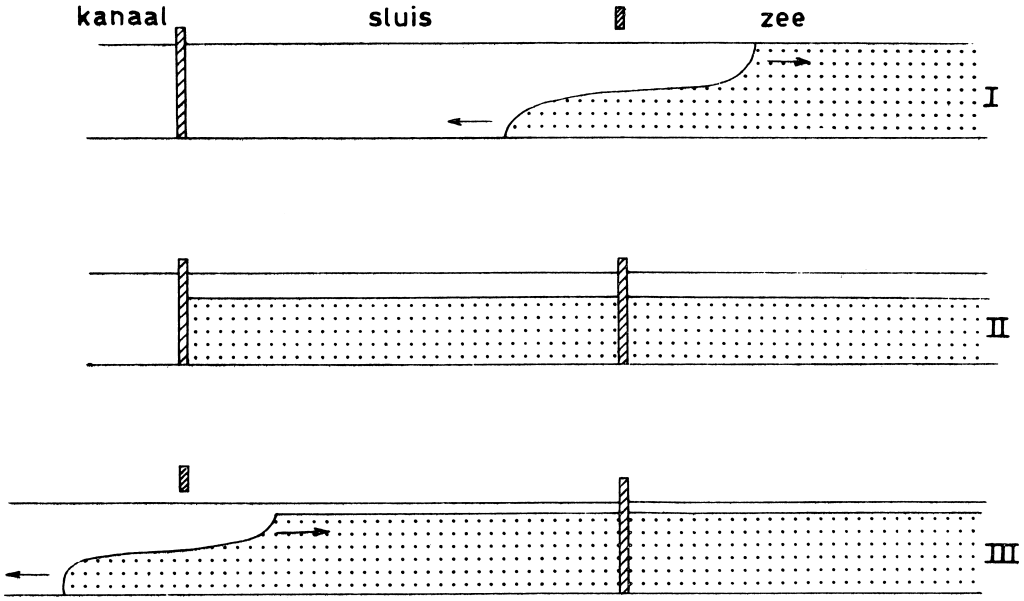


Fig. XIII-6 Verzilting van een kanaal via een schutsluis.

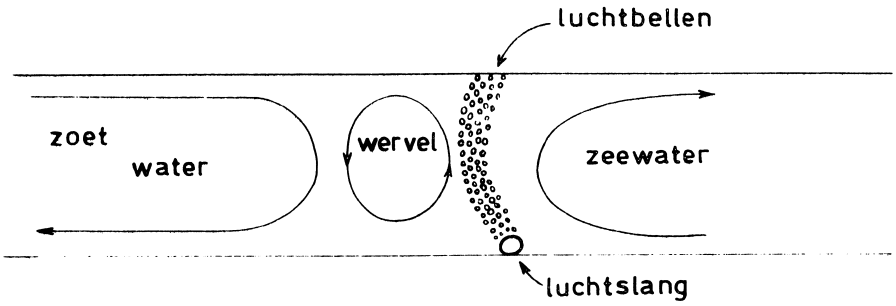


Fig. XIII-7 Principe van de werking van een luchtbellenscherm.

XIV. Watervoorziening.

1. Noodzaak van watertoevoer.

a) De noodzaak van watertoevoer is afhankelijk van:

- klimatologisch neerslagtekort, vooral van de grootheid Σ (E_p - N) sinds het begin van een droge periode.
  E_p: potentiële evapotranspiratie mm/etm
  E_a: aktuele " "
  N : neerslag "
- werkelijk neerslagtekort, vooral van de grootheid Σ (E_a - N) sinds het begin van een droge periode.
  E_a is vaak kleiner dan E_p, afhankelijk van de grondbedekking en het groeistadium van het gewas. Bij gewassen met korte groeiduur is daardoor het werkelijke neerslagtekort vaak veel kleiner dan het klimatologische.
- bodemgesteldheid, een goede grond, die goed bevochtigd is, kan aan een diep wortelend gewas in de droge tijd 150 - 250 mm vocht ter beschikking stellen. In niet te droge klimaten is dit voldoende voor een goede oogst, in droge klimaten echter niet. In zeer droge streken wordt de grond vaak niet volledig bevochtigd, zodat de oogst afhangt van de vochtvoorraad, die bij het begin van het groeiseizoen aanwezig is (Z. Rusland, lössgronden met groot vochthoudend vermogen).
- hoe waardevoller het gewas, des te eerder geeft men water (tuinbouw versus graanteelt).

b) Men treft kunstmatige watervoorziening aan:

- in zeer droge gebieden, waar anders geen landbouw mogelijk is (Egypte, BW-klimaat)
- in gebieden met uitgesproken droge tijd: buiten de regentijd is landbouw zonder watervoorziening niet mogelijk (Mediterraan Cs-klimaat met graanteelt in winter, braak in zomer)
- gebieden, waar in droge jaren vochttekorten optreden (NW-Europa, vele tropische gebieden).

Watervoorziening treft men hier het meest aan bij waardevolle gewassen (tuinbouw, fruit, suikerriet) en op weinig vochthoudende gronden.

c) Door het opstellen van waterbalansen voor de bodem kan inzicht worden verkregen in de behoefte aan watergiften en in de grootte daarvan.

d) Zonder kunstmatige waterverstrekking is vaak een aanpassing aan vochttekorten mogelijk b.v. door:
- korte groeiduur van het gewas (in Nederland rogge en zomergerst, in warme gebieden vaak gierst of tarwerassen met korte groeiduur)
- weinig gevoelige gewassen (aardappels minder gevoelig dan bieten)
- dry farming: water opsparen door het land braak te houden totdat voldoende vocht aanwezig is voor een (graan) oogst
- bemesting: er zijn aanwijzingen dat fosfaat gunstig werkt bij droogte
- vasthouden van regenwater door dijkjes (bunds) rondom de velden (India, op slecht doorlatende Vertisolen)
- grondverbetering: door mengen of breken van lagen bevordert men de diepte van beworteling en daarmede de beschikbare voorraad bodemvocht: plaatgronden in Zeeland (dunne laag zavel op zand), vele gronden in de oude Veenkoloniën.
- benutten van grondwater: in de lage delen van Nederland (poldergebieden) van nature hoge grondwaterstanden. Door inlaten van water in de sloten tracht men het grondwater op peil te houden; dit gelukt slechts ten dele, omdat de slootwanden een grote weerstand bieden aan de waterbeweging (slootwand-effekt).
  In de beekdalen van de Pleistocene gronden van Nederland vindt men grasland, dat profiteert van de aanvoer van grondwater uit de omliggende hogere gebieden.
  Ook zonder aanvulling kan het grondwater bijdragen tot de vocht-

voorziening, door capillair transport via de onverzadigde zone. Het daalt dan echter, waardoor dit transport op den duur tot stilstand komt.
De bloembollengronden van de binnenduinen zijn afgegraven tot 55 cm boven boezem- of polderpeil: dit laatste wordt door inlaten nauwkeurig gehandhaafd.

2. Kunstmatige watervoorziening.

a) Deze geschiedt als:
- "infiltratie"
- beregening
- bevloeiing

b) Bij "infiltratie" houdt men het grondwater door aanvoer op peil. Het systeem is in Nederland ontwikkeld uit de watervoorziening van de bollengronden, waar alleen het peil in het open water wordt gehandhaafd. In de binnenduinen is dit voldoende (brede sloten, dik en goed doorlatend zandpakket). Bij de eigenlijke infiltratie worden greppels of drains voor wateraanvoer gebruikt.

c) Infiltratie stelt zeer bepaalde en strenge eisen:
- zeer vlak terrein
- geringe verliezen naar de ondergrond (< 3 mm/etm)
- doorlatende grond, ook als deze voortdurend nat gehouden wordt

De toepassing is vrijwel beperkt tot vlak liggende zandgronden, bij voorkeur rustend op een ondoorlatende laag. De berekening van de drainafstanden verloopt analoog aan die voor de waterafvoer: meestal gebruikt men een variant van de formule van Hooghoudt (fig. XIV-1).

$$L^2 = \frac{8\ kd\ (n - m_o)}{s} + \frac{4\ k\ (n - m_o)^2}{s} \qquad (1)$$

De drains worden horizontaal gelegd: zij dienen in de winter tevens voor ontwatering. Rondom de drains treedt afwisselend reduktie op (in de zomer) en oxydatie (in de winter). Daardoor veel

gevaar voor verstopping met ijzerverbindingen. Als afdekmateriaal onder deze omstandigheden heeft heide tot nu toe het best voldaan. Infiltratie is vooral toegepast in de oudere Zuiderzeepolders (Wieringermeer, Noordoostpolder). Het systeem zal waarschijnlijk geen uitbreiding meer ondergaan, wegens:

- beperkte oppervlakte aan gronden, die aan de eisen voldoen
- bestemming van dergelijke gronden tot rekreatiegebied in plaats van tot grasland.

d) In Suriname stuwt men bij cultures op goed doorlatende kleigronden het water in de greppels periodiek gedurende korte tijd op tot iets beneden maaiveld. Op deze wijze kan men in droge tijden de grond af en toe bevochtigen ("flooden"; het is echter geen onder-water zetten van de grond, maar komt overeen met een diskontinue "infiltratie").

e) Beregening en bevloeiing kunnen toegepast worden onafhankelijk van de grondwaterstand. Een diep doorlatende grond en een lage grondwaterstand zijn in droge klimaten een voordeel, omdat daarbij het gevaar voor verzilting gering is. De waterverstrekking is meestal diskontinu (behalve bij bevloeide rijst), bij "infiltratie" in de regel kontinu (behalve bij "flooden").

f) Voor het ontwerp van toevoerstelsels is van belang:
- hoeveel water moet worden verstrekt ?
- bij diskontinue toediening: hoe vaak moet dit geschieden ?

g) Van belang zijn (tabel XIV-1)
- de totale jaarlijks te geven hoeveelheid (bepalend voor pompkosten of reservoirinhoud)
- de piekbehoefte (bepalend voor de kapaciteit van het aanvoerstelsel)

h) De jaarlijkse waterbehoefte is sterk afhankelijk van het klimaat. De piekbehoefte varieert veel minder, omdat deze wordt bepaald door de droogste periode. Men mag aannemen, dat dan geen neer-

slag valt, zodat het verlies door verdamping geheel moet worden aangevuld. In de warmste maanden is deze verdamping niet sterk afhankelijk van de breedtegraad, omdat deze grootheid grotendeels door straling wordt bepaald. Op hoge breedte wordt de lagere zonnestand dan gekompenseerd door een langere dag.

Tabel XIV-1. Waterverbruik (orde van grootte) bij kunstmatige waterverstrekking.

gebied	gemiddelde jaarlijkse waterbehoefte, mm	piekbehoefte $ls^{-1}ha^{-1}$
Nederland, grasland	150 - 250	0.5 - 1.0
" , glastuinbouw, gestookt	900 - 1300	0.5 - 1.0
Spanje	1000 - 1200	0.5 - 1.0

i) De technische uitvoering van beregening en bevloeiing wordt in andere colleges behandeld.

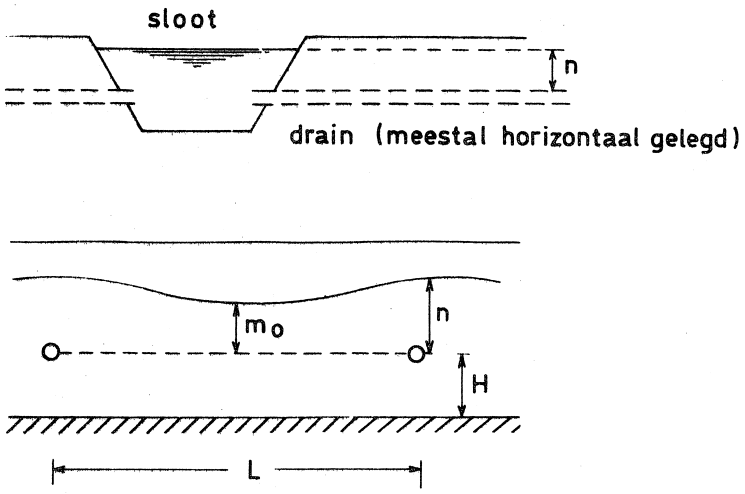


Fig. XIV - 1 Infiltratie