

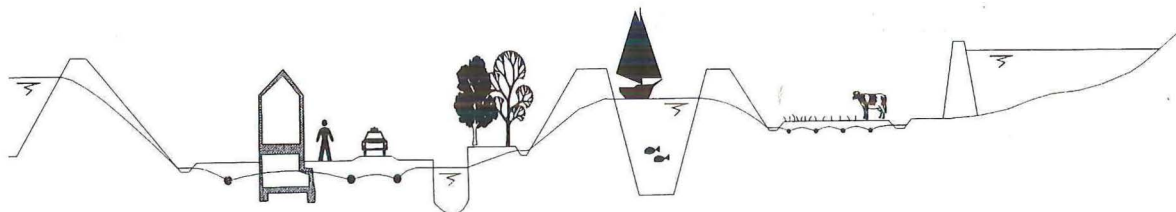
CTIw3410

# Waterbeheersing

Dictaat behorende bij het derdejaars college Waterbeheersing

Februari 2000

Sectie Land- en Waterbeheer



**LW3410**

# **WATERBEHEERSING**

Dictaat behorende bij het derdejaars college Waterbeheersing

Februari 2000

Technische Universiteit Delft  
Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen  
Opleiding Civiele Techniek  
Sectie Land- en Waterbeheer



## Voorwoord

Dit dictaat, behorende bij het vak *Waterbeheersing* (lw3410), heeft tot doel derdejaars studenten kennis te laten maken met het waterbeheer in landelijke en stedelijke gebieden.

Bij het opstellen van dit dictaat is vrijelijk gebruik gemaakt van materiaal van de vroegere hoogleraren Prof. Klein, Prof. Berkhout, Prof. Schoemaker, Prof. Segeren en hun medewerkers.

Voor het verkrijgen van een goed overzicht van het vakgebied waterbeheer en het voorbereiden van het tentamen is dit dictaat een hulpmiddel, maar het bezoeken van de colleges is van eminent belang. Ook de niet in het dictaat opgenomen stof die op de colleges wordt behandeld zal aan dit overzicht bijdragen en getentamineerd kunnen worden.

Prof.ir. R. Brouwer

Delft, februari 2000



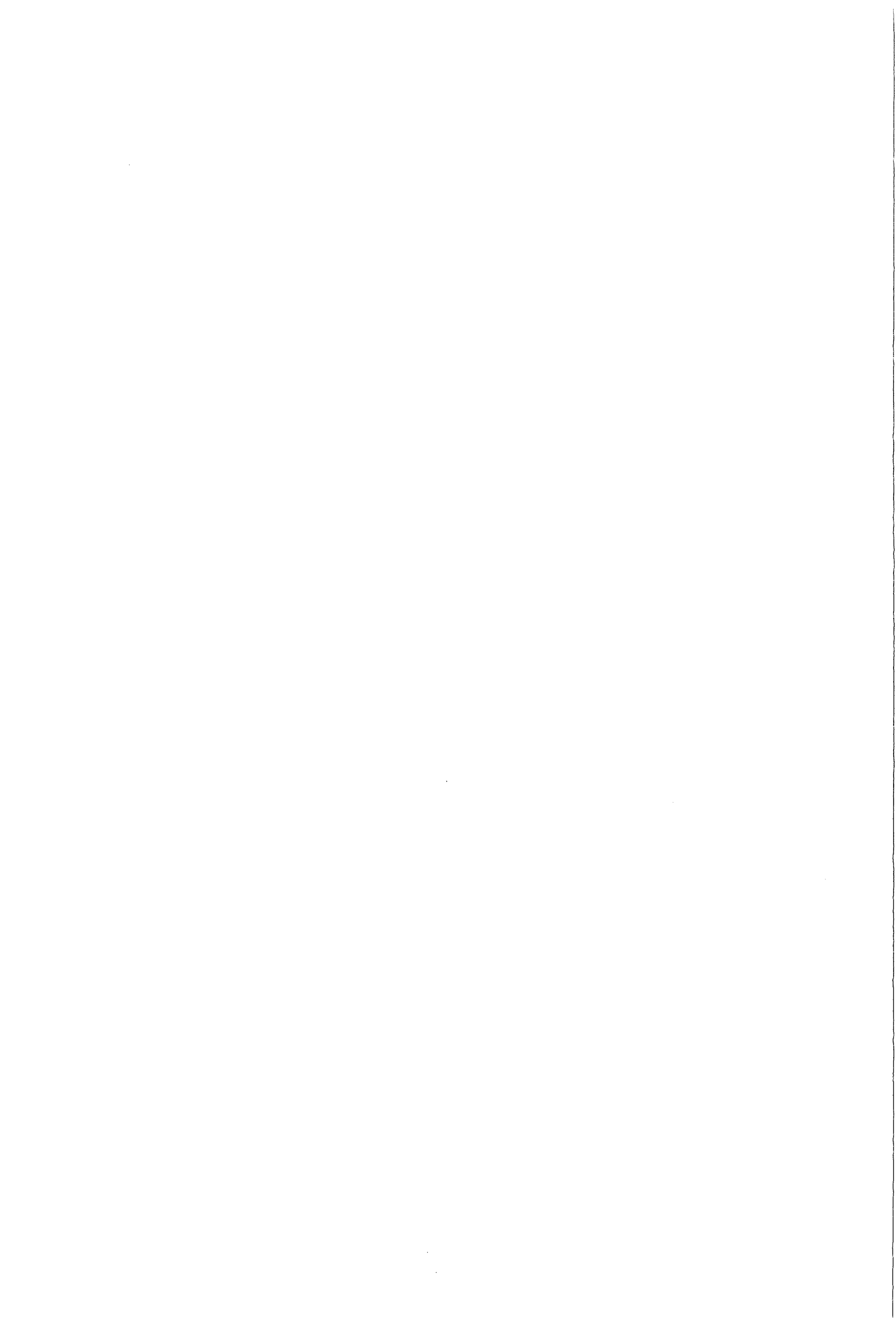


# INHOUDSOPGAVE

<b>1</b>	<b>Grondslagen en achtergronden</b>	
1.1	Inleiding.....	1.1
1.1.1	Inleiding tot het college .....	1.1
1.1.2	Inleiding tot het vakgebied.....	1.1
1.1.3	Vakdiensten en instituten .....	1.5
1.1.4	Vakliteratuur en handboeken .....	1.6
1.2	De Nederlandse situatie.....	1.7
1.2.1	Inleiding .....	1.7
1.2.2	Geologische opbouw.....	1.9
1.2.3	Klimaat.....	1.16
1.2.4	Waterstaatkundige opbouw .....	1.17
1.2.5	Bestuurlijke organisatie waterbeheer .....	1.28
1.3	Waterbeheersing in het landelijke gebied.....	1.32
1.3.1	Waterbeheersing voor landbouw en natuurbeheer .....	1.32
1.3.2	Ontwaterings- en afwateringsbehoefte.....	1.33
1.3.3	Wateraanvoerbehoefte.....	1.33
1.4	Waterbeheersing in het stedelijk gebied .....	1.34
1.4.1	Inleiding .....	1.34
1.4.2	Ontwaterings- en afwateringsbehoefte.....	1.35
1.4.3	Wateraanvoerbehoefte .....	1.36
1.5	Bijzondere problemen in het buitenland.....	1.37
1.5.1	Inleiding .....	1.37
1.5.2	Aride omstandigheden .....	1.38
1.5.3	Humide omstandigheden .....	1.40
<b>2</b>	<b>Water in de grond</b>	
2.1	Inleiding .....	2.1
2.2	Grond.....	2.1
2.2.1	Vaste delen .....	2.1
2.2.2	Poriën .....	2.6
2.3	Water in de verzadigde zone .....	2.7
2.3.1	Inleiding.....	2.7
2.3.2	Krachten in de onverzadigde zone.....	2.7
2.3.3	Vochtgehalte, vochtspanning en pF-curve in de onverzadigde zone .....	2.9
2.3.4	Waterbergend vermogen van grond .....	2.14
2.4	Stroming in de onverzadigde zone .....	2.15
2.4.1	Grondwaterstroming in de verzadigde zone.....	2.15
2.4.1.a	De wet van Darcy .....	2.15
2.4.1.b	Bepaling van de doorlatendheid .....	2.16
2.4.2	Doorlatendheidscoëfficiënt in de onverzadigde zone.....	2.22
2.5	Rijtema en de onverzadigde zone.....	2.26
2.6	Waterbeheersing voor landbouw en natuurbeheer .....	2.32
2.6.1	Ontwaterings- en afwateringsbehoefte .....	2.33
2.6.2	Wateraanvoerbehoefte .....	2.33
<b>3</b>	<b>Ontwatering</b>	
3.1	Inleiding en begrippen.....	3.1
3.2	Ontwateringsmiddelen.....	3.3
3.3	Doelstellingen voor ondergrondse ontwatering.....	3.8

3.4	Oppervlakte ontwatering .....	3.10
3.5	Ontwerp van ontwatering .....	3.11
3.5.1	Inleiding.....	3.11
3.5.2	Stationaire drainagevergelijkingen.....	3.11
3.5.3	Niet-stationaire drainagevergelijkingen .....	3.22
3.5.4	Bepaling van de buisdiameter .....	3.24
<b>4</b>	<b>Afwatering</b>	
4.1	Inleiding en begrippen.....	4.1
4.2	Landelijke en stedelijke gebieden .....	4.2
4.3	Hellende en vlakke gebieden.....	4.4
4.4	Lozing en berging.....	4.5
4.4.1	Inleiding.....	4.5
4.4.2	Natuurlijke lozing .....	4.5
4.4.3	Kunstmatige lozing.....	4.7
4.4.4	Berging .....	4.10
4.5	Polders .....	4.12
4.6	Ontwerp van afwateringssystemen.....	4.13
4.6.1	Inleiding.....	4.13
4.6.2	Bepaling van doelstellingen en functies.....	4.13
4.6.3	Tracé en inrichting van het afwateringssysteem.....	4.13
4.6.4	Peilnormen voor de afwatering .....	4.14
4.6.5	Bepaling van de maatgevende afvoer.....	4.16
4.6.5.1	Inleiding.....	4.16
4.6.5.2	Gemengde hellende/vlakke gebieden.....	4.17
4.6.5.3	Hellende gebieden met snelle afvoer, rationele methode .....	4.18
4.6.5.4	Vlakke gebieden en polders.....	4.22
4.6.5.5	Regenduurlijnmethode .....	4.24
4.6.5.6	Niet-stationaire afvoermodellen .....	4.30
<b>5</b>	<b>Wateraanvoerbehoefte</b>	
5.1	Inleiding en begrippen.....	5.1
5.2	Wateraanvoerbehoefte ten behoeve van de landbouw.....	5.2
5.2.1	Inleiding .....	5.2
5.2.2	Referentie evapotranspiratie .....	5.2
5.2.3	Gewaswaterbehoefte .....	5.4
5.2.4	Netto gewaswaterbehoefte .....	5.5
5.2.5	Overige veldwaterbehoefte .....	5.5
5.2.6	Rotatie van gewassen.....	5.6
5.2.7	Opzet wateraanvoerbehoefteberekening .....	5.6
5.2.8	Computerprogramma's .....	5.8
5.3	Waterbronnen .....	5.8
<b>6</b>	<b>Wateraanvoersystemen</b>	
6.1	Inleiding en begrippen.....	6.1
6.1.1	Algemeen .....	6.1
6.1.2	Indeling van een wateraanvoersysteem.....	6.2
6.2	Veldirrigatiesystemen.....	6.2
6.3	Ontwerpcriteria van wateraanvoersystemen.....	6.5
6.3.1	Capaciteit van aanvoerstelsel .....	6.5
6.3.2	Inleiding distributiemethodiek .....	6.8
6.3.3	Eenvoudige type meet- en regelkunstwerken .....	6.10

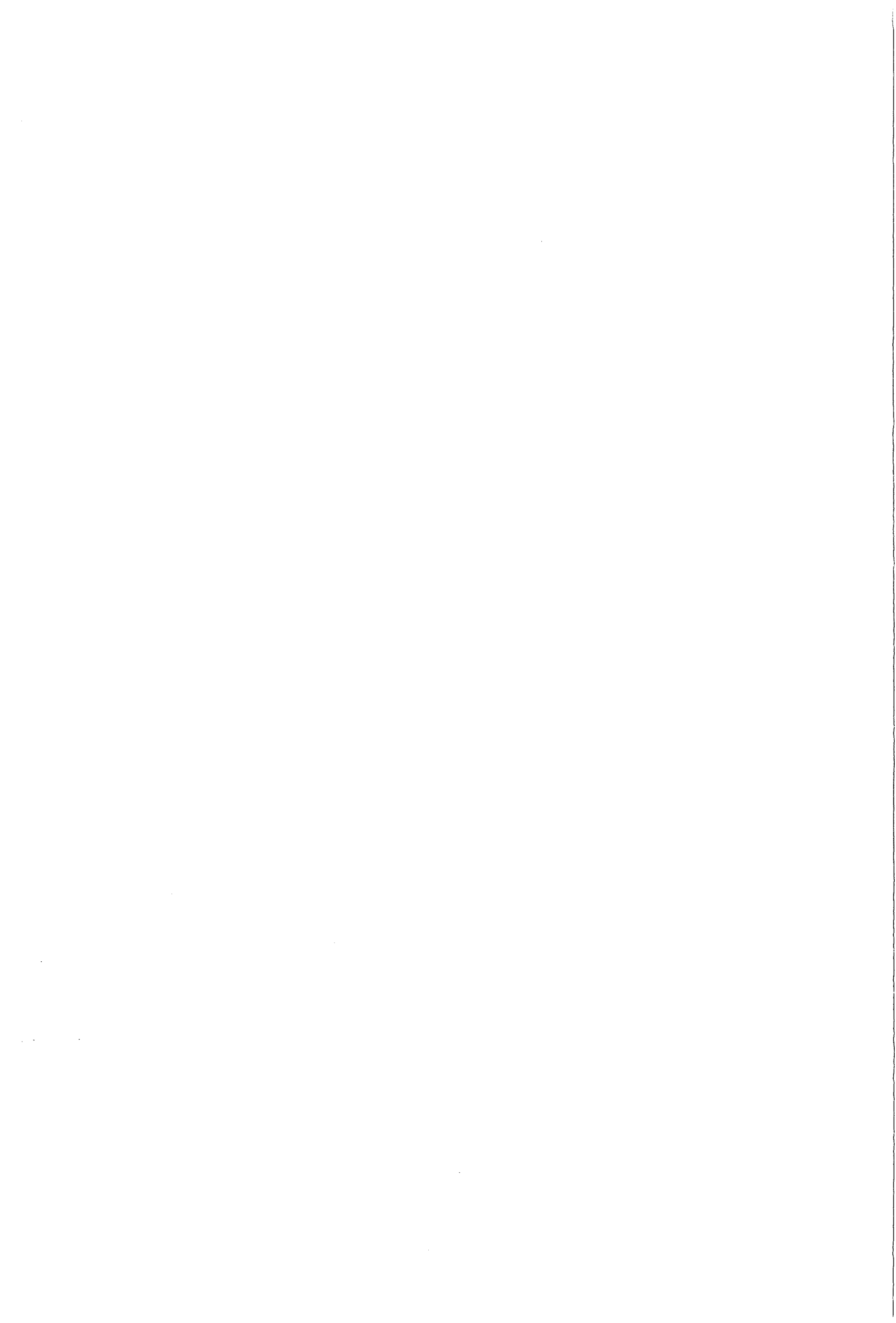
6.4	Reservoirs .....	6.13
6.4.1	Inleiding .....	6.13
6.4.2	Dalafsluitingen .....	6.13
6.4.3	Seizoenreservoirs .....	6.13
6.4.4	Nachtreservoirs in irrigatiegebieden .....	6.14
6.4.5	Stedelijke berging .....	6.14
6.4.6	Ontwerp van reservoirs .....	6.14
<b>7</b>	<b>Ontwerpen en dimensioneren</b>	
7.1	Vloeistofmechanica.....	7.1
7.1.1	Toepassen van vloeistofmechanische begrippen.....	7.1
7.1.2	Kentallen: Reynolds en Froude .....	7.1
7.1.3	Tijds- en plaatsafhankelijkheid.....	7.1
7.2	Inleiding: Samenhang functionele criteria en ontwerp transport en regelsystemen .....	7.2
7.2.1	Soorten kunstwerken .....	7.2
7.2.2	Eisen transport- en regelsystemen.....	7.3
7.3	Dimensioneren transportleidingen .....	7.3
7.3.1	Eenparige stationaire stroming.....	7.3
7.3.2	Niet-eenparige stationaire stroming .....	7.6
7.3.3	Lengteprofielen .....	7.9
7.4	Dimensioneren regelkunstwerken.....	7.10
7.4.1	Inleiding.....	7.10
7.4.2	Overlaten .....	7.11
7.4.3	Onderspuiers.....	7.12
7.4.4	Duikers .....	7.13
7.5	Niet-stationaire stromingsberekeningen .....	7.15
<b>8</b>	<b>Beheersorganisatie</b>	
8.1	Inleiding.....	8.1
8.2	Operationeel waterbeheer .....	8.1
8.3	Onderhoud .....	8.1
8.4	Beheersorganisaties .....	8.2



## **Hoofdstuk 1      Grondslagen en Achtergronden**

### *Leerdoelen*

Dit hoofdstuk bevat een inleiding tot het vakgebied. In grote lijnen dient u, na lezing van dit hoofdstuk, de relevantie van het vakgebied en de specifieke civieltechnische waterbeheersproblemen in verschillende omstandigheden te herkennen.



# 1 GRONDSLAGEN EN ACHTERGRONDEN

## 1.1 Inleiding

### 1.1.1 Inleiding tot het college

Het vak *Waterbeheersing* is een van de inleidende vakken voor civiel ingenieur die in het "natte domein" willen werken. Het volgt in de opleiding tot Civiel Ingenieur op de inleidende colleges *Hydrologie* en *Inleiding Waterbouwkunde* en andere waterbouwkundige en vloeistofmechanische vakken. Er is een zijwaartse relatie met Civiele *Gezondheidstechniek* (GZ3420), *Constructieve waterbouw* (WA3330) en *Rivierwaterbouwkunde* (WA3340). Het college is breed van opzet, en van

(De tekst in de kaders in dit hoofdstuk is afkomstig uit "Samen over water; advies ten behoeve van de Vierde Nota Waterhuishouding", gezamenlijk advies van de Raad voor Verkeer en Waterstaat, de Raad voor Milieubeheer, de Raad voor het Natuurbeheer, de Raad voor de Openluchtrecreatie en de Raad voor de Ruimtelijke Ordening; 1996)

Water heeft in potentie vele functies, namelijk een ecologische functie, diverse gebruiksfuncties en een belevingsfunctie. Al deze functies moeten uiteindelijk duurzaam vervuld worden. Vanuit de duurzaamheidsgedachte betekent dit dat het water moet voldoen aan eisen op het gebied van kwaliteit en kwantiteit. Omdat de veiligheid van mens en dier gewaarborgd moeten worden is dit aspect van belang bij het beheer van watersystemen.

belang voor studenten waterbouw en infrastructuur. Het is een verplicht vak voor hen die willen afstuderen in de richting Waterbeheer, Milieu- en Gezondheidstechniek.

De waterkwaliteitskant van de waterbeheersing zal worden behandeld in *Waterkwaliteitsmanagement* (LW4400). In het vierde en vijfde jaar zullen zowel de waterbeheersing landelijke gebieden en de waterbeheersing stedelijke gebieden meer gedetailleerd aandacht krijgen. Voor landelijke gebieden gebeurt dit in de vakken *Irrigatie en drainage* (LW4410) en *Polders en Hoogwaterbeheersing* (LW4460). De stedelijke waterbeheersing volgt dan in het vak *Waterbeheersing in de stad* (LW5510). Vooral in de stedelijke waterbeheersing is de link met de gezondheidstechnische vakken evident, maar deze blijkt ook van belang door de invloed van stedelijk water op de landelijke omgeving.

### 1.1.2 Inleiding tot het vakgebied

Definitie: "Het vakgebied van de waterbeheersing (of waterhuishouding) omvat de maatregelen die de mensheid ten dienste staan en toepast om de toestand van het hydrologische systeem (oppervlaktewater en grondwater) in zijn leefgebied beter dienstbaar te maken aan zijn doelstellingen zowel in het opzicht van kwantiteit als kwaliteit".

Hydrologie is de leer van het ontstaan, het voorkomen en het gedrag van water in al haar vormen op en onder de landoppervlak van de aarde, en vormt een basiswetenschap voor het vakgebied waterbeheersing.

Er kan aanleiding zijn tot waterbeheersingmaatregelen indien de bestaande waterhuishoudkundige toestand wateroverlast veroorzaakt (overstroming, hoge grondwaterstand, etc.), niet in alle behoeften naar water in voldoende kwantiteit en/of kwaliteit voorziet, schade veroorzaakt door erosie of verzouting, chemische en thermische vervuiling.

In een dichtbevolkt land als Nederland kan de waterbeheersing in landelijke en stedelijke gebieden niet los van elkaar worden gezien en als zodanig zal in dit college aandacht worden besteed aan de waterbeheersing in landelijke en stedelijke gebieden. In dit college zal de nadruk liggen op de waterbeheersing van landelijke gebieden waarbij de te stellen eisen voortvloeien uit de functies van deze gebieden voor de "groot-waterverbruikers" met name de landbouw, de recreatie en het natuurbeheer.



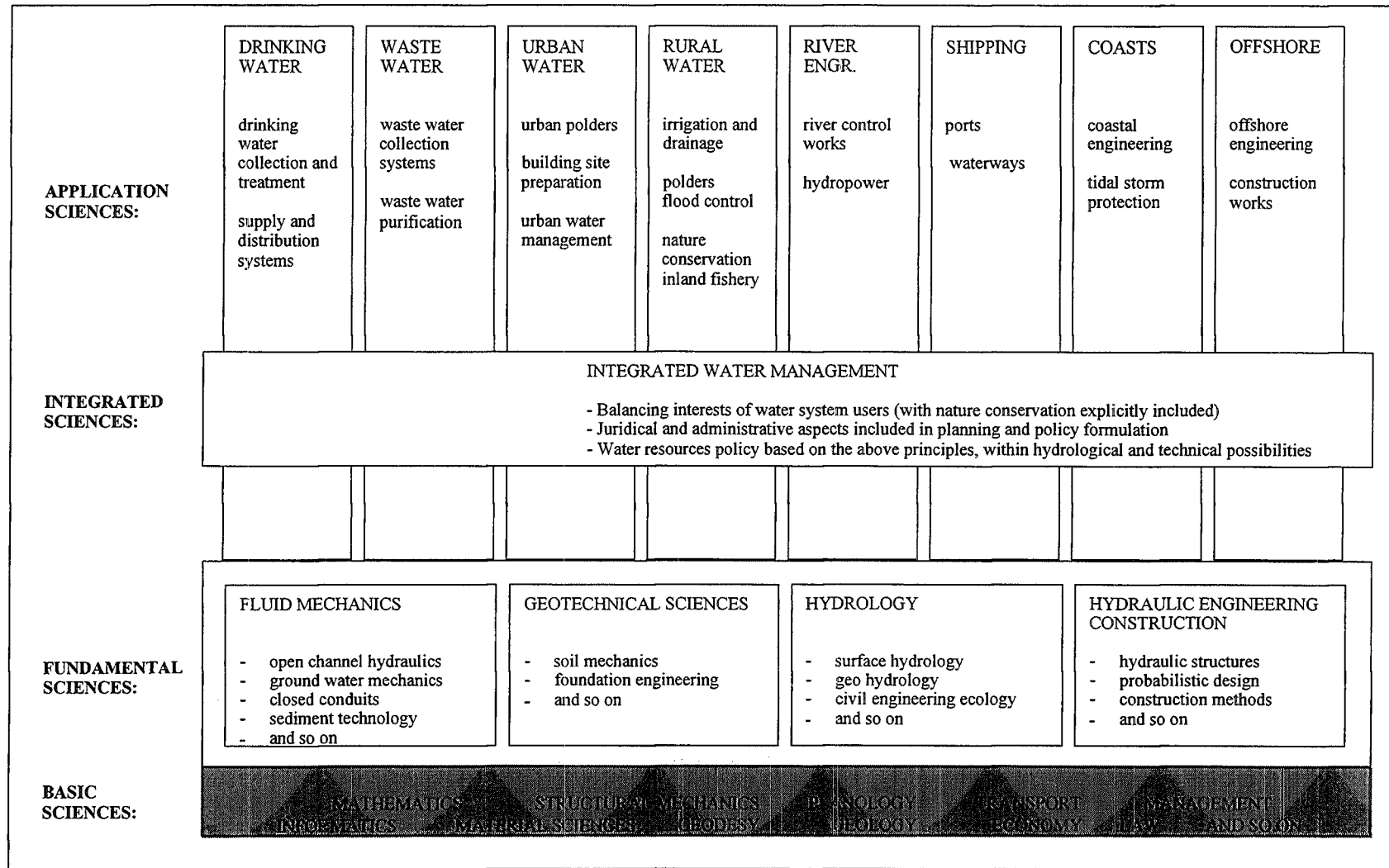
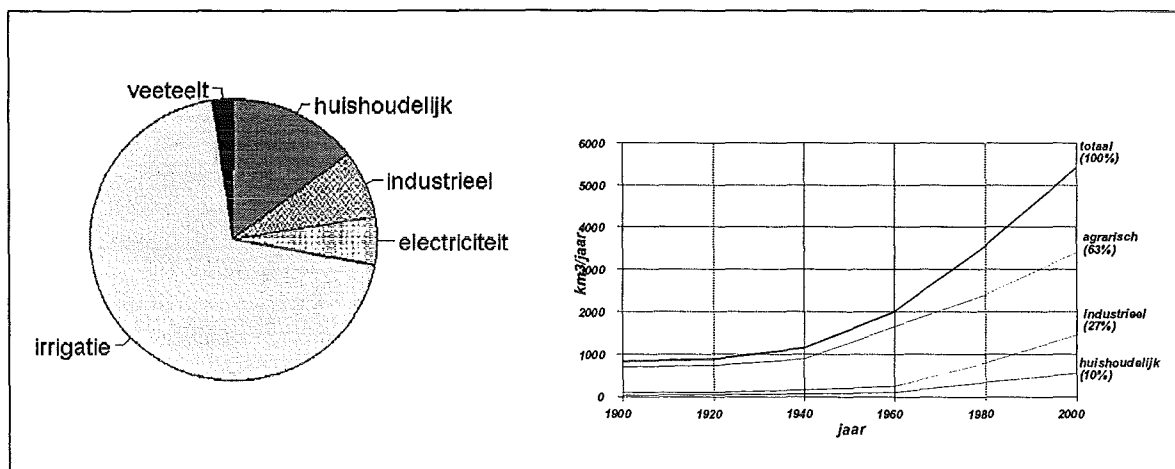


Figure 1.0 Strategische samenhang in het natte domein van de Civiele Techniek

Het water op aarde bevindt zich voor een deel op het aardoppervlak (oppervlaktewater) en voor een deel eronder (grondwater). Grond- en oppervlaktewater vormen echter één systeem, en zijn sterk interactief. Ook waterbeheersingrepen in één van deze waterbronnen kunnen niet los worden gezien van de invloed die deze hebben op de andere.



Figuur 1.1: Waterverbruik naar doel in de VS

Figuur 1.2: Wereldwijd waterverbruik na 1920

In de laatste jaren is de aandacht voor de waterkwaliteit van grond- en oppervlaktewater sterk gegroeid. Niet alleen moet deze kwaliteit voldoende zijn om het watergebruik van de mens veilig te stellen, maar ook moeten de verschillende ecosystemen kunnen voortbestaan. Ingrijpen in de kwantitatieve waterstromen veroorzaakt vaak ook kwalitatieve veranderingen in het watermilieu. De lozing van afvalwater is het meest duidelijke voorbeeld van zo'n kwaliteitsingreep, maar ook irrigatie en drainage kunnen via verzouting en erosie invloed hebben op de waterkwaliteit in een gebied. Waterkwaliteit en waterkwantiteit zullen dus ook in samenhang beoordeeld dienen te worden.

*Gebieden met een ecologische functie zijn zowel te vinden in natuurgebieden als in cultuurlandschappen. Veel van de natuurwaarden, waarvoor Nederland internationale verantwoordelijkheid heeft, betreffen levensgemeenschappen die gebonden zijn aan natte of vochtige omstandigheden. Naast de algemene eisen aan de kwaliteit en kwantiteit van het water stellen het behoud en de ontwikkeling van de natuur specifieke eisen aan het watersysteem. Daarnaast heeft elke levensgemeenschap specifieke eisen. Een ecologisch duurzaamheidskader bevat normen voor de biodiversiteit en voor een na te streven oppervlakte nat natuurgebied, uitgesplitst naar verschillende ecotypen. Buiten de natuurgebieden is een zodanige algemene milieukwaliteit nodig dat de flora en fauna die eigen zijn aan het agrarisch cultuurlandschap hierin een plaats krijgen en behouden. De waterkwaliteit wordt bedreigd door de belasting met schadelijke stoffen zoals bestrijdingsmiddelen, fosfaat en stikstof. De waterkwantiteit wordt negatief beïnvloed door een verlaging van het waterpeil ten behoeve van de landbouw en door aanpassing van de peilen in gebieden die een bebouwingsbestemming krijgen.*

Een overzicht van veel voorkomende doelstellingen in het waterbeheer, met globale kerncijfers, is gegeven in tabel 1.1, waarin ook de onderscheiden vak-colleges aan de faculteit Civiele Techniek zijn genoemd. De verschillende doelen waarvoor water wordt verbruikt zijn weergegeven in de figuren 1.1 en 1.2.

**Tabel 1.1: Een overzicht van veel voorkomende doelstellingen in het waterbeheer**

Doel	Debiet/volume/peil faalkans	Voorbeeld		Vak opleiding Civiele Techniek
Drinkwater levering	135 lpppd	stad van 100.000 inwoners	0.156 m <sup>3</sup> /s	gz3420, gz4470
Huishoudelijk afvalwaterafvoer	120 lpppd	stad van 100.000 inwoners	0.139 m <sup>3</sup> /s	gz4480
Energie/industriewater	377*10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /jaar	hoogovens	12 m <sup>3</sup> /s	gz4470
Veiligheid tegen overstroming	rivieren	rivierdijken		lw4460
	zee	zeedijken		wa3340 wa4330
Veiligheid tegen inundaties	locale intense neerslag	polders en boezemsystemen		lw3410
				lw4460
Begaanbaarheid van de grond; bouwrijp terreinen	grondwaterstand- beheersing	landbouwgrond, stedelijk gebied		lw3410
				lw5510
Landbouw/natuur in groei- seizoen (piekaanvoer)	0,5 - 2,0 l/s/ha	10.000 ha in gematigd klimaat	5 m <sup>3</sup> /s	lw3410 lw4410
		10.000 ha in heet klimaat	20 m <sup>3</sup> /s	lw3410 lw4410
Scheepvaart	min. peil: min. Q	schutsluizen Julianakanaal	15 m <sup>3</sup> /s	wa3330
Stedelijk hemelwater piek- afvoer	25 mm in één uur (1: 10 jaar)	stad van 100.000 inwoners (600 ha) in gematigd klimaat	40 m <sup>3</sup> /s	lw5510
				gz3420 gz4490
Doorspoelen zoute kwel in droge tijd	0,3 * 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup> per jaar	schemerboezem	10 m <sup>3</sup> /s	lw4460
Doorspoelen Nieuwe Waterweg	10*10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup> per zomer		orde van 1000 m <sup>3</sup> /s	-
<b>N.B. aan veel van deze doelstellingen zijn ook kwaliteitseisen gekoppeld</b>				gz3420, he4400

Het vakgebied waterbeheersing kent een oude en rijke traditie in de Nederlandse samenleving. De wordingsgeschiedenis van Nederland door de eeuwen heen is grotendeels gebaseerd geweest op onze voortgang in kennis en kunde op dit vakgebied. En ook nu nog is deze kennis van vitaal belang voor de instandhouding en beheer van ons landgebied. Van oudsher zijn de Nederlanders op dit vakgebied ook buiten hun eigen land actief geweest. Deze traditie zet zich voort en vindt zijn afspiegeling in dit college waarin ook aandacht wordt besteed aan niet typisch Nederlandse aspecten van het vakgebied.

De vakgebieden waterbouwkunde en waterbeheersing hebben van meet af aan tot de kern van de opleiding van de Nederlandse civiele ingenieur behoort. Vroeger werd er geen onderscheid tussen de twee vakgebieden gemaakt, maar tegenwoordig zijn de beide gebieden zo ontwikkeld dat ze een eigen onderscheiden inhoud gekregen, ook in de opleiding aan de TU. Hierbij kan geen der vakgebieden echter goed beoefend worden zonder begrip en kennis van het andere. Het onderwijs in het watermanagement aan de faculteit der Civiele Techniek wordt verzorgd door de afdeling Watermanagement. Hierbij gaat het vooral om het vaststellen wat er moet gebeuren en waarom, daarbij uitgaande van de eisen die de menselijke samenleving aan het waterbeheer stelt en de randvoorwaarden die het natuurlijke hydrologische systeem daaraan oplegt. Bij waterbouwkunde ligt het accent op hoe de daarvoor nodige werken tot stand moeten worden gebracht. De grens tussen de beide vakgebieden is niet scherp.

Het vakgebied waterbeheersing is bij uitstek een interdisciplinair vakgebied, stoelend op een aantal technische basis vakgebieden (hydrologie, aardwetenschappen, waterbouw, grondmechanica, landbouw- en cultuurtechniek), als wel een aantal maatschappijgerichte basis vakgebieden (sociologie, economie, bestuurskunde).

In het Nederlandse onderwijs en de beroepspraktijk wordt veelal een onderscheid gemaakt tussen de civieltechnische waterbeheersing (het onderhavige vakgebied onderwezen aan de TU Delft) en de cultuurtechnische waterbeheersing (onderwezen aan de LU Wageningen). Inherent aan het verschillend karakter van de opleidingen, richt de Wageningse opleiding zich meer op de water-

beheersing vanuit de biologie en landbouworganisatie op tertiair niveaus (in de grond en op de akkers) waar de Delftse opleiding de nadruk legt op het secundair en primair niveau (water aan- en afvoerstelsel, hoogwaterbescherming, uit- en inlaatwerken etc.). Buiten Nederland wordt dit onderscheid in veel mindere mate gemaakt. In dit college zal ook aan de cultuurtechnische waterbeheersing voldoende aandacht worden besteed nodig voor onderling begrip en goede samenwerking met de cultuurtechnici, en voor zelfstandige beoordeling in voorkomende gevallen.

### 1.1.3 Vakdiensten en instituten

De beroepsuitoefening van het vakgebied landelijke en stedelijke waterbeheersing vindt in Nederland plaats bij een aantal diensten en instituten, waarvan de belangrijkste onderstaand zijn genoemd:

#### Planning, ontwerp, uitvoering en beheer

- diverse diensten van Rijkswaterstaat; met name het Rijksinstituut voor Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA), het Rijksinstituut voor Kustwateronderzoek (RIKZ), de dienst Weg en Waterbouw, de Bodemkundige Dienst, de Meetkundige Dienst, en de Adviesdienst Verkeer en Vervoer.
- Provinciale Waterstaatsdiensten
- Waterschappen
- Gemeenten
- Ingenieursbureaus en aannemersbedrijven

#### Onderzoek

- TU Delft (afdeling Watermanagement);
- Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding (ICW te Wageningen);
- LU Wageningen (vakgroep Cultuurtechniek en Afvoerhydrologie);
- TNO;
- Grondmechanica Delft;
- Waterloopkundig Laboratorium (WL).

#### Internationaal:

- ICID (International Commission on Irrigation and Drainage) met als hoofdzetel New Delhi en per land een National Executive Committee;
- International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI te Wageningen)
- IAHS (International Association of Hydrological Sciences) een onderdeel van het IGGU (International Geodetical and Geophysical Union);
- IHP (International Hydrological Programme) een UNESCO samenwerkingsverband;
- IIMI (International Irrigation Management Institute) met hoofdkantoor in Colombo, Sri Lanka;
- UN organisaties zoals FAO, UNESCO, UNEP, ECE, UNDP.

#### Vakorganisaties

Zowel nationaal als internationaal zijn er een aantal organisatorische verbanden waarin vakgenoten op het gebied der waterbeheersing samenwerken (bijvoorbeeld door middel van het organiseren van congressen, symposia en andere vormen van uitwisseling van kennis en informatie). Als dusdanig kunnen worden genoemd:

- Sectie Waterbeheer van het KIVI
- Studiekring voor cultuurtechniek van het Koninklijk Genootschap voor Landbouwwetenschappen (KGVV)
- Hydrologische kring

### 1.1.4 Vakliteratuur en handboeken

#### Algemeen

- \* CHO-TNO, *Verklarende hydrologische woordenlijst*, Den Haag: CHO-TNO rapport no 16, 1986.
- \* Chow Ven te, *Hanbook of Applied Hydrology*, New York, USA: McGraw Hill, 1964.
- \* Pulles, J.W., *Beleidsanalyse van de waterhuishouding van Nederland PAWN*, Den Haag: Rijkswaterstaat, 1985.
- \* Werkgroep Vademecum, *Cultuurtechnische Vademecum*, Utrecht: Cultuurtechnische Vereniging, 1988.
- \* Wilson, E.M., *Engineering Hydrology*, New York, USA: MacMillan, 1974.

#### Ontwatering en Afwatering; Drainage

- \* Kley, J. En H.J. Zuidweg, *Polders en dijken*, Amsterdam: Agon Elsevier, 1969.
- \* Ochs, W.J. en B.G. Bishay, *Drainage Guidelines*; World Bank Technical Paper 195, Washington DC, USA: The World Bank, 1992.
- \* Ritzema, H.P. (ed.), *Drainage Principles and Applications*; ILRI publication 16, Wageningen: International Institute of Land Reclamation and Improvement, 1994.
- \* Smedema, L.K. en D.W. Rycroft, *Land Drainage*, London, GB: Batsford, 1983.

#### Wateraanvoer en irrigatie

- \* Doorenbos, J. en A.H. Kassam, *Yield Response to Water*, Rome, Italië: Food And Agricultural Organization of the United Nations, 1986.
- \* Houk, I.E., *Irrigation Engineering; Volume 1 and 2*, New York, USA: Willey, 1951/1956.
- \* Kraatz, D.B. en I.K. Mahajan, *Small Hydraulic Structures*, Rome, Italië: Food And Agricultural Organization of the United Nations, 1975.
- \* Leliavski, S., *Irrigation and Hydraulic Design; Volume 1: General principles of hydraulic design*, London, GB: Chapman and Hall, 1955.
- \* Smith, M., CROPWAT; *A Computer Program for Irrigation Planning and Management*; FAO Publication 46, Rome, Italië: Food and Agricultural Organization of the United Nations, 1992.
- \* USBR, *Design of small dams*, US Department of the Interior, Denver, USA: 1987.

#### Stedelijke waterbeheersing

- \* Hall, M.J., *Urban Hydrology*, Barking, GB: Elsevier Applied Science Publishers Ltd., 1984.
- \* Kibler D.F. (ed.), *Urban Stormwater Hydrology*, Washington DC, USA: Water Resources Monograph 7, American Geophysical Union, 1982.
- \* Watkins, L.H. en D. Fiddles, *Highway and Urban Hydrology in the Tropics*, Plymouth, GB: Pentech Press Ltd., 1984.
- \* Urbonas, B. en P. Stahre, *Stormwater; Best Management Practices and Detention*, London, GB: Prentice Hall, 1993.
- \* Ven, F.H.M. van de, *Van neerslag tot rioolloop in vlak gebied*, Lelystad: Rijkswater-staat, 1989.
- \* Tjallingii, S.P., *Ecopolis, Strategies for Ecologically Sound Urban Development*, Backhuys Publishers, 1995.
- \* Segeren, W.A. en H. Hengeveld, *Bouwrijp maken van terreinen*, Stichting Bouwresearch 99, Kluwer Technische Boeken B.V.

#### Ontwerpen en dimensioneren

- \* Ankum, P. 1995. *Flow Control in Irrigation and Drainage*; Communication of the Water Management Department no. 65, Delft: TU Delft, 1995.
- \* Arends, G.J. *Sluizen en stuwen*, Delft: Delft Universitaire Pers, 1993.
- \* Bos, M.G. *Discharge measuring structures*, Wageningen: International Institute of Land Reclamation and Improvement, 1989.
- \* Herbermann, H. en W. Schuurmans, *Profile, Users Manual (version 3.00)*, Delft: TU Delft, 1991.

## 1.2 De Nederlandse situatie

### 1.2.1 Inleiding

De waterbeheersing van een gebied wordt bepaald door de fysisch geografische situatie. De fysisch geografische situatie wordt gekarakteriseerd door topografische en bodemkundige kenmerken, en het klimaat. Om bodemkundige kenmerken te begrijpen zal men naar de ontstaansgeschiedenis van het landschap moeten kijken. Klimatologische gegevens kunnen worden samengevat in klimatogrammen. Voor een goed begrip van de ontwikkeling van de waterbeheersing in Nederland, de huidige waterstaatkundige inrichting van het land en van de overwegende waterbeheersingsproblemen, is kennis van de ontstaansgeschiedenis van het Nederlandse landschap en van het klimaat van wezenlijk belang.

#### Zware regen voorbij

Zware regen met wateroverlast, zo luidde zondag en maandag de weerberichten van het KNMI. De eerstkomende dagen kan er nog af en toe regen vallen, maar lang zoveel niet meer als we de laatste dagen hebben gehad. Een voorspelling die we makkelijk kunnen doen, want de zondvloed die over eens heen hebben gekregen is zeldzaam. In Dirksland werd maandagochtend 133,7 mm afgetapt en dat is de op drie na hoogste etmaalsom in deze eeuw in ons land. Het absolute record staat op naam van Voorthuizen waar op 3 augustus 1948 in 24 uur 208,0 mm werd opgevangen. Op de tweede plaats staat het regenmeetpunt in Amsterdam met 147,6 mm op 9 augustus 1951 en op de derde plaats staat Gouda met 145,5 mm op 24 juni 1975. Sinds die datum (en niet sinds 350 jaar zoals hier en daar is gemeld) hebben we in ons land dus niet zoveel regen in een etmaal gemeten.

De aftappingen van dinsdagochtend logen er ook niet om. Met name op de oostelijke Veluwe is afgelopen nacht veel gevallen, op een groot aantal plaatsen zo'n 50 tot 60 mm, het meest in Apeldoorn waar 62,4 mm. De Zuid-Hollandse eilanden kregen er nog zo'n 30 tot 45 mm bij en Dirksland nog 23,1 zodat de som over 48 uur daar uitkomt op 156,8 mm.

De extreme neerslag en storm hingen samen met een kleine maar zeer actieve depressie voor de kust bij Den Haag. Daardoor waren er verspreid over ons land enorme verschillen in het weer- terwijl het in een groot deel van het land vrijwel bladstil en onbewolkt was met plaatselijk dichte mist en lage temperaturen (Soesterberg had de

eerste vorst aan de grond met -0,1 op 10 centimeter hoogte), goot het in het zuiden en zuidwesten en stak daar ook een storm, windkracht 9 op. De meteorologen van de Maritiem Meteorologische Dienst in Hoek van Holland hebben zondag vlak voor één uur hoosachtige verschijnselen in de lucht waargenomen die een verklaring kunnen zijn voor de enorme schade in die omgeving.

Het is niet de eerste keer dit jaar dat we met extreem weer en vooral zware regenval te maken hebben. De Bilt kreeg in de eerste tien dagen van maart 99 mm, een nieuw record voor deze periode. Ook op 6 juni vielen enorme hoeveelheden, in De Bilt 48 mm binnen een etmaal op 3 september was het weer raak met op veel plaatsen zo'n 30 tot 50 mm. Boskoop kreeg toen 92 mm te verwerken. Met al die regen hebben we in De Bilt de jaarsom van 800 mm al overschreden: de stand dinsdag is 813,7 mm.

Ook in België heeft het enorm geregend en is fase 3 van het rampenplan afgekondigd. VRT-weerman Frank Deboosere meldt ons dat in Brasschaat bij Antwerpen tussen zondagavond 10 uur en maandagochtend 8 uur liefst 143 mm is opgevangen en Sint Kathelijne-Waver kreeg 102 mm. Volgens het KMI is dat de tweede hoogste waarde sinds de computerregistratie van de gegevens begon in 1951. Het record werd waargenomen in Botrange op 10 oktober 1982 met 156 mm. De site van het KMI biedt een uitgebreide analyse van de neerslag.

Bron: KNMI, [www.knmi.nl](http://www.knmi.nl), 15-9-98

In de ontwikkeling van de waterbeheersing in Nederland zijn ruwweg drie componenten te onderscheiden:

- eerste component met overwegend verdedigend optreden tegen overstroming vanuit de zee en grote rivieren
- tweede component gericht op de regeling en verbetering van de regionale en lokale afwatering
- derde component waarin vooral aandacht wordt besteed aan de waterhuishouding in de grond

Alle componenten zijn doorlopend in ontwikkeling voornamelijk vanwege de steeds hogere eisen die de maatschappij aan het waterbeheer stelt en de beschikbaar komende nieuwe technologieën. Daarbij is er een toenemende aandacht voor het beheer van het water in verband met de aantasting van het watermilieu door vervuiling.

**Tabel 1.2: Waterbalans van Nederland in een gemiddeld en een zeer droog jaar (Van Veen, Ruimte voor water, 1991)**

	Gemiddeld jaar			Zeer droog jaar		
	mm	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	%	mm	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	%
<b>IN</b>						
Neerslag	775	30.100	27,2	535	20.800	30,9
Rijn	1.775	69.000	62,4	1.065	41.500	61,6
Maas	215	8.400	7,6	90	3.500	5,2
Andere rivier-invoer	75	3.000	2,7	40	1.500	2,2
<b>TOTAAL</b>	<b>2.840</b>	<b>110.500</b>		<b>1.730</b>	<b>67.300</b>	
<b>UIT</b>						
Verdamping	501	19.500	17,6	528	20.500	30,4
Verschillende gebruiken	129	5.000	4,5	154	6.000	8,9
Rivier-uitvoer	2.210	86.000	77,8	1.048	40.800	60,0
<b>TOTAAL</b>	<b>2.840</b>	<b>110.500</b>		<b>1.730</b>	<b>67.300</b>	

*Nederland is van oudsher een waterland: water speelt een belangrijke rol in de Nederlandse cultuur. Water verschaft het landschap een dynamisch karakter: het stroomt en er is golfslag, er is scheepvaart, de waterstand varieert en water befrist. Onder meer door deze dynamiek is water een visueel aantrekkelijk landschapselement, zowel in het buitengebied als in het stedelijke of industriële landschap. Water is dan ook een structurerend element in het stedelijk gebied en in het landschap; het brengt ruimtelijke geleding aan: waterlopen vormen verbindingen en tegelijk barrières. Buiten de visuele kwaliteit is de geur van water een belangrijk belevingsaspect, vaak in negatieve zin wanneer de woon- en werkomgeving ernstig wordt aangetast door stinkend water. Water is een 'merit good' zoals ook ander natuur- en cultuurelementen dat zijn. Water, schoon water, moet er meer dan voldoende zijn, zelfs al zou er in technische zin geen behoefte aan bestaan. Tegenover water als merit good staat water als bedreigend factor. Water kan worden ervaren als een infectiehaard en bron van verontreinigingen. Ten slotte bestaat nog de dreiging van overstromingen.*

## knmi/nos teletekst pagina 717

**Zware regen**

Aanhoudend zware regen met enkele tientallen millimeters regen binnen een etmaal kan aanleiding geven tot wateroverlast op wegen en aquaplaning (watergladheid). Vooral op wegen waar het water langzaam wegloopt levert dat gevaar op. Tijdens hevige regen kan het zicht vooral bij hoge rijsnelheid flink teruglopen, op de weg in combinatie met opspattend water tot minder dan 100 meter, vergelijkbaar met dichte mist!

Een willekeurige plaats in ons land krijgt gemiddeld vijf keer per jaar een hoeveelheid van 20 mm binnen een etmaal; een etmaalsom van 30 mm komt ongeveer eens in de twee jaar voor en eens per tien jaar valt er meer dan 50 mm op een dag. De meeste regen valt in de zomer, vooral wanneer een aantal onweersbuien na elkaar komen. Zo kreeg het KNMI in De Bilt op 1 augustus 1917 liefst 62,3 mm in de regenmeter en op 19 juli 1966 viel hier 61,2 mm in 24 uur. Landelijk staat het eeuwrecord op 208 mm op 3 augustus 1948 in Voorthuizen.

De Bilt kreeg in 1998 een recordhoeveelheid van 1240 mm; dat is ruim anderhalf maal de normale hoeveelheid. Nog nooit, in elk geval zolang de neerslag door het KNMI wordt gemeten, sinds 1848, is hier in een jaar zoveel regen gevallen. Het vorig record was 1151,9 mm in 1965.

Volgens voorlopige cijfers gaat Schellingwoude (bij Amsterdam) met de "eer" strijken als de natste plaats Nederland tenminste sinds het begin van de metingen.

Naar schatting komt de jaarsom hier uit op 1365 mm en daarmee is ook het landelijke neerslagrecord aan flarden gegaan. Dat stond op naam van 1966 toen Vaals 1323 mm noteerde. Omdat niet alle regencijfers van de 300 neerslagstations van het KNMI binnen zijn, kunnen we in de loop van januari, na verwerking en validatie van deze gegevens, het landelijk neerslagrecord definitief vaststellen.

Vooral de afgelopen twee maanden is erg veel regen gevallen en alleen al op 13 en 14 september viel in het zuidwesten lokaal meer dan 150 mm. Op 28 oktober viel in strook van de westkust over de Noordoostpolder naar Drenthe 75 tot 90 mm. Hoogeveen heeft in oktober 291 mm gekregen, ongeveer 35% van de jaarsom. De Bilt kreeg in september 165 mm en in oktober 179 mm. Sinds het begin van de neerslagwaarnemingen midden vorige eeuw zijn deze twee maanden samen hier nog nooit zo nat geweest.

Neerslag hangt samen met de temperatuur en in een warmer klimaat van de toekomst kunnen grotere hoeveelheden neerslag vaker voorkomen. Klimaatonderzoekers gaan ervan uit dat de wereldgemiddelde neerslag in het midden van de volgende eeuw met enkele procenten zal toenemen. De relatief grootste toename wordt op noordelijke breedten verwacht, vooral in de winter. Een warmer wereldklimaat hoeft niet in te houden dat het overal op aarde warmer wordt. Als we er toch van uitgaan dat ook ons land een warmer klimaat krijgt dan zal ook hier de neerslag toenemen. In de zomer zal de regen dan buigiger van karakter worden en kan er meer in korte tijd vallen.

Bron KNMI, [www.knmi.nl](http://www.knmi.nl), 11-1-99

### 1.2.2 Geologische opbouw

Nederland maakt met uitzondering van Zuid-Limburg deel uit van het dalingsbekken van de Noordzee. Zeeën en rivieren hebben dit steeds dalend bekken opgevuld met zand en klei. De delta van de Rijn en de Maas en de westelijke noord Duitse rivieren is opgebouwd uit materialen die door de rivieren en de zee zijn aangevoerd en afgezet (fluviatiele en mariene afzettingen). Bovendien is het noordelijk deel van ons land door het landijs bewerkt en zijn er grondmorenen achtergebleven (glaciale afzettingen). Tenslotte heeft ook de wind plaatselijk afzettingen weggeblazen en elders weer neergezet (eolische afzettingen).

Deze geologische processen hebben een bepaalde opbouw van de ondergrond tot gevolg gehad. In het volgende zal deze opbouw kort worden beschreven. Daarbij zal de beschrijving beperkt blijven tot de bovenste 10 à 30 m; deze laag is van belang voor de waterbeheersing in een gebied.

In verband met de waterbeheersing is in het algemeen gesproken slechts het geologische tijdperk van het Kwartair van belang en dan nog voornamelijk vanaf het eerste deel van het Midden Pleistoceen (tabel 1.3).



Tabel 1.3: Indeling van het Kwartair

Tijdperk		Jaren geleden voor het heden		
Holoceen		Subatlanticum	2.700-heden	
		Subboreaal	5.000-2.700	
		Atlanticum	8.000-5.000	
		Boreaal	8.700-8.000	
		Preoboreaal	10.300-8.700	
Pleistoceen	Boven	Weichselien	Koude tijd	70.000-10.300
		Eemien		100.000-70.000
	Midden	Saalien	Koude tijd	200.000-
		Holsteinien		
		Elsterien	Koude tijd	
		Cromerien	Complexe eenheid	
	Onder	Menapien	Koude tijd	600.000-
		Waalien		
		Eburonien	Koude tijd	
		Tiglien		
	Praetiglien	Koude tijd	2.500.000-	

De onderzijde van het Pleistoceen ligt in vrijwel geheel Nederland ver beneden het tegenwoordige maaiveld. In Noord-Holland tot 600 in, oplopend tot dagzomend in het zuiden en Oosten van Nederland. Het Kwartair onderscheidt zich van het Tertiair doordat er bij herhaling veel koudere omstandigheden heersten, de ijstijden (glacialen), welke afwisselden met warmere perioden (interglacialen). Aan het begin van het Pleistoceen was Nederland bijna geheel door een zee overdekt.

Toen de zee zich geleidelijk terugtrok tengevolge van accumulatie van water in de ijskappen, en de Rijn, Maas en Noord-Duitse rivieren via Nederland hun uitmonding in de zee kregen, werd er op de onderliggende zeeafzettingen een 200 tot 400 m dik pakket rivierzand afgezet (tabel 1.4); kolom afzettingen van grote rivieren). De geaccumuleerde sneeuw werd door de druk van het eigen gewicht in ijs omgezet en ging naar lager gelegen gebieden vloeien. De accumulatie van sneeuw leidde tot een aanzienlijke daling van de zeespiegel (Saalien: - 200 m) waardoor het verval van de rivieren sterk toenam en deze een groot eroderend en transporterend vermogen kregen.

Het bewegende ijs had een sterk eroderende werking en vervoerde veel puin, het zogenaamde morenemateriaal. Daar waar het transporterende vermogen te gering werd, werd het materiaal afgezet. Bij het stijgen van de temperatuur ging smelten en verdampen de aanvoer van ijs overtreffen. Smeltwaterstromen veroorzaakten plaatselijk erosie en elders afzettingen (fluvio—glaciale afzettingen). Het landijs trok zich terug en de zeespiegel ging weer stijgen waardoor de erosieve kracht van de rivieren minder werd en het transporterend vermogen afnam. Het rivierbed werd praktisch geheel gevuld, eerst met grof, later met fijner materiaal.

De beide laatste ijstijden (Saalien en Weichselien) zijn sterk bepalend geweest voor de aard en ligging van de zandgronden van Noord-, Oost-, Midden- en Zuid-Nederland. Tijdens het Saalien is een groot deel van Nederland met landijs bedekt geweest. De maximale uitbreiding van het ijs reikt tot aan de lijn Vogelenzang-Nijmegen. Ten zuiden van deze lijn heerste een zeer droog, koud klimaat. De rivieren bleven hier zand afzetten (tabel 1.4) en verder werden sedimenten van lokale oorsprong door wind en smeltwater afgezet (fluvio—periglaciaal). Ten noorden van het ijsfront kan men aan of dichtbij het oppervlak grondmorenen of keileem aantreffen. (Formatie van Drenthe). Het randgebied van het ijs bestond uit een aantal afzonderlijke ijstongen die de noordwaarts gericht rivierdalen van Rijn en Maas binnendrongen.

Tabel 1.4: Tabel van de kwartaire formaties, gerangschikt naar ouderdom

Chronostratigrafie			Afzettingen in verband met landijs		Afzetting van lokale herkomst		Afzettingen van grote rivieren		Afzettingen in zee en bij de kust	
			N	Z	N	Z	N	Z	N	Z
KWARTAIR	HOLOCEEN						Formatie v. Kootwijk E Formatie v. Singraven B Formatie v. Griedsveen V	Betuwe formatie R+M		Westland formatie
	PLEISTOCEN	Boven	Weichselien*							
			Eemien	F. v. Drente			Formatie van Twente E+V+P+B Formatie van Asten	Formatie van Kreftenheye R+M		Eemformatie
	Midden	Saalien*	F. v. Peelo							
		Holsteinien				Formatie van Eindhoven E+P B+V	Formatie van Urk R	Formatie van Veghet M	**	
		Elsterien*								
		Cromerien complex**							**	
		Menapien*					Form. v. Kedicem (ten dele) B+P+V	Formatie v. Enschede O	Formatie v. Sterksel R+M	
		Waalien						Formatie v. Harderwijk	Formatie v. Kedichem R+M	
	Eburonien*									

E=eologische afzettingen  
P=periglaciale afzettingen  
B=beekafzettingen  
V=veen

R=Rijn  
M=Maas  
O=oostelijke noordduitse rivieren en voorlopers

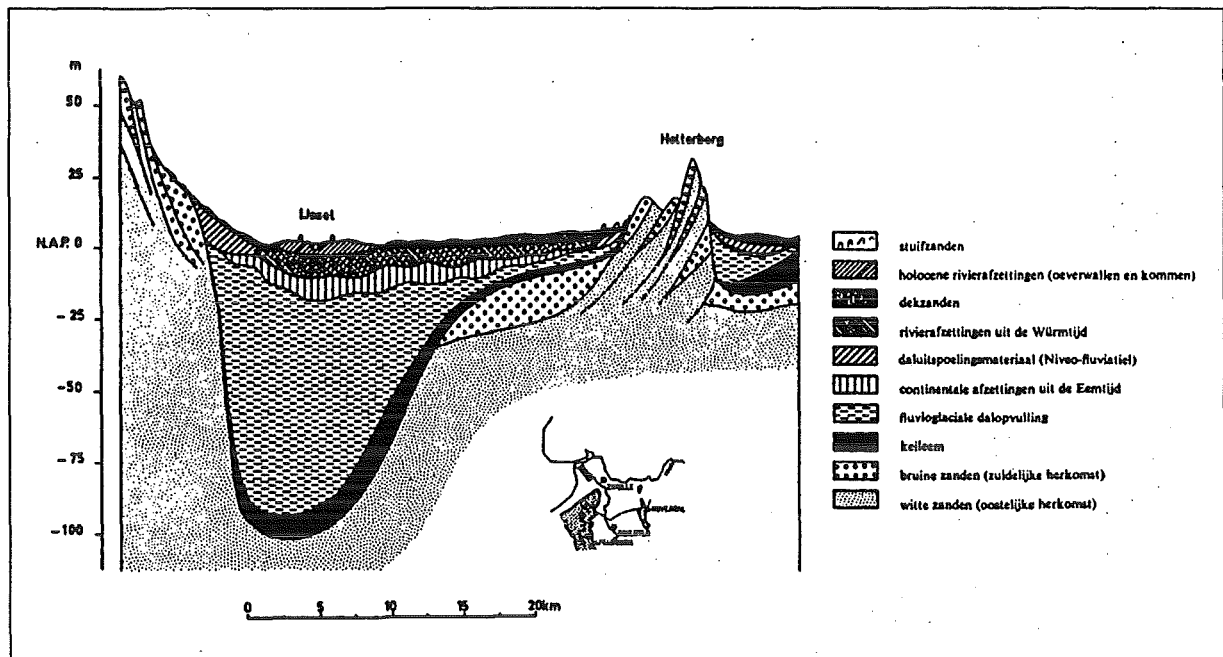
O\* koude tijd  
\*\* complexe eenheid bestaande uit tenminste 4 warme en 3 koude tijden  
\*\*\* nog onbenoemd, voorlopig bij Formatie van Urk

De bevroren ondergrond werd in sterke mate vervormd en er werden diepe depressies uitgeslepen (fig. 1.3, 1.4) terwijl aan de zijanten en voorzijde heuvels werden opgestuwd.

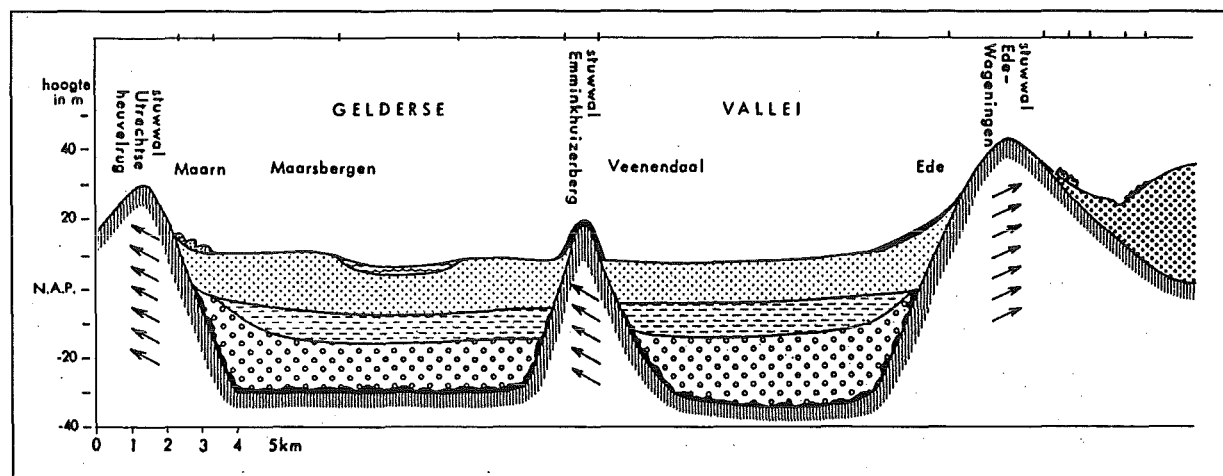
Deze stuwwallen zijn de Utrechtse Heuvelrug, de Oost-Veluwe stuwwal bij Nijmegen en de stuwwallen in Overijssel. Noordelijk hiervan zijn ook nog stuwwallen te onderscheiden ten gevolge van latere fasen van oprukkend ijs: de reeks Steenwijk-Gaasterland-Wieringen-Texel en een gedeeltelijk begraven reeks Vollenhove-Urk-Hoorn-Castricum.

Na het Saalien volgde een warmere periode, het Eemien. In de bekkens, waarin het ijs was gesmolten, ontstonden meren waarin klei werd afgezet. Bij een eerdere ijstijd was zo ook de Formatie van Peelo gevormd, die bestaat uit zeer compacte harde klei (potklei). Door erosie van de stuwwallen door wind en water vlakten de hoogteverschillen snel af. De rivieren vulden de diep uitgeslepen dalen met grove grindhoudende zanden (Formatie van Kreftenheye).

De zeespiegel steeg zover dat grote delen van Noord-West Nederland door water werden bedekt: de Eemzee. In deze periode zijn klei- en veenlagen gevormd.



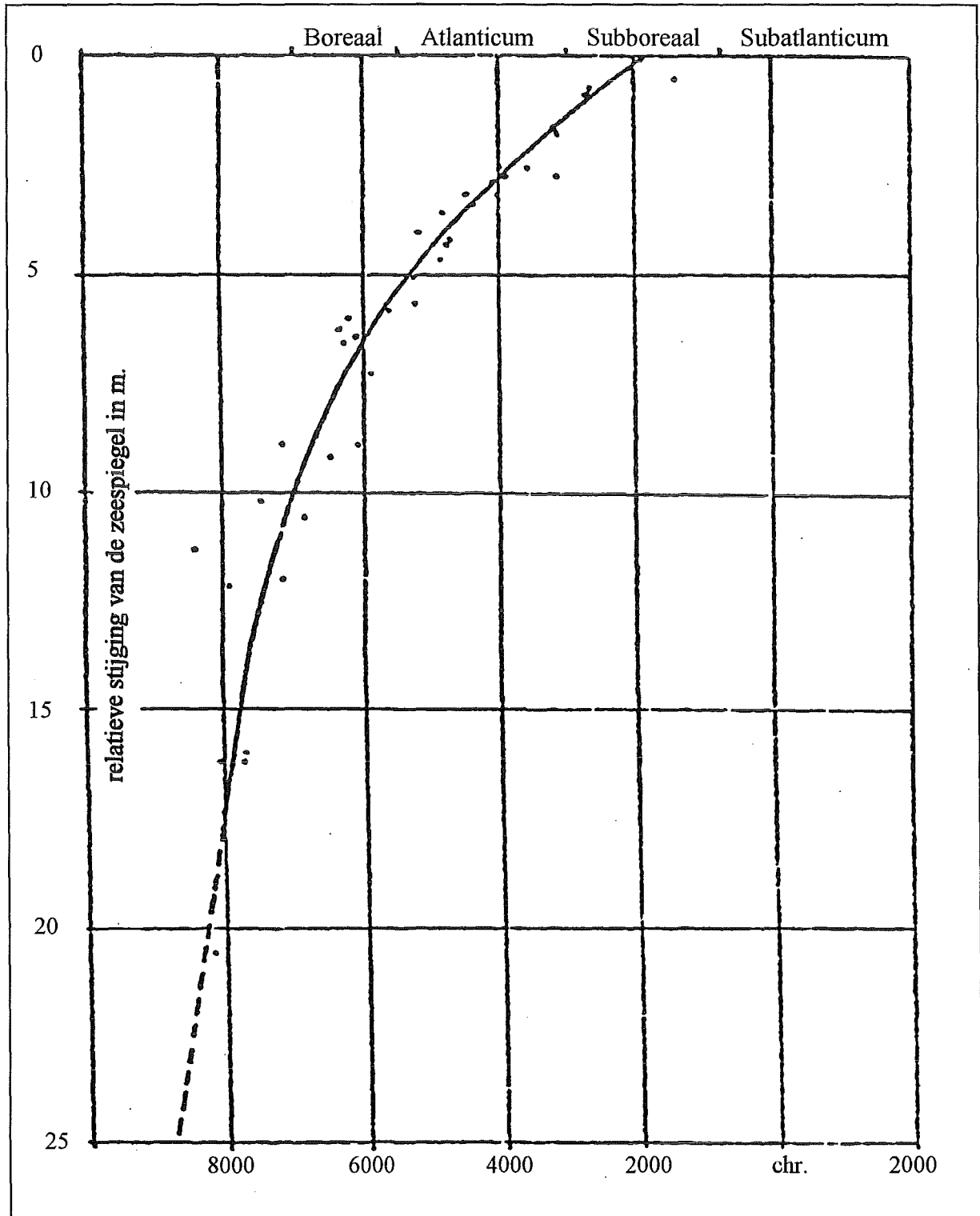
Figuur 1.3: Schematische dwarsdoorsnede door de Noord-Veluwe tot de Holterberg



Figuur 1.4: Globale geologische doorsnede door het zuidelijke deel van de Gelderse Vallei en de aangrenzende stuwwallen

Tijdens Weichselien bereikte het landijs Nederland niet. Wel was door de lage temperatuur de bodem tot op grote diepte bevroren. Uit de droge rivierbeddingen en het droge Noordzeegebied werd zand weggeblazen en op betrekkelijk korte afstand weer afgezet als een vrij uniform zanddek van matig fijn zand: het dekzand (Formatie van Twenthe). De dikte van deze formatie varieert veelal van minder dan 1 m tot enkele meters. Met name in de depressies (diepten) werden dikke lagen afgezet, tot 25 m. Het resultaat was dat het land vlakker werd. Tot deze formatie behoren ook smeltwaterafzettingen bestaande uit grof zand. In het Weichselien zijn de Rijn en Maas doorgedaan met het afzetten van grove grindhoudende zanden. Bij het beëindigen van het Weichselien steeg de zeespiegel en ontdooidde de bovengrond. In het huidige noorden en westen van Nederland was het landschap niet anders dan in het oosten en zuiden: een naar het noord-oosten afhellend, zwak golvend, dekzandlandschap.

Het Holoceen kenmerkte zich doordat het geleidelijk warmer en vochtiger werd, waardoor de begroeiing toenam en de zeespiegel geleidelijk steeg door het smelten van het landijs (fig. 1.5).

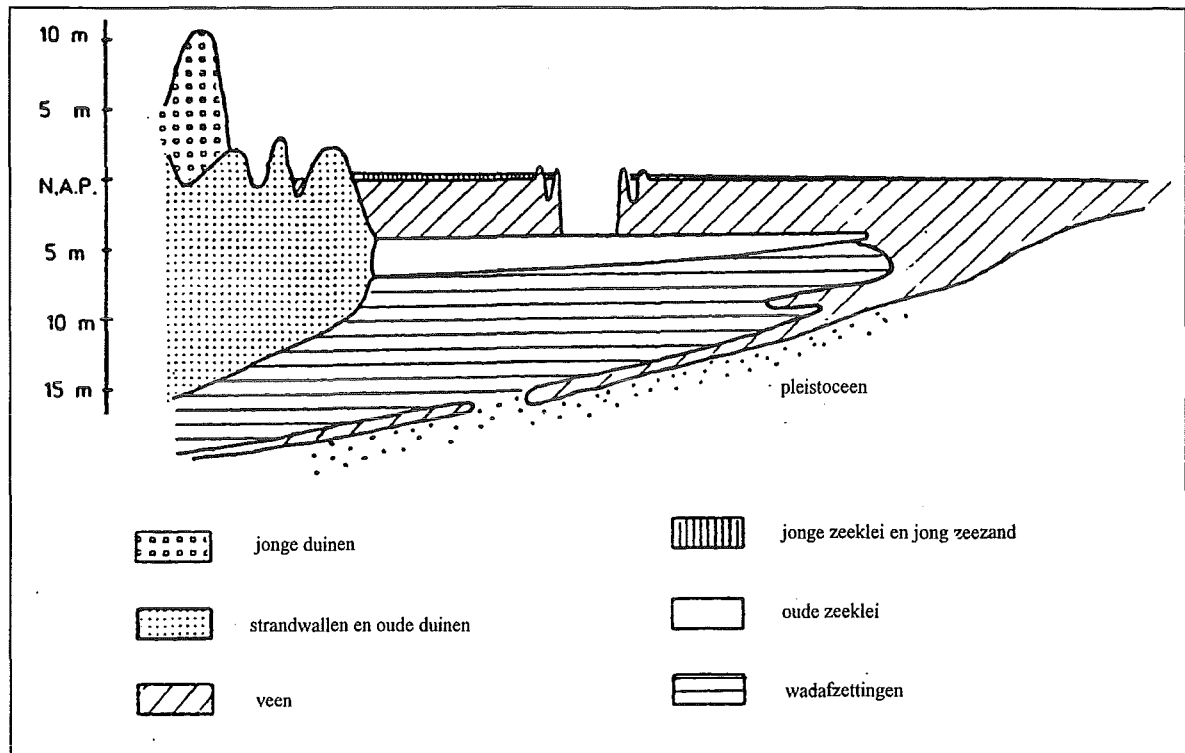


**Figuur 1.5: Relatieve stijging van de zeespiegel ten opzichte van het pleistocene oppervlak**

De invloed van de zee is in het Holoceen verder bepalend voor het afzettingsmilieu: de zee drong in vele kleinere en grotere vloten ons land binnen.

Daardoor werd de afwatering van de gebieden in het noorden en westen van Nederland zo zeer verslechterd dat moerassen ontstonden en zich een uitgestrekt veengebied ontwikkelde. In het Oosten en zuiden van Nederland bleef deze veenontwikkeling beperkt tot de lagere delen. De verdere groei

van dit veen-op-grote-diepte of Basisveen werd in de loop van het Atlanticum belemmerd door het verder stijgen van de zeespiegel. Op het veen werden door de zee lagen klei en zand afgezet: de Afzettingen van Calais. Deze wadafzettingen zijn ook bekend onder de naam oude zeelei. Uit dezelfde periode dateren de Afzettingen van Gorkum, peri-mariene afzettingen bestaande uit zand en klei die door de rivieren zijn afgezet onder invloed van de stijgende zeespiegel. Meer naar het oosten ging de veengroei door. Het door de Afzettingen van Calais bedekte veen is sterk samengedrukt. Dit Basisveen ligt, aflopend naar het westen, op een grootste diepte van ongeveer 20 m - N.A.P. en vormt een slecht doorlatende laag die plaatselijk, door erosie, is onderbroken (fig. 1.6).



**Figuur 1.6: Schematisch profiel door het Holoceen van West-Nederland**

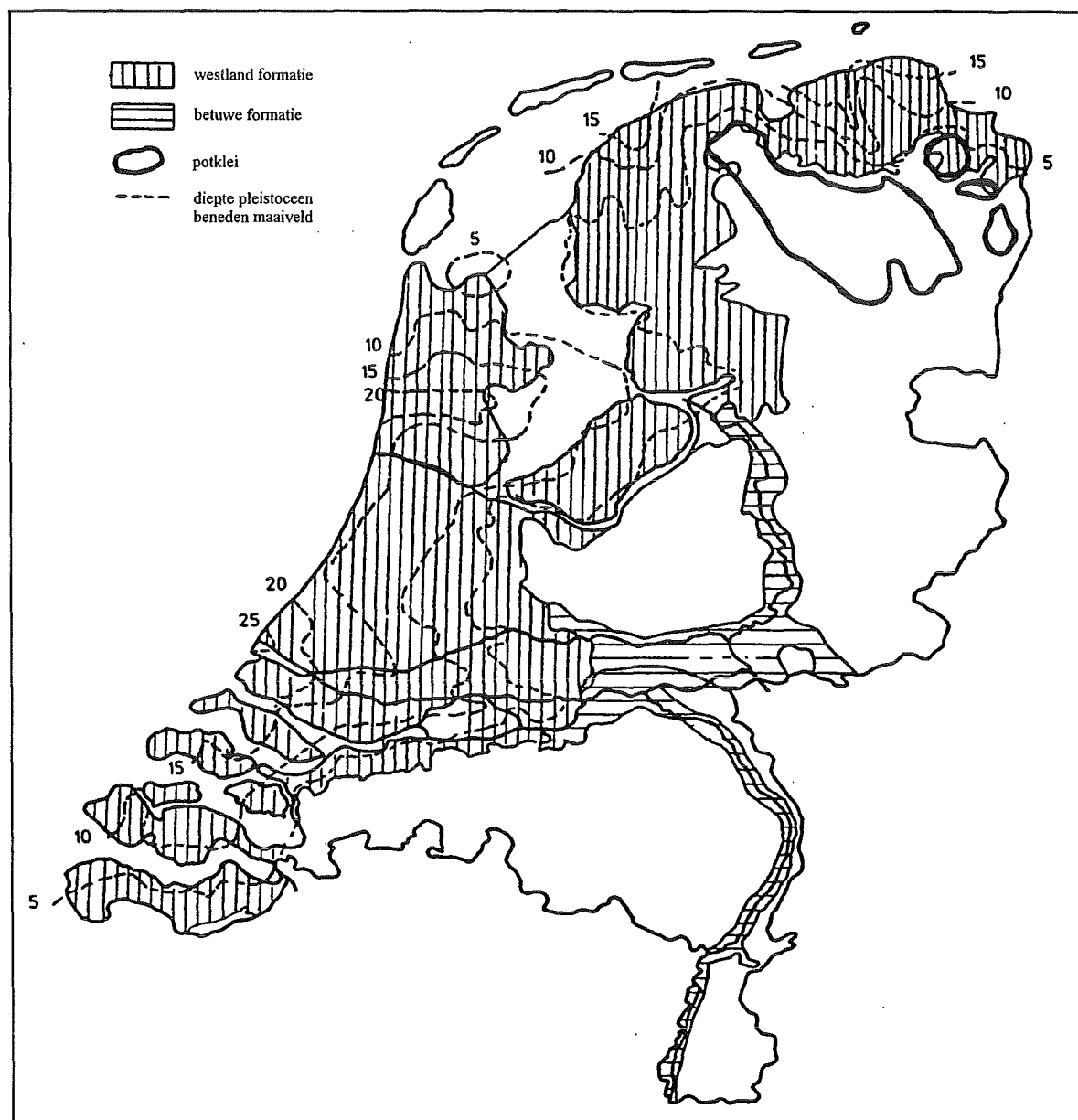
Ten gevolge van de in het Atlanticum heersende westenwinden ontstond een naar de kust gerichte golfbeweging. Evenwijdig aan de kust ontstonden zandbanken — de strandwallen — waarop zich duinen ontwikkelden. In het gebied achter de duinen ontstond een zoetwatermoeras waarin opnieuw veenvorming plaats vond: het oppervlakteveen of Hollandveen. Ongeveer 4000 jaar geleden begon het veen zich uit te breiden over de Afzettingen van Calais. Dit Hollandveen bereikte een dikte van enkele meters. Periodieke overstromingen tastten het veen nu en dan plaatselijk aan. Deze aantastingen zijn terug te vinden in de vorm van ingeschakelde kleilagen. In het noorden zijn de strandwallen nooit gesloten geweest, daarom is daar weinig veen ontstaan.

Het subatlanticum is een periode geweest waarin transgressies van de zee weer overheersten. Veel veen werd weggeslagen (Flevomeer, Zeeland, delen van Zuid-Holland en noord Noord-Holland), terwijl verder grote delen van het veen bedekt werden met de mariene Afzettingen van Duinkerken of de primariene afzettingen van Tiel. Deze afzettingen worden ook wel jonge zeelei genoemd. Waar het veen zo hoog lag dat het niet overstroomde, bleef de veengroei doorgaan, totdat deze gebieden omstreeks 1000 jaar na Chr. in cultuur werden genomen. Na het jaar 1200 na Chr. zijn op en voor de oude strandwallen de jonge duinen tot ontwikkeling gekomen. Deze west en noord Nederlandse Holocene afzettingen vormen samen de zogenaamde Westland Formatie. De dikte van de Formatie varieert van minder dan 1 m tot bijna 50 m (fig. 1.7). De in het Holoceen gevormde rivierafzettingen worden Betuwe Formatie genoemd (fig.1.7).

Deze rivierafzettingen bestaan afwisselend uit klei en zand, met het incidenteel voorkomen van veen. Onderscheiden worden de Stroomgordelafzettingen, die voornamelijk uit zand en kleiig zand bestaan,

en de Komafzettingen, die voornamelijk uit klei bestaan. De dikte varieert van minder dan 1 m tot meer dan 10 m.

Op de dekzanden van Oost- en Zuid-Nederland zijn gedurende het Holoceen lokale zandverstuivingen ontstaan: de Formatie van Kootwijk. De verstuivingen bestaan overwegend uit matig fijn en zeer fijn zand. In de beekdalen en andere geïnundeerde laaggelegen gebieden zijn kleilig zand, zandige klei, klei en veen afgezet: de Formatie van Singraven. Deze zeer plaatselijk voorkomende afzettingen liggen voornamelijk op de Formatie van Twente en zijn van minder dan 1 m tot enige meters dik.



**Figuur 1.7: Verbreiding van de Westland Formatie, Betuwe Formatie, het voorkomen van Potklei en de diepte van het Pleistoceen beneden N.A.P.**

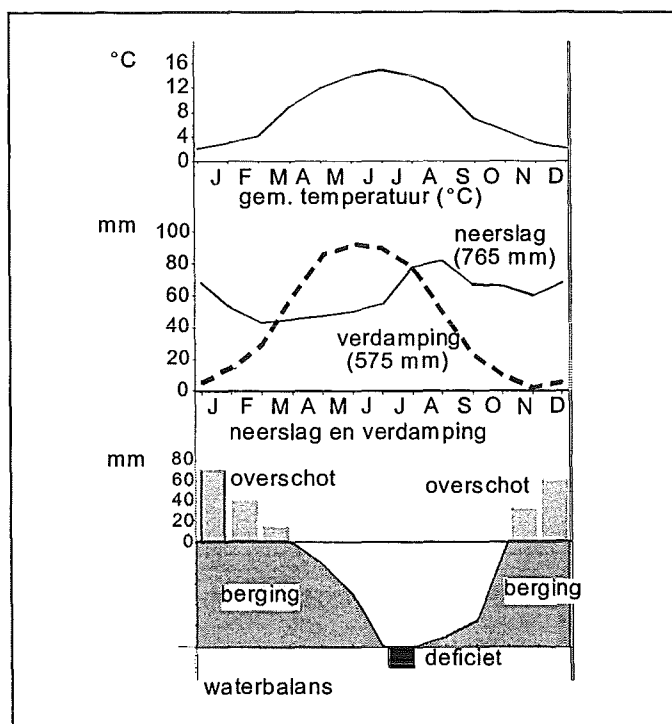
Naast het boven beschreven afzettingssysteem (geonose) treden in de bovenste 1 à 2 m van de bodem veranderingen op onder invloed van het klimaat, de waterhuishouding, de flora, de fauna en de mens. Deze veranderingen worden als bodemvorming (pedogenese) aangeduid. Als gevolg van ophoging, verplaatsing en uitspoeling van zowel minerale als organische stoffen, ontstaat in de bovenste laag een gelaagdheid die oorspronkelijk ontbrak.

Gegevens met betrekking tot de bodemgesteldheid kunnen worden verkregen van bodemkaarten, geologische kaarten, archieven en projectgebonden onderzoek. De geologische kaarten van de Rijks Geologische Dienst en bodemkaarten van de Stichting voor Bodemkartering bieden veel informatie die van belang is in het kader van civiel-technische werken en de waterbeheersing. De schaal is echter zodanig dat deze informatie slechts bruikbaar is voor studie op regionaal niveau. Bovendien geven de bodemkaarten slechts informatie tot 1,20 m beneden maaiveld. De informatie van de kaarten zal daarbij dan ook nog moeten worden aangevuld met gegevens uit archieven van bijvoorbeeld de Rijks Geologische Dienst, het Rijks Instituut voor Drinkwatervoorziening, Rijkswaterstaat en de Landinrichtingsdienst.

Het voor waterbeheer ingenieurs en planologen belangrijke vak van bodemkunde wordt nader behandeld in het college CTlw5480 "Bodemkunde voor de civiel ingenieur."

### 1.2.3 Klimaat

De belangrijkste klimatologische parameters voor waterbeheersing zijn neerslag (N) en verdamping (V). Neerslag en verdamping resulteren in (soms negatieve) waterberging in de bodem (S). Het jaarlijkse verloop van N en V, en het daaruit resulterend verloop van S (maat voor vochttoestand van de grond) kan overzichtelijk worden weergegeven in een klimatogram als in figuur 1.8 (dit voorbeeld geldt voor Nederland). Samen met andere relevante gegevens (groeiperiode en tolerantie van gewassen, temperatuur, etc.) kan aan de hand van zo'n klimatogram een redelijke voorspelling m.b.t. de waterbeheersings- en landgebruiksproblemen in een gebied worden gemaakt.



**Figuur 1.8: Klimatogram van Nederland**

Een eerste indruk van een klimaat kan worden verkregen uit een eenvoudige waterbalansberekening waarin maandelijkse neerslag (N) en verdamping (V) met elkaar worden vergeleken. In perioden waarin  $N > V$  wordt de waterberging in de wortelzone (S) aangevuld, tot de maximaal mogelijke berging is bereikt ( $S_{max}$ ). Nadat dit maximum is bereikt, zijn positieve (N-V)-waarden afvoerhoeveelheden. In perioden waarin  $N < V$  kan het gewas in eerste instantie uit de berging putten, maar nadat  $S=0$  is bereikt, zijn de negatieve (N-V)-waarden de aanvoerhoeveelheden.

Nederland is een vlak en klein land en de ruimtelijke verschillen in klimaat zijn gering. In Nederland is de totale neerslag ca 750 mm/jaar. De verdamping gemiddeld 450 mm/jaar. Neerslag is niet geheel homogeen over Nederland verdeeld: de natste plekken in Nederland zijn de Veluwe en Zuid-Limburg.

Het groeiseizoen in Nederland loopt van april tot begin september. De omstandigheden in het groeiseizoen zijn gunstig: er komen geen grote neerslagoverschotten noch -tekorten voor.

Het kleine deficit in juli/augustus leidt normaal gesproken niet tot misoogsten: alleen in uitzonderlijk droge jaren kan aanzienlijke schade optreden. Toch is in de afgelopen decennia irrigatie in Nederland sterk opgekomen, zowel ter verbetering van de kwaliteit van de oogsten als ter voorkoming van droogteschade. Gedurende de winterperiode is er een aanzienlijke hoeveelheid overtollig water dat dient te worden afgevoerd. Het landbouwkundige productiepotentieel in Nederland is beperkt door:

- het korte groeiseizoen (slechts zo'n 5-6 maanden goede groeiomstandigheden);
- het lage zonne-energieniveau (met als gevolg lage fotosynthese.)

In stedelijke gebieden is waterbeheersing nodig om de wegen, parken en tuinen droog en begaanbaar te houden en de woningen vrij van water en vocht. Daarnaast wenst men het grondwaterpeil ook niet weer te laag om rotting van funderingspalen te voorkomen. Voor de waterbeheersing in stedelijke gebieden zijn de omvang en intensiteit van afzonderlijke buien belangrijker dan de gemiddelde regenval. De waterbeheersing in stedelijke gebieden is er immers op gericht om de ontwatering en afwatering ook bij zware buien in voldoende mate te realiseren. Deze problematiek wordt in het college LW5510 *stedelijke waterbeheersing* behandeld.

De geschetste Nederlandse situatie is redelijk representatief voor de gematigde, humide klimaatomstandigheden van de Westerse wereld.

#### 1.2.4 Waterstaatkundige opbouw

Waterstaat wordt wel omschreven als de van nature aanwezige en de kunstmatige infrastructuur, dienende tot beveiliging, behoud, gebruik, uitbreiding en ontsluiting van het grondgebied, bodem zowel als water. De waterstaatszorg omvat:

- de zorg voor de waterkeringen;
- de zorg voor de waterhuishouding;
- de zorg voor de land- en vaarwegen;

Deze paragraaf gaat met name in op de waterhuishoudkundige aspecten van de waterstaat.

Waterhuishouding wordt gedefinieerd als het geheel van onderzoeken, technische werken en bestuurlijke maatregelen, dat nodig is om tot doelmatige kwantitatieve en kwalitatieve beheersing van het aanwezige water te komen. Voor de Tweede Wereldoorlog beperkt de zorg voor de waterhuishouding zich in Nederland tot een vrij ruwe regeling van de waterstand binnen die gebieden door middel van waterlozing. In de gebieden met vrij afstromend water was er van eigenlijk zorg weinig sprake. Men raakte het water kwijt in de mate waarin "natuurlijke" gesteldheid van het terrein en de enigszins verbeterde beken dat mogelijk maakte. In de jaren voor de Tweede Wereldoorlog zetten zich al ontwikkelingen in gang die een betere beheersing van de afwatering mogelijk maakten. Ruilverkavelingen kwamen tot stand, de eerste IJsselmeerpolders werden aangelegd en hiermee samenhangend ontwikkelde de landbouwwetenschap zich snel. Deze ontwikkelingen deden zich voor in het polderland, zowel als in de hellende gebieden.

*Bij recreatie en toerisme vervult water een rol voor grote en kleine watersport, zwemmen, schaatsen, oever- en kustrecreatie, sportvisserij. Naast de watergeboden recreatie vormt het water op talloze plaatsen in Nederland een essentieel onderdeel van het stedelijk of niet-stedelijk decor voor bijvoorbeeld fietsers en wandelaars. Duurzame recreatie en toerisme betekenen voor water onder meer het veiligstellen van toegankelijk wateroppervlak en van de kwaliteit van water en waterbodems. Knelpunten voor recreatie en toerisme kunnen optreden bij wijziging van de bestemming van wateren, bij verontreiniging van de wateren en/of waterbodems, bij een te geringe diepgang of in verband met onveiligheid.*

Bij het waterbeheer zijn vele (tegenstrijdige) belangen betrokken. Hierbij valt te denken aan landbouwbelangen, industriële belangen, en stedelijke belangen. Een rivier in een dichtbevolkt gebied



als Nederland zal kwalitatief betrouwbaar drinkwater moeten leveren, terwijl er bovenstrooms industrieel afvalwater word geloosd. Daarnaast kan dezelfde rivier ook nog dienst doen als scheepvaartroute, kunnen boeren er hun irrigatiewater uit pompen en kan er recreatie en visserij plaats vinden, en kan de rivier nog een natuurwaarde hebben. De organisatie om dit complexe beheersprobleem aan te pakken wordt kort besproken in de desbetreffende paragraaf en nader behandeld in het college CTlw4450 "Integraal Waterbeheer". Eerst wordt nader ingegaan op de beschrijving van de verschillende waterstaatkundige eenheden in Nederland.

*De industriële sector gebruikt oppervlaktewater en grondwater om te koelen, voor gebruik als proceswater en voor verwerking in producten. Daarnaast heeft de industrie watergangen en rioolstelsel nodig voor de lozing van afvalstoffen. De industrie belast het watersysteem met chemische en thermische verontreinigingen. De industrie stelt eisen aan de omvang van de wateraanvoer, aan de chemische samenstelling, het slibgehalte, de temperatuur en aan de beschikbaarheid van afvoermogelijkheden.*

Er zijn weinig landen waar de landschappen zo sterk zijn beïnvloed door ingrepen van de mens als Nederland, vooral met betrekking tot de waterstaat. De waterbeheerskundige hoofdstructuur wordt gevormd door de Rijntakken Waal, IJssel en Nederrijn en door de Maas, samen met het IJsselmeer, en Deltameren en het Amsterdam-Rijnkanaal-Noordzeekanaal. Een korte bespreking van de waterstaatkundige opbouw van Nederland wordt van belang geacht in verband met het feit dat verdere ontwikkeling tot verdere ingrepen in het bestaande systeem leidt, waarbij men dat bestaande systeem moet kennen. Bij de waterstaatkundige opbouw wordt altijd een onderscheid gemaakt tussen polderland en hellende gebieden.

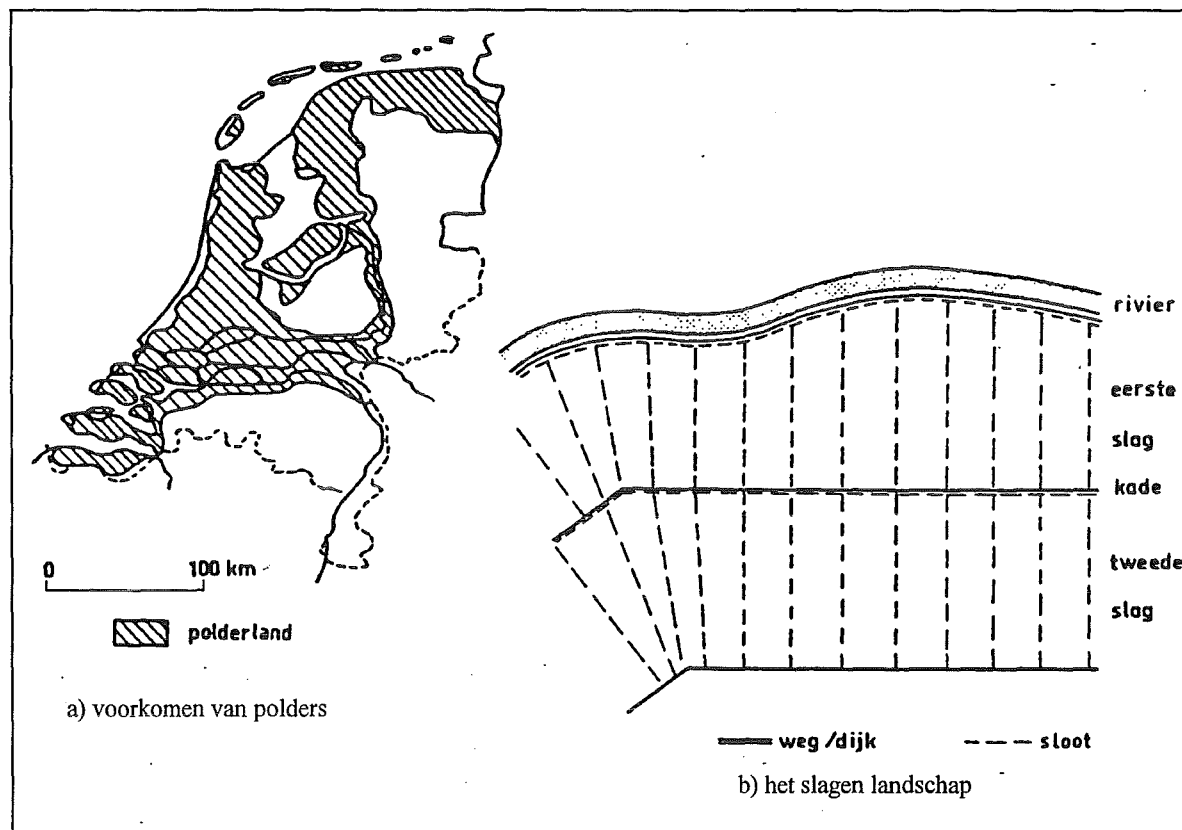
*Het transport over water stelt onder meer eisen op het gebied van bevaarbaarheid, bereikbaarheid, en veiligheid: vaardiepte, vaarbreedte, stroomsnelheid, aanwezigheid van havens, vluchthavens en vrije vaarroutes. Het Tweed Structuurschema Verkeer en Vervoer neemt de duurzame samenleving als maatstaf voor het te voeren beleid. Dit betekent het stellen van grenzen aan de externe effecten van verkeer en vervoer, onder meer aan de aantasting van de natuur en aan het ruimtebeslag. Knelpunten bij het transport over water kunnen optreden indien de waterdiepte te gering is (bij geringe afvoer) of wanneer de stroomsnelheid te groot wordt (bij grote afvoer) of wanneer de stroomprofiel te krap is (bijvoorbeeld door bebouwing in de uiterwaarden en andere fysieke belemmeringen)*

### **Polderland**

Een groot deel van Nederland is polderland (fig. 1.9a). In het noorden van Nederland woonden reeds lang geleden mensen op terpen, ter bescherming tegen overstromingen. Tussen de terpen maakte men vanaf ongeveer het jaar 1000 verhoogde verbindingswegen. Daar waar deze dijken een gesloten ring vormden ontstond een polder. Nadat in de middeleeuwen in het noorden een bedijkte kustlijn was ontstaan werden brede stroken aangeslibd land telkens weer ingedijkt, zodat een aantal langwerpige, oost-west georiënteerde polders ontstonden. In het Utrecht-Hollandse veengebied vond de eerste bewoning plaats op de hogere, stevige oevers van riviertjes en kreken. Vanaf deze hogere delen werden de venen ontwaterd, met behulp van evenwijdige sloten loodrecht op de ontwateringsbasis (het riviertje) (fig. 1.9b). Eerst vond de ontginning in een strook langs de riviertjes plaats, later ook meer binnenwaarts gelegen. Zo ontstonden rijen evenwijdige polders, de zogenaamde slagen. Aanvankelijk vond er alleen ontwatering plaats. Ten gevolge van deze ontwatering trad inklinking van klei en veen op. Deze inklinking, tezamen met zeespiegelrijzing, bracht het maaiveld tot beneden het niveau van de ontwateringsmiddelen.

De ontwateringsbasis moest worden bedijkt en het overtollige water moest via hooschop, paardemolen en later windmolen uit het gebied worden gemalen. Grote delen van het veen werden afgegraven als brandstof(turf) of verbrand in verband met de vruchtbaarheid, zodat meren en moerassen ontstonden. Regionale beheerseenheden werden

noodzakelijk in verband met de afdamming van de rivier- en kreekmondingen, ter bescherming tegen hoge buitenwaterstanden. De afvoer van het water naar het buitenwater vond gedurende laag water door middel van spuiscuizen plaats. Binnen het dijksysteem ontstond een netwerk van waterlopen en plassen voor de afvoer van het water als bij hoog buitenwater de afvoer gestremd was. Dit regionale-bergingsstelsel heet een boezem.



**Figuur 1.9: Polders in Nederland**

Sinds de introductie van de windmolen werd het mogelijk meren en plassen droog te malen. Ten gevolge van het ontstaan van deze droogmakerijen, vooral in de 16e en 17e eeuw, nam de waterbelasting op het boezemsysteem toe en nam het bergend oppervlak af. Door de droogmaking van de Haarlemmermeer verloor bijvoorbeeld Rijnland 80% aan boezemoppervlak.

Deze ontwikkeling leidde in de loop van de tijd tot de volgende maatregelen:

- aanleg van meer afvoerpunten van boezem naar buitenwateren;
- kunstmatige lozing vanuit de boezem naar binnenwateren door achtereenvolgens windmolens en stoom-, diesel- en elektrische gemalen;
- instelling van een zogenaamd maalpeil, een maximum waterpeil in de boezem. Als het maximum in de boezem bereikt wordt moeten de polders stoppen met het op de boezem uitslaan van water. Het water moet verder geborgen worden in de watergangen en de boezem van de polder.

De volgende begrippen zijn in het polderland van belang:

- Boezem : Een stelsel van met elkaar in open verbinding staande vaarten en kanalen waarop inliggende polders hun overtollige water lozen en waaruit deze polders hun benodigde water kunnen betrekken. Het door de polders geloosde water wordt tijdelijk in de boezem geborgen alvorens het naar zee afgevoerd wordt.
- Polder : Een vlak gebied dat afgescheiden is van het omringende hydrologisch regime om het peil van het grondwater en het oppervlaktewater onafhankelijk van de omgeving te kunnen beheersen.
- Boezemland : Het gebied dat op natuurlijke wijze afvoert naar de boezem.

- Polderpeil : De waterstand die men in de polder tracht te handhaven. Veelal heeft de polder een zomerpeil en een winterpeil. In stedelijke gebieden spreekt men veelal van grachtpeil of singelpeil.
- Binnenwater : De zee en de rivieren die op natuurlijke wijze afvoeren naar de zee.
- Keur : Verordening waarin de ge- en verboden van een bepaald waterschap aangaande zijn belangen staan vermeld.

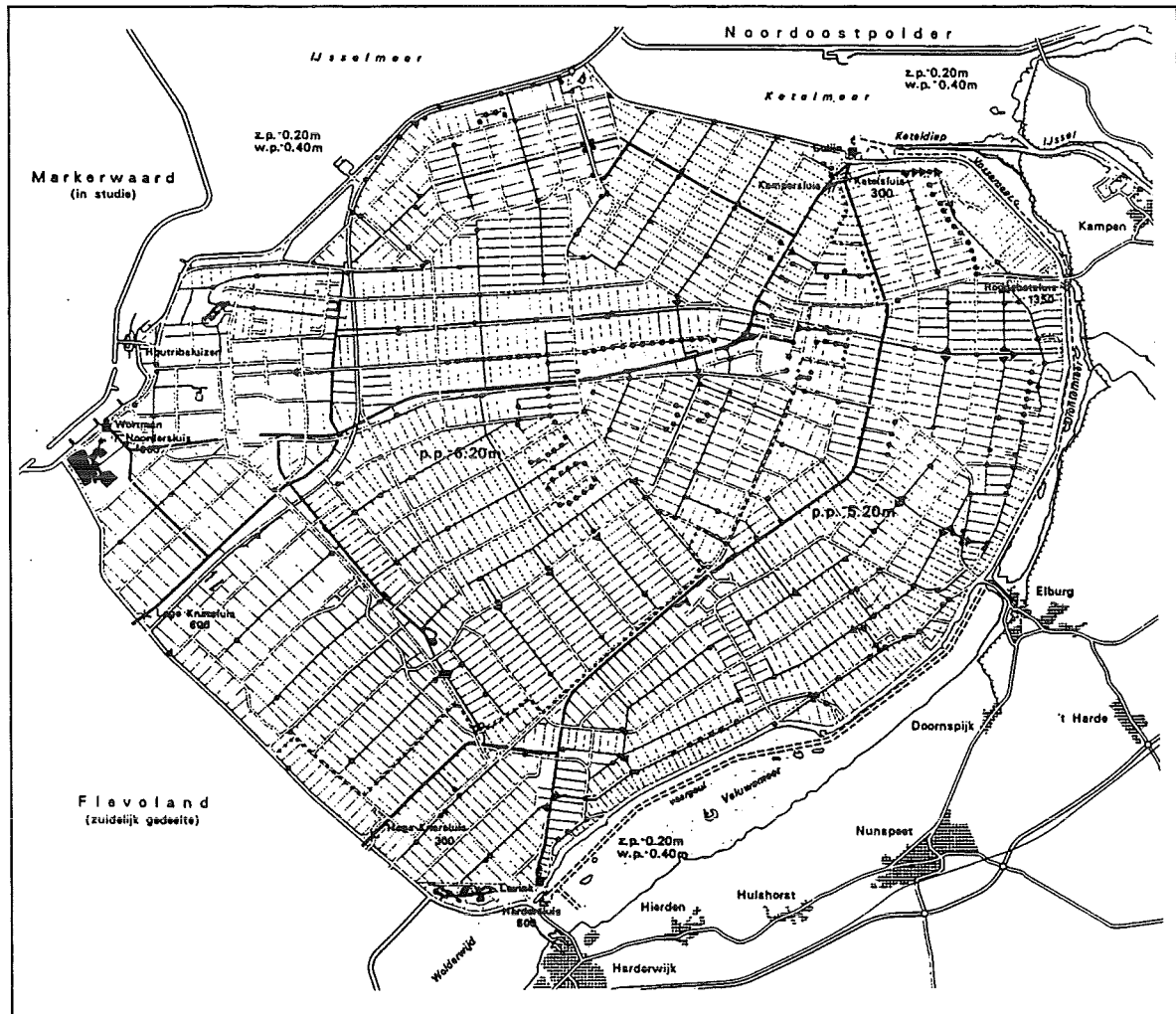


Fig 1.10: Een landelijk poldersysteem

Enkele gegevens over enige regionale waterbeheersingseenheden staan vermeld in tabel 1.5. De figuren 1.10, 1.11 en 1.12 illustreren het voorgaande.

**Tabel 1.5: Enige algemene gegevens over regionale waterbeheersingseenheden in West-Nederland.**

Waterbeheersers	Delfland	Schie-land	Rijnland	Amstel-land	Uitwaterende Sluizen van Kennemerland
Totaal oppervlak (ha)	37600	7700	114800	30960	78764
Oppervlak van de boezem (ha)	680	170	4300	560	1850
Percentage boezemwater van het totale oppervlak	1.80	2.20	3.75	1.80	2.35
Toelaatbare peilsteiging (cm)	15	30	25 à 30 <sup>(2)</sup>	55	50
Oppervlakte boezemland					
-totaal (ha)	8480	40	17300	1200	8533
-stedelijk verhard oppervlak (ha)	2000	-	2350	480	500
-landelijk verhard oppervlak (ha)	2800	-	1500	-	-
-onverhard gebied (ha)	3680	40	14450	720	8033
Oppervlakte poldergebieden (ha)	28440	7490	90400	29200	65346
Duinen	-	-	1800	-	3035
Totale gemaalcapaciteit (m <sup>3</sup> /min)	2400	900	9280	1800	4000

Polders die niet via een boezemsysteem afwateren treft men aan in Zuid-West-Nederland, in het rivierengebied en de IJsselmeerpolders. In Zuid-West-Nederland worden de polders bemalen naar buitenwater.

In het rivierengebied en in de IJsselmeerpolders is het peil van het hoofdafwateringssysteem lager dan de sloten en kan vrij worden afgevoerd, eventueel zelfs met droogvallende sloten.

De afvoer van het overtollige water uit een polder kan geschieden door vrije (zwaartekracht) lozing of door bemaling. Vrije lozing geschiedt door uitwateringssluizen naar her buitenwater of via stuwen naar de boezem. Uitsluitend vrije lozing komt in laag Nederland niet veel meer voor. Bemaling van een polder geschiedt door middel van een gemaal rechtstreeks op het open water of op de boezem.

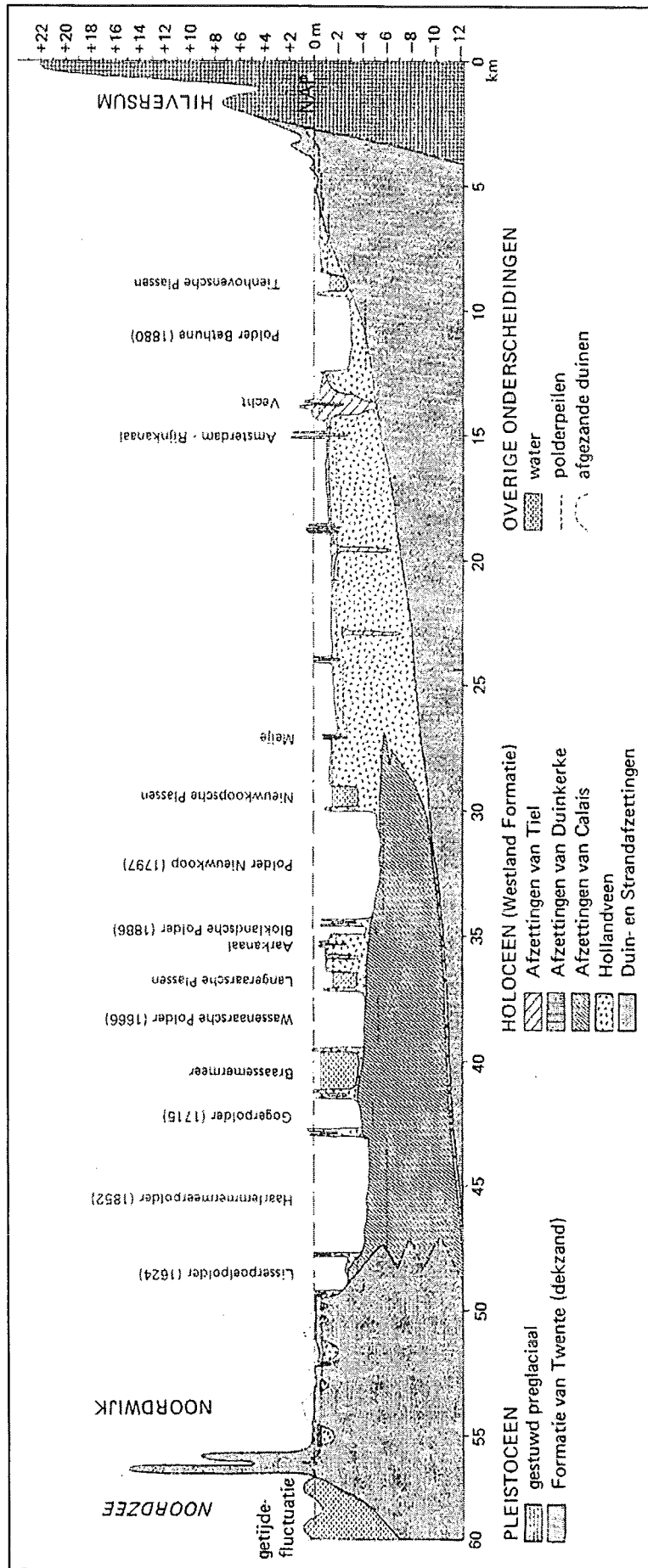


Fig. 1.11. Geologisch-waterstaatkundige doorsnede over het Midden-Nederlandse polderland.

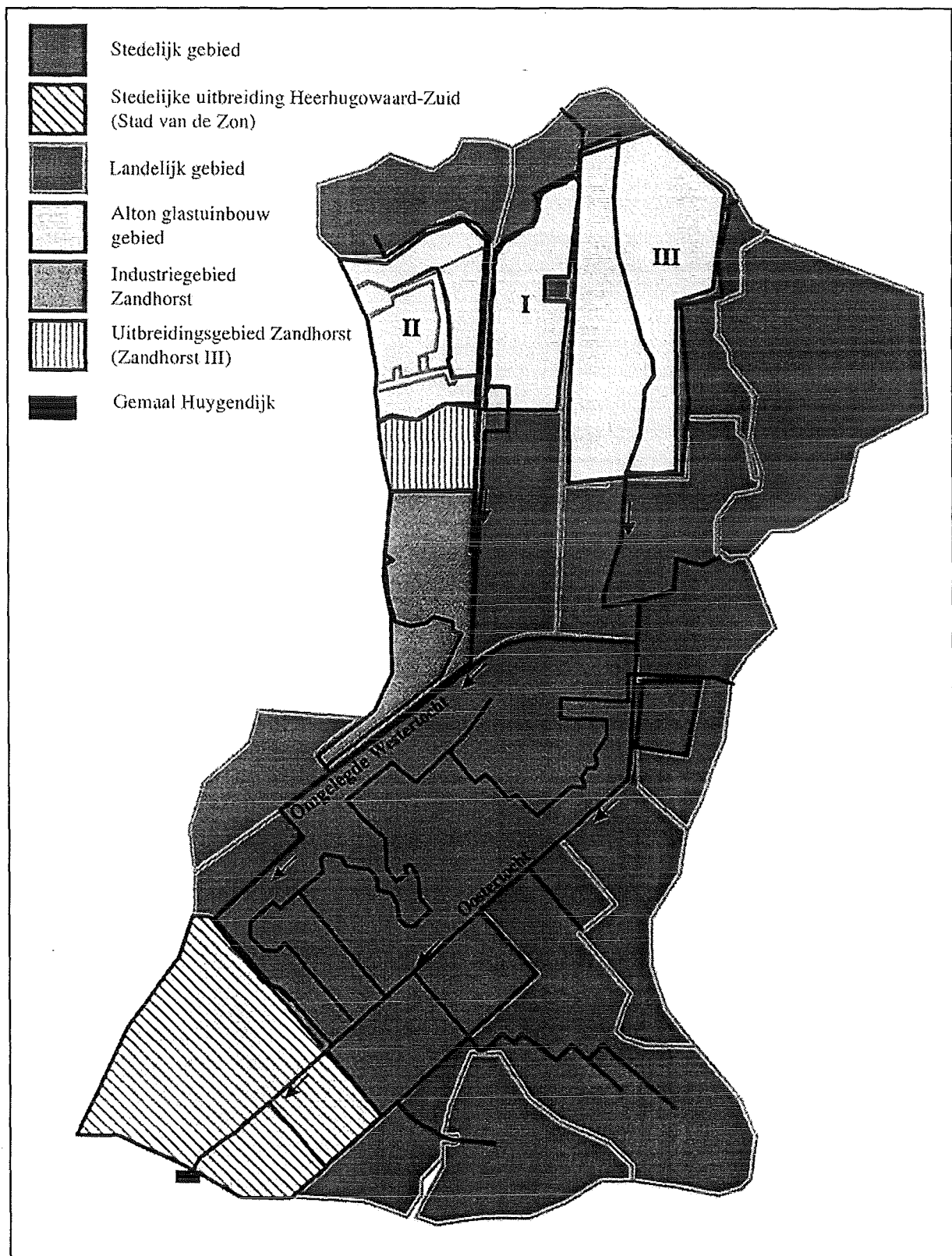


Fig. 1.12. Een stedelijk poldersysteem.

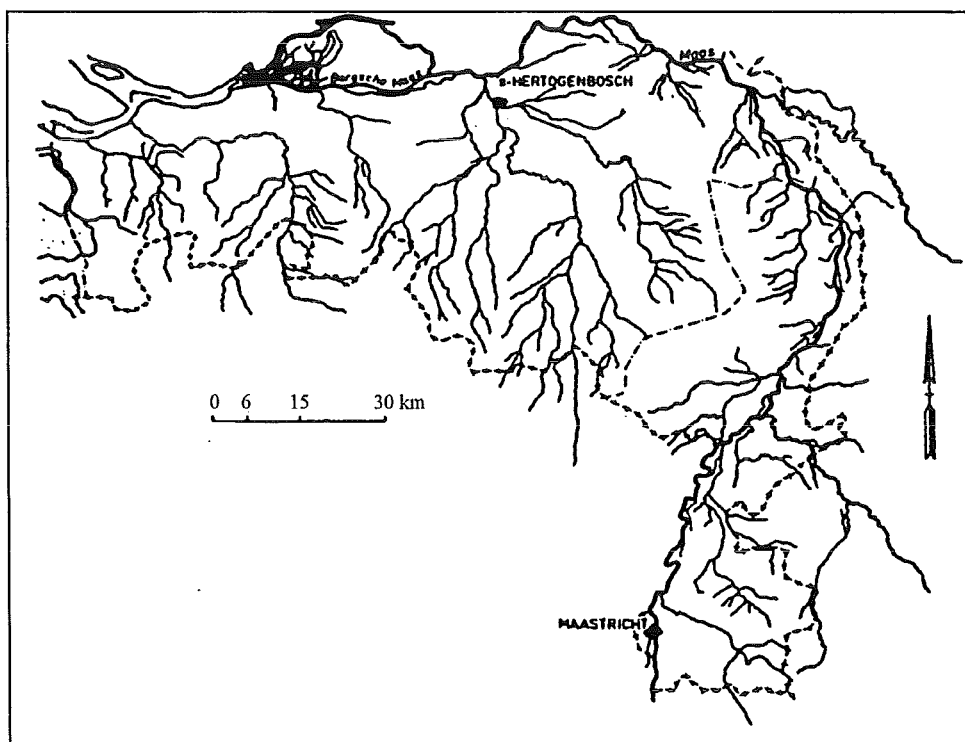
In het college *Polders en hoogwaterbeheersing* zal nader worden ingegaan op de specifieke beheer- en ontwerpaspecten van poldersystemen.

### Hellende gebieden

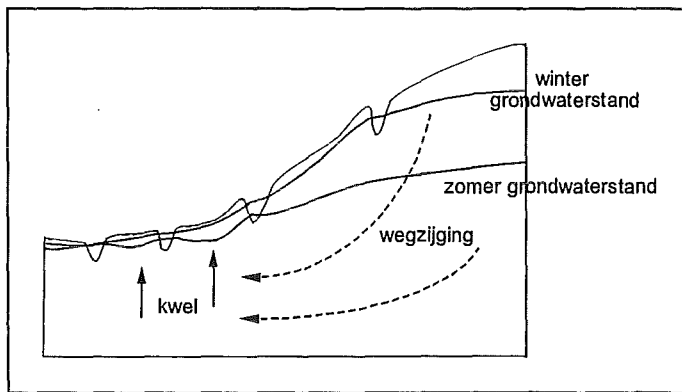
Zonder in te gaan op een precieze definiëring wordt een hellend gebied omschreven als alle niet-poldergebieden (figuur 1.9). De hellende gebieden in Nederland bestaan grotendeels uit redelijk tot goed doorlatende zandgronden met een grote infiltratiecapaciteit. Door de grote infiltratiecapaciteit van de bodem en de gematigde neerslagintensiteit in hellende gebieden in Nederland, dringt nagenoeg alle neerslag in de ondergrond en komt via het grondwater tot afvoer. De helling van de grondwaterspiegel in het niet-gestuwde zandgebied is onvoldoende om het neerslagoverschot als grondwaterstroming af te voeren. Dit heeft tot gevolg gehad dat het grondwater uittreedt en zich een afwateringssysteem heeft ontwikkeld in de vorm van beken in de richting van de primaire helling.

De hiërarchische opbouw van zo'n systeem is weergegeven in fig. 1.13. Gebieden met meer reliëf, zoals duinen en stuwheuvels, zijn wel in staat zonder beken het neerslagoverschot af te voeren als grondwater. Dit grondwater treedt als kwel uit aan de voet van de heuvels. In fig. 1.14 is een schematische doorsnede loodrecht op een beekdal gegeven met daarin de winter- en zomergrondwaterstand. De Jager (1965) onderscheidt in deze doorsnede drie gebieden.

- Het lage gebied. Het maaiveld is laaggelegen ten opzichte van het peil in de beek en de grondwaterstand is hoog. Het is veelal een kwelgebied. Een intensieve ontwatering is nodig en men treft er dan ook veel sloten aan. Er is in dit gebied een geringe berging voor water aanwezig. Daardoor wordt de neerslag relatief snel afgevoerd.
- Het hoge gebied. Zowel in de zomer als in de winter ligt het maaiveld hoog ten opzichte van het peil in de beek en ook ten opzichte van de grondwaterstand. Reken of sloten voor detailontwatering komen in dit gebied niet voor. Waterafvoer vindt gedurende het gehele jaar plaats via de diepere ondergrond. Deze afvoer wordt de basisafvoer genoemd. Deze basisafvoer is te beschouwen als de langzame afvoercomponent van een hellend gebied.



Figuur 1.13: Afwateringssysteem in een hellend zandgebied

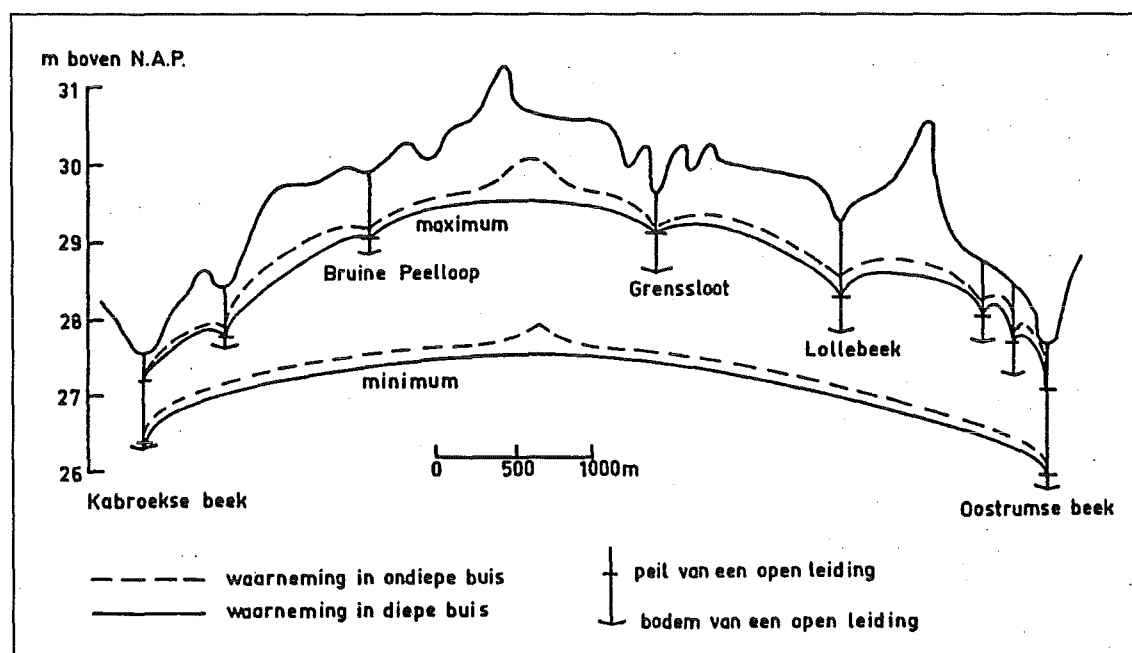


Figuur 1.14: Grondwaterstroming in hellend gebied

- Het middelhoge gebied. De grondwaterstanden zijn aan het eind van de zomerperiode vrij diep ten opzichte van het maaiveld. Er is voldoende berging in de grond aanwezig om de winterneerslag op te vangen. Toch stijgt op den duur de grondwaterstand zo hoog ten opzichte van het maaiveld dat in dit gebied sloten voor de ontwatering nodig zijn en dit gebied ook bijdraagt aan de snelle grondwatercomponent van de afvoer.

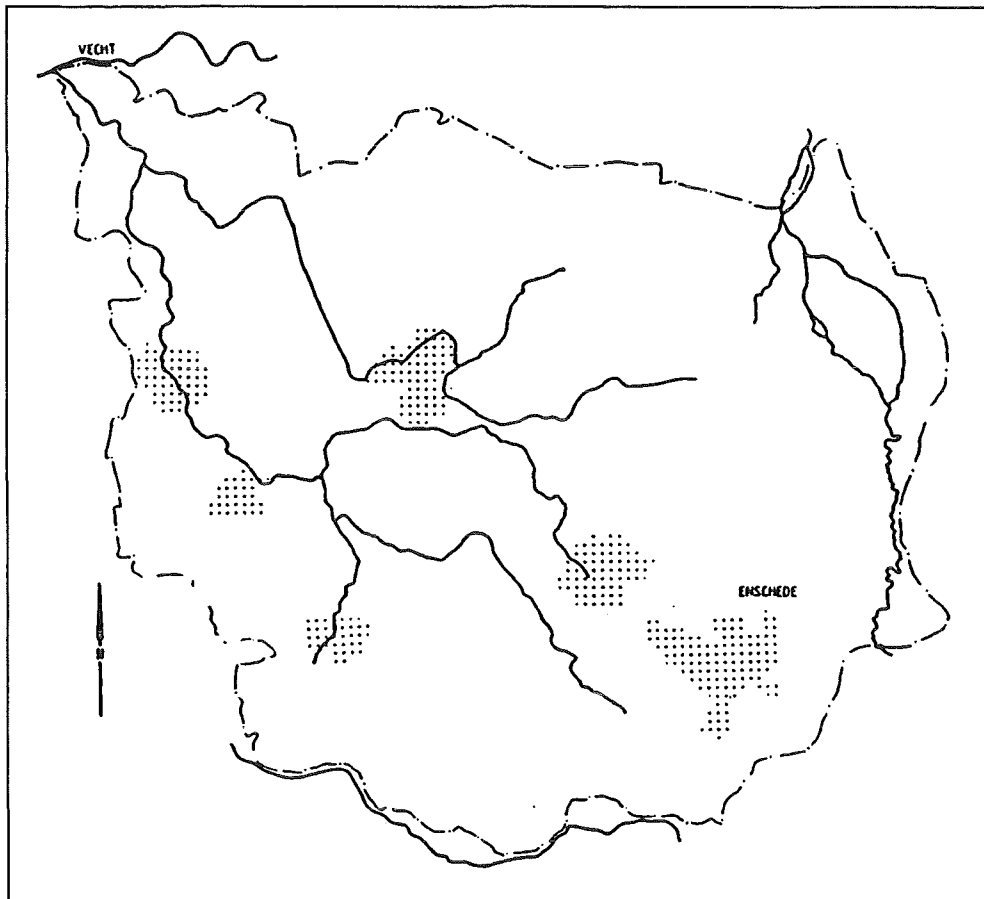
In hellende gebieden is sinds vele jaren ingegrepen in het waterhuishoudkundig systeem. De volgende maatregelen zijn in de loop der jaren uitgevoerd.

- het verruimen van watergangen ter vergroting van de afvoercapaciteit;
- het aanleggen van stuwen ter regulering van de afvoer, met als doel het handhaven van voldoende hoge peilen;
- het bouwen van gemalen daar waar de natuurlijke lozing te wensen overlaat;
- het bekaden van waterlopen om overstromingen te voorkomen;
- het scheppen van mogelijkheden voor wateraanvoer in droge zomers. De uitgevoerde maatregelen bleken na verloop van tijd niet meer voldoende. Eerst waren het vooral de veranderingen ten gevolge van de voortgaande ontginningen en ingebruikneming van woeste gronden. Later waren het hogere eisen ten gevolge van de intensivering van de landbouw die verdere aanpassing van het waterbeheersingsstelsel tot gevolg hadden. De figuren 1.15 t/m 1.17 illustreren het voorgaande.

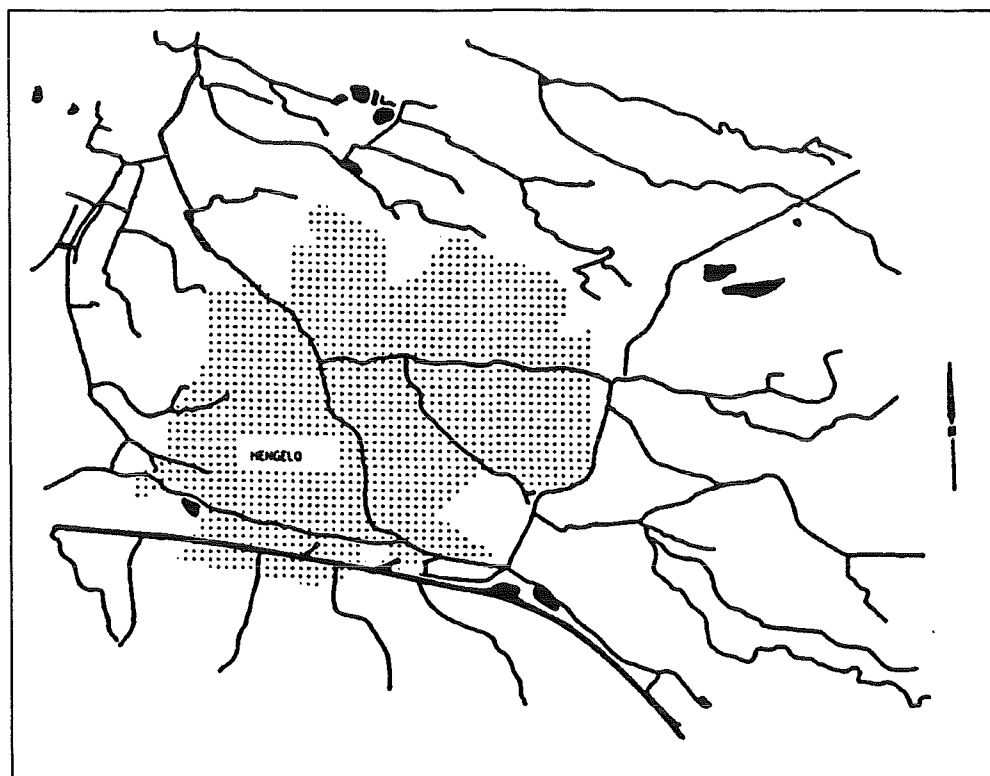


Figuur 1.15: Geologisch-waterstaatkundige dwarsdoorsnede over het hellende gebied in Nederland



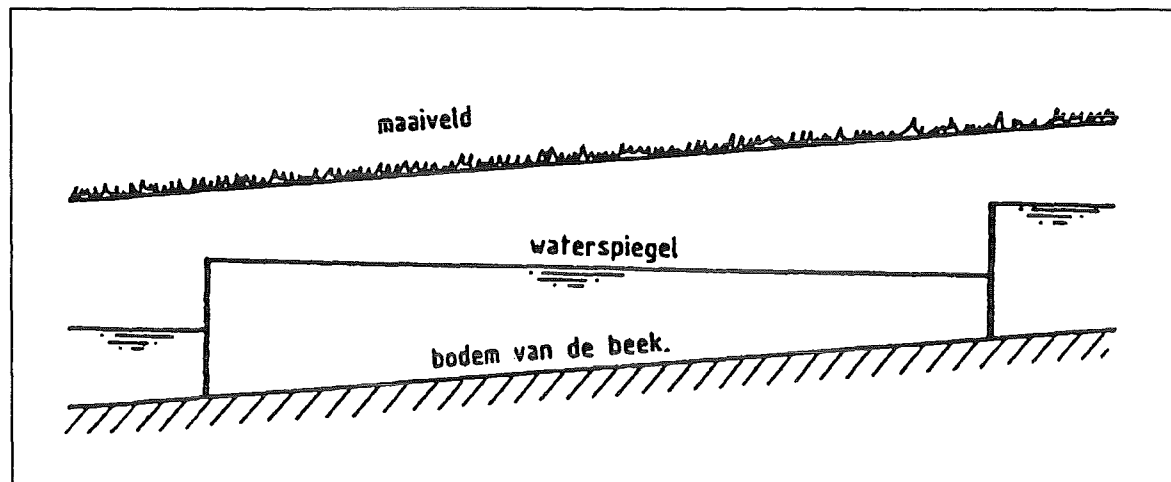


**Figuur 1.16: Een regionale waterbeheersingseenheid: waterschap Regge en Dinkel**



**Figuur 1.17: Een stedelijk watersysteem in hellend Nederland: Hengelo**

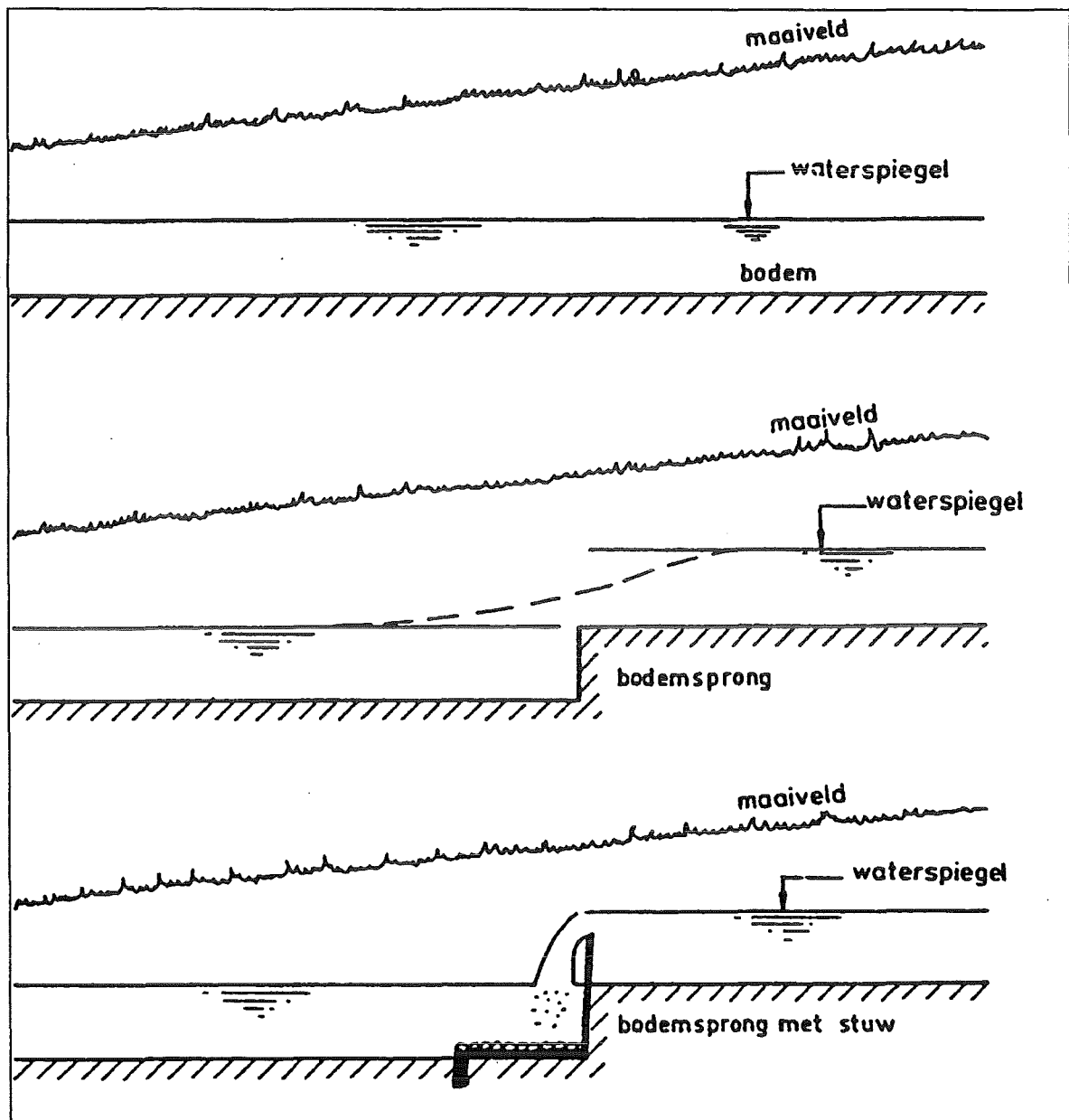
Peilbeheersing is gewenst ten behoeve van de vochtvoorziening van de gewassen in de zomerperiode. Er bestaat in deze zandgronden een nauwe relatie tussen de grondwaterstand en de gewasproductie. De grondwaterstand wordt op haar beurt sterk beïnvloed door het peil in de waterlopen. In gebieden met een natuurlijke afstroming zijn de waterstanden in de watergangen in het voorjaar en de zomer lager dan gewenst wordt. Wil men de gewenste zomerwaterstanden toch bewerkstelligen dan moeten stuwen worden geplaatst, de zogenaamde landbouwstuwen (fig. 1.18).



**Figuur 1.18: Landbouwstuwen**

Naast dergelijke landbouwstuwen kent men ook zogenaamde waterstaatkundige of technische stuwen. De stroomsnelheid in een leiding wordt in sterke mate bepaald door het verhang. Mag de stroomsnelheid niet te hoog worden, dan zal in een sterk hellend terrein het bodemverhang kleiner moeten worden gemaakt dan het terreinverhang (fig. 1.19).

Dit kan leiden tot diepe ingravingen en een te grote drooglegging bovenstrooms. Om dit te voorkomen past men bodemsprongen toe. Om het teveel aan energie te vernietigen en om erosie te voorkomen wordt een technische stuw geplaatst (fig. 1.19). De watervoorziening is in de loop der jaren, zeker in de hellende gebieden, steeds belangrijker geworden.



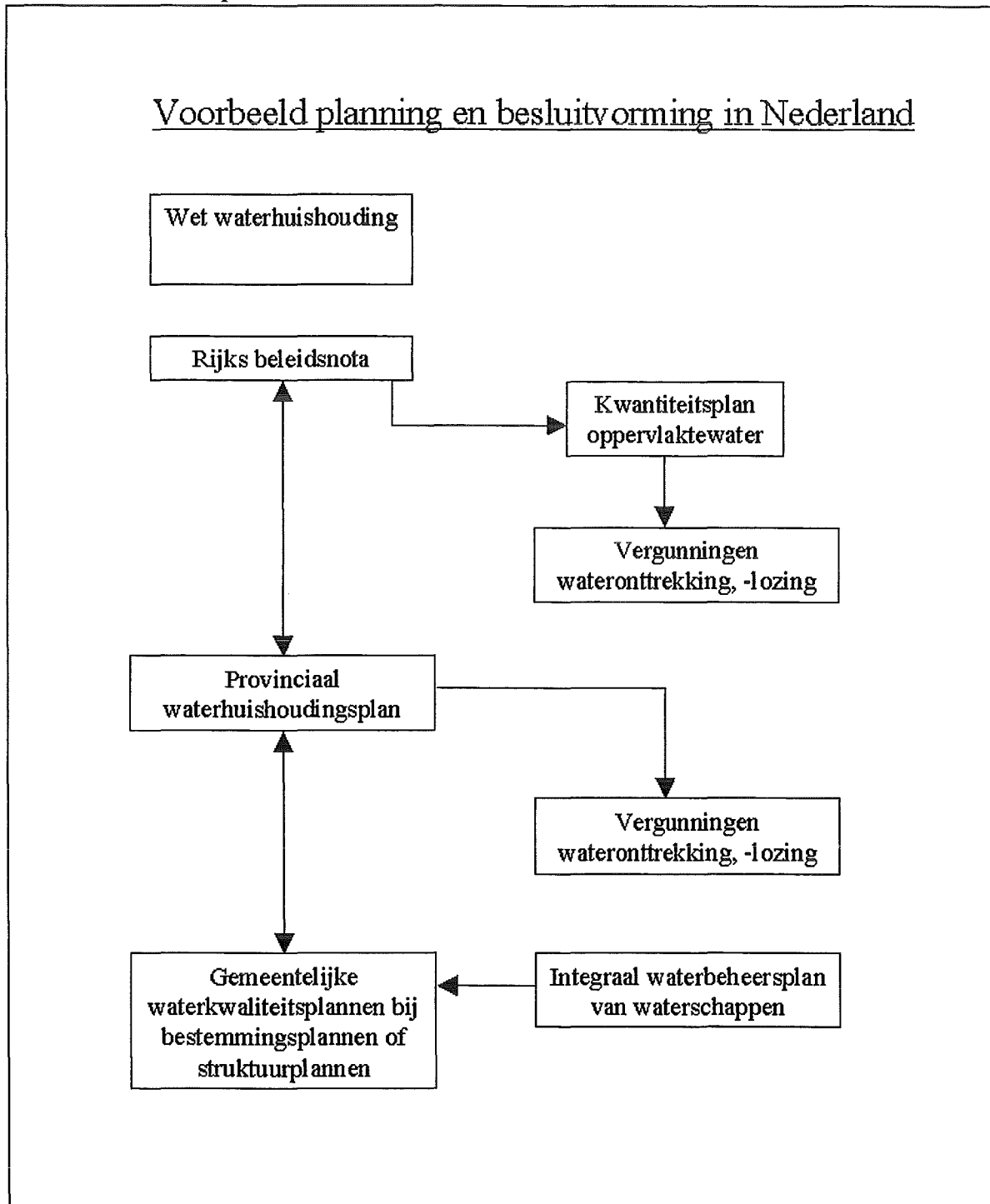
**Figuur 1.19: Technische stuw**

Gebleken is dat veelal niet aan de waterbehoefte kon worden voldaan. Een oorzaak van het toenemende belang van de watervoorziening is de toenemende intensivering in de land- en tuinbouw en het streven om in droge perioden de bedrijfsrisico's zo veel mogelijk te beperken. Een andere oorzaak is het toegenomen gebruik van grondwater voor drinkwater, industrie en irrigatie waardoor er minder grondwater beschikbaar komt in het beekstelsel.

### 1.2.5 Bestuurlijke organisatie waterbeheer

Voor het beheer en de beheersing van het water is een organisatorisch en juridisch kader nodig. In Nederland is dit bestuurlijk-juridisch kader in de loop der eeuwen gegroeid tot een zeer complex systeem waarbij een groot aantal organisaties zijn betrokken. Naast het rijk, de provincies en de gemeenten zorgen met name de water- en zuiveringsschappen voor het kwantitatief en kwalitatief beheer van het water. De Wet op de Waterhuishouding vormt het integrerend geheel, waarbinnen de waterhuishouding in Nederland wordt geregeld.

Tabel 1.3: Taken en plannen in het waterbeheer



Op nationaal niveau is de Wet op de Waterhuishouding de basis voor de coördinatie van het waterbeheer. De Wet op de Waterhuishouding heeft tot doel de overheid de instrumenten te verschaffen om een samenhangend beleid en beheer te voeren met betrekking tot de gehele waterhuishouding enerzijds en een speciale aanvullende regeling te treffen voor het waterkwantiteitsbeheer anderzijds. Volgens deze wet moeten de provincies een provinciaal waterhuishoudingsplan opstellen waarin per regio wordt aangegeven wat de functies van het oppervlakte en grondwater zijn, en hoe deze functies middels het beheer van gemeentes en schappen zo goed mogelijk gewaarborgd kunnen worden.

Provinciale waterhuishoudingsplannen zijn bedoeld als integratiekader en richtinggevend voor de verschillende onderdelen. Ze behandelen zowel oppervlaktewater als grondwater, zowel waterkwantiteit als waterkwaliteit. Als onderdeel wordt een "provinciaal kwantiteitsplan oppervlaktewater" vastgesteld. Het provinciale waterhuishoudingsplan heeft raakpunten met de streekplannen, met de milieubeleidsplannen en met het beleidsplan Natuur en landschap.

Bij de waterbeheersing heeft de gemeente te maken met de provinciale plannen ten aanzien van het grondwater en het oppervlaktewater, kwantitatief en kwalitatief, en met de waterschappen en zuiveringsschappen. Hierbij is vooral de relatie tussen gemeenten en waterschappen van belang, gezien de overlappende beheersgebieden. Een gemeente moet van een waterschap een vergunning hebben voor de afvoer van het water uit een deel van de stad en voor het dempen en graven van nieuwe watergangen. Een waterschap heeft voor de bouw van een gemaal of een zuiveringsinstallatie een bouwvergunning nodig van de gemeente.

**Tabel 1.4: Kosten van het publiekrechtelijke waterbeheer in Nederland in 1994 in guldens (uit: "Hoe betalen we de waterrekening?", RIZA, 1996)**

Taak	Rijk (in mln)	Provincie (in mln)	Waterschap (in mln)	Gemeente (in mln)	Totaal (in mln)	Per hoofd van de bevolking
Waterkeringszorg	726	98	120	14	958	62
Waterkwantiteitsbeheer	290	42	90	81	1103	72
Waterkwaliteitsbeheer	548	283	1660	1389	3880	252
Totaal	1564	423	2470	1484	5941	386

**Tabel 1.5: Financiering van het publiekrechtelijke waterbeheer in Nederland in 1994 in guldens (uit: "Hoe betalen we de waterrekening?", RIZA, 1996)**

Beginsel	Rijk (in mln)	Provincie (in mln)	Waterschap (in mln)	Gemeente (in mln)	Totaal (in mln)	Per hoofd van de bevolking
Algemene middelen	1458	168		421	2047	133
Belang betaling zeggenschap		74	810	5	889	58
Vervuiler betaalt aan overheid	106	183	1660	94	2043	133
Gemeentelijk rioolrecht				964	964	62
Totaal	1564	425	2470	1484	5941	386

De ontwatering van de percelen is de verantwoordelijkheid van de grondeigenaar. Indien noodzakelijk mag de eigenaar van het perceel een ontwateringssysteem in het eigen perceel aanleggen. De afwatering vanaf de perceelsgrenzen is de verantwoordelijkheid van hetzij de gemeente, hetzij het schap. De grens tussen ont- en afwatering is per gemeente verschillend vastgelegd. Deze kan gelijk met de perceelsgrenzen gekozen worden of ter plaatse van de aansluiting van de perceelsofwatering op het hoofdstelsel.

Het oppervlaktewaterkwaliteitsbeheer is sinds 1970 geregeld in de Wet Verontreiniging Oppervlaktewateren. Op nationaal niveau wordt de planmatige aanpak van het probleem uitgewerkt in het Indicatief Meerjaren Programma (IMP). Door de provincie en/of door de zuiveringsschappen of waterschappen moeten in het kader van het IMP waterkwaliteitsplannen worden vastgesteld. Op gemeentelijk niveau moet een Integraal Afvalwater Afvoerplan (IAAP) worden ontwikkeld. Het beheer met betrekking tot de rijkswateren wordt uitgevoerd door het ministerie van Verkeer en Waterstaat. Het waterkwaliteitsbeheer van de niet-rijkswateren is opgedragen aan de provincies, die dit beheer kunnen delegeren aan andere openbare lichamen. Dit heeft een scala van bestuursvormen opgeleverd: kwaliteitsbeheer door de provincie; beheer door nieuw opgerichte of bestaande

zuiveringschappen of nieuwe of bestaande waterschappen. De kwaliteitszorg voor het oppervlaktewater ligt alleen in de gemeente Amsterdam bij de gemeente.

## KENNISGEVING

### Ontwerp-verordening waterhuishouding Vallei en Eem en ontwerp-wijzigingen van het kiesreglement en het algemeen reglement voor het waterschap Vallei en Eem

De provincies Gelderland en Utrecht maken het volgende bekend:

Sinds 1 januari 1997 is het waterschap Vallei en Eem operationeel. Ten behoeve van dit waterschap zijn een ontwerp-verordening waterhuishouding en ontwerp-wijzigingen van het kiesreglement en het algemeen reglement voorbereid. Deze ontwerpen worden nu ter inzage gelegd.

#### Ontwerp-verordening waterhuishouding

In de verordening waterhuishouding wordt met name het juridisch instrumentarium ten behoeve van het oppervlaktewaterkwantiteitsbeheer door het waterschap geregeld. Het gaat om het beheersplan, het peilbesluit en de vergunningen voor lozen, onttrekken en peilafwijkingen. De nieuwe verordening wijkt op een aantal punten af van de op dit moment geldende verordeningen waterhuishouding. De belangrijkste afwijkingen zijn:

- vanuit doelmatigheidsoverwegingen wordt de bevoegdheid aan het waterschap overgedragen om de gevallen aan te wijzen waarin een registratie- dan wel een vergunningsplicht geldt om water te lozen in of te onttrekken aan oppervlaktewater;
- in het kader van deregulering wordt alleen het noodzakelijke geregeld. Dit heeft tot gevolg dat de onderhavige ontwerp-verordening ten opzichte van de bestaande verordeningen waterhuishouding aanzienlijk in omvang is teruggebracht.

#### Ontwerp-wijziging algemeen reglement

Op verzoek van het waterschap Vallei en Eem worden de benamingen voor hun bestuursorganen aangepast. Met de benaming dijkgraaf voor de voorzitter en college van 1 dijkgraaf en heemraden voor het dagelijks bestuur kunnen de taken en bevoegdheden van het waterschap beter tot uitdrukking worden gebracht.

#### Ontwerp-wijziging kiesreglement

Bij de voorbereiding van de in de tweede helft van 1997 te houden schriftelijke verkiezingen van de leden van het algemeen bestuur voor het waterschap Vallei en Eem is gebleken dat de voorgeschreven tijd om bepaalde handelingen te verrichten te krap is. Onder andere in verband hiermee wordt het reglement op een aantal onderdelen gewijzigd. De wijzigingen zijn veelal technisch van aard.

#### Terinzagelegging

De ontwerp-verordening waterhuishouding Vallei en Eem met bijbehorende ontwerp-besluiten en de ontwerp-wijzigingen van het algemeen reglement en het kiesreglement voor het waterschap Vallei en Eem liggen van 17 april tot en met 15 mei 1997 tijdens kantooruren ter inzage in:

- de provinciekantoren van Utrecht te Utrecht en van Gelderland te Arnhem;
- het kantoor van het waterschap Vallei en Eem;
- de gemeentehuizen van de gemeenten die geheel of gedeeltelijk liggen binnen het waterschap Vallei en Eem, namelijk Amerongen, Amersfoort, Arnhem, Baarn, Barneveld, Bunschoten, De Bilt, Ede, Eemnes, Hoevelaken, Leersum, Leusden, Maarn, Maartensdijk, Nijkerk, Putten, Renkum, Renswoude, Rheden, Scherpenzeel, Soest, Veenendaal, Wageningen, Woudenberg en Zeist.

#### Reacties

Gedurende de periode van terinzagelegging (dus van 17 april tot en met 15 mei 1997) kunt u schriftelijke zienswijzen ten aanzien van de ontwerp-verordening waterhuishouding met ontwerp-besluiten en schriftelijke bedenkingen ten aanzien van de ontwerp-wijzigingen van het kiesreglement en het algemeen reglement naar voren brengen. Deze kunt u richten aan Gedeputeerde Staten van Utrecht, Postbus 803001 3508 TH te Utrecht. Voor de ontwerp-verordening waterhuishouding met ontwerp-besluiten is het eveneens mogelijk mondelinge zienswijzen te geven. Hiervoor kunt u contact opnemen met de heer H. Versteeg, tel. (030) 258 33 64. Voor nadere informatie kunt u ook contact met hem opnemen. Degene die zijn of haar zienswijze of bedenking inbrengt kan verzoeken om zijn of haar persoonlijke gegevens niet bekend te maken.

Arnhem, 8 april 1997 -  
nr. MW97.14521-6081003

Gedeputeerde Staten van Gelderland  
J. Kamminga - voorzitter  
drs. C.P.A.G. Crasborn - griffier

**De waterhuishoudkundige organisatie is diep geworteld in de democratie.**

Het kwantitatief grondwaterbeheer wordt geregeld in de in 1983 van kracht geworden Grondwaterwet. Het grondwaterbeheer is opgedragen aan de provincies die een provinciaal beleidsplan, het

zogenaamde grondwateronttrekkingsplan, moeten opstellen. Het beleid moet worden gecoördineerd in de provinciale grondwatercommissie en in de landelijke commissie grondwaterbeheer. Het kwalitatief grondwaterbeheer is geregeld worden via de Wet op de Bodembescherming. De provincies moeten een grondwaterkwaliteitsplan opstellen. Dit plan moet gecombineerd worden met het grondwateronttrekkingsplan en uiteraard met het provinciaal waterhuishoudingsplan.

De waterhuishouding van het stedelijke gebied wordt beïnvloed door de gemeente, het schap (waterschap, hoogheemraadschap, polderschap, dijkkring), de provincie, het rijk en de eigenaren van de percelen. Per gemeente zijn er verschillen in de afspraken tussen de overheden onderling. In stedelijke gebieden kan onderscheid worden gemaakt tussen het oppervlaktewater, het grondwater en het afvalwater. De gemeente heeft meestal de verantwoordelijkheid voor het beheer van het rioleringsstelsel en de zuivering van afvalwater. De zorg voor de kwantitatieve beheersing van het oppervlaktewater in het algemeen bij de waterschappen, maar in een groot aantal uitzonderingsgevallen bij de gemeente.

De noodzaak van de integrale afweging van alle bij het waterbeheer betrokken belangen en de wijze waarop de lange termijn waterbeheersplannen tot stand komen wordt nader behandeld in het college LW4450 *Integraal Waterheer*. De bij integraal waterbeheer betrokken waterbeheersorganisaties, wet- en regelgeving komen nader aan de orde in het vak *Waterstaatsrecht en -organisatie* lw5500.

### 1.3 Waterbeheersing in het landelijke gebied

#### 1.3.1 Waterbeheersing voor landbouw en natuurbeheer

De beheersing van de grondwaterstand in het landelijk gebied is van belang voor landbouw, natuur en recreatie. De grondwaterstand fluctueert afhankelijk van neerslag, verdamping, afvoer, aanvoer en berging. De diepte van de grondwaterstand wordt vooral bepaald door reliëf, doorlatendheid en afvoermogelijkheid. De grondwaterstand beïnvloedt de fysische eigenschappen van de grond, en heeft daardoor invloed op:

- groei van planten;
- structuur van de grond;
- bewerkbaarheid;
- begaanbaarheid, berijdbaarheid;
- zwel- en krimpverschijnselen;
- temperatuur van de grond.

*Water is bij de functie landbouw nodig voor de gewassen en voor de dieren. Reden waarom de landbouw eisen stelt aan de omvang van de watervoorraad en -aanvoer, aan het grondwaterpeil, aan het zoutgehalte en de verder samenstelling van het water. Vanuit de landbouw kan zowel een te veel (winterseizoen) als een te kort (zomerseizoen) aan water een probleem zijn. Gevolg is dat het grondwaterpeil in grote delen van het land kunstmatig laag wordt gehouden, hetgeen de verdroging van (natuur)gebieden kan veroorzaken.*

Voor de groei van een plant is water en lucht in de bodem nodig. Een tekort aan water is nadelig, maar ook een teveel aan water, omdat dit een tekort aan lucht betekent. De waterhuishouding van de grond bepaalt de hoeveelheid beschikbaar water, de hoeveelheid lucht, de temperatuur en is van invloed op de structuur van de grond. Wanneer het luchtgehalte in de bodem lager wordt dan 10% van het totaalvolume treedt sterke vermindering van de productie op.

Voor een gewas is een optimale grondwaterspiegel te bepalen, zowel een te diepe als een ondiepe grondwaterstand heeft immers een nadelige invloed op de gewasopbrengst. De optimale grondwaterstand is afhankelijk van het profiel van de bodem en de fysische eigenschappen van de

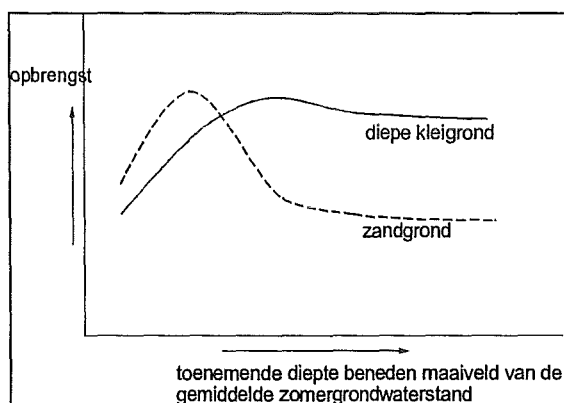
betreffende grondsoorten. Er is in de praktijk onderzoek verricht naar de reactie van het gewas op de hoogte van de grondwaterstand. In figuur 1.6 zijn schematisch twee opbrengst-ontwateringscurven weergegeven: Eén voor klei en één voor zandgrond. Zandgrond vereist een hogere grondwaterstand dan kleigrond en is veel gevoeliger voor lagere grondwaterstanden.

### 1.3.2 Ontwaterings- en afwateringsbehoefte

Ontwatering en afwatering is nodig om te hoge grondwaterstanden te verlagen. Het groeiseizoen van het gewas onder Nederlandse omstandigheden valt in een periode van neerslag tekort. Toch is het van belang voor het gewas dat ook buiten de groeiperiode de grondwaterstand wordt beheerst. Bij hoge grondwaterstanden verliest de grond aan draagkracht en is moeilijk begaanbaar en bewerkbaar. Er kunnen geen wintergewassen worden geteeld en in het voorjaar kiemt zaad langzaam op koude natte gronden. De microbiologische activiteit in de grond wordt beperkt. Zo blijkt dus de grondwaterstand in de winter van invloed te zijn op de groei in de zomerperiode.

Als optimale grondwaterstand kunnen globaal de volgende waarden worden gehanteerd:

Grasland	0,60 - 0,70 m -m.v.
Bouwland, boomgaard op vochthoudende grond;	> 1,00 m -m.v.
Idem, op droogte gevoelige grond	0,70 m -m.v.
Bollenteelt	0,55 m -m.v.

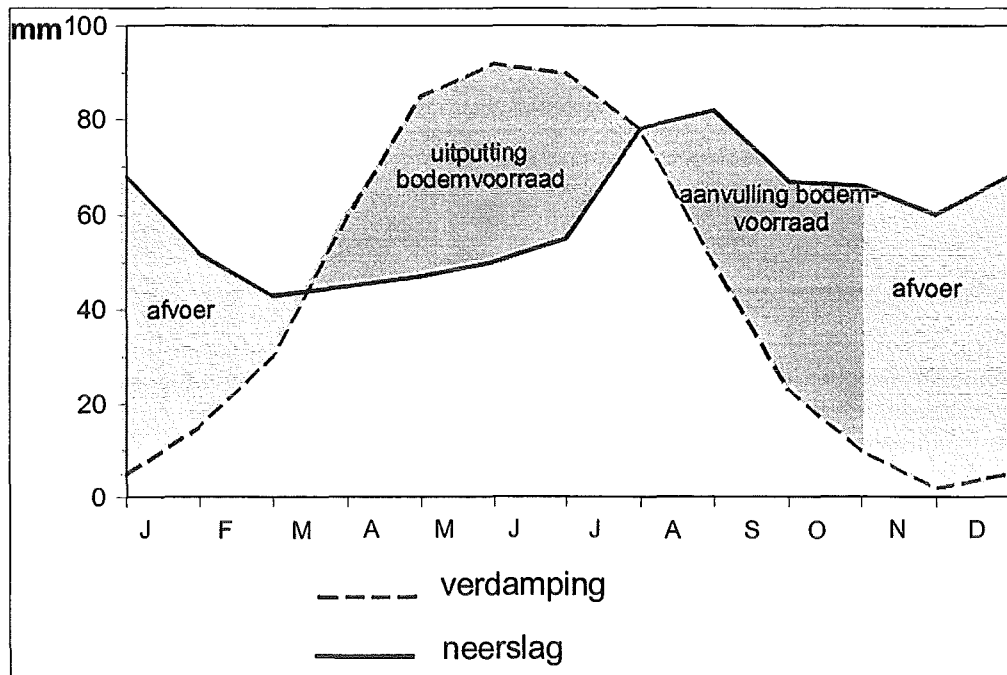


**Figuur 1.20: Verband tussen de opbrengst van akkerbouwgewassen en grondwaterstand**

### 1.3.3 Wateraanvoerbehoefte

In figuur 1.7 is te zien dat in het groeiseizoen de verdamping de neerslag overtreft. In de figuur is de potentiële verdamping uitgezet d.w.z. de maximale hoeveelheid vocht welke bij goede gewasgroei via de plant zal verdampen. Wanneer nu door gebrek aan water in het groeiseizoen niet aan de behoefte van de plant kan worden voldaan, zal deze de huidmondjes sluiten waardoor de verdamping wordt geremd, maar tevens ook de groei en de opbrengst.





Figuur 1.21: Gemiddelde neerslag en potentiële verdamping in Nederland

Als er niet aan de waterbehoefte van een gewas voldaan wordt, zal kunstmatige wateraanvoer plaats moeten hebben in de vorm van bevoeiing, beregening of ondergrondse infiltratie vanuit sloten. De vraag hoe groot de bodemvoorraad moet zijn om aan de vraag naar vocht te kunnen voldoen houdt verband met de kans van optreden van verschillen tussen neerslag en verdamping. Dit statistische probleem kan worden opgelost indien over een voldoende lange periode gegevens over neerslag en verdamping bekend zijn. Wil men minder dan één maal per 10 jaar ( $p=10\%$ ) een watertekort hebben, de bodemvoorraad minstens 185 mm moet zijn. Hoe dit kan worden gerealiseerd zal in volgende hoofdstukken aan de orde komen.

## 1.4 Waterbeheersing in het stedelijk gebied

### 1.4.1 Inleiding

Het studiegebied van de stedelijke hydrologie omvat de bebouwde en in aanbouw zijnde gebieden en de relatie tussen die gebieden en hun omgeving. De belangrijkste kenmerken van de waterhuishouding in stedelijk gebied zijn: de aanwezigheid van verhard oppervlak, de import van een grote hoeveelheid water via het drinkwaternet en de aanwezigheid van een groot aantal verontreinigingsbronnen, zowel geconcentreerd als diffuus verdeeld over het oppervlak. Kassencomplexen lijken qua waterhuishouding meer op stedelijk dan op landelijk gebied. Vervuiling van water in stedelijke gebieden is veel geconcentreerder aanwezig dan in landelijke gebieden en stelt speciale eisen aan het waterbeheer.

Bij aanleg van steden in laaggelegen en in poldergebieden is het meestal noodzakelijk de grondwaterstand te beheersen om het gebied begaanbaar en bewoonbaar te maken. De waterbeheerstechnieken voor dit bouwrijp maken zijn veelal dezelfde als die voor het ontwateren van landelijk gebied.

De interactie tussen de waterbeheersing in stedelijke gebieden en die in landelijke gebieden is groot. De veiligheid van de stad tegen overstromingen hangt vaak ook af van dijken in het landelijk gebied. Het drinkwater en industriewater voor de stad wordt uit het landelijk gebied geïmporteerd, afvalwater wordt (na zuivering) weer geëxporteerd naar het landelijk gebied. Door de verstedelijking wordt de omvorming van neerslag tot afvoer versneld, waardoor het ommeland in minder tijd hogere

piekafvoeren krijgen te verwerken. De waterhuishoudkundige inrichting in de stad zou erop gericht moeten zijn de in- en uitgaande water- en stofstromen zó te beheersen, dat een duurzame woonomgeving wordt geschapen zonder de lasten daarvan af te wentelen op het omliggende landelijke gebied.

#### 1.4.2 Ontwaterings- en afwateringsbehoefte

Om overtollig water uit een stad af te voeren zijn twee deelstromen van belang. Deze zijn de ontwatering en de afwatering. De ontwatering betreft het transport van neerslag van de plaats waar de neerslag valt naar het stedelijke open water of de riolering. Ook kan neerslag infiltreren naar het diepe grondwater. Voor de ontwatering van de percelen stroomt de neerslag over en door de grond, eventueel door drainbuizen en greppels naar een stelsel van grote waterlopen. Afwatering betreft het verder transport door een stelsel van sloten, grachten en kanalen naar de boezem, rivier of zee. Hiervoor is voor gebieden onder zeeniveau (polders) bemaling noodzakelijk. Het industriële en huishoudelijke afvalwater stroomt, soms vermengd met neerslag, door de riolering naar de rioolwaterzuiveringsinstallaties.

Transport van regenwater naar, over of van het oppervlakte gebeurt op drie manieren:

- horizontale, oppervlakkige afstroming
- inloop in riool- of bergingsvoorziening
- infiltratie in de ondergrond

Naast de indeling op basis van de verschijningsvormen van het water, kan er ook een indeling gemaakt worden op basis van de processen. Bestaande uit de ontwatering, de afwatering en de afvoer via de riolering. De ontwatering betreft de afvoer van overtollige neerslag of grondwater van de percelen naar een stelsel van grotere waterlopen. De afwatering betreft het transport van water door het stelsel van oppervlaktewaterlopen vanuit de verschillen gebieden in de stad naar het omringende landelijke water.

Huishoudelijk afvalwater is vooral vervuild met organische zuurstofbindende stoffen, zoals voedselresten en fecaliën. Via het afvalwater kunnen zij in het oppervlaktewater terecht komen. De bacteriën die deze stoffen afbreken, onttrekken hiertoe zuurstof aan het water, waardoor zuurstofloosheid kan

ontstaan. In rioolwaterzuiveringsinstallaties wordt een groot gedeelte van de zuurstofbindende stoffen aan het afvalwater onttrokken.

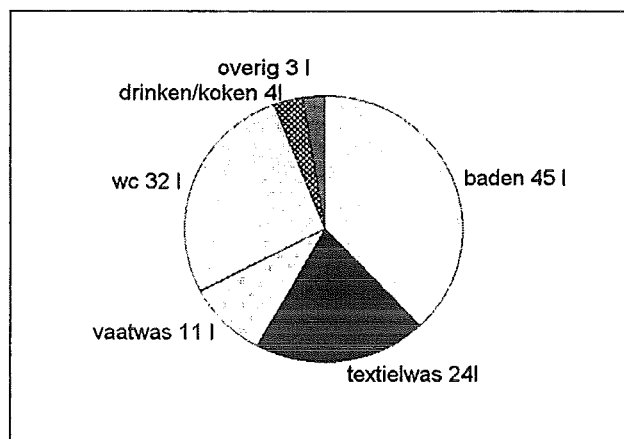
Voor de afvoer van het afvalwater uit de stad stroomt het water door een leidingstelsel van rioleringsbuizen. In de meeste oude steden ligt een gemengd stelsel wat wil zeggen dat zowel afvalwater als overtollige neerslag door de riolering wordt afgevoerd. In principe wordt alle water afgevoerd naar de rioolwaterzuiveringsinrichting (RWZI). De buizen zijn ruim gedimensioneerd zodat een aanzienlijke berging in het stelsel aanwezig is. Als de toestroming de afvoercapaciteit naar de RWZI overtreft, wordt eerst deze berging opgevuld. Als deze berging echter vol raakt, zal ongezuiverd afvalwater vaak vermengd met opgewoeld rioolslib via overstortputten worden geloosd op open water. Dit riooloverstortwater is tegenwoordig één van de grote (diffuse) vervuilingbronnen in Nederland. Voor het vakgebied van de riolering en van de afvalwaterzuivering wordt verwezen naar de colleges gz3420, gz4480 en gz4490.

In nieuwe gedeeltes van de stad wordt steeds vaker een gescheiden rioolstelsel of een verbeterd gescheiden rioolstelsel aangelegd. In een gescheiden rioolstelsel stroomt het afvalwater en de overtollige neerslag door gescheiden buizen. Het afvalwater wordt naar de zuiveringsinrichting afgevoerd terwijl het regenriool op het open water loost. In een verbeterd gescheiden stelsel wordt het regenwaterriool op een beperkt aantal punten verbonden met het vuilwaterriool, waardoor een deel van het neerslagwater wordt afgevoerd richting RWZI in plaats van directe lozing op het stedelijk oppervlaktewater.

In toenemende mate wordt in stedelijke gebieden regenwater dat afstroomt van daken en van terreinen die niet erg verontreinigd zijn verzameld en gebruikt voor “laagwaardig gebruik” in en rond de woning. Gebruik voor toiletspoeling, voedingswater voor de wasmachine en als sproeiwater in de tuin is eenvoudig te realiseren. Regenwater dat toch afstroomt wordt geïnfilteerd in de bodem, in plaats van snel afgevoerd naar het riool. Door deze “afkoppeling” worden hoge afvoerpieken en topbelastingen in de rioolwaterzuiveringsinstallatie gereduceerd.

### 1.4.3 Wateraanvoerbehoefte

De wateraanvoer in stedelijk gebied is onder te verdelen in een drinkwateraanvoer en een oppervlaktewateraanvoer.



**Figuur 1.22: Drinkwatergebruik in Nederland**

Het hoofdelijk drinkwaterverbruik gerekend over de gezinnen in Nederland is 135 liter per dag. Drinkwater wordt niet alleen gebruikt om te drinken maar ook voor een aantal andere doeleinden (zie figuur 1.8). Omdat drinkwater voor verschillende doeleinden wordt gebruikt wordt er gestreefd naar het verstrekken van verschillende “soorten” water voor verschillende doeleinden. Door middel van het afkoppelen en hergebruiken van regenwater voor laagwaardige gebruik kan het gebruik van (duur) drinkwater worden gereduceerd.

Voor dit belangrijke vakgebied van het drinkwater wordt verwezen naar de colleges gz3420 en gz4470.

Oppervlaktewateraanvoer in stedelijke gebieden dient om de het grondwaterpeil te handhaven en om oppervlaktewater te verversen. Het grondwaterpeil moet niet te laag worden om plantengroei mogelijk te maken en (houten) paalfunderingen nat te houden. Stedelijke oppervlaktewater dient periodiek te worden doorgespoeld om de waterkwaliteit te waarborgen.

*Wateren in de stad vormen een integraal onderdeel van regionale watersystemen en zijn dan ook niet als afzonderlijke watersystemen te beschouwen. Toch zijn er redenen om het stedelijk waterbeheer in een aparte paragraaf te behandelen. De problematiek van (grond)wateroverlast, afvalwater, waterverbruik is anders dan die van het landelijk gebied. De ecologische potenties van de stedelijke watersysteem zijn slechts beperkt benut. Water in de stad is een tot nu toe vergeten onderdeel van de regionale watersystemen. Een opwaardering hiervan kan zowel voor de stedelijke wateren als voor de regionale systemen als geheel positief uitwerken.*

*In de afgelopen jaren zijn veelbelovende initiatieven genomen voor een meer duurzaam stedelijk waterbeheer en in de praktijk gerealiseerd. Belangrijke elementen hierbij zijn waterbesparende maatregelen in de woning, het afkoppelen van verhard oppervlak van de riolering, het vasthouden van regenwater in vijvers en in de bodem, en herwaardering van watersystemen bij de ruimtelijke inrichting van (nieuwe) woongebieden.*

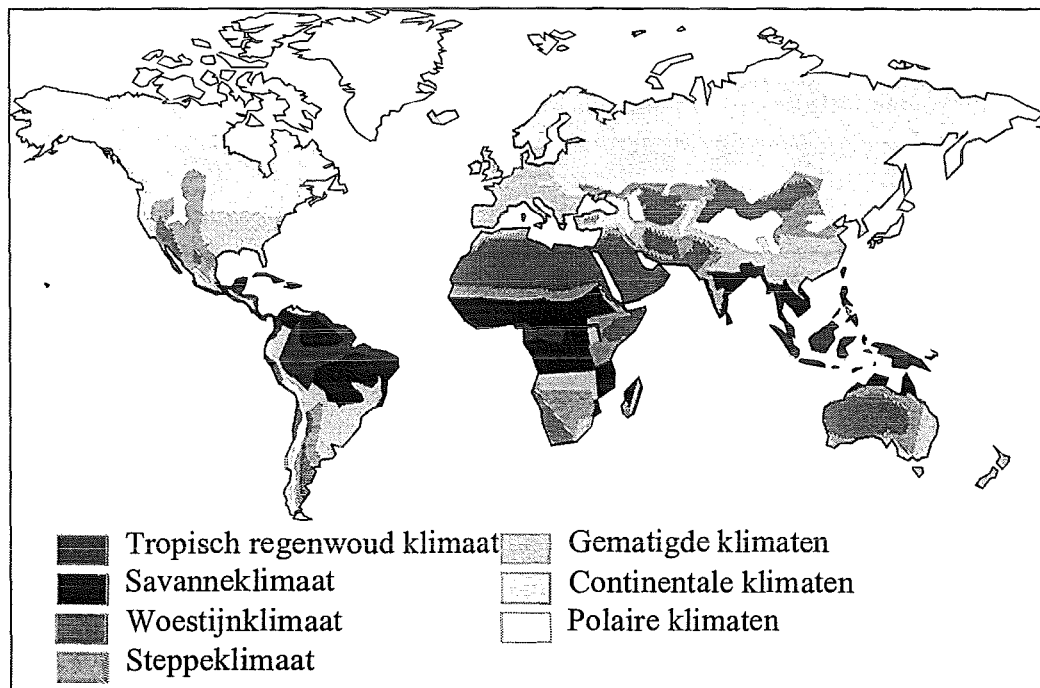
Vierde Nota Waterhuishouding 1997

Om de hierboven genoemde reden komt dit kennisgebied in detail aan de orde in het college *Stedelijk waterbeheer*' LW 5510. In de volgende hoofdstukken van dit voorliggende college Waterbeheersing wordt alleen in gegaan op de ontwaterings- en afwateringsaspecten voor het bouwrijp maken van terreinen.

## 1.5 Bijzondere problemen in het buitenland

### 1.5.1 Inleiding

De klimatologische omstandigheden in andere delen van de wereld verschillen sterk van die in Nederland. Als gevolg daarvan variëren ook de waterbeheersingsproblemen. Figuur 1.9 toont, sterk geschematiseerd, de globale verspreiding van klimaatgebieden. In grove lijnen kunnen de klimatologische omstandigheden buiten de gematigde klimaatzones worden onderverdeeld in (aride) gebieden en humide (natte) gebieden.



**Figuur 1.23: Globale verspreiding van klimaten**

Een groot deel van de dicht bevolkte gebieden op de wereld zijn te vinden tussen of rond de keerkringen. De potentiële lengte van het groeiseizoen is groter dan in gematigde streken: door de sterke zonnestraling de fotosynthetische capaciteit vaak hoog. Tussen de keerkringen wordt het groeiseizoen beperkt door de seizoenmatige regenval, als gevolg van de seizoenmatige verplaatsing van de equatoriale lage drukzone. Rond de keerkringen liggen de subtropische lage-regenval gebieden, waar sterke hogedrukzones het binnendringen van vochtige lucht bemoeilijken. Door irrigatie in droge gebieden of perioden, en afwatering in natte gebieden of perioden kan het groeiseizoen sterk worden verlengd.

Aride gebieden zijn de gebieden waar watergebrek de overheersende beperkende factor is voor landgebruik. Er heerst doorgaans een lange, droge tijd. De waterbehoefte van gewassen is hoog door de hoge verdamping (5-8 mm/dag tegen zo'n 3-4 mm/dag in Nederland gedurende de zomer). Deze omstandigheden komen in de eerste plaats voor in de typische aride klimaten, te weten het woestijn en het steppeklimaat, maar gelden in wat mindere mate ook voor de mediterrane en de (drogere) savanne klimaatgebieden (semi-aride klimaten).

In humide omstandigheden overheersen de wateroverlast problemen, veroorzaakt door hoge regenval gedurende een groot deel van het jaar. Hieronder vallen het tropisch oerwoud klimaatgebied (humide klimaat) en (in iets mindere mate) het moesson klimaatgebied (semi-humide).

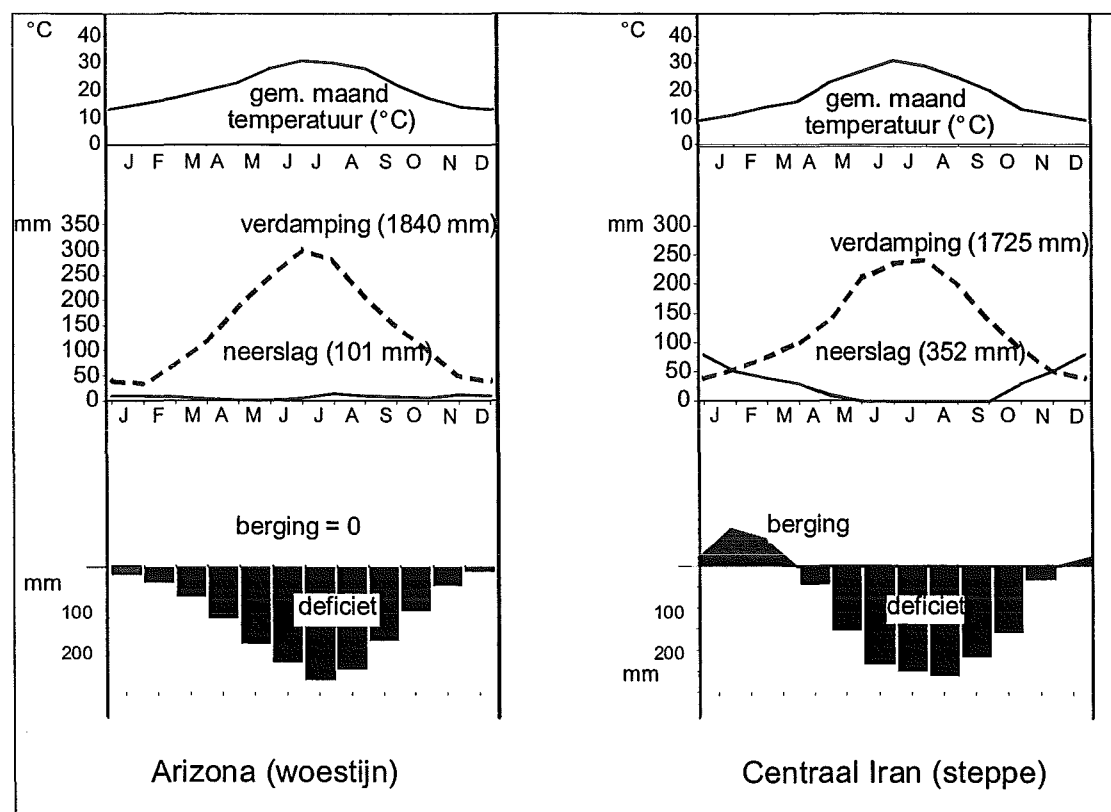
De optredende landgebruiksproblemen zijn echter ook van toepassing op de (nattere) savanne gebieden.

Wat betreft de stedelijke gebieden geeft de stedelijke afwatering ten gevolge van de hoge neerslagintensiteit vaak veel grotere problemen dan in Nederland voorkomt, wel tijdelijke inundaties van stadswijken als gevolg.

### 1.5.2 Aride omstandigheden

In de aride en semi-aride klimaatzone valt te weinig regen en/of is de regenperiode van te korte duur voor goede plantengroei. Aride klimaten zijn: het woestijnklimaat, steppeklimaat, mediterraan klimaat, savanneklimaat. Een algemeen geldende ondergrens voor de regenval nodig voor het telen van een gewas is niet te geven. Het is voornamelijk afhankelijk van het verdampingsniveau en de regenverdeling. Tussen de keerkringen zal een 3 maands gewas toch gauw zo'n 300-400 mm water nodig hebben om tot goede productie te kunnen komen. Bij een goede regenverdeling (geringe verliezen) zou dan zo'n 400-500 mm seizoenregenval voldoende zijn, bij winterregenval lager. Slechte verdeling en onbetrouwbaarheid van de regen belemmeren vaak het effectief gebruik, de effectiviteit is te verhogen door soil and water conservation maatregelen.

Het woestijnklimaat is het meest extreme aride klimaat. Alleen zeer aangepaste plantensoorten kunnen hier overleven. In de steppen valt meer regen, wel tot zo'n 400-500 mm per jaar. Waar de steppen tussen de keerkringen liggen valt de regen typisch in de zomer, buiten de keerkringen valt de regen in de steppegebieden veelal in de winter. Door de lagere verdamping in de winter is de winterregen effectiever voor de plantengroei dan de zomerregen. De zomer valt wanneer de zon een gebied passeert, dus op het Noordelijk halfrond van mei tot september en op het Zuidelijk halfrond van november tot maart.



Figuur 1.24: Klimatogrammen aride klimaten

Het mediterrane klimaat heeft dezelfde regenval karakteristiek als het steppeklimaat buiten de keerkringen (winterregenval met genoemde agrohydrologische voordelen). De zomers zijn warm, maar het klimaat in zijn geheel is gematigder dan het steppeklimaat door invloed van nabije zeeën.

Het savanneklimaat heeft doorgaans meer regen, een langere regenperiode en een gelijkmatigere temperatuur. De savannegebieden liggen ter weerszijden van de evenaar in de strook waar twee regenseizoenen voorkomen. Er kan zich een behoorlijke vegetatie ontwikkelen. Het probleem voor de landbouw is echter dat hoewel de jaarregenval vrij hoog is, de seizoenregenval marginaal en nauwelijks voldoende voor een gewas is.

### **Landgebruik**

In de droge steppeklimateen waar regenafhankelijke landbouw niet mogelijk is, wordt traditioneel veel nomadisme bedreven. De schrale natuurlijke vegetatie kan maar een zeer lage beweidingsintensiteit verdragen (één stuk vee per 10-50 ha). Door zijn grote mobiliteit, waarbij de jaarlijkse trek de trek van de regen volgt, is nomadisme een aangepaste vorm van landgebruik onder deze omstandigheden. Zodra echter de landdruk toeneemt dreigt door overbeweiding het labiele evenwicht tussen natuurlijke regeneratie en afgrazing en wordt de vegetatie door dier en mens vernietigd, resulterend in degeneratie van het land; erosie, ontbossing, en woestijnvorming. Deze evenwichtsverstoring is op vele plaatsen reeds opgetreden. Zolang er voor de lokale bevolking geen alternatieve bestaan c.q. inkomensvormingsmogelijkheden zijn, lijkt het probleem vrijwel onoplosbaar.

Bij ranching is het beweidingsgebied toegedeeld en wordt het actief beheerd door een nauwgezette beheersing van de beweidingsintensiteit. Ranching kon zich vooral ontwikkelen in "lege" gebieden zoals die voorkwamen in het zuidwesten van de USA, Noord-Oost-Brazilië en Australië. In de ontwikkelingsgebieden overheerst het nomadisme. Plaatselijk is ranching ingevoerd tijdens de koloniale bewinden, enerzijds door toewijzing van land voor dit doel aan settlers, anderzijds door reglementering / zonerings van het nomadisme. Deze meer gestructureerde vorm van beweiding van steppen biedt betere garanties tegen overbeweiding en landdegeneratie.

Regenafhankelijke (rainfed) verbouw van gewassen onder marginale regenval omstandigheden wordt veelal aangeduid als "dry farming". Het is toepasbaar in de nattere steppegebieden (incl. de mediterrane klimaat gebieden) en de drogere savannegebieden. Totaal beslaat het dry farming/ marginale regenvalgebied een zeer groot deel van de ontwikkelingslanden.

### **Soil and water conservation**

In aride streken bestaat er een grote mate van samenhang bestaat tussen het beheer van grond (soil conservation) en waterbeheer (water conservation). Centraal staat in beide gevallen de beheersing van run-off water.

Soil conservation richt zich op de voorkoming en bestrijding van erosie. Erosie is het proces van het losslaan van gronddeeltjes door de "impact" van de regendruppels (splash), en de meevoering met het aflopende regenwater (run-off). Het eroderend vermogen van oppervlakkig aflopend water is maar gering, uitgezonderd waar concentratie van afvoer optreedt zoals in geulen. In het laatste geval kan de stroomsnelheid groot genoeg worden om uitschurend te gaan werken. Erosie komt in Nederland met name voor op de löss gronden in Limburg met name daar waar grasland is vervangen door maïsakkers.

Water conservation richt zich op de opslag en benutting van schaars regenwater. De diverse water conservation maatregelen kunnen er op zijn gericht:

- a. zoveel mogelijk regen in de grond te doen infiltreren
- b. de geïnfiltreerde regen tegen verdampingsverliezen te beschermen
- c. de regenwater te concentreren

Water conservation maatregelen voor de infiltratie van water in de bodem omvatten de handhaving van een goede structuur van de grond, veelvuldig openbreken van dichtgeslagen bovengrond en contour bunding. Verdamping van natte, kale grond is een vanzelf eindigend proces: er vormt zich nl. een droge toplaag, welke de ondergrond grotendeels tegen verdere verdampingsverliezen beschermt. Waar regenval schaars is kan regen van een groter gebied op een kleiner gebied geconcentreerd worden (water gathering of water harvesting).

Het ontwerp van waterbeheersystemen in het kader van soil and water conservation berust bijna geheel op ervaringen opgedaan via proefneming of in de praktijk. Dit geldt b.v. voor de afstanden tussen interceptors, breedte en type terrassen etc. Ontwerpnormen worden afgeleid door een zorgvuldige vergelijking van de onderhavige omstandigheden met die waarvoor ervaringsnormen bekend zijn (vergelijking regenintensiteiten, helling, grondsoort, bedrijfsvoering, etc.).

### **Irrigatie en drainage**

Irrigatie- en drainagesystemen kunnen de landbouwproductie in aride en semi-aride gebieden mogelijk maken of de opbrengst verveelvoudigen. Economische ontwikkeling in deze gebieden is welhaast synoniem met de ontwikkeling van geïrrigeerde landbouw. Grote arealen geïrrigeerde landbouw in aride/semi-aride gebieden beslaan in totaal zo'n 100 miljoen ha en worden aangetroffen in de droge delen van India, Pakistan, Midden-Oosten, Noord-Afrika, het westen van de USA, Midden-Amerika, Chili, Peru, Australië, Zuid-Europa. In de laatste decennia is de irrigatie ook in de gematigde zones sterk opgekomen, om de opbrengst, teruggang of kwaliteitsverlies van het landbouwgewas ten gevolge van periodes van droogte te voorkomen. Veel ontwikkelingsfondsen (Wereldbank, UNDP, Europese ontwikkelingsbank, bilateraal etc.) zijn gericht op een verdere uitbreiding van het areaal of verbetering van de irrigatietechnieken.

In veel van genoemde landen wordt irrigatie reeds eeuwenlang bedreven en hebben zich sterke tradities en gebruiken ontwikkeld met betrekking tot waterrechten en distributie (te vergelijken met onze waterschapstradities). Irrigatie is voor veel landen in aride gebieden een noodzakelijkheid om in de eigen vraag naar voedsel te kunnen voorzien. In de semi-aride gebieden is de situatie vaak wat gunstiger, vooral waar overtollig water uit de regentijd kan worden vastgehouden in reservoirs, of waar de geohydrologische situatie gunstig is voor grondwater ontwikkeling. Veel grootscheepse irrigatie ontwikkeling in aride/semi-aride gebieden is gebonden aan rivieren die hun oorsprong in een regenrijker gebied hebben. Voorbeelden hiervan zijn de Nijl en de rivieren uit het Andes gebergte en de Himalaya en de Rocky Mountains.

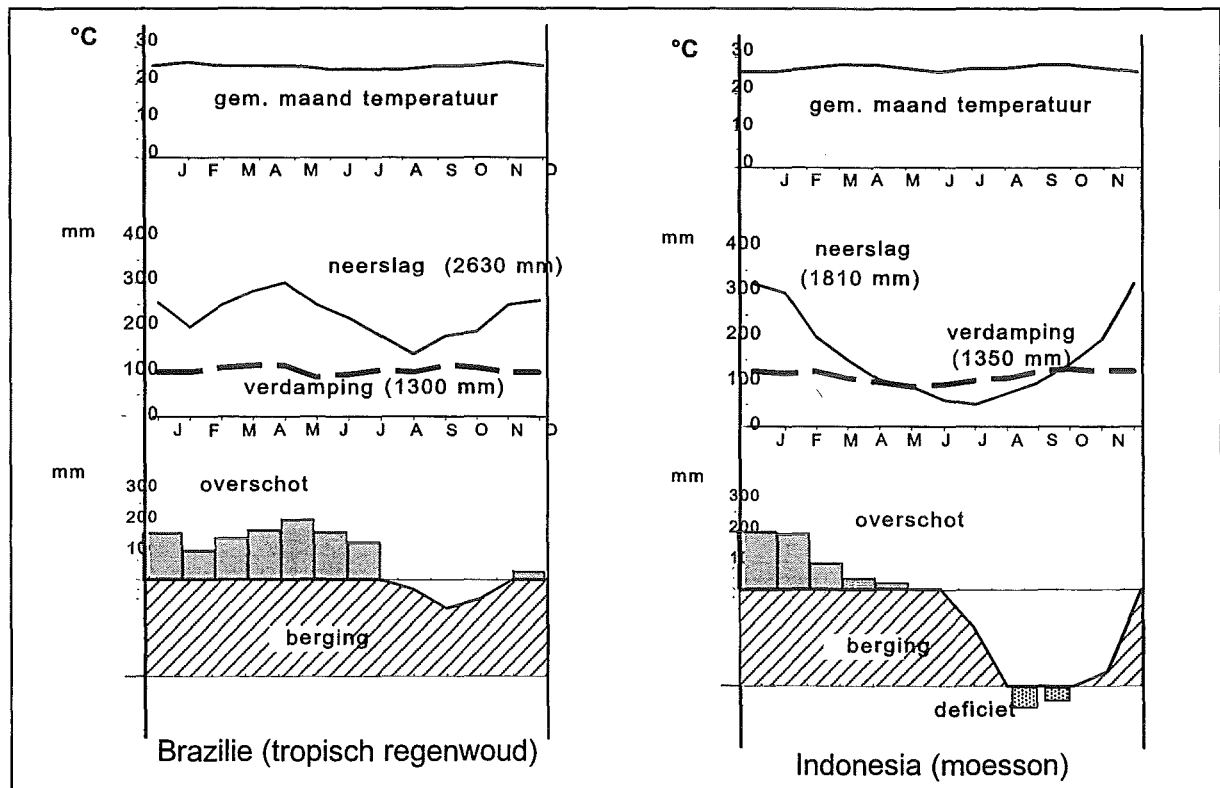
Naast erosie is ook verzouting van de grond een probleem van de aride/semi-aride gebieden, en wel speciaal waar irrigatie wordt toegepast zonder de daarbij behorende drainage. Het principe van verzouting van de grond is eenvoudig. Alle grond en oppervlaktewater bevat zouten. Waar dit water in de grond verdampt zullen de zouten achterblijven. Na verloop van tijd zal de grond dusdanig zijn verzout dat planten er niet meer (goed) kunnen groeien. De sterke verdamping en de geringe uitspoeling (weinig overtollig regenwater) verklaren het verzoutingsgevaar van de aride/semi-aride gebieden. Drainage omstandigheden spelen echter ook vaak een rol (stagnerende diepe percolatie, hoge grondwaterstanden). Een drainagesysteem dat overtollig water (met daarin opgelost de schadelijke zouten) afvoert is daarom een vereiste.

#### **1.5.3 Humide omstandigheden**

Tot de humide gebieden worden specifiek gerekend de tropisch oerwoud gebieden en de moesson gebieden. Veel van de hierna te bespreken landgebruiksmogelijkheden en -problemen slaan ook op de natte perioden van de natte savanne gebieden.

Het tropisch oerwoud komt voor rond de evenaar. Hier overheerst het equatoriale lage drukgebied met stijgende luchtstromen, welke veel regen veroorzaken. Het klimaat is het gehele jaar door warm en vochtig (regenval zo'n 2000-3500 mm per jaar; gemiddelde jaartemperatuur 26°-28°C).

De moessongebieden worden eveneens dicht bij de evenaar aangetroffen, ongeveer waar normaliter de savannegebieden voorkomen. Door een bijzondere geografische situatie ontstaan in de moessongebieden de passaat-winden, uitzonderlijk regenrijke winden die uit zee komen. Deze variant op het savanneklimaat is vooral goed ontwikkeld in Z.O.-Azië 2+en ook wel in Centraal-Amerika.



Figuur 1.25 Klimatogrammen humide klimaten

### Tropisch oerwoud

De klimaatomstandigheden welke enerzijds het tropisch oerbos zijn bestaansmogelijkheid geven, hebben anderzijds relatief "arme" gronden doen ontstaan. Dit laatste houdt verband met de snelle verwerking en de sterke uitspoeling van de gronden onder genoemde klimaatomstandigheden. Verder heeft ook de rijke bosvegetatie, waar in de biomassa een grote hoeveelheid minerale voedingsstoffen ligt opgeslagen, bijgedragen tot de bodemverarming. Deze vegetatie heeft zich veelal ontwikkeld parallel met de bodemontwikkeling. Thans houdt het zich qua minerale voeding in stand op de dunne, vruchtbare bovenlaag welke voortdurend wordt verrijkt met strooisel uit de vegetatie (de vegetatie en de strooisellaag vormen een gesloten mineralenkringloop. Waar verder qua klimaat (warm en vochtig) de groeiomstandigheden optimaal zijn, kan zich aldus een rijke vegetatie op deze arme bodem handhaven. Dit geldt echter slechts voor het speciale ecosysteem van het tropisch oerwoud. Bij ontwikkeling van deze gronden voor landbouw zal de kringloop snel worden verstoord, en treedt de minerale armoede van de gronden aan het licht. Daarbij wordt de grond ook blootgesteld aan de vaak hevige regens wat tot erosie kan leiden.

Toch is reeds zeer veel tropisch oerbos ontgonnen en deze ontginning zet zich in hoog tempo voort, veelal aangewakkerd door bevolkingsdruk. De gevolgen van het geleidelijk verdwijnen van het tropisch oerbos zijn in zijn totaliteit moeilijk te overzien, maar heeft zeker een groot aantal, ernstig negatieve aspecten, zoals erosie en overstromingen!



**Landbouw in humide gebieden**

De regenval in humide gebieden dekt gedurende een groot deel van het jaar ruim de waterbehoefte van een gewas. In de semi-humide gebieden treedt wel een droge periode op maar uitgesproken droog is deze periode niet en bij een redelijke waterberging in de grond treden slechts geringe deficieten op gedurende slechts een korte periode. De condities voor plantengroei zijn gunstig door de aanwezigheid van water, de gunstige temperatuur en zonnestraling (enigszins beperkt door de veelvuldige bewolking). Grote regenoverschotten kunnen echter wateroverlast veroorzaken: water op het maaiveld, verzadigde wortelzone en hoge grondwaterstanden. Normale landbouwgewassen zijn hiervoor gevoelig: bij langdurige ernstige wateroverlast zal het gewas afsterven. Door ontwatering (drainage) kan men proberen de mate en duur van wateroverlast te beperken.

**Slecht gedraineerde gronden**

De slecht gedraineerde gronden kunnen in een warm klimaat goed voor de rijstbouw worden gebruikt. Rijst heeft de onder de landbouwgewassen unieke eigenschap goed te groeien in een met water verzadigd wortelmilieu en daarbij zeer hoge opbrengsten te geven. De grote rijstgebieden van de wereld worden aangetroffen in de laagvlakten van de moessongebieden. Verder komt rijst voor op de slecht gedraineerde gronden in hoger gelegen gebieden (zware kleien, ingesloten laagten). Met irrigatie kan rijst ook buiten deze gebieden worden verbouwd, terwijl met aanvullende irrigatie in de droge tijd in de eerst genoemde gebieden het gehele jaar door rijst kan worden verbouwd en er zo 2 of 3 maal per jaar geoogst kan worden.

## **Hoofdstuk 2      Water in de grond**

### *Leerdoelen*

Na bestudering van het hoofdstuk moet u inzicht hebben in het gedrag van water in de grond, met name in de onverzadigde zone, de dynamische reservoirwerking van de grond te begrijpen en er aan te kunnen rekenen.



## 2 WATER IN DE GROND

### 2.1 Inleiding

Voor de menselijk samenleving is water in de grond van levensbelang om dat alle plantengroei en veel dierlijk leven hiervan afhankelijk is. Kennis over het gedrag en de beschikbaarheid van water in de grond is derhalve een essentieel belang voor de civiel ingenieur. De in dit hoofdstuk behandelde stof bouwt voort op een eerste behandeling van dit onderwerp in de colleges Hydrologie en Grondmechanica.

### 2.2 Grond

De woorden "bodem" of "grond" worden vaak als synoniemen van elkaar gebruikt. Toch is er verschil. Het woord "bodem" slaat op de opbouw en eigenschappen in verticale zin. Het woord "grond" duidt enerzijds op het materiaal zelf (grondsoort) anderzijds op het voorkomen van eigenschappen in horizontale zin (kleigrond, grondgebied).

Grond is een poreus medium dat uit drie componenten bestaat: vaste delen, water en lucht. Soms ontbreekt een component, zoals in volledig met water verzadigde grond (onder de grondwaterspiegel) of in volledig droge grond (woestijnen). Grond kan worden onderverdeeld in vaste delen en open ruimtes (poriën). Een belangrijke fysische parameter van grond is de massadichtheid (Engels: density), die is gegeven in vergelijking 2.1. Het soortelijk gewicht (Engels: specific weight) is gegeven in vergelijking 2.2.

$$\rho = \frac{M_v}{V_v} \quad (2.1)$$

waarin:  $\rho$  = soortelijke massa [kg/m<sup>3</sup>];  
 $M_v$  = massa van bij 105°C gedroogde grond [kg];  
 $V_v$  = volume vaste delen [m<sup>3</sup>].

$$\gamma = \rho * g \quad (2.2)$$

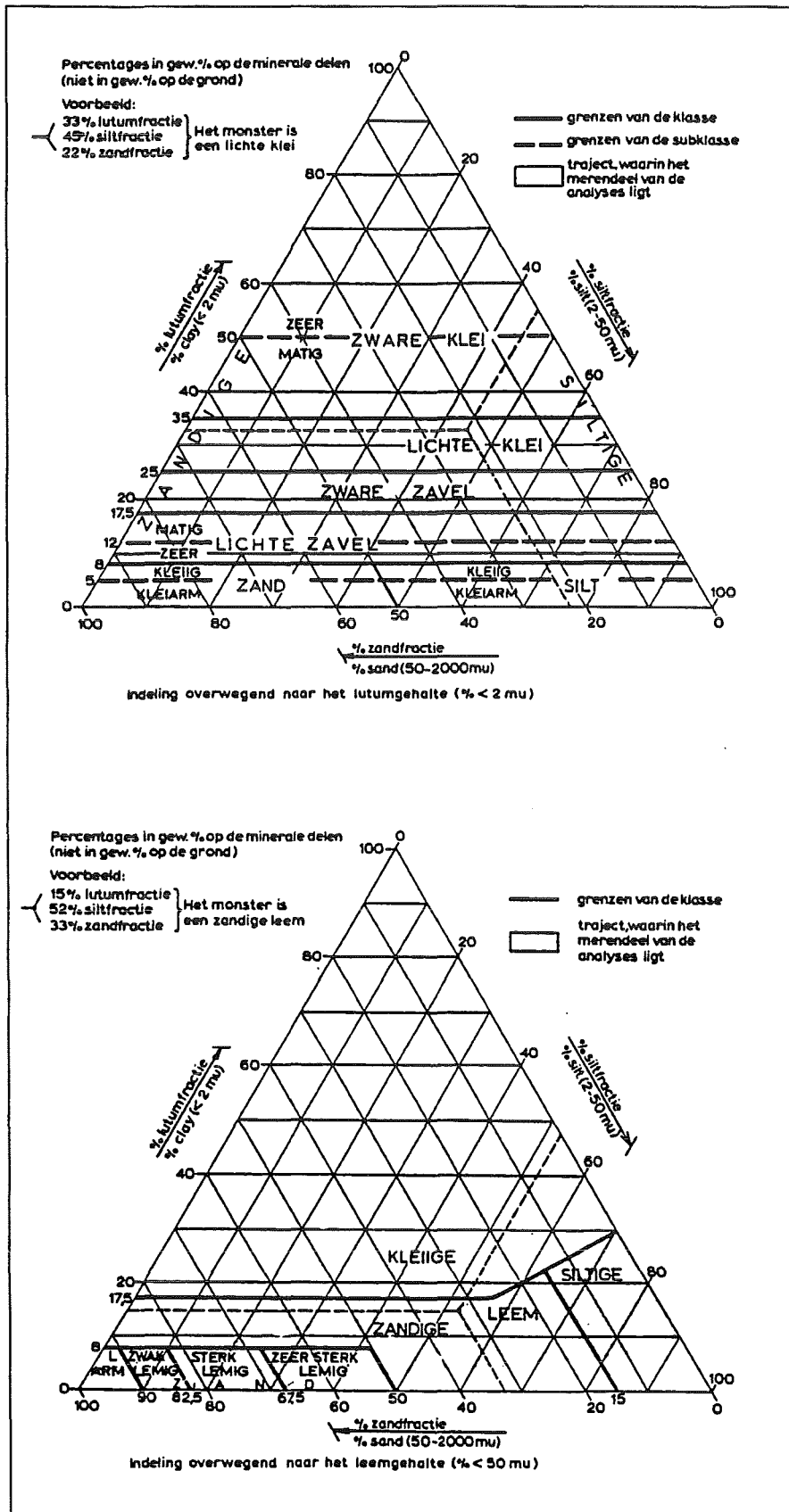
waarin:  $\gamma$  = soortelijk gewicht [kN/m<sup>3</sup>];  
 $g$  = zwaartekrachtversnelling [9,81 m/s<sup>2</sup>].

#### 2.2.1 Vaste delen

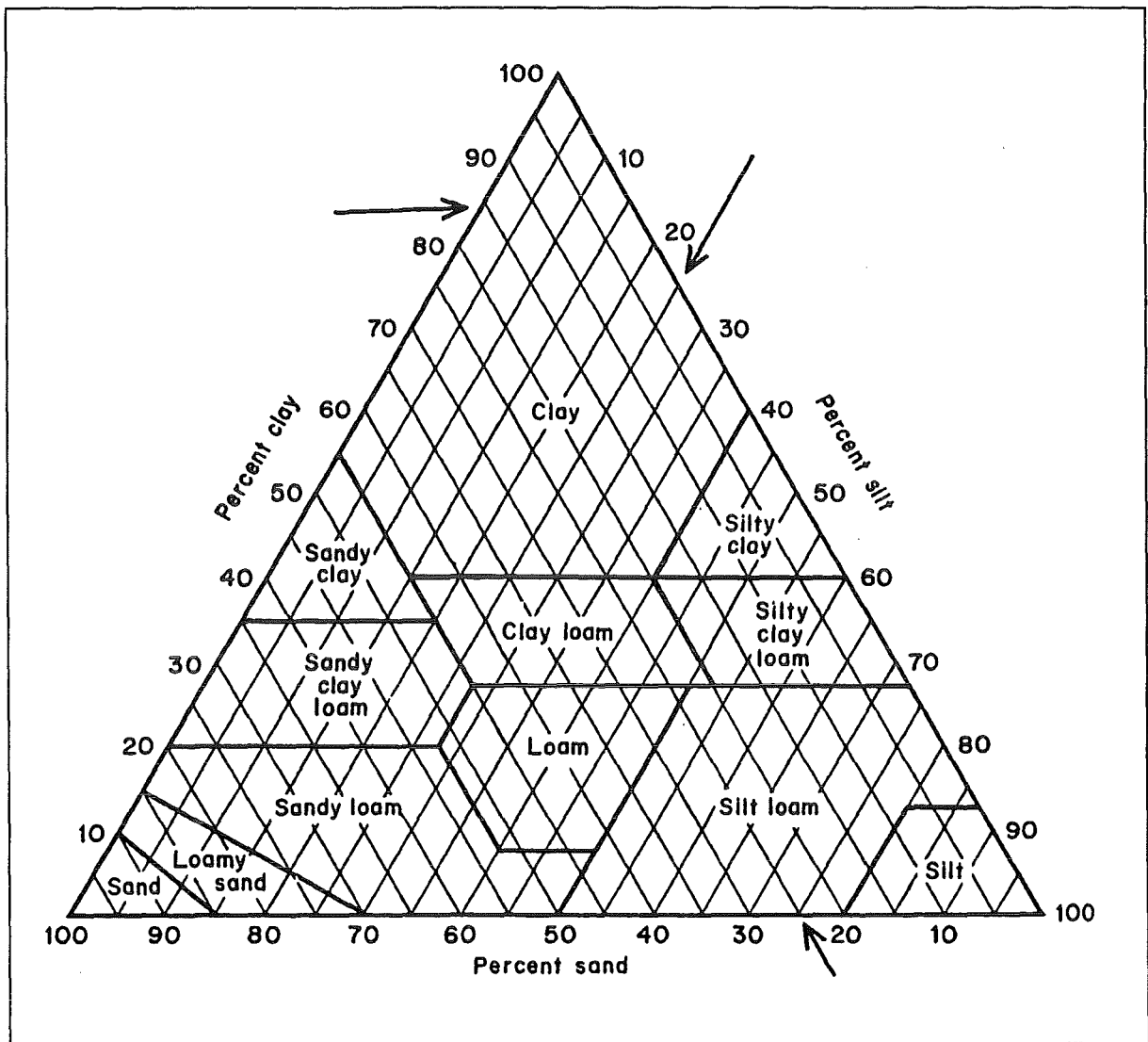
De meeste grondsoorten bestaan voor 40-60% uit vaste stof. Er is daarbij onderscheid te maken tussen mineralen en organische bestanddelen. In de poriën bevindt zich water en lucht, het gedrag hiervan zal verderop worden behandeld.

De minerale bestanddelen van de grond bestaan uit korrels (deeltjes) van diverse grootte, aard en eigenschappen. Ze zijn ontstaan door fysische, chemische en biologische verwerking van vast gesteente. Karakterisering kan o.a. plaatsvinden door middel van een verdeling naar korrelgrootte (tabel 2.1) of met behulp van driehoeksgrafieken (figuur 2.1 en figuur 2.2). Bepaling van de korrelgrootteverdeling kan geschieden door middel van zeefanalyse of een slibanalyse.

Organische stof is alle levend en dood materiaal in de grond van organische herkomst. Het is van overwegend plantaardige oorsprong. Er vindt een voortdurend omzettingsproces plaats van plantenresten naar humus. De organische stoffen in de bodem, beïnvloeden de wortelgroei en opname voedingsstoffen, en verbeteren de structuur van de grond karakterisering kan plaatsvinden volgens figuur 2.3. Het organische stofgehalte in gronden kan variëren van enkele tienden procenten (humusarm stuifzand) tot 90 à 95% (veenmosveen, turfstrooisel). De spreiding van organische stof in de bovengrond van kultuurgronden is veel kleiner (tabel 2.2).



Figuur 2.1: Driehoeksgrafieken voor minerale grondsoorten (Nederland)



Figuur 2.2: Driehoeksgrafiek voor minerale grondsoorten (Internationaal)



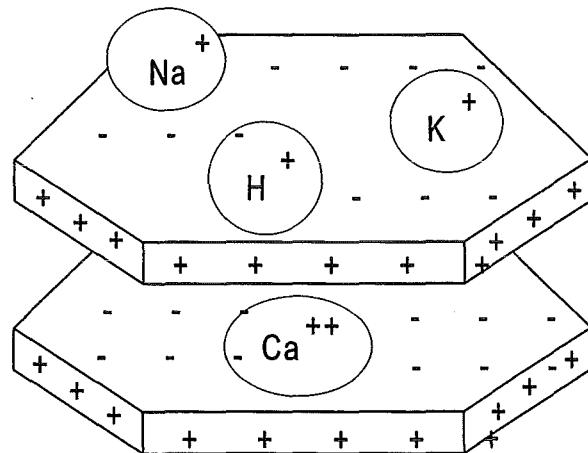
**Tabel 2.1: Benaming van korrelgrootteklassen volgens de Stichting voor Bodemkartering (Stiboka) en internationaal**

Korrelgrootteklasse Stiboka	Diameter [ $\mu\text{m}$ ]	Internationale klasse
Lutum	< 2	clay
Silt	2 - 50	silt (including fine silt)
Leem	< 50	
Uiterst fijn zand	50 - 105	
Zeer fijn zand	105 - 150	
Matig fijn zand	150 - 210	
Matig grof zand	210 - 420	coarse sand
Zeer grof zand	420 - 2000	
Grind	> 2000	gravel

**Tabel 2.2: Gehalte aan humus in de bovengrond van enkele Nederlandse cultuurgronden**

Zavel en löss	1,5 – 3%
Klei	2,5 – 4,5%
Dalgrond	7 – 25%
Esgronden in noord en midden Nederland	5 – 10%
Esgronden in het zuiden van Nederland	< 5%

Enkele bodemeigenschappen worden bepaald door de binding van water en ionen (adsorptie). Dit is een oppervlakteverschijnsel (figuur 2.4). Lutum en humus zijn kleine deeltjes die door hun grote oppervlakte een hoge absorptiecapaciteit hebben. Lutumdeeltjes zijn plaatvormig, en hebben daarom een relatief groot oppervlak. De adsorptiecapaciteit van de lutumfractie is  $10^2$  -  $10^5$  maal zo groot als die van de zand- of siltfractie. De adsorptiecapaciteit van humus is nog eens 3 à 4 maal zo groot als bij de lutumfractie. Bodemeigenschappen die afhankelijk zijn van het lutum- en humusgehalte van de bodem zijn:



**Figuur 2.4: Adsorptie van lutumdeeltjes**

- Zwel- en krimpvermogen van de grond;
- Klink;
- Bewerkbaarheid;
- Doorlatendheid;
- Hoeveelheid voedingsstoffen (ionen).



### 2.2.2 Poriën

Poriën kunnen worden beschreven als een stelsel van open ruimten die met elkaar in verbinding staan. De vorm, afmeting en rangschikking van de poriën is nauw verbonden met de stapeling van de vaste delen (structuur). Iedere grondsoort kan worden beschreven door z'n eigen, karakteristieke poriën, waarbij onderscheiden kunnen worden:

- vorm
- afmeting
- rangschikking

De poriënfractione (Eng: porosity) van een grondsoort is het percentage dat de poriën innemen van het totale volume. Deze poriënfractione ( $p$ ) kan op eenvoudige wijze fysisch worden bepaald, maar zegt niets over de vorm en de rangschikking van de poriën. De poriënfractione varieert gemiddeld tussen 40 en 60%. Bij klei is de poriënfractione meestal groter dan bij zand. Bij veengronden is de poriënfractione tussen de 80 en 90%.

$$p = \frac{V_p}{V_t} = \frac{V_t - V_v}{V_t} \quad (2.3)$$

waarin:  $p$  = poriënfractione [-];  
 $V_p$  = volume aan poriën [ $m^3$ ];  
 $V_t$  = totale volume grondmonster veldvochtige grond [ $m^3$ ];  
 $V_v$  = volume aan vaste delen [ $m^3$ ].

Door de morfologische karakterisering van grond kan men inzicht krijgen in de vorm en de rangschikking van de poriën. Morfologische analyse vindt plaats met behulp van moderne elektro-optische apparatuur waarmee dunne plakjes grond kunnen worden bekeken.

Poriën van verschillende vorm en grootte hebben verschillende functies met betrekking tot de lucht- en waterhuishouding van de grond. De volgende indeling kan worden gemaakt:

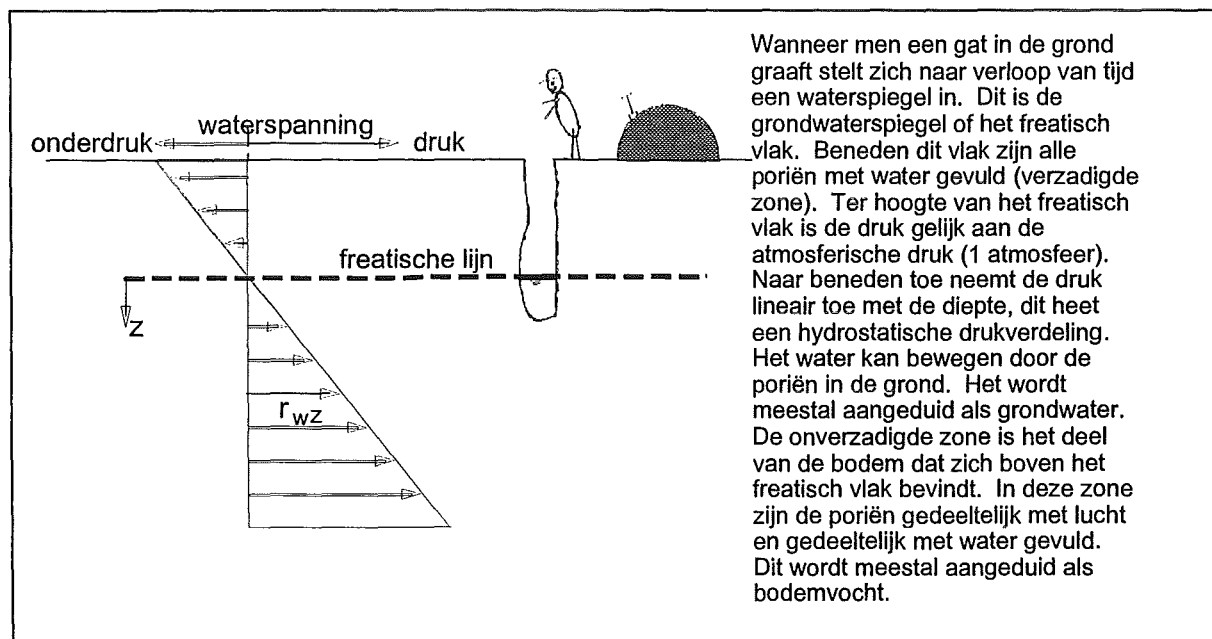
- microporiën (< 30  $\mu m$ )
- mesoporiën (30 - 100  $\mu m$ )
- macroporiën (> 100  $\mu m$ )

De microporiën kunnen het water tegen de werking van de zwaartekracht in vasthouden en dienen zo als waterreservoir voor de plant (capillaire opstijging). De mesoporiën zijn van belang voor de intensieve luchtverversing en voor de aanvulling van water in de microporiën. De macroporiën zijn belangrijk voor het transport van lucht en water in de grond. De beste gronden voor de plant beschikken in voldoende mate over alle 3 typen poriën. Bij gronden met bijna alleen microporiën zal snel wateroverlast optreden. Gronden met weinig microporiën en veel macroporiën zullen een hoge doorluchting en een laag vochthoudend vermogen hebben.

## 2.3 Water in de onverzadigde zone

### 2.3.1 Inleiding

In de civiele techniek wordt vaak alleen onderscheid gemaakt tussen droge grond en natte (verzadigde) grond. Dit onderscheid is nodig voor het bepalen van krachten in de grond. In natte grond kunnen twee zones worden onderscheiden: de verzadigde zone en de onverzadigde zone. De grens tussen deze twee zones wordt gevormd door het freatisch vlak. Voor de meeste grondmechanische en waterbouwkundige problemen kan het water in de onverzadigde capillaire zone worden verwaarloosd. Voor de waterbeheersing is vaak ook de onverzadigde zone van belang. Planten in de natuur en landbouwgewassen halen met hun wortels water uit de onverzadigde zone (met uitzondering van moeras- en waterplanten die een aparte wortel zuurstofvoorziening hebben om ook in verzadigde grond of onder water te kunnen functioneren). Bij het vak grondmechanica worden de eigenschappen van droge en van verzadigde grond behandeld, in dit hoofdstuk wordt met name gesproken over de onverzadigde zone.



**Figuur 2.5: Waterdrukverdeling in de bodem zonder verticale stroming (evenwichtstoestand), bij ondiepe grondwaterstand, capillaire opstijging tot het maaiveld.**

### 2.3.2 Krachten in de onverzadigde zone

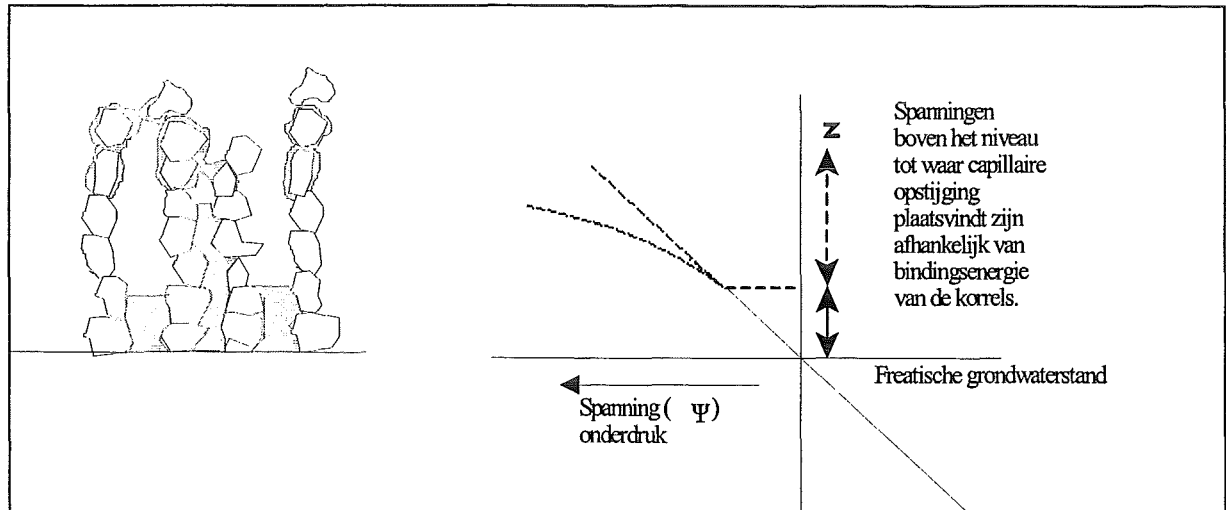
Het water in de onverzadigde zone wordt tegen de werking van de zwaartekracht in vastgehouden. De volgende krachten zijn hierbij van belang:

#### 1. Adhesiekrachten

Deze bindingskrachten spelen zich af op het grensvlak van de vaste deeltjes en het water. Hoewel de binding erg sterk is ( $> 100$  atm), werkt deze over zeer korte afstand (enkele moleculen), zodat de hoeveelheid vocht welke op deze wijze gebonden wordt erg gering is en van weinig belang voor de plant.

#### 2. Osmotische krachten

Door de negatieve lading van bodemdeeltjes is de concentratie van positieve ionen nabij het oppervlak van de deeltjes groter dan elders. Hierdoor wordt water naar de bodemdeeltjes getrokken en als een dunne waterfilm aan de deeltjes gebonden. Vooral in gronden met een groot totaal oppervlak aan vaste deeltjes per gewichtseenheid (b.v. klei) kan de op deze wijze gebonden hoeveelheid water groot zijn. De opname van water door osmotische krachten gaat meestal gepaard met zwel van de grond (zie ook blz 2.2, absorptie).



**Figuur 2.6: Waterspanningsverdeling in de onverzadigde zone, bij diepere grondwaterstand**

### 3. Capillaire krachten

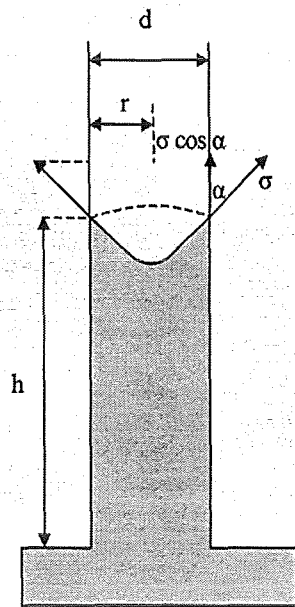
Capillaire krachten ontstaan als resultante van de aantrekkingskrachten tussen de watermoleculen onderling (cohesie) en de aantrekkingskrachten die gronddeeltjes en watermoleculen op elkaar uitoefenen (adhesie). Op het grensvlak water-lucht vormt zich een holle meniscus waarin een zekere onderdruk heerst. Het water stijgt zo hoog tot het gewicht van de omhoog getrokken waterkolom in evenwicht is met de capillaire krachten (Figuur 2.7).

**Tabel 2.3: Relatie poriediameter, stijghoogte en vochtspanning. (zie ook figuur 2.7)**

Equivalente diameter Van de porie in $\mu\text{m}$	Stijghoogte in cm	Vochtspanning in cm $\text{H}_2\text{O}$	Atm.
3000 (3 mm)	1	1	0,001
30	100	100	0,1
3	1000	1000	1

N.B. let op de gebruikte dimensies!

De capillaire krachten waarmee water aan de grond wordt gebonden strekken zich uit over het spanningstraject van 0 tot maximaal ongeveer 1 atmosfeer.



Een poriënsysteem in de grond is te vergelijken met een stelsel van buisjes van verschillende diameters. Plaast men een nauw buisje (capillair) in water dan stijgt het water hierin op. In de poriën stijgt het water op, doordat de adhesie tussen wand- en watermoleculen groter is dan de cohesie tussen de watermoleculen onderling.

Hoe hoog stijgt het water? Dat is afhankelijk van de diameter van de buis: hoe nauwer de poriën, hoe hoger de opstijging en hoe groter de capillaire kracht waarmee het water wordt vastgehouden. Water in een nauwe buis stijgt op totdat de naar boven gerichte kracht die veroorzaakt wordt door de verticale component van de oppervlaktespanning gelijk is aan de naar beneden gerichte kracht veroorzaakt door het gewicht van de waterkolom

Dus:

$$\sigma \cdot \cos \alpha \cdot 2 \cdot \pi \cdot r = \pi \cdot r^2 \cdot h \cdot \rho_w \cdot g$$

Door invoeren van:

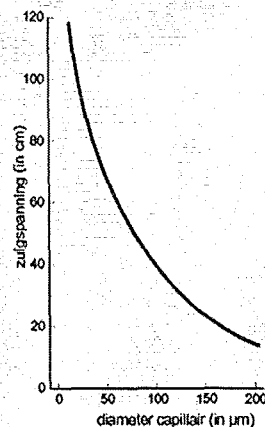
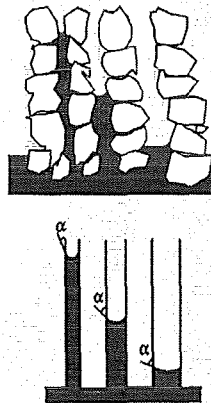
$h_{\max}$  bij  $\alpha=0$  dus  $\cos \alpha = 1$   
 $\rho_w = 1000 \text{ [kg/m}^3\text{]}$   
 $\sigma_{w,20^\circ\text{C}} = 72,75 \cdot 10^{-3} \text{ [N/m]}$  of  $\text{[kg/s}^2\text{]}$

Kan dit worden vereenvoudigd tot:

$$h = \frac{15}{r} \cdot 10^{-6}$$

Waarin:

- $\sigma$  = oppervlaktespanning [N/m];
- $\alpha$  = hoek tussen water en wand [-];
- $r$  = straal capillair [m];
- $g$  = zwaartekrachtversnelling [ $\text{m/s}^2$ ];
- $\rho_w$  = dichtheid van het water [ $\text{kg/m}^3$ ];
- $h$  = stijghoogte [m].



Figuur 2.7: Capillaire opstijging

### 2.3.3 Vochtgehalte, vochtspanning en pF-curve in de onverzadigde zone

Om inzicht te krijgen in de beschikbaarheid van water voor planten in de onverzadigde zone zijn twee begrippen van belang:

- de hoeveelheid vocht (weergegeven door het vochtgehalte  $\theta$  [volume %]) en
- de bindingsenergie van het vocht (weergegeven door de vochtspanning  $\psi$  [cm]).

Het vochtgehalte van grond (Engels: soil moisture content) is de verhouding tussen het volume van het water in de grond en het totale volume van de grond (vergelijking 2.4).

Vochtgehalte op zich zegt niet zoveel. Zand met 20 vol. % vocht is “nat”. Dezelfde hoeveelheid water in veen is nog zo sterk gebonden aan de humus dat het veen “droog” lijkt. De plant kan met geringe moeite het meeste water aan het zand onttrekken. Bij het veen kan het echter zo zijn dat het water zo sterk gebonden is dat de zuigkracht van de wortels (16 atm) niet toereikend is om ook maar iets van het water te kunnen onttrekken.

Om iets aan de weet te komen over de hoeveelheid water die met een bepaalde kracht (zuigspanning) is gebonden aan de grond, worden er in de praktijk allerlei proeven gedaan met verschillende typen gronden. In principe komt het er op neer dat een met water verzadigd monster aan een zuigspanning wordt onderworpen. Hierbij zal alle vocht, dat met een kleinere spanning aan de grond is gebonden, worden onttrokken. Het sterker gebonden water blijft achter.

Wanneer men vochtspanning en vochtgehalte in een grafiek uit wil zetten ontstaat er een schaalprobleem. Daarom neemt men de logaritme van de vochtspanning. De logaritme van de vochtspanning in cm's waterkolom, wordt de pF ( $p = \text{power of } 10$ ;  $F = \text{free energy}$ ) genoemd (vergelijking 2.5). Tabel 2.4 geeft de relatie tussen de vochtspanningen (of pF) enerzijds en vochtgehaltes anderzijds voor humusarm zand. Wanneer men het vochtgehalte uitzet tegen de pF, spreekt men van de pF curve.

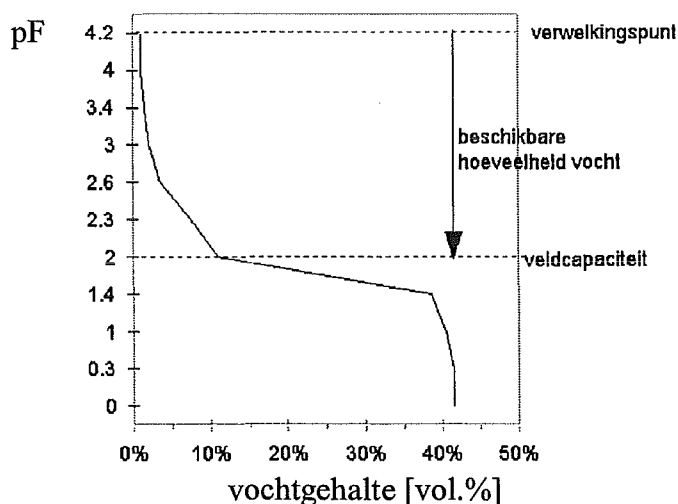
$$\theta = \frac{V_w}{V_t} * 100\% \quad (2.4)$$

$$pF = \log |\Psi| \quad (2.5)$$

waarin:  $\theta$  = vochtgehalte [vol. %];  
 $V_w$  = volume water [ $\text{m}^3$ ];  
 $V_t$  = totaal volume grondmonster [ $\text{m}^3$ ];  
 $\Psi$  = vochtspanning [cm].

**Tabel 2.4: Vochtgehalte bij verschillende vochtspanningen bij humusarm zand**

Vochtspanning ( $\Psi$ )		Vochtgehalte ( $\theta$ )	pF
cm waterkolom		vol %	
1	= $10^0$	41,5	0
2,5	= $10^{0,4}$	41,5	0,4
10	= $10^1$	40,5	1
31,6	= $10^{1,5}$	38,5	1,5
100	= $10^2$	11,0	2
200	= $10^{2,3}$	7,5	2,3
501	= $10^{2,7}$	3,5	2,7
1000	= $10^3$	2,0	3
2512	= $10^{3,4}$	1,5	3,4
10000	= $10^4$	1,0	4
15850	= $10^{4,2}$	1,0	4,2



**Figuur 2.8: pF-curve humusarm zand met enige karakteristiek punten**

## DE BESCHIKBAARHEID VAN BODEMVOCHT VOOR DE PLANT

De hoeveelheid voor de plant beschikbaar hangwater is geen statische grootheid omdat zij bepaald wordt door twee dynamische processen: aan de ene kant het wegzakken van water onder invloed van de zwaartekracht en aan de andere kant het uitdrogen van de grond door de groeiende en dus verdampende planten. Na een hevige regenbui of na irrigatie blijkt de bodem reeds na korte tijd niet meer met water verzadigd te zijn. Een gedeelte van het water is nl. zo weinig gebonden dat het naar beneden weg, stroomt uit de wortelzone. Dit is gunstig omdat de plant in een met water verzadigde grond meestal spoedig gebrek aan zuurstof heeft, waardoor de groei en dus ook de wateropname zou stagneren.

De situatie die in de bodem ontstaat na uitzakken van regenwater vormt de begrenzing van de hoeveelheid voor de plant beschikbaar hangwater aan de natte zijde. Men noemt de volumefractie vocht die bij deze situatie hoort *veldcapaciteit*. Bij het begrip veldcapaciteit moet men onderscheid maken tussen gronden met hoge grondwaterstanden enerzijds en die met zeer diepe grondwaterstanden anderzijds. In het eerste geval kan men globaal spreken van een evenwichtstoestand met het grondwater.

De volumefractie vocht correspondeert met de drukhoogte die, afgezien van het teken, ongeveer gelijk is aan de afstand tot de grondwaterspiegel. Voor Nederlandse omstandigheden wordt vaak uitgegaan van een grondwaterstand van 100 cm beneden maaiveld in het voorjaar. De minimale volumefractie vocht van de bodem correspondeert dan met ongeveer  $pF = 2,0$ . Dit is een *minimale* hoeveelheid vocht, omdat in het geval van een grondwaterstand van 100 cm alleen de bovengrond op ongeveer  $pF = 2,0$  is. Dieper bevat de grond meer vocht omdat de drukhoogte gaande naar de grondwaterspiegel toeneemt tot nul. Door van  $pF = 2,0$  uit te gaan bij deze grondwaterstand zal de veldcapaciteit meer onderschat worden naarmate de wortelzone dikker is.

Dan is  $pF = 1,7$  misschien een betere schatting. In het geval van zeer diepe grondwaterstanden zoals die zich voordoen in hangwaterprofielen, kan de hierboven omschreven evenwichtsverdeling niet meer als uitgangspunt worden genomen. In deze gevallen neemt men op grond van praktijkervaringen de volumefractie vocht die correspondeert met  $pF = 2,3$ .

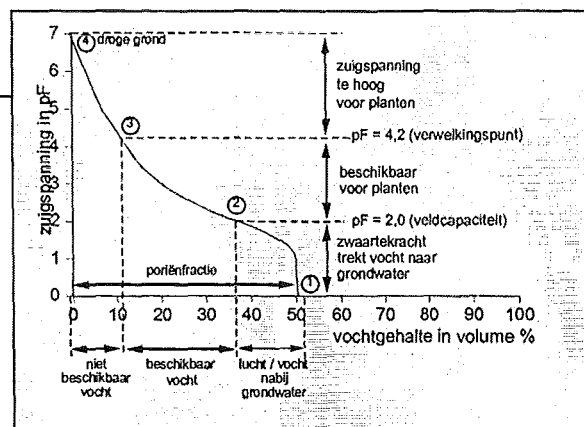
De tweede grens van het beschikbare hangwater is het *verwelkingspunt*. Verwelking zal optreden wanneer de toelevering van water aan de plant achterblijft bij de afvoer via transpiratie. Dit punt is evenmin statisch gedefinieerd, maar hangt af van de doorlaatkarakteristiek van de grond en van de potentiaalgradiënten op de grensvlakken wortelbodem en blad-atmosfeer. Alhoewel het verwelkingspunt dus niet statisch gedefinieerd is, komt men op grond van praktijkervaringen tot de conclusie dat water, gebonden met een hogere waarde dan  $pF = 4,2$  ( $h = -16000$  cm), voor de plant niet of nauwelijks meer onneembaar is. Men constateert dat boven  $pF = 4,2$  de planten permanent verwelken en men noemt de volumefractie vocht die correspondeert met  $pF = 4,2$  het verwelkingspunt van de bodem. De waarde van  $pF = 4,2$  voor het verwelkingspunt is het maximum tot waar planten water aan de bodem kunnen onttrekken. Deze waarde is evenwel geen abrupte grens. Reeds voordat deze maximumwaarde bereikt is, kost het de planten met het afnemen van de drukhoogte steeds meer moeite om water op te nemen uit de bodem.

Men ziet dan ook dat planten al groeiremmingen gaan vertonen als gevolg van een vochttekort bij lagere  $pF$ -waarden dan  $pF = 4,2$ . Het is afhankelijk van de soort plant bij welke  $pF$ -waarde deze remmingen gaan optreden. Voor gras bijvoorbeeld, begint dit al bij  $pF = 2,8$ , maar granen vertonen pas groeiremming bij  $pF = 3,0$ . Men spreekt in dit verband van *gemakkelijk en moeilijk beschikbaar water*.

Samenvattend kan men zeggen dat de hoeveelheid voor de plant beschikbaar hangwater geen statische grootheid is maar wel met enige vuilstregels benaderd kan worden.

Aan de natte kant is bij ondiepe grondwaterstanden de diepte van de grondwaterspiegel bepalend voor de volumefractie vocht. In deze gevallen is de veldcapaciteit het vochtgehalte dat correspondeert met  $pF$ -waarden van ongeveer 1,7 á 2,0. In het geval van diepe grondwaterstanden is veldcapaciteit het vochtgehalte bij  $pF = 2,3$ . Aan de droge kant is het verwelkingspunt de grens waarbij het water niet langer beschikbaar is voor de planten; dit vochtgehalte ligt bij  $pF = 4,2$ .

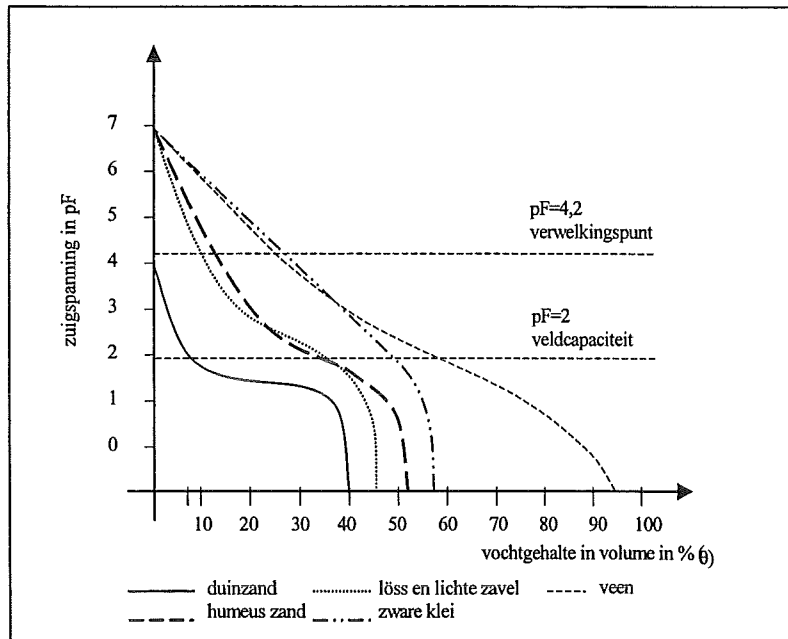
Reeds voordat het verwelkingspunt bereikt is, kunnen er groeiremmingen in de plant optreden als gevolg van watertekort. Bij welke  $pF$ -waarde dit gebeurt is soortafhankelijk.



Bron: "Bodemkunde van Nederland.",  
deel I, W.P. Locher en H. de Bakker

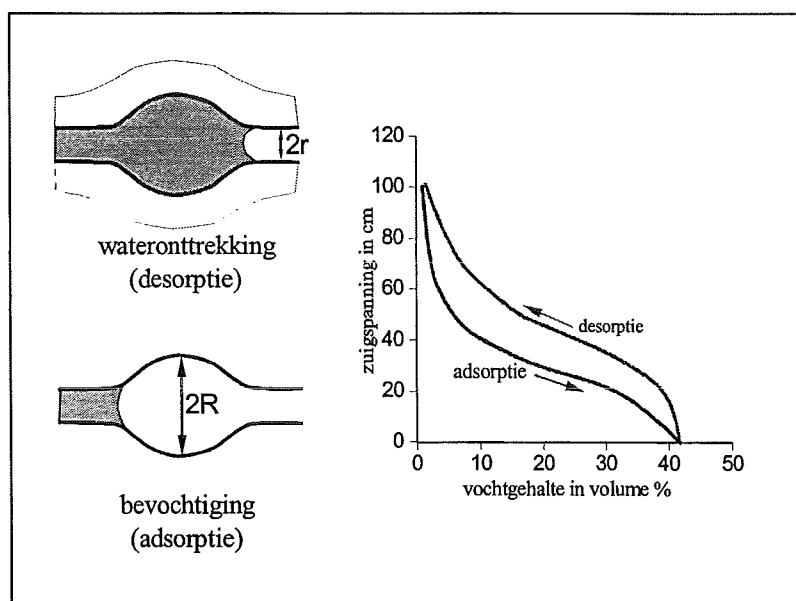
De grafiek die de relatie weergeeft tussen pF en vochtgehalte wordt de pF-curve of bodemvochtkarakteristiek genoemd (Eng: soil moisture retention curve of soil moisture characteristic). Iedere grondsoort heeft een eigen karakteristieke pF-curve. In figuur 2.9 is voor een aantal grondsoorten de pF-curve getekend. De vorm van de curve is afhankelijk van o.a.:

- volume aan poriën;
- poriëngrootte-verdeling;
- organisch stofgehalte
- lutumgehalte



**Figuur 2.9: pF-curven van enkele grondsoorten met karakteristiek punten**

Eigenlijk kan men bij één grondsoort niet spreken van één pF-curve maar van een "hysterese familie" van pF-curven (figuur 2.10): bij bepalingen van de pF-curven is gebleken dat niet altijd hetzelfde vochtgehalte aanwezig is bij dezelfde vochtspanning. Wanneer namelijk wordt uitgegaan van een nat



**Figuur 2.10: Hysterese**

monster waaraan vervolgens water wordt onttrokken dan zal een andere pF-curve ontstaan dan in het geval dat uitgegaan wordt van een droge grond en deze bevochtigd wordt. Dit verschijnsel heet hysteresis en wordt veroorzaakt doordat de poriën in de grond niet één vaste diameter hebben, er bij bevochtiging en wateronttrekking de korrels een andere pakking kunnen krijgen, en er bij bevochtiging een grote kans op luchtinsluiting bestaat.

Lopend langs de pF-curve, zijn een aantal karakteristieke punten te onderscheiden (zie figuur 2.11): (NB zie ook het blok over "De beschikbaarheid van bodemvocht voor de plant")

1. Freatisch vlak ( $\psi = 0 \text{ cm} \rightarrow pF = -\infty$ ). (praktischer is  $\psi = 1 \text{ cm } pF = 0$ )

Bij  $pF = -\infty$  is de grond verzadigd, omdat alle poriën gevuld zijn met water, geldt hier dat het vochtgehalte gelijk is aan de poriënfraction. Het vochtgehalte bij  $pF = 0$  is een goede schatting voor de poriënfraction als de pF-curve hier (bijna) verticaal loopt. Het vochtvolume is hier dus gelijk aan het poriënvolume goede plantengroei dient het poriënvolume ongeveer 40% te zijn.

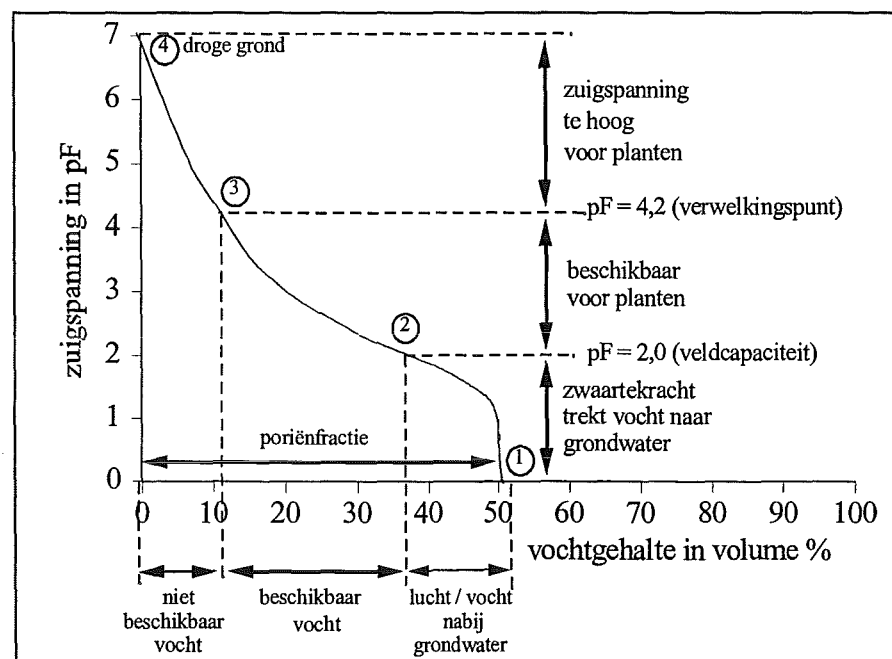
2. veldcapaciteit (in evenwichtstoestand geldt:  $\psi = 100 \text{ cm} \rightarrow pF = 2$ )

Wanneer na een overvloedige regenbui het water in de grond enige dagen heeft kunnen uitzakken, dan zegt men dat de grond zich bevindt op veldcapaciteit (Eng. field capacity). Daarmee komt overeen: de maximale hoeveelheid water die, tegen de werking van de zwaartekracht in kan worden vastgehouden. Bij proefbepaling van de vochtspanning bij de beschreven situatie bleek deze steeds ongeveer overeen te komen met pF 2 (1,8 à 2,2). De pF 2,0 komt overeen met de voorjaarstoestand in Nederlandse gronden, bij een grondwaterstand van zo'n 1 m. Het luchtgehalte bij veldcapaciteit pF 2,0 is van belang voor de luchtvoorziening van de wortels en moet minimaal 10-12% zijn.

Dit luchtgehalte is gelijk aan het verschil in vochtgehalte bij  $pF = 0$  en  $pF = 2$ .

3. Verwelkingspunt ( $\psi = 16.000 \text{ cm} \rightarrow pF = 4,2$ )

Dit is de vochttoestand in de grond waarbij het water zó wordt gebonden, dat de wortels van de planten het water niet meer kunnen onttrekken. De wortels van planten hebben een beperkte zuigkracht ( $\pm 16 \text{ atm}$ ), waarmee ze het water uit de grond kunnen trekken. Als de grond zo droog is geworden gaat de plant blijvend verwelken: het verwelkingspunt (Eng. wilting point).



Figuur 2.11: pF-curve en de bijbehorende begrippen

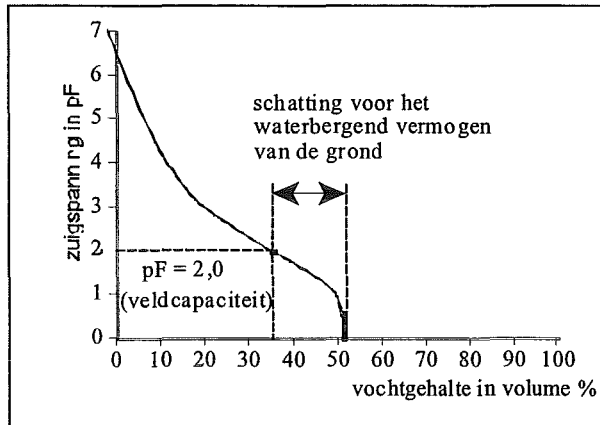


4. Droge grond ( $\psi = 10^7$  cm  $\rightarrow$  pF = 7)

Deze situatie komt overeen met stof droge grond gedroogd bij 105 °C. Het vochtgehalte wordt nu geacht 0 te zijn.

2.3.4 Waterbergend vermogen van grond

Onder het waterbergend vermogen van de grond wordt verstaan de hoeveelheid water (in volumeprocenten) die vrij komt wanneer bij een grond, die op veldcapaciteit is, de grondwaterstand daalt, gedeeld door het bedrag van die daling.



Figuur 2.12 Waterbergend vermogen

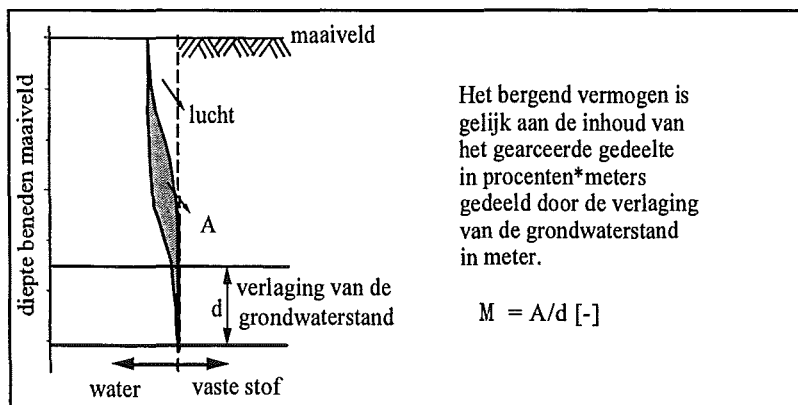
Deze hoeveelheid hangt af van de pF-curve, van de snelheid van daling, van de waterstand en van de drainafstand. De drainafstand heeft invloed, omdat de snelheid van daling van de waterspiegel niet op alle punten van de grondwaterstand hetzelfde is. Er zijn verschillende manieren om het waterbergend vermogen te schatten. Een eerste schatting van het waterbergend vermogen  $\mu$  is te ontlenen aan de pF-curve: het waterbergend vermogen is het verschil in vochtgehalte bij pF = 0 (grondwater) en pF = 2 (zie figuur 2.12).

Ook kan uit het vochtprofiel van de grond het waterbergend vermogen worden geschat (zie figuur 2.12). Een derde manier om het bergend vermogen globaal te schatten is de empirische formule 2.6.

$$\mu = \sqrt{k} \tag{2.6}$$

waarin:  $\mu$  = waterbergend vermogen [%];  
 $k$  = doorlatendheid [cm/etm];

bv. Voor  $k = 100$  cm/etm wordt dan gevonden  $M = 10\%$ .



Figuur 2.13: Schatten van bergend vermogen

## 2.4 Strooming in de onverzadigde zone

### 2.4.1 Grondwaterstroming in de verzadigde zone

#### 2.4.1a de wet van Darcy

De theorie over strooming van water door een poreus grondpakket wordt fundamenteel behandeld in het college Grondwatermechanica.

De voor waterbeheersing relevante punten worden in deze paragraaf kort samengevat.

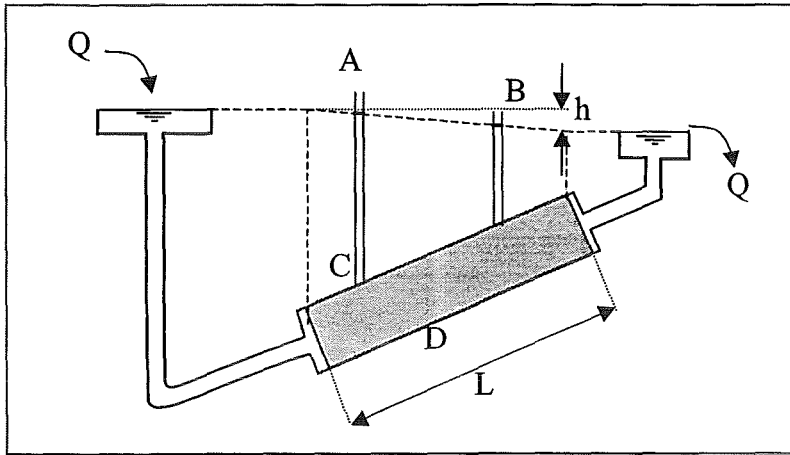


Fig. 2.14: Grondwaterstroming

Het debiet  $Q$  dat door een grondmonster stroomt is recht evenredig met:

- de dwarsdoorsnede  $F$  van het grondmonster
- het drukverschil  $h$  over het grondmonster

En omgekeerd evenredig met:

- de lengte  $L$  van het grondmonster

Dit wordt geïllustreerd in figuur 2.14: hierin zijn de drukhoogteverliezen over de opsluitfilters en de aan en afvoerleidingen op nul te stellen. Het grondmonster wordt geacht homogeen en isotroop te zijn.

We schrijven dan:

$$Q = k \cdot F \cdot \frac{h}{L}$$

$Q$  = debiet door het monster [ $m^3/s$ ]

$F$  = doorsnede monster [ $m^2$ ]

$h$  = drukverschil [ $m^1$ ] (waterkolom)

$L$  = lengte monster [ $m^1$ ]

$k$  = doorlatendheidscoëfficiënt [ $m/s$ ]

De waarde van de doorlatendheidscoëfficiënt  $k$  is afhankelijk van:

- de grondsoort
- de viscositeit van de vloeistof
- de soortelijke massa van de vloeistof
- de temperatuur

zodat theoretisch correcter de  $k$  behoort te worden geschreven als  $k = \frac{\kappa \gamma_w}{\eta}$  bij een gegeven temperatuur.

In de praktijk hanteert men de  $\eta_{20}$ , de viscositeit van water bij 20°C (NB de  $\eta_0$  is in werkelijkheid soms wel 80% groter!) en noteert men in de civiele techniek de  $k$  meestal in cm/sec in plaats van in m/sec. Als we de formule van Darcy herschrijven vinden we

$$\frac{Q}{F} = k \cdot \frac{h}{L} \quad \text{en dus} \quad v = k \cdot i$$

$v$  = schijnbare watersnelheid [cm/s]

$k$  = doorlatendheidscoëfficiënt [cm/s]

$i$  = piezometrisch verhang [-]

- NB 1. De werkelijke snelheid van de waterstroompjes door de poriën is natuurlijk groter dan  $Q/F$  omdat de doorsnede van de poriën in het grondmonster kleiner is dan de totale  $F$ .
- NB 2. De term  $h/L$ , het piezometrisch verhang, is bij een isotrope grond constant langs de hele stroombaan, hetgeen kan worden aangetoond met het observeren van de stijghoogte in peilbuizen.
- NB 3. Het teken van  $h$  is positief in de richting van de zwaartekracht en van  $L$  is positief in de richting van de stroming;  $i$  is hier dus positief.

Een indruk van mogelijke waarden van  $k$  geeft de volgende tabel.

Grof rivierzand	$k = 10^{-1}$ cm/sec
Grof duinzand	$k = 10^{-2}$ cm/sec
Veen	$k = 10^{-5} - 10^{-7}$ cm/sec
Klei	$k = 10^{-8} - 10^{-12}$ cm/sec

**Tabel 2.5: Enkele mogelijke waarden van  $k$  van Darcy in de waterbouwkunde**

#### 2.4.1.b Bepaling van de doorlatendheid

De doorlatendheid van zand wordt vooral bepaald door de poriën tussen de korrels. In fijn zand zijn deze kleiner dan in grof zand, zodat fijn zand minder doorlatend is. Bij klei wordt de doorlatendheid vooral bepaald door de structuur. Grote poriën, scheuren, wormen-, wortelgangen hebben een grote invloed op de doorlatendheid.

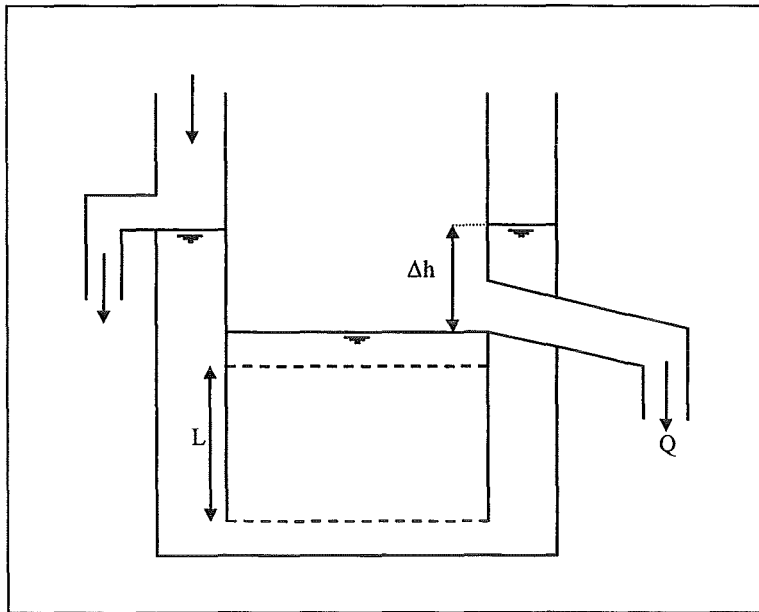
#### Bepaling van de doorlatendheid m.b.v. de wet van Darcy

In het laboratorium wordt een grondmonster doorstroomd van beneden naar boven. Het monster wordt gestoken m.b.v. een zogenaamde Kopecky-ring.

Deze heeft een inwendige diameter van 50 mm, een hoogte van 51 mm en een wanddikte van 1,5 mm (volume is 100 cm<sup>3</sup>).

In de geschetste opstelling wordt een constant drukhoogteverschil  $\Delta h$  aangehouden. Aan de hand van de gemeten hoeveelheid doorgestroomd water  $Q$  per tijdseenheid kan nu de doorlatendheid worden berekend als:

$$k = \frac{Q \cdot L}{\Delta h \cdot F}$$

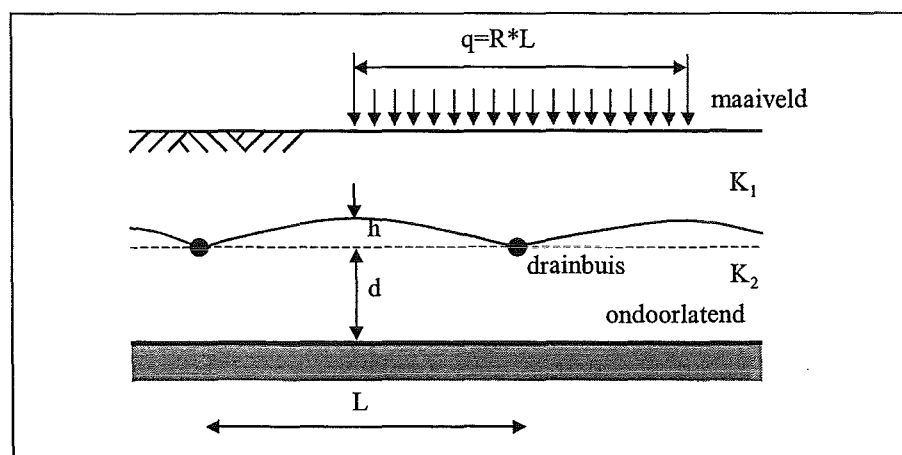


**Figuur 2.15 Bepaling van de k waarde in het laboratorium**

De methode is niet te gebruiken voor gescheurde grond: grond, waarin zich wormgaten, wortelgangen en molsgangen bevinden. Ook niet voor montmorilloniet klei, die bij droogte krimpt en bij wateropname zwelt. Bij zware kleien kan verslemping van de grond optreden, die bij de laboratoriumopstelling niet wordt gevonden. Bij het in de grond steken van de ring kan ruimte komen tussen het grondmonster en de ring, waardoor onnauwkeurige uitkomsten kunnen worden verkregen. Een voordeel van deze methode is, dat de doorlatendheid kan worden gemeten in alle richtingen en ook boven de grondwaterstand.

#### Bepaling van de doorlatendheid aan drains

Dit is de beste methode voor de meting van de doorlatendheid in een gedraineerd gebied. Midden tussen de drains wordt de opbolling gemeten. Er wordt vanuit gegaan dat de k-waarde boven de drains en de k-waarde beneden de drains verschillend zijn.



**Figuur 2.16: Bepaling van de k waarde in het veld.**

Bekend worden verondersteld de ligging van de ondoorlatende laag, de drainafstand L en de diameter van de drain, waarna de hypothetische diepte d van de waterondoorlatende laag kan worden bepaald. Het drain debiet q wordt gemeten of afgeleid uit de neerslag. Aangenomen wordt dat de formule van Hooghoudt (die in de volgende hoofdstukken wordt afgeleid) geldt:

$$q = \frac{8 \cdot K_2 \cdot d \cdot h + 4 \cdot K_1 \cdot h^2}{L^2} \quad \text{waarin nu als onbekende aanwezig zijn } K_1 \text{ en } K_2.$$

Dat zijn de doorlatendheid boven en onder het drain niveau.

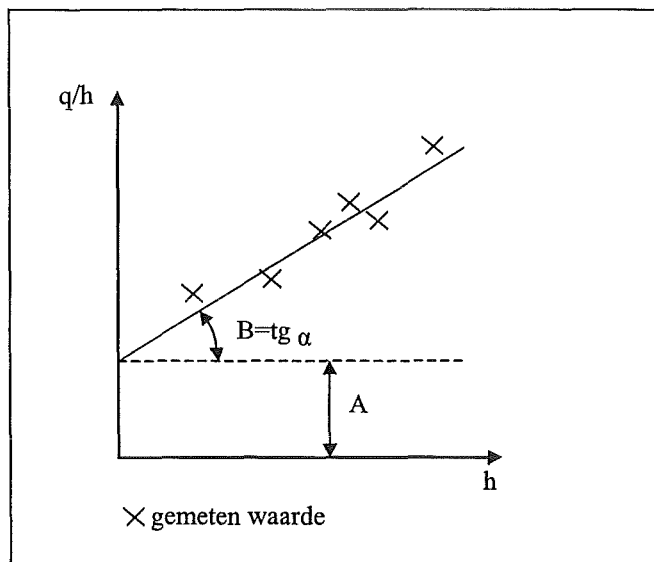
(Als  $K_1 = K_2$  dan wordt de bepaling van de doorlatendheid eenvoudiger)

De formule is te schrijven als:

$$q = Ah + Bh^2 \text{ of: } q/h = A + Bh. \text{ Hierin is}$$

$$A = \frac{8 \cdot K_2 \cdot d}{L^2} \quad \text{en} \quad B = \frac{4 \cdot K_1}{L^2}$$

Voor verschillende in het veld gemeten waarden van  $q$  en  $h$  kan nu het verband worden bepaald tussen  $q/h$  en  $h$ . Dit is in principe een rechte lijn. De coëfficiënten  $A$  en  $B$  kunnen worden afgelezen resp. op de  $q/h$ -as (is vanaf de oorsprong tot het snijpunt met de lijn) en als tangens van de hoek  $\alpha$  van de lijn met de  $h$ -as. Uit  $A$  en  $B$  kunnen de doorlatendheden,  $K_2$  resp.  $K_1$  worden berekend.



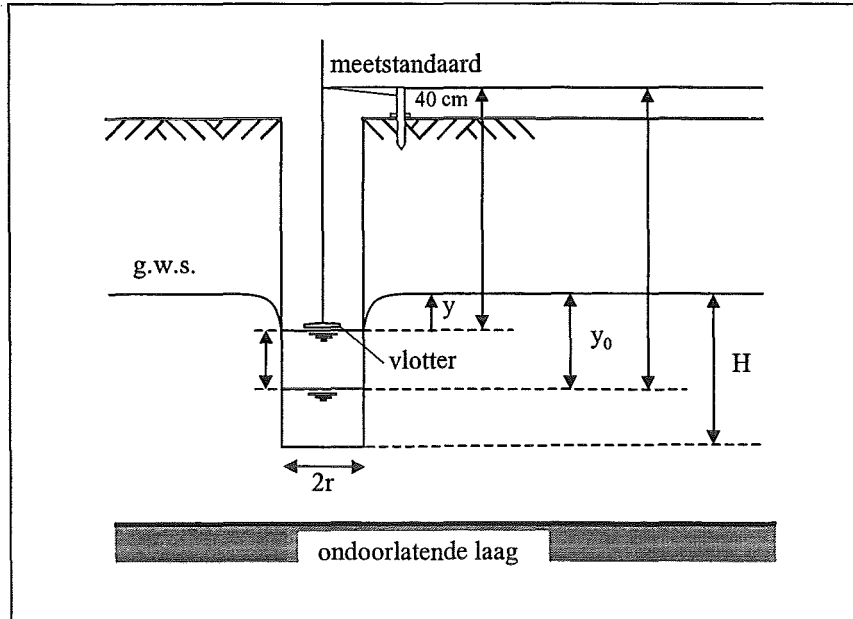
**Figuur 2.17**

Het voordeel van deze methode is dat er op praktijkschaal wordt gemeten. Het nadeel is dat er nogal wat tijd nodig is: de metingen moeten worden verricht bij verschillende hoogten  $h$ . Een ander bezwaar is dat het gebied gedraineerd moet zijn. Dit kan echter ook een voordeel zijn. Bij grote te draineren gebieden kan men beter eerst een proefdrainage maken. Een bijkomstig voordeel van de proefdrainage is dat men daarbij ook andere factoren kan meten, zoals de radiale weerstand en de intreeweerstand. De methode geldt alleen voor een twee-lagensysteem, waarbij de grens op de hoogte van de drains ligt.

#### Bepaling van de doorlatendheid d.m.v. boorgatenmethode

Bij de boorgatenmethode maakt men met een grondboor een gat in de grond met een diameter van 6-9 cm tot onder de grondwaterstand. De hoogte van de grondwaterstand meet men enige tijd na het boren, wanneer de waterspiegel in het boorgat niet meer stijgt. Daarna wordt de waterspiegel plotseling over een afstand  $y_0$  verlaagd en wordt gemeten hoe snel deze waterspiegel weer stijgt. Hoe sneller de waterstand in het boorgat stijgt, hoe groter de doorlatendheid  $K$ . De toestroming van het water in het gat vindt plaats door de bodem en door de buitenmantel van het boorgat. Op een tijdstip  $t$  bij een waterspiegel van  $y$  beneden de grondwaterstand bedraagt deze toestroming:

$$\frac{K \cdot 2\pi r \cdot H \cdot y}{a} + \frac{K \cdot \pi r^2 \cdot y}{a}$$



Figuur 2.18 Boorgatmethode

De stijgsnelheid van het water bedraagt dan:

$$-\frac{dy}{dt} = \frac{K \cdot 2\pi r \cdot H \cdot y}{a \cdot \pi r^2} + \frac{K \cdot \pi r^2 \cdot y}{a \cdot \pi r^2} = \frac{K \cdot y(2H+r)}{a \cdot r}$$

Geïntegreerd vanaf het tijdstip  $t = 0$  tot  $t = t$  en vanaf de begintoestand  $y = y_0$  van de waterspiegel tot de toestand op het tijdstip  $t$ :  $y = y$  wordt dit:

$$\int_{y=y_0}^{y=y} -\frac{dy}{y} = K \cdot \left( \frac{2H+r}{a \cdot r} \right) \cdot \int_{t=0}^{t=t} dt$$

Hieruit volgt:

$$K = \frac{a \cdot r \cdot \ln \frac{y_0}{y}}{t(2H+r)}$$

met

$r$  = de straal van het boorgat (in m)

$H$  = de hoogte van de grondwaterstand boven de onderzijde van het boorgat (in m)

$a$  = een factor om de dichtheid en de vorm van de stroombanen aan te geven

$K$  = de horizontale doorlatendheid (in m/etm)

Uit proeven van Hooghoudt is gebleken:  $a = rH/c$ , waarin  $c$  ongeveer  $2,2 \times 10^{-6}$  is. De formule kan nu worden omgewerkt tot:

$$K = \frac{a \cdot r \cdot \ln \frac{y_0}{y}}{t(2H+r)} = \frac{2,3}{2c} r^2 \left( \frac{\log \frac{y_0}{y}}{t} \right) \left( \frac{H}{H + \frac{1}{2}r} \right) = \frac{2,3}{2c} r^2 \left( \frac{\log \frac{y_0}{y}}{t} \right) = 523000 r^2 \left( \frac{\log \frac{y_0}{y}}{t} \right)$$

In de praktijk wordt de waterstand in het boorgat m.b.v. een puls verlaagd waarna men met een vlotter steeds de afstand  $y$  meet. De bepaling van  $K$  geschiedt daarna grafisch.

Langs de verticale as zijn daarbij uitgezet de waarden van  $\log y_0/y$  en langs de horizontale as de tijd. De doorlatendheid  $K$  is nu bepaald door:  $K = 523000 r^2 \text{ tg } \alpha$ .

Wanneer bodemlagen aanwezig zijn met verschillende doorlatendheid, bepaalt men eerst de  $K_1$  in de bovenste laag en dan in een dieper boorgat de  $K_2$  door gebruik te maken van de formule:

$$K = \frac{K_1 H_1 + K_2 H_2}{H_1 + H_2} = 523000 r^2 \text{ tg } \alpha$$

De doorlatendheid kan het beste in de wintermaanden worden gemeten omdat dan de grond tot zo groot mogelijke hoogte is verzadigd met water. Tevens zijn dan, wat de temperatuur betreft de omstandigheden gelijk aan die waarbij normaal water door de drains wordt afgevoerd.

Het nadeel van de boorgatenmethode is, dat men er op bedacht moet zijn, dat het boorgat langs de wanden door de boor vaak wordt dicht gesmeerd. Soms verdwijnt deze invloed na korte tijd door het binnenstromende water. Bij de uitvoering van de proef moet men rekening houden met enkele beperkingen. De waterstand mag in het boorgat niet te ver worden verlaagd (tot max. 3/4), omdat anders de bovenste stroomlijnen te veel naar beneden worden getrokken (het zogenaamde tunneleffect). Het boorgat mag niet dieper zijn dan 0,50-0,75 m onder de grondwaterstand. Bovendien mag de meting slechts over een bereik van ongeveer 1/4 van de hoogte worden verricht. Het meten van de waterstand in het boorgat is vrij lastig. Dit kan gebeuren uit de hand of m.b.v. een registratieapparaat.

#### Bepaling van de doorlatendheid uit de zandfractie

Bij zanden, waarin geen kleideeltjes voorkomen, blijkt een verband te bestaan tussen de doorlatendheid  $K$  en het specifiek oppervlak  $U$  van de zandkorrels volgens de betrekking:

$$K = \frac{3,703}{\eta} \frac{n^3}{(1-n)^2} \frac{1}{U^2} \text{ cm/s} = \frac{3200n^3}{\eta U^2 (1-n)^2} \text{ m/etm}$$

Hierin is:

$\pi$  = viscositeit van water

$\eta$  = poriënfractie

$U$  = specifiek oppervlak. Hieronder wordt verstaan de verhouding van het totale korreloppervlak van een monster met een zeker gewicht tot dat van eenzelfde gewichtshoeveelheid korrels van hetzelfde materiaal met een diameter van 1 cm. Voor zand van eenzelfde korrelgrootte geldt derhalve:  $U = 1/d$ . Per definitie heeft dus een materiaal, bestaande uit korrels met een diameter van 1 cm een  $U$ -cijfer van 1.

Het  $U$ -cijfer van zand wordt bepaald uit de zeeffracties door het percentage dat elke zeeffractie uitmaakt van het totaal aan zand tussen 16 en 2000  $\mu\text{m}$  te vermenigvuldigen met het specifieke  $U$ -cijfer van deze fractie.

De uitkomsten worden opgeteld en gedeeld door 100. Volgens de normaalbladen N209, N210 en N213 kan als hoofdingeling voor het gehele korrelgebied van een grondsoort (na laboratoriumonderzoek) de hierna volgende indeling (tabel 2.6) worden aangehouden. De fracties zijn tussen haakjes aangegeven. Het U-cijfer is voor elke begin- en eindwaarde van de fractie berekend met:  $U = 1/d$ . Het specifiek U-cijfer voor de fracties is berekend uit de U-cijfers van de begin- en eindwaarden, dus:

$$f_r = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right), \text{voor fractie } 0,016 - 0,0625$$

$$f_r = \frac{1}{2} (625 + 160) = 390$$

**Tabel 2.6: De indeling in zandfracties met de daaruit berekende U-cijfers voor de begin- en eindwaarden van de fracties en de U-cijfers voor de gehele fracties.**

Fractie in mm (1000 $\mu\text{m}$ ):			Ufr
Lutum (< 0,002)		Uiterst fijn 0,016-0,0625)	625-100 390
Slib (< 0,016)	Fijn zand (0,016-0,200) 625-50	zeer fijn (0,0625-0,0833)	160-120 140
		middelfijn (0,0833-0,125)	120-80 100
Zand (0,016-2)		matig fijn (0,125-0,200)	80-50 65
		matig grof (0,200-0,333)	50-30 40
		middel grof (0,333-0,500)	30-20 25
Grind (2-64)	grof zand (0,200-2) 50-5	zeer grof (0,500-1)	20-10 15
		uiterst grof (1-2)	10-5 7,5
Stenen (> 64)			

### De doorlatendheid in nieuwe polders

In nieuwe polders is het meestal niet mogelijk om de doorlatendheid te bepalen door middel van de boorgatenmethode.

Zavel- en kleigronden, die onder water zijn afgezet, vertonen een zeer losse opbouw met een hoog watergehalte en een laag volumegewicht. Wanneer deze gronden zijn drooggevallen verliezen zij geleidelijk water en treedt krimp van de grond op. Deze scheurvorming leidt tot een net van met elkaar in verbinding staande spleten in een regelmatig patroon. De grond zelf is nog ongerijpt en vrijwel waterdoorlatend.

De waterdoorlatendheid wordt vrijwel geheel bepaald door de scheuren. Men vindt daarbij zeer hoge waarden voor de doorlatendheid (100-200 m per etmaal).



Het is echter moeilijk na te gaan in hoeverre deze scheuren doorlopen en hoeveel de doorlatendheid bedraagt die nodig is voor het bepalen van de drainafstanden. De scheuren kunnen zeer lang blijven bestaan, soms meer dan 100 jaar, zoals is gebleken in de IJ-polders. Ook in de winter blijven zij aanwezig. De scheurvorming is afhankelijk van het watergehalte van de grond bij het droogvallen. Deze is het hoogst bij de zware kleigronden en neemt af naarmate het lutumgehalte lager is. Zware klei scheurt dus meer dan zavel. Lichte zavel (8-12% lutum) scheurt nauwelijks. Sommige kleien zijn in droge toestand sterk gescheurd maar zwellen bij bevochtiging zo sterk, dat de scheuren zich sluiten en de klei nagenoeg ondoorlatend kan worden (knipklei, sommige montmorillonietkleien, kleien met veel geadsorbeerd Na).

Zandgronden, die onder water zijn afgezet vertonen wel enig waterverlies maar slechts heel weinig krimp. De doorlatendheid daarvan kan dus wel met behulp van de boorgatenmethoden worden bepaald. Meestal past men echter de empirische formule toe, omdat het zand in het boorgat vaak de neiging geeft tot vloeien.

Om in de drooggevallen gronden toch nog een redelijke bepaling van de drainafstanden te bewerkstelligen, werd bij de Zuiderzeewerken gebruik gemaakt van proefvelden. Deze werden uitgevoerd met uiteenlopende drainafstanden. Men probeert daarbij het scheurenpatroon te korreleren met de proefondervindelijk vastgestelde drainafstanden. Het scheurenpatroon wordt daarbij opgemeten in profielkuilen.

Van belang zijn de breedte, de diepte en de onderlinge afstand van de scheuren. De gegevens van de proefvelden worden gebruikt voor de drooggevallen gronden, waar het scheurenpatroon wordt opgemeten.

Bij veen hangt de doorlatendheid sterk af van de veensoort; mosveen is meestal weinig doorlatend, rietveen goed doorlatend.

De orde van grootte van de doorlatendheid bij enkele grondsoorten is te zien in tabel 2.7.

**Tabel 2.7: De orde van grootte van doorlatendheden bij enkele grondsoorten in de bodemkundige praktijk**

Grondsoort	Doorlatendheid (m/etm)
<b>Klei</b>	
Sterk gescheurd (Zuiderzeepolders)	10 – 100
Sterk doorgroeid (Suriname)	>10
Enige poriën of scheuren	0,5 – 2
Zeer dicht (komklei, slechte laag)	0,005 – 0,05
Zeer dicht (knipklei)	< 0,005
Slap, ongerijpt	$10^{-4}$ – $10^{-5}$
Ongerijpt, samengeperst	$10^{-5}$ – $10^{-6}$
Lichte zavel, gerijpt	0,02 – 0,2
<b>Zand</b>	
Grof, met enig grind	10 – 50
Middelfijn (dekzand)	1 – 5
Uiterst fijn	0,2 – 0,5
<b>Veen</b>	
Ongerijpt	$10^{-2}$

#### 2.4.2 Doorlatendheidscoëfficiënt in de onverzadigde zone

Tot nu toe is het water (vocht) in de onverzadigde zone van de bodem alleen nog maar statisch beschouwd. Er was sprake van een evenwichtstoestand waarbij geen stroming optrad. Er kan echter

wel stroming in de onverzadigde zone optreden. Ook het bodem/watersysteem streeft naar een zo laag mogelijk energieniveau. Water zal van een punt met een hoger energieniveau naar een punt met een lager energieniveau willen stromen, tot een nieuwe evenwichtssituatie. Stroming in de onverzadigde zone vindt alleen plaats in de geheel of gedeeltelijk met water gevulde poriën. Evenals voor stroming in de verzadigde zone geldt ook voor stroming in de onverzadigde zone de wet van Darcy. In deze oorsprong agro-hydrologische beschouwing worden meestal de daar gebruikelijke noteringen gebruikt b.v.  $k$  in m/etmaal in cm/sec. We schrijven voor de stroming van water vanuit het grondwater via de capillairen naar boven:

$$v = -K * i \tag{2.7}$$

waarin:  $v$  = stromingssnelheid [m/etm];  
 $K$  = (onverzadigde) doorlatendheid [m/etm];  
 $i$  = verhang van de stijghoogte [-].

(Het minteken komt vanwege de aanname dat de stroming plaats vindt in de richting van de afnemende plaats potentiaal.)

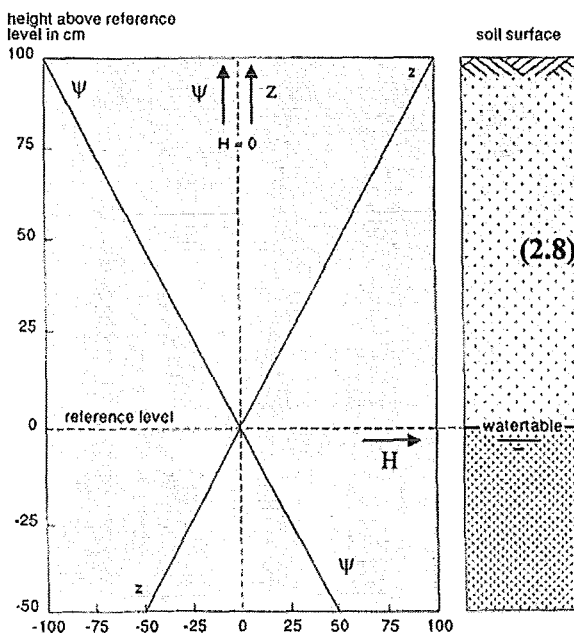
De hydraulische doorlatendheid  $k$  is in verzadigde grond een constante:  $k_{verz}$ . Deze  $k_{verz}$  is afhankelijk van het type grond (grote of kleine poriën). De onverzadigde doorlatendheid (of capillair geleidingsvermogen)  $k_{onverz}$  is geen constante maar hangt sterk af van het vochtgehalte  $\theta$ , de grootte van de poriën en daardoor ook met de vochtspanning ( $\psi$ ).

Onverzadigde stroming treedt op als er een drijvende kracht is: het water stroomt van een punt met een hogere potentiaal naar een punt met een lagere potentiaal.

De maat voor de potentiaal is:

$$H = z + \psi$$

$H$  = stijghoogte bodemvocht [m]  
 $\psi$  = stijghoogte bodemvocht [m] (negatief in de capillaire zone, positief in de beneden de grondwaterspiegel in de bodem).  
 $z$  = plaatshoogte [m]

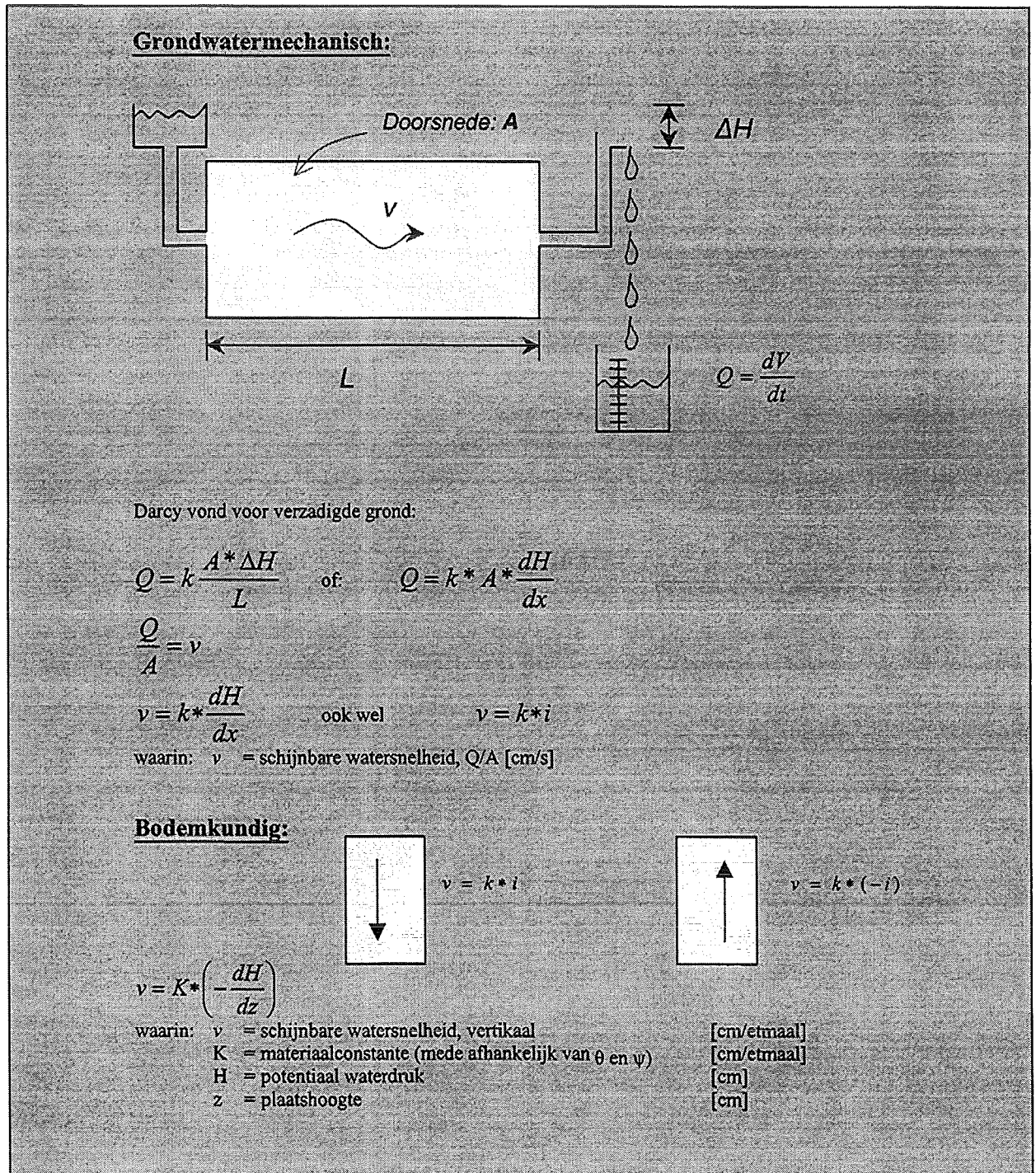


**Figuur 2.19: Gebruik van de tekens (deze situatie is een evenwichtssituatie, geen stroming)** (bron: Drainage Principles and Applications, ILRI, publicatioin

Figuur 2.19 en 2.20 illustreren het gebruik van de plus- en de mintekens. (De situatie in figuur 2.19 is de verdeling van  $z$  en  $\psi$  als er geen stroming heerst: er is evenwicht)

Voor stroming in een verticaal vlak is onderscheid te maken tussen potentiaal (ook wel: stijghoogte) veroorzaakt door de zwaartekracht en de potentiaal veroorzaakt door de vochtspanning. Voor verticale stroming geldt dan ( $z =$  positief naar boven):

$$v = -K * \frac{dH}{dz} \quad \text{of} \quad v = -K * \frac{d(\psi + z)}{dz} = -K * \left( \frac{d\psi}{dz} + 1 \right) \quad (2.9)$$



Figuur 2.20: Grondwatermechanisch versus bodemkundig (Gebruik van het minteken)

**Stationaire verticale onverzadigde stroming**

De algemene oplossing voor de stationaire verticale stroming kan worden gevonden door de integratie van:

$$dz = \frac{d\psi}{\frac{v}{K+1}} \quad \text{met} \quad K=f(\psi)$$

Deze vergelijking wordt in de grondwaterstromingsmodellen gebruikt voor de beschrijving van stationaire verticale stroming in de onverzadigde zone (afgeleid van de vergelijking van Richards)

De mogelijkheid een oplossing te vinden voor de differentiaalvergelijking hangt nu af van de relatie tussen  $K$  en  $\psi$ . Voor bepaalde relaties zal er een analytische oplossing mogelijk zijn. Voor andere relaties kan de oplossing alleen numeriek gevonden worden. Het numeriek oplossen van dit probleem is door het gebruik van computers eenvoudiger en minder arbeidsintensief geworden.

Bij  $pF=0$  ( $\psi = 1$  cm) is  $k_{verz}$  gelijk aan  $k_{onverz}$ ; bij toename van de vochtspanning ( $pF$ ) raken steeds minder poriën met water gevuld. Hierdoor daalt het capillair geleidingsvermogen. De afname wordt tevens veroorzaakt doordat de stroming in steeds kleinere poriën gaat plaatsvinden waarin de wrijving erg groot is. Van  $pF=0$  tot  $pF=4,2$  (verwelkingspunt) kan de  $k_{onverz}$  wel een  $10^6$  verschillen. (zie figuur 2.14.)

Door de niet constante doorlatendheid ( $k_{onverz}$ ), is de differentiaalvergelijking (formule 2.9) niet-lineair en is niet altijd een analytische oplossing mogelijk. Zie blok hiernaast.

Om berekeningen te kunnen doen met stroming in de onverzadigde zone, zijn door verschillende onderzoekers empirische formules ontwikkeld, waarin  $k$  als functie van  $\theta$  en van  $\psi$  is gegeven (zie het blok *Verschillende empirische formules  $k(\psi)$  en  $k(\theta)$* ). Door Rijtema zijn tabellen gemaakt die handberekeningen in de onverzadigde stroming mogelijk maken. De methode van Rijtema is hierin vooraanstaand, omdat deze een goed inzicht geeft in het proces.

**Verschillende empirische formules  $k$  als functie van  $\psi$  en  $\theta$ .**

(Bron: W.H. van der Molen, "Stroming in de onverzadigde zone", 1972)

$$k = a\psi^{-n} \quad (\text{Wind, 1955; Wesseling '57})$$

$$k = \frac{a}{\psi^n + b} \quad (\text{Gardner, '58})$$

$$k = k_0 e^{-a\psi} \quad (\text{Talsma, '63})$$

$$\frac{k}{k_{verz}} = \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^n \quad (\text{Irmay})$$

waarin:  $k_0$  = verzadigde doorlatendheid [m/etm];  
 $a$  en  $b$  constanten [-];  
 $n$  = exponent  
 $\psi_a$  = zuigspanning bij "air entry value" [cm];  
 $\theta_s$  = vochtgehalte bij verzadiging [-];  
 $\theta_r$  = rest vochtgehalte bij  $K = 0$  [-].

**Figuur 2.21: Empirische relaties tussen  $K$  en  $\psi$ ,  $\theta$**

## 2.5 Rijtema en de onverzadigde zone

Rijtema heeft relaties tussen de vochtspanning en het capillair geleidingsvermogen gecombineerd. Hij heeft drie trajecten in het verloop van de zuigspanning onderscheiden. Voor elk traject geldt een andere relatie.

De trajecten:

- I  $0 \leq \psi \leq \psi_a$   
 II  $\psi_a < \psi < \psi_{\max}$   
 III  $\psi > \psi_{\max}$

waarin:

- $\psi$  = heersende zuigspanning [cm];  
 $\psi_a$  = air entry value [cm];  
 $\psi_{\max}$  = grenswaarde voor zuigspanning [cm].

De relaties:

- I: voor  $0 \leq \psi \leq \psi_a$  geldt:

$$k = k_0$$

Het eerste traject betreft de vol-capillaire zone tot aan de zuigspanning waarbij lucht in de poriën gaat dringen ( $\psi_a$  = luchtindringingspunt). Alleen bij grof zand is dit traject duidelijk aanwezig.

- II: Het verband tussen het capillair geleidingsvermogen en de zuigspanning in het traject van verzadiging tot een zuigspanning van 100 à 300 cm kan door een exponentiële functie worden benaderd. In dit traject is nog sprake van stroming door gevulde capillairen.

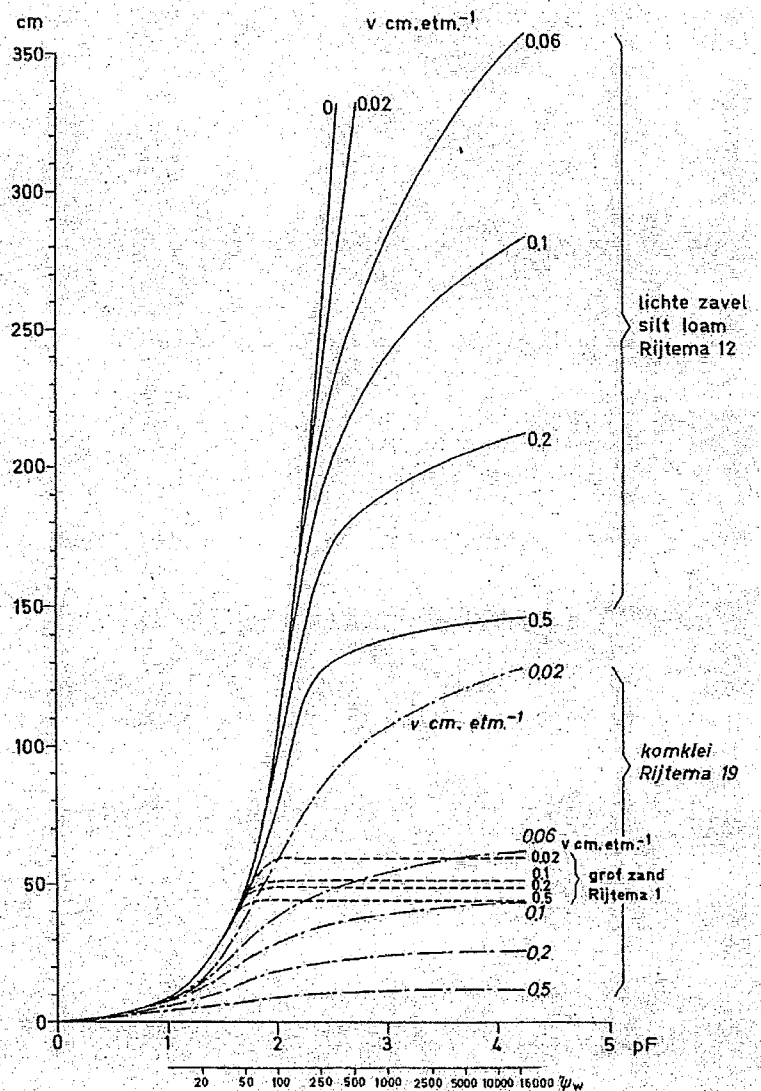
Voor  $\psi_a < \psi < \psi_{\max}$  geldt:

$$K = K_0 * e^{-a(\psi - \psi_a)}$$

- III: Bij hogere zuigspanningen laat het verband zich het best weergeven door een machtsfunctie. Dit duidt erop dat het capillair geleidingsvermogen vooral bepaald wordt door stroming in de oppervlaktefilm van de vaste deeltjes.

Voor  $\psi > \psi_{\max}$  geldt:

$$K = a * \psi^{-n}$$



Figuur 2.22: Vochtspanningsprofielen voor verschillende grondsoorten (naar Rijtema, 1970)

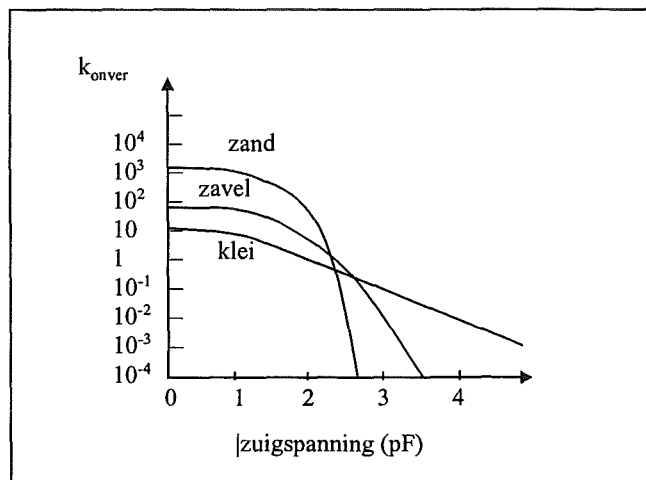
De capillaire opstijging, het vochtspanningsprofiel, en het vochtgehalte profiel kan berekend worden na integratie van vergelijking 2.9, in combinatie met de gegeven  $k(\psi)$  voor de drie trajecten. De integratie van de stromingsvergelijking (vergelijking 2.9), voor de drie trajecten van Rijtema, leidt tot relaties waaruit het verband tussen  $v$ ,  $\psi$  en  $z$  blijkt. In het laboratorium zijn de pF-curven en de waarden voor de parameters  $\alpha$ ,  $a$ ,  $\psi_a$ ,  $\psi_{\max}$  en  $k_0$  bepaald (zie tabel 2.8).

Door Rijtema [Rijtema P.E., *Soil moisture forecasting*, Instituut voor Cultuurtechniek, Wageningen, 1969] zijn tabellen gegeven waarin voor verschillende stroom (opstijg-) snelheden  $v$  de waarden zijn gegeven van de hoogten  $z$  waarop vochtspanningen worden gevonden van verschillende grootte. De tabellen zijn gegeven voor 20 "standaardgronden"

**Tabel 2.8: Constanten in de formules voor onverzadigde doorlatendheid (Rijtema 1969)**

Grondsoort	$k_0$	$\alpha$	$\psi_a$	$\psi_{\max}$	$a$	$n$
	cm/etm	cm <sup>-1</sup>	cm	Cm	cm <sup>n+1</sup> /etm	-
Grof zand	1120	0,2240	10	80	0,080	1,40
Fijn zand	50	0,0500	0	175	10,9	1,40
Löss	14,5	0,0490	0	130	22,6	1,40
Zavel	6,5	0,0200	0	300	47,3	1,40
Lichte klei	3,5	0,0174	0	300	55,6	1,40
Komklei	0,22	0,0380	0	80	4,86	1,40
Veen	5,3	0,1045	0	50	6,82	1,40

Zand heeft een grote hydraulische doorlatendheid; het capillair geleidingsvermogen neemt echter bij toenemende vochtspanning snel af. Klei heeft een lagere hydraulische doorlatendheid, maar de onverzadigde doorlatendheid, ook bij hoge vochtspanningen, is groot. Zavel beweegt hier tussenin.



**Figuur 2.23: Het capillair geleidingsvermogen afhankelijk van de vochtspanning**

Grof zand heeft slechts een geringe stijghoogte. Bij een grondwaterstand dieper dan ca. 60 cm beneden de wortelzone is er nauwelijks sprake van vochttransport. Bij komklei geldt dit voor een grondwaterstand dieper dan ca 100 cm beneden de wortelzone. Is bij zavel echter de vochtspanning onderaan de wortelzone  $\psi = 1000$  cm (pF 3,0) dan wordt bij een grondwaterstand van 190 cm beneden de wortelzone nog ca 2 mm vocht per etmaal aangevoerd.

**Tabel 2.9a: Rijtematabel voor zavel: de hoogte  $z$  [cm] bij gegeven waarden voor  $v$  en  $\psi$** 

$\psi$ (zuigspanning)	$\theta$ (vochtgehalte)	$v$ [cm/etm]							
		0,5	0,4	0,3	0,2	0,15	0,1	0,06	0,02
cm	vol%								
0	50								
20	48,7	18,3	18,6	18,9	19,3	19,4	19,6	19,8	19,9
50	47,4	44,2	45,3	46,3	47,5	48,1	48,7	49,2	49,7
100	46,1	81,2	84,2	87,6	91,3	113,3	95,4	97,2	99,0
250	32,5	127,7	137,2	149,2	165,7	176,8	191,3	207,3	231,3
500	27,9	134,4	145,4	160,0	181,4	197,2	220,5	252,1	326,9
1000	20,5	138,6	150,7	167,0	191,9	211,1	241,3	285,4	414,7
2500	13,7	142,3	155,3	173,0	201,0	223,2	259,1	315,2	500,3
5000	12,5	144,4	157,9	176,6	206,3	230,2	269,6	322,8	552,2
10000	10,3	146,1	160,1	179,4	210,6	236,0	278,2	347,0	594,7
16000	9,2	147,0	161,2	180,9	212,8	239,0	282,8	354,6	617,4

**Tabel 2.9b: Rijtema tabel voor sterk lemig fijn zand**

$\psi$ (zuigspanning)	$\theta$ (vochtgehalte)	$v$ [cm/etm]							
		0,5	0,4	0,3	0,2	0,15	0,1	0,06	0,02
cm	vol%								
0	37								
20	33,5	19,7	19,7	19,8	19,9	19,9	19,9	20,0	20,0
50	29,2	47,9	48,3	48,7	49,1	49,3	49,6	49,7	49,9
100	19,6	82,0	84,5	87,4	90,8	92,7	94,8	96,7	98,9
250	14,7	92,8	97,3	103,3	111,7	117,9	126,7	138,3	165,8
500	11,9	94,1	99,0	105,4	115,0	122,1	133,1	148,7	194,6
1000	9,2	95,1	100,2	107,1	117,4	125,4	138,0	156,8	218,1
2500	6,5	95,9	101,3	108,5	119,5	128,2	142,2	163,8	238,9
5000	5,3	96,4	101,9	109,3	120,7	129,9	144,6	167,9	251,0
10000	4,7	96,8	102,4	109,9	121,7	131,2	146,2	171,2	260,9
16000	4,2	97,0	102,6	110,3	122,3	131,9	147,6	172,9	266,1

**Berekeningen met behulp van de Rijtema-tabellen**

Met behulp van de Rijtema-tabellen zijn drie typen berekeningen mogelijk voor stroming in de onverzadigde zone:

1. Het grondwater zonder de wortelzone en de zuigspanning  $\psi$  in de wortelzone zijn bekend zodat de capillaire opstijging  $v$  kan worden berekend.
2. Het grondwaterniveau  $z$  onder de wortelzone en de capillaire opstijging zijn bekend zodat de zuigspanning  $\psi$  kan worden berekend
3. De zuigspanning  $\psi$  in de wortelzone en de capillaire opstijging zijn bekend zodat het grondwaterniveau  $z$  onder de wortelzone kan worden berekend.

De berekening van het vochtgehalteprofiel gaat of van boven naar beneden of van beneden naar boven, waarbij steeds voor de bepaalde plaatshoogte  $z$  het bijbehorende vochtgehalte  $\theta$  wordt bepaald. Op de overgang van een grondsoort naar de andere grondsoort blijft de vochtspanning gelijk, het vochtgehalte  $\theta$  hangt af van die vochtspanning, maar voor verschillende grondsoorten gelden bij een gegeven vochtspanningen andere vochtgehaltes. (Zie de voorbeelden)

Met moderne numerieke computerberekeningen kan er snel veel worden doorgerekend; het is echter van groot belang inzicht in de fysische processen te hebben, die met de Rijtema methodiek systematisch worden doorlopen.



**LET OP:**

Voor de beide opgaven zijn aangepaste Rijtema-tabellen gebruikt. De aanpassingen vereenvoudigen de opgaven zodat er sneller inzicht in de opgaven wordt verkregen. De oorspronkelijke Rijtema-tabellen zijn de tabellen 2.9a en 2.9b.

De volgende tabellen 2.10a en 2.10b zijn hiervan afgeleid en worden voor de beide opgaven gebruikt:

**Tabel 2.10a: Aangepaste Rijtema-tabel voor zavel: de hoogte  $z$  [cm] bij gegeven waarden voor  $v$  en  $\psi$**

$\psi$ cm	$\theta$ vol%	$v$ [cm/etm]								
		0,5	0,4	0,3	0,2	0,15	0,1	0,06	0,02	
0	50									
20	49	18,3	18,6	19,0	19,0	19,4	19,3	19,6	19,9	
50	47	44,2	45,3	46,0	48,0	48,1	48,7	49,2	49,7	
100	44	81,3	84,2	97,0	91,0	113,3	125,4	137,2	149,0	
250	33	127,7	137,2	149,0	165,0	176,8	191,3	207,3	231,3	
500	28	134,4	145,5	160,0	179,0	197,2	220,5	241,3	326,9	
1000	23	136,6	150,7	167,0	192,0	211,1	241,3	285,4	414,7	
2500	14	142,3	155,3	173,0	205,0	223,2	259,1	315,2	500,3	
5000	12	144,4	157,9	177,0	207,0	230,2	269,6	322,8	552,2	
10000	10	146,1	160,1	179,0	210,0	236,0	278,2	347,0	594,7	
16000	9	147,0	161,2	181,0	212,8	239,0	282,8	354,6	617,4	

**Tabel 2.10b: Aangepaste Rijtema tabel voor sterk leemig fijn zand**

$\psi$ cm	$\theta$ vol%	$v$ [cm/etm]								
		0,5	0,4	0,3	0,2	0,15	0,1	0,06	0,02	
0	37									
20	35,0	17,7	18,7	19,0	19,9	19,9	19,9	20,0	20,0	
50	29,0	47,9	47,3	48,0	49,1	49,3	49,6	49,7	49,9	
100	20,0	82,0	84,5	90,0	90,8	92,7	94,8	96,7	98,9	
250	14,7	92,8	97,3	103,3	111,7	117,9	126,7	138,3	165,8	
500	11,9	94,1	99,0	105,4	115,0	122,1	133,1	148,7	194,6	
1000	9,2	95,1	100,2	107,1	117,4	125,4	138,0	156,8	218,1	
2500	6,5	95,9	101,3	108,5	119,5	128,2	142,2	163,8	238,9	
5000	5,3	96,4	101,9	109,3	120,7	129,9	144,6	167,9	251,0	
10000	4,7	96,8	102,4	109,9	121,7	131,2	146,2	171,2	260,9	
16000	4,2	97,0	102,6	110,3	122,3	131,9	147,6	172,9	266,1	



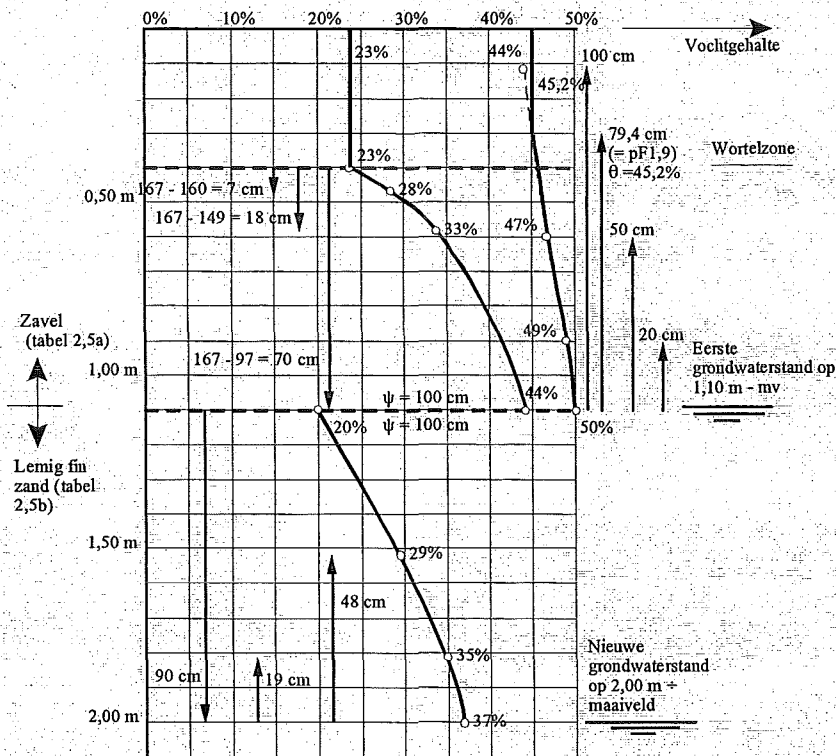
**Opgave**

Een polder heeft een bodemprofiel dat bestaat uit lichte zavelgrond tot op 1,10 m -m.v., en beneden deze 1,10 m - m.v. uit sterk lemig fijn zand. De "Rijtema tabellen" van deze gronden zijn gegeven in tabel 2.5a en 2.5b. Het gewas heeft een wortelzone van 0,40 m.

Teken twee vochtgehalteprofielen van situaties a en b in één figuur.

- a. Aan het begin van het groeiseizoen staat de grondwaterstand op 1,10 m beneden het maaiveld. De grond is dan op veldcapaciteit. De veldcapaciteit van deze gronden ligt niet bij de gebruikelijke pF 2,0 maar bij pF 1,9.
- b. In de droge periode zonder neerslag zakt de grondwaterstand. De capillaire opstijging is gelijk aan de gewasverdamping, en bedraagt 3 mm/dag. De wortels van het gewas onttrekken met een zuigspanning van pF 3.

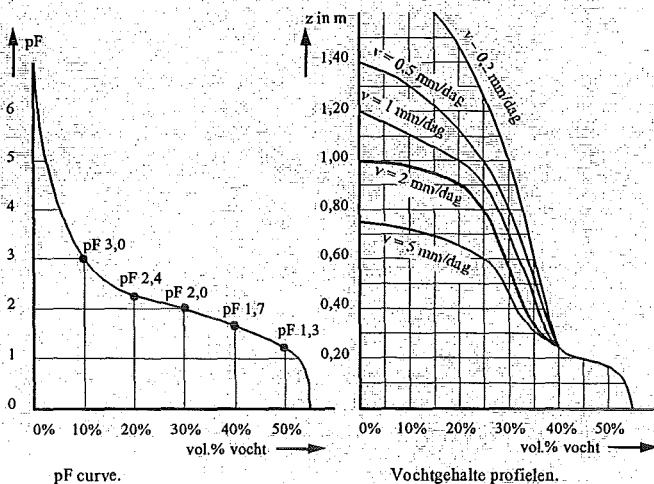
**Uitwerking**



**Opgave**

Een bodemprofiel in een aride gebied bestaat uit lichte zavelgrond tot op 0,75 beneden maaiveld, en uit lemig fijn zand beneden deze laag. De Rijtema tabellen van deze gronden zijn gegeven in onderstaande figuur en tabel 2.5a.

Er is een gemiddelde gewasverdamping van 2 mm/dag. Het gewas kan water onttrekken uit de ondergrond. Het gewas heeft een worteldiepte van 0,35 m.

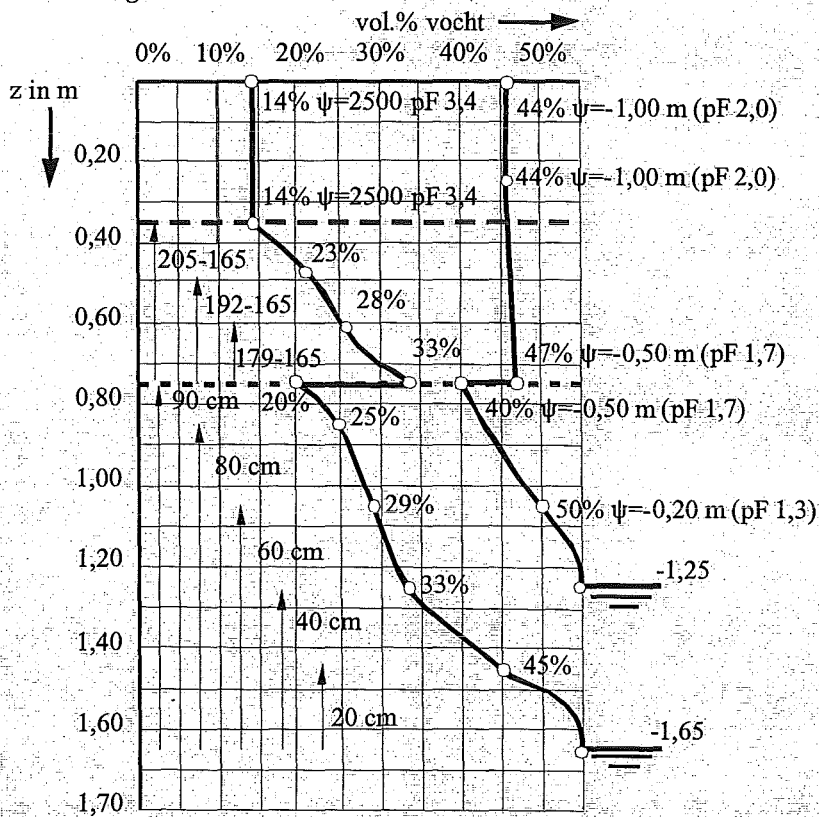


**Figuur: pF-curve voor fijn-lemig zand**

Teken de twee vochtgehalte-profielen voor de volgende situaties in één figuur.

- a. Vlak na een irrigatiegift is de grond op velcapaciteit (pF 2); de grondwaterstand ligt op 1,25 m -m.v.
- b. Vlak voor een irrigatiegift ligt de grondwaterstand ligt op 1,65 m -m.v.

**Uitwerking**



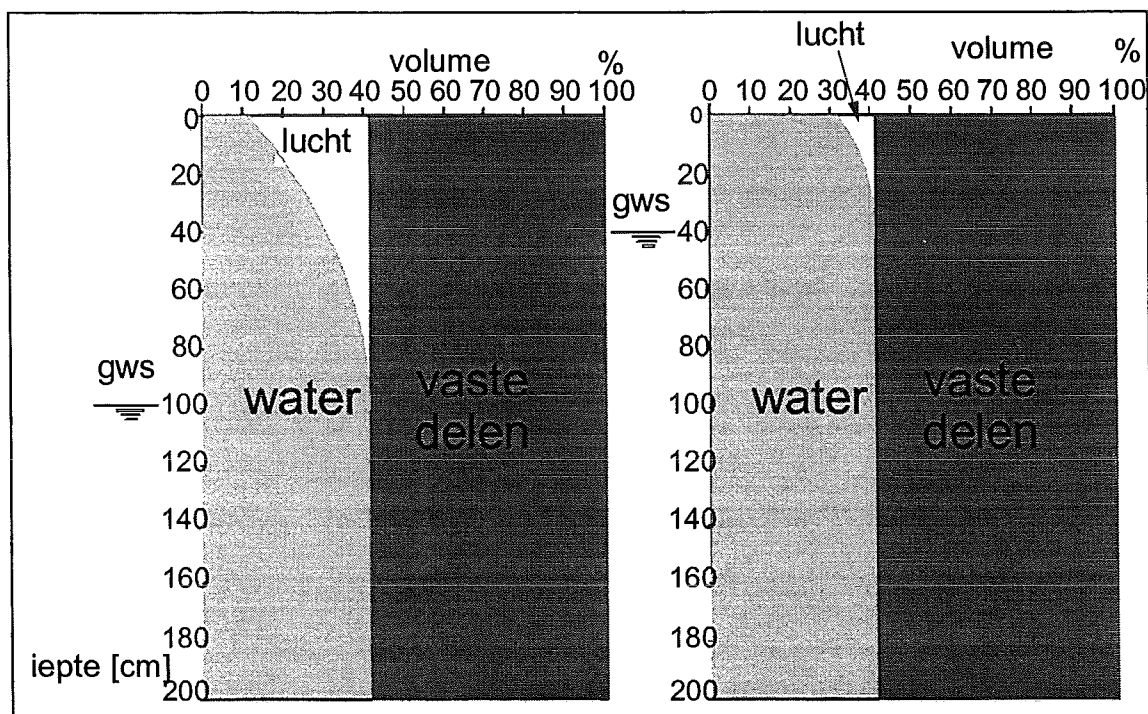
## 2.6 Waterbeheersing voor landbouw en natuurbeheer

De beheersing van de grondwaterstand in het landelijk gebied is van belang voor landbouw, natuur en recreatie. De grondwaterstand fluctueert afhankelijk van neerslag, verdamping, afvoer, aanvoer en berging. De diepte van de grondwaterstand wordt vooral bepaald door reliëf, doorlatendheid en afvoermogelijkheid. De grondwaterstand beïnvloedt de fysische eigenschappen van de grond, en heeft daardoor invloed op:

- groei van planten;
- structuur van de grond;
- bewerkbaarheid;
- begaanbaarheid, berijdbaarheid;
- zwel- en krimpverschijnselen;
- temperatuur van de grond.

Water is bij de functie landbouw nodig voor de gewassen en voor de dieren. Reden waarom de landbouw eisen stelt aan de omvang van de watervoorraad en -aanvoer, aan het grondwaterpeil, aan het zoutgehalte en de verder samenstelling van het water. Vanuit de landbouw kan zowel een te veel (winterseizoen) als een te kort (zomerseizoen) aan water een probleem zijn. Gevolg is dat het grondwaterpeil in grote delen van het land kunstmatig laag wordt gehouden, hetgeen de verdroging van (natuur)gebieden kan veroorzaken.

Voor de groei van een plant is water en lucht in de bodem nodig. Een tekort aan water is nadelig, maar ook een teveel aan water, omdat dit een tekort aan lucht betekent. De waterhuishouding van de grond bepaalt de hoeveelheid beschikbaar water, de hoeveelheid lucht, de temperatuur en is van invloed op de structuur van de grond. In figuur 2.24 is het effect te zien van de grondwaterstand op de hoeveelheid lucht in de wortelzone. Wanneer het luchtgehalte in de bodem lager wordt dan 10% van het totaalvolume treedt sterke vermindering van de productie op.



**Figuur 2.24: Verhouding gehalte vaste stof/bodemvocht/lucht bij verschillende**

Voor een gewas is een optimale grondwaterspiegel te bepalen, zowel een te diepe als een ondiepe grondwaterstand heeft immers een nadelige invloed op de gewasopbrengst. De optimale

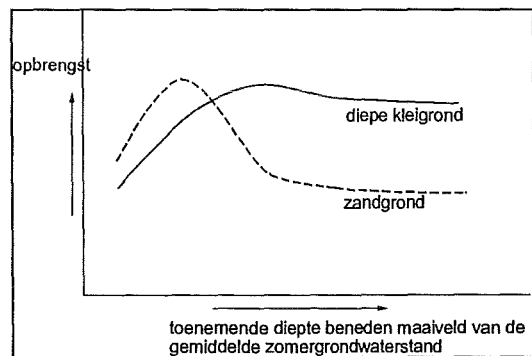
grondwaterstand is afhankelijk van het profiel van de bodem en de fysische eigenschappen van de betreffende grondsoorten. Er is in de praktijk onderzoek verricht naar de reactie van het gewas op de hoogte van de grondwaterstand. In figuur 2.25 zijn schematisch twee opbrengst-ontwateringscurven weergegeven: Eén voor klei en één voor zandgrond. Zandgrond vereist een hogere grondwaterstand dan kleigrond en is veel gevoeliger voor lagere grondwaterstanden.

### 2.6.1 Ontwaterings- en afwateringsbehoefte

Ontwatering en afwatering is nodig om te hoge grondwaterstanden te verlagen. Het groeiseizoen van het gewas onder Nederlandse omstandigheden valt in een periode van neerslag tekort. Toch is het van belang voor het gewas dat ook buiten de groeiperiode de grondwaterstand wordt beheerst. Bij hoge grondwaterstanden verliest de grond aan draagkracht en is moeilijk begaanbaar en bewerkbaar. Er kunnen geen wintergewassen worden geteeld en in het voorjaar kiemt zaad langzaam op koude natte gronden. De microbiologische activiteit in de grond wordt beperkt. Zo blijkt dus de grondwaterstand in de winter van invloed te zijn op de groei in de zomerperiode.

Als optimale grondwaterstand kunnen globaal de volgende waarden worden gehanteerd:

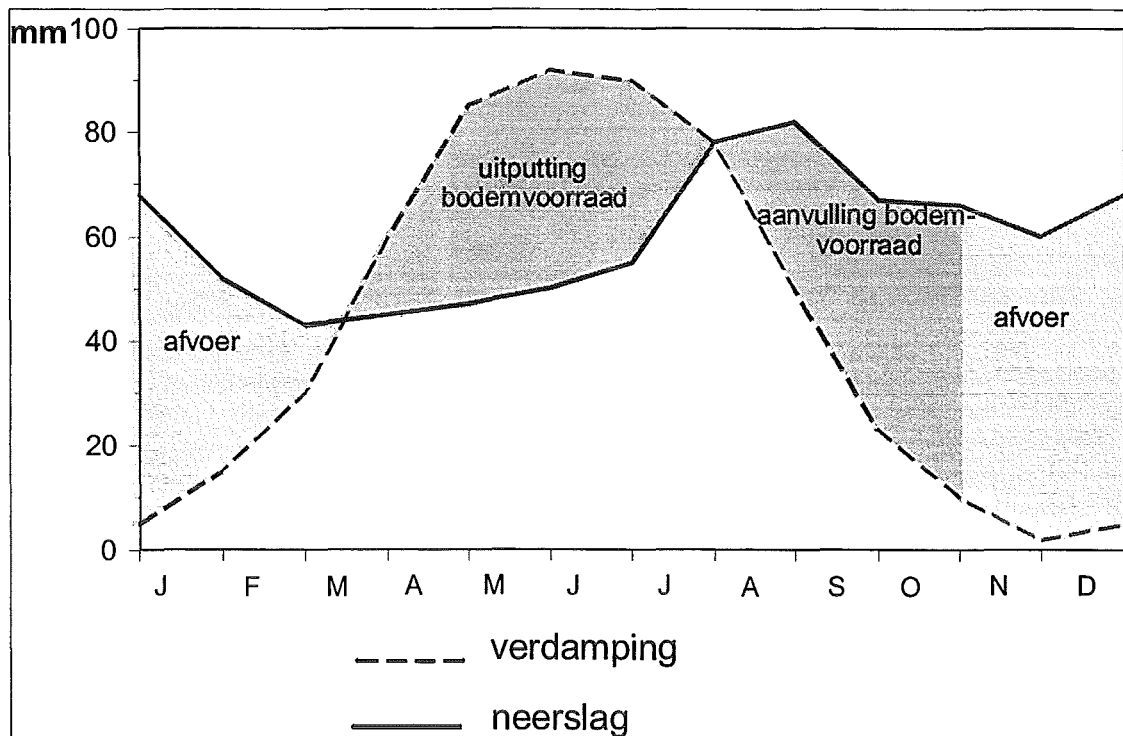
Grasland	0,60 - 0,70 m -m.v.
Bouwland, boomgaard op vochthoudende grond;	> 1,00 m -m.v.
Idem, op droogte gevoelige grond	0,70 m -m.v.
Bollenteelt	0,55 m -m.v.



**Figuur 2.25: Verband tussen de opbrengst van akkerbouwgewassen en grondwaterstand**

### 2.6.2 Wateraanvoerbehoefte

In figuur 2.17 is te zien dat in het groeiseizoen de verdamping de neerslag overtreft. In de figuur is de potentiële verdamping uitgezet d.w.z. de maximale hoeveelheid vocht welke bij goede gewasgroei via de plant zal verdampen. Wanneer nu door gebrek aan water in het groeiseizoen niet aan de behoefte van de plant kan worden voldaan, zal deze de huidmondjes sluiten waardoor de verdamping wordt geremd, maar tevens ook de groei en de opbrengst.



**Figuur 2.26: Gemiddelde neerslag en potentiële verdamping in Nederland**

Als er niet aan de waterbehoefte van een gewas voldaan wordt, zal kunstmatige wateraanvoer plaats moeten hebben in de vorm van bevloeiing, beregening of ondergrondse infiltratie vanuit sloten. De vraag hoe groot de bodemvoorraad moet zijn om aan de vraag naar vocht te kunnen voldoen houdt verband met de kans van optreden van verschillen tussen neerslag en verdamping. Dit statistische probleem kan worden opgelost indien over een voldoende lange periode gegevens over neerslag en verdamping bekend zijn. Wil men minder dan één maal per 10 jaar ( $p = 10\%$ ) een watertekort hebben, de bodemvoorraad minstens 185 mm moet zijn. Of dit aanwezig is zal navolgend worden besproken.

Bij een diepe grondwaterstand wordt de beschikbare hoeveelheid vocht bepaald door het vochtgehalte tussen  $pF\ 2,0$  en  $pF\ 4,2$ :  $\theta_{2,0} - \theta_{4,2}$ . De worteldiepte wordt berekend met de effectieve wortelzone (deel van de grond dat 80% van de wortels bevat.)

### Capillaire nalevering

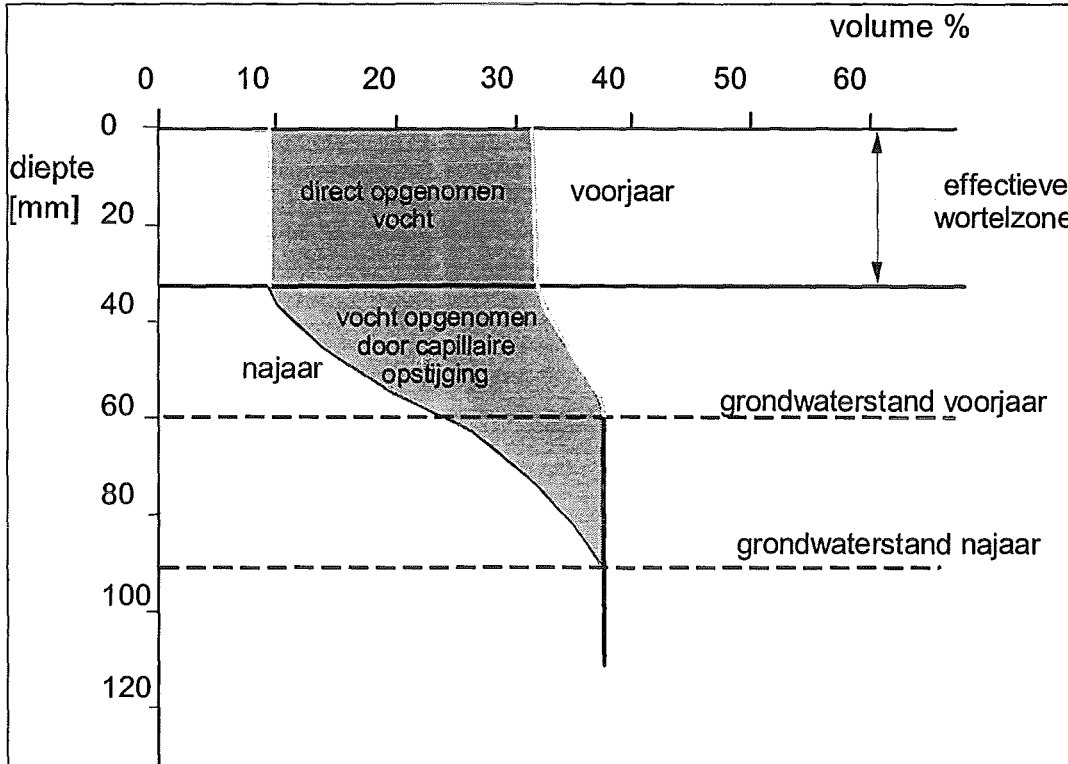
De hoeveelheid beschikbaar vocht voor de plant wordt bij diepe grondwaterstanden bepaald door de hoeveelheid vocht die beschikbaar is tussen veldcapaciteit ( $pF\ 2,0$ ) en verwelkingspunt ( $pF\ 4,2$ ). Bij ondiepe grondwaterstanden ( $< 2$  à  $3\ m$ ) vindt behalve deze hoeveelheid over de hoogte van de wortelzone, een extra toelevering plaats d.m.v. capillaire opstijging van vocht. De stroming vindt plaats doordat - uitgaande van een evenwichtssituatie in het voorjaar - door evapotranspiratie het evenwicht wordt verbroken. Er ontstaat een opwaarts gerichte vochtspanningsgradiënt die de drijvende kracht vormt voor de capillaire stroming. Door de opstijging van vocht uit de zone onder de wortelzone treedt over de gehele hoogte tot aan de grondwaterstand een vochtspanningsgradiënt op. Stel dat zich tijdelijk een stationaire toestand instelt waarbij de evapotranspiratie gelijk is aan de door capillaire opstijging geleverde hoeveelheid vocht. Hierdoor daalt de grondwaterstand, waardoor bij gelijkblijvende vochtspanningsverschillen de hoogte waarover het vocht moet worden nageleverd wordt vergroot en de toeleveringssnelheid neemt af; de grond droogt enigszins uit en het capillair geleidingsvermogen neemt af. Er ontstaat een toestand van steeds verdere daling van de grondwaterstand en uitdroging van de grond.

In het voorjaar (meestal wordt 15 april aangehouden) is de bodem op veldcapaciteit (evenwichtsvochtgehalte). In deze evenwichtssituatie vindt geen stroming plaats ( $v = 0$ ).

Hieruit volgt, zoals eerder werd afgeleid:

$$v = -K \left( \frac{d\psi}{dz} + 1 \right) = 0 \quad (2.10)$$

$$\frac{d\psi}{dz} = -1 \rightarrow \psi = -z \quad (2.11)$$



**Figuur 2.27: Schematische voorstelling van de voor- en najaarsvochttoestand van de bodem.**

Dit betekent dat in deze situatie de zuigspanning in de bodem overeenkomt met de plaatshoogte  $bv$  t.o.v. de grondwaterspiegel. Dit geldt tot 1 m boven de grondwaterstand. Daarboven blijft de  $pF$  2,0 gehandhaafd. De hoeveelheid vocht welke in het voorjaar beschikbaar is voor de plant wordt bepaald door:

- de grond o.a. tussen  $pF$  0 en  $pF$  2,0
- diepte grondwaterstand: lager  $pF$  betekent meer vocht
- dikte effectieve wortelzone

In het najaar (meestal wordt hiermee bedoeld: einde groeiseizoen) is de grondwaterstand op z'n laagst evenals het vochtgehalte in het profiel. De vochtsituatie in het najaar wordt bepaald door:

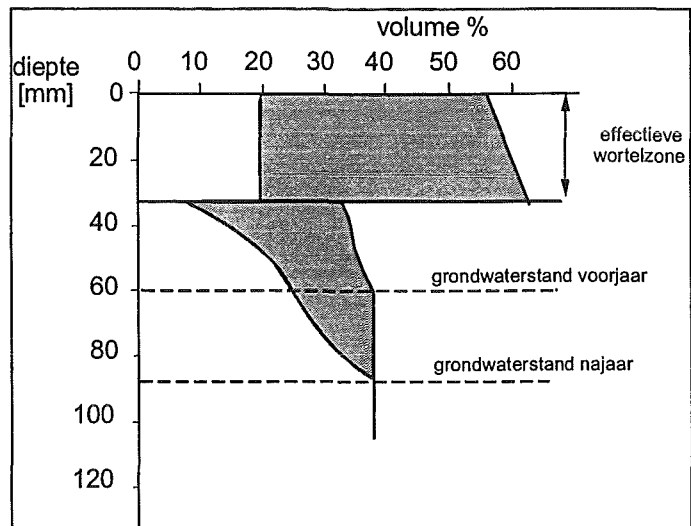
- worteldiepte (sterk bepaald door bodemprofiel)
- fysische eigenschappen ondergrond o.a. mate waarin de capillaire stroming afneemt bij dalende grondwaterstand
- toe- of afstroming van water

Het verschil tussen het voorjaars-vochtgehalte-profiel en het najaarsvochtgehalte-profiel is de hoeveelheid vocht die aan de plant ten goede is gekomen.

Om beter inzicht te krijgen in de grondwaterhuishouding in Nederland wordt vaak onderscheid gemaakt tussen laag-, middelhoog-, en hooggelegen gebieden. Hiermee bedoeld gebieden die wat betreft de vochtvoorziening respectievelijk wel, gedeeltelijk of in het geheel niet door de grondwaterstand worden beïnvloed.

### Lage gronden

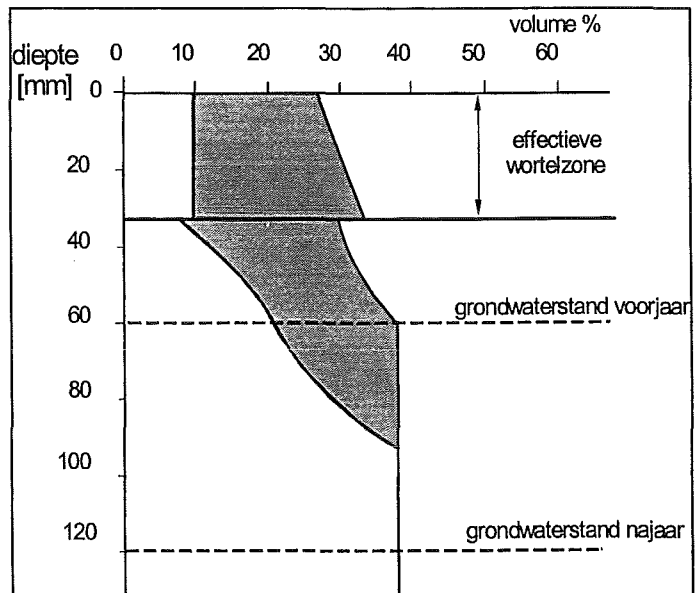
Deze gronden zijn zodanig t.o.v. het grondwater gelegen dat gedurende het gehele seizoen vocht, via capillaire opstijging kan worden onttrokken (figuur 2.19). Er is in deze gebieden een nauwe relatie tussen grondwaterstand en slootpeil. In de winterperiode zal het peil in de sloten voldoende laag moeten zijn om overtollig water te kunnen later wegvloeien zijn.



**Figuur 2.28 Beschikbare hoeveelheid vocht bij lage gronden (voorbeeld)**

### Middelhoge gronden

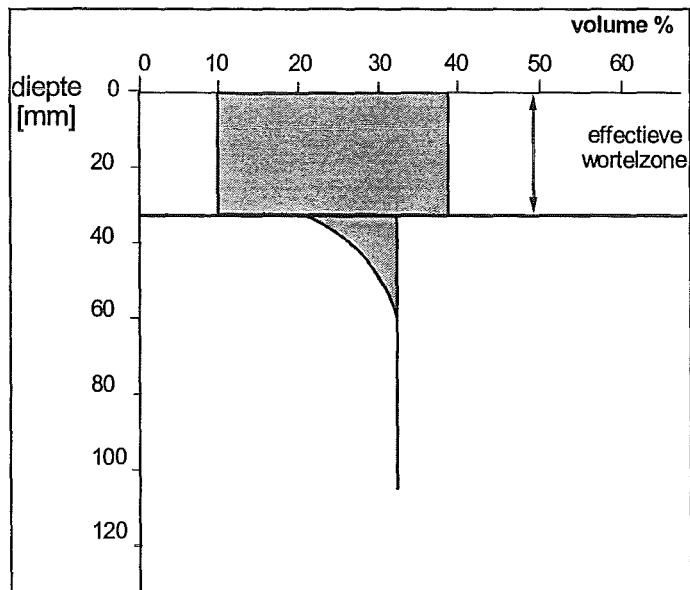
Deze gronden kunnen in het voorjaar nog profiteren van het grondwater. In de zomer daalt het grondwater echter buiten het bereik van de plantenwortels. Het verschil met de lage gronden is dat het grondwaterniveau niet alleen daalt als gevolg van de capillaire opstijging maar ook door ondergrondse afstroming naar lager gelegen gebieden (basisafvoer). In de winterperiode zal eerst de berging in de grond worden aangevuld. Daarna zullen sloten pas water gaan afvoeren. Het ontwateringssysteem is hierdoor ook minder intensief dan bij de lage gronden.



**Figuur 2.29: Beschikbare hoeveelheid vocht bij middelhoge gronden (voorbeeld)**

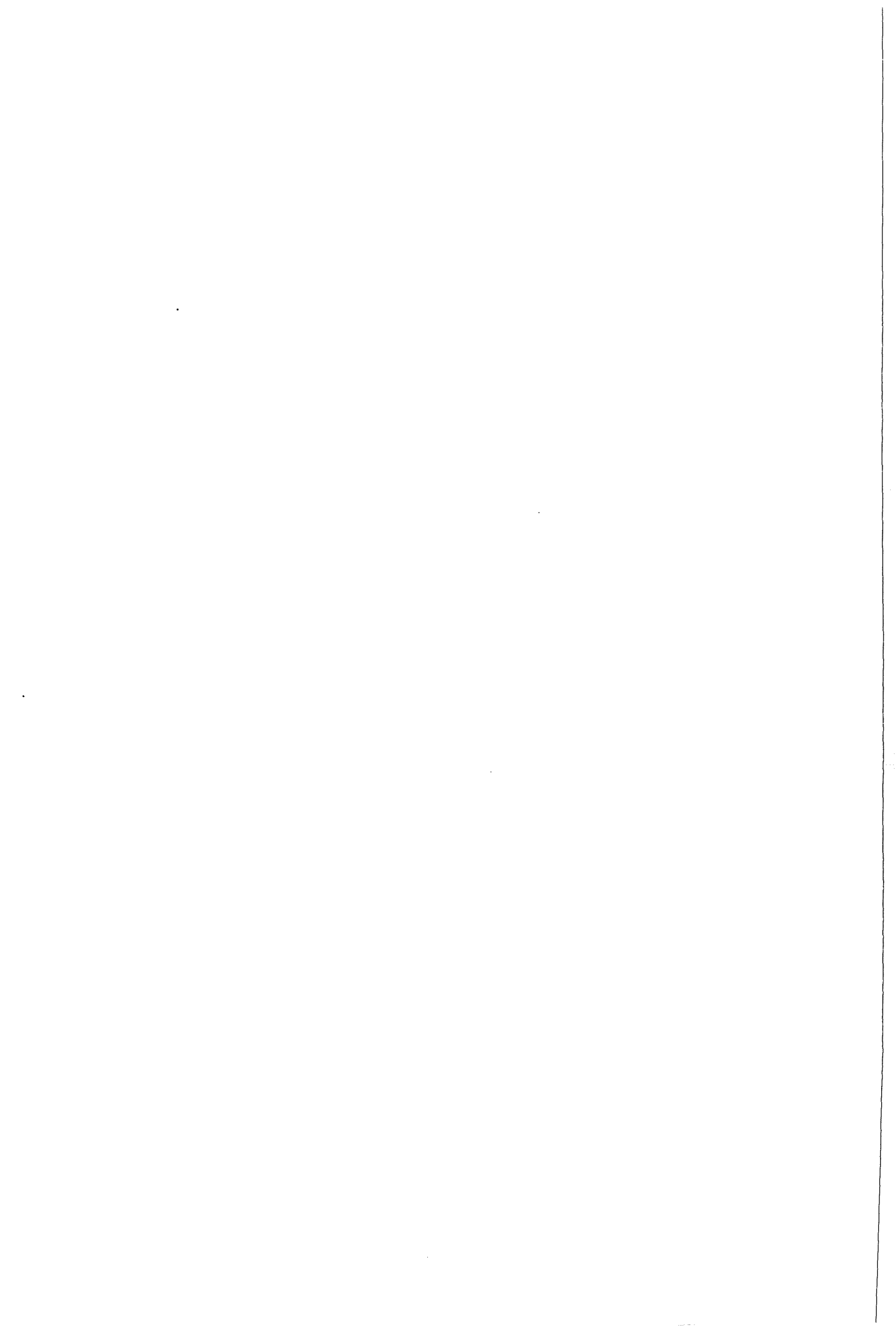
### Hoge gronden

Deze gronden zijn zodanig hoog gelegen ten opzichte van het grondwaterniveau, dat de wortelzone hiervan gedurende het groeiseizoen geen invloed ondervindt. Er wordt dan vaak gesproken van een hangwaterprofiel. In de hoge gronden is ontwatering zelden noodzakelijk. Men vindt er dan ook geen sloten. Het waterbergend vermogen van de grond tussen grondwaterstand en maaiveld is zeer hoog. Afvoer vindt vrijwel constant het gehele jaar door plaats naar lager gelegen gebieden. Soms kunnen zowel bij de middelhoge als hoge gronden tijdelijk hoge waterstanden voorkomen. Dit zijn dan meestal schijngrondwaterstanden als gevolg van zeer slecht doorlatende keilemlagen op geringe diepte. Soms kan hiervan in het voorjaar tijdelijk gebruik worden gemaakt.



**Figuur 2.30: Beschikbare hoeveelheid vocht bij hoge gronden**



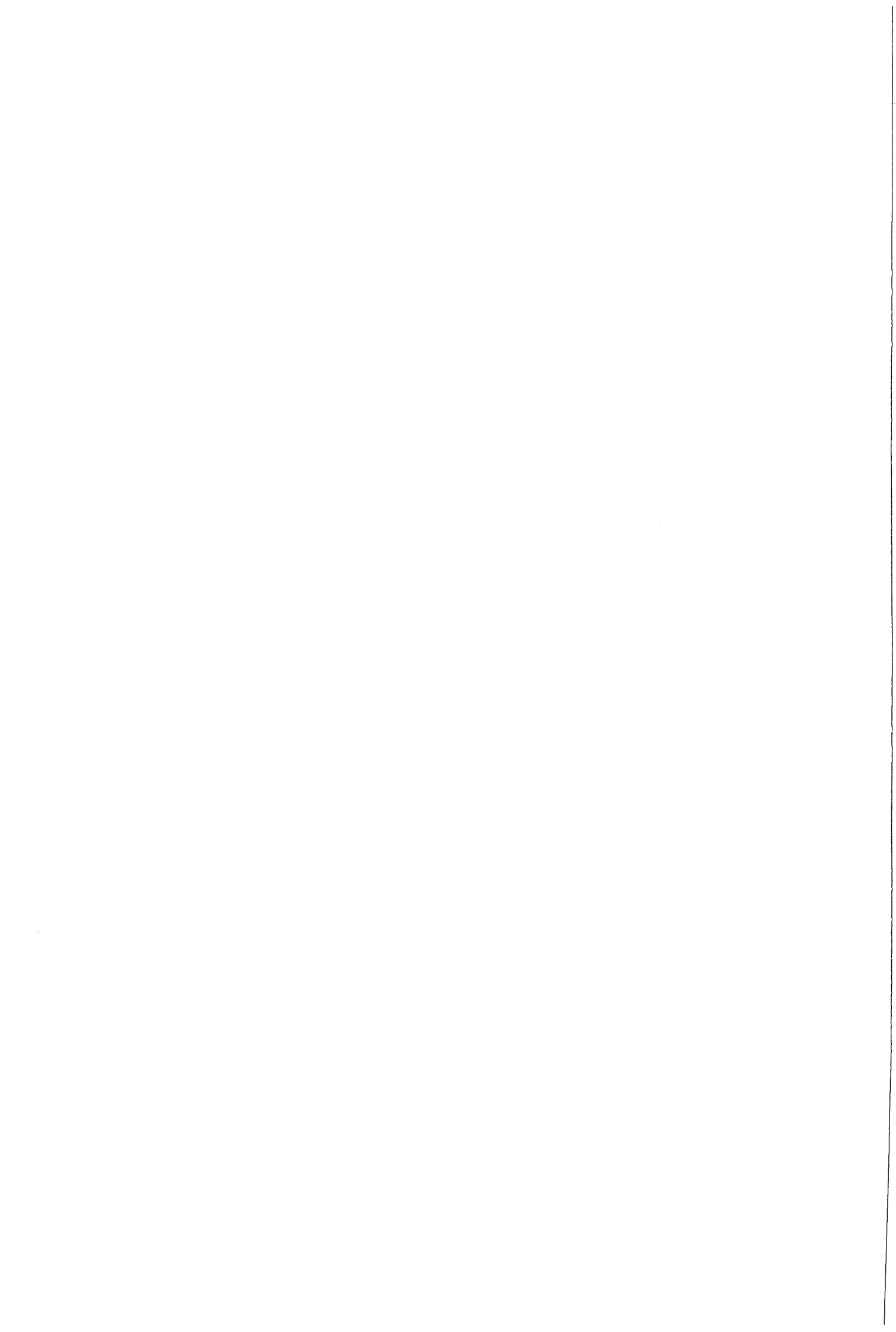


## Hoofdstuk 3      Ontwatering

### *Leerdoelen*

Na bestudering van dit hoofdstuk moet u inzicht in en kennis hebben van:

- de noodzaak van ontwatering
- de beginselen van ontwatering, bovengronds en ondergronds;
- enkele ontwateringsmiddelen en hun toepassing;
- enkele stationaire en niet-stationaire drainagevergelijkingen en de mogelijkheid deze toe te passen op bodems met verschillende grondsoorten



## 3 ONTWERING

### 3.1 Inleiding en begrippen

Ontwatering is de afvoer van water uit de grond en de afvoer van water dat op het maaiveld in de vorm van plassen aanwezig is. Het doel van het ontwateringssysteem is het voorkomen van een overmaat aan vocht in de bodem. In landelijke gebieden moet de hoeveelheid vocht in de wortelzone beperkt zijn ten behoeve van de groei van de plant, de bewerkbaarheid van de bodem en de beheersing van het zoutgehalte in de bodem. In stedelijke gebieden moet de hoeveelheid vocht in de bodem beperkt zijn om de begaanbaarheid te waarborgen en schade aan gebouwen en leidingen te voorkomen. In dit hoofdstuk zullen enkele types ontwateringsystemen, ontwateringsmiddelen en de ontwerpcriteria voor de ontwatering worden besproken.

De techniek van ontwatering van stedelijke en landelijke gebieden lijkt erg op elkaar. Omdat de drainagetechniek in stedelijke gebieden later op gang kwam dan die in landelijke gebieden, is deze vanuit de landbouw ontwikkeld. In grote delen van de wereld wordt de grondwaterstand beheerd door een min of meer dicht stelsel van sloten. In veel gebieden zijn of worden veel van deze stelsels vervangen door drains. Het woord "drain" heeft in de Engelse taal een ruimere betekenis dan in het Nederlands. Er kan zowel een ontwaterings- als afwateringsmiddel mee worden aangeduid. Wanneer echt een drainbuis wordt bedoeld, wordt vaak het woord pipedrain gebruikt. Naast ontwatering kunnen ook door het opheven van het maaiveld natte gronden droog worden gemaakt.

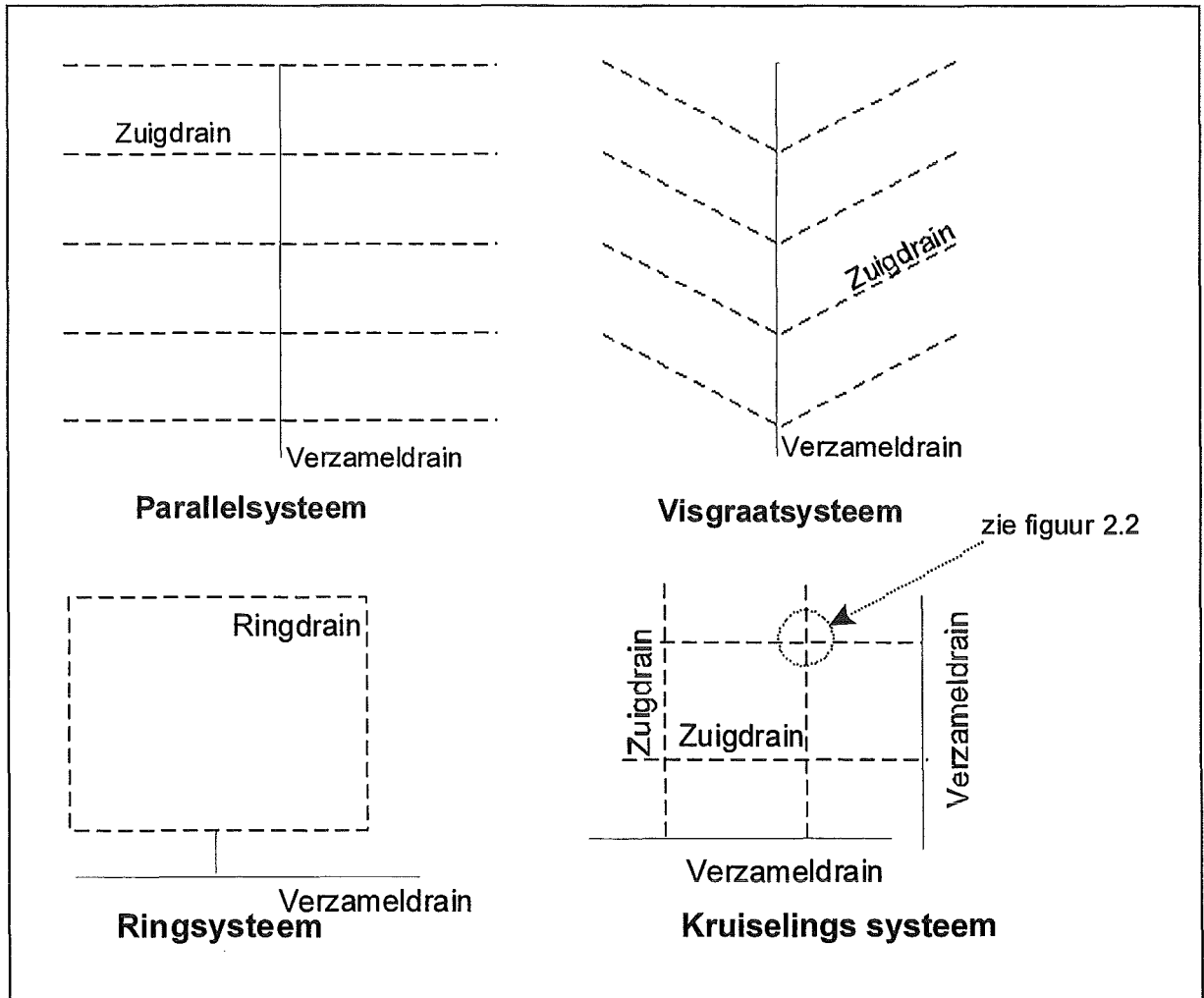
Afhankelijk van het type ontwateringsmiddel is een drainagesysteem of een open systeem of een gesloten systeem. Open systemen bestaan uit open waterlopen, zoals greppels, sloten en tochten. Gesloten systemen bestaan uit ondergrondse pijpen.

Drainagesystemen kunnen ook worden onderverdeeld naar hun lay-out. Veel gebruikte systemen zijn (figuur 3.1):

- enkelvoudige systemen;
- samengestelde systemen;
- ringsystemen (bouwblokdrainage);
- kruiselingse systemen.

Bij een enkelvoudig systeem mondt elke drain uit in een open sloot. Bij een samengesteld systeem mondt de drain uit in een verzameldrain en deze misschien weer in een nog grotere verzameldrain. In Nederland worden in de landbouw meestal het enkelvoudige systeem toegepast, in irrigatiegebieden en stedelijke gebieden worden vaak samengestelde systemen toegepast. De keuze voor het ene of andere systeem hangt van veel factoren af:

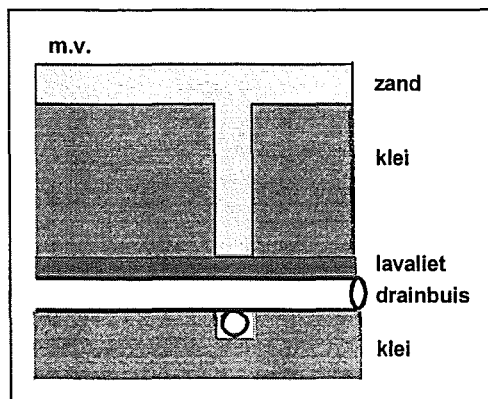
- met een samengesteld systeem kan zonder sloten een groot gebied worden gedraineerd, dit beperkt het landverlies;
- de aanlegkosten van een verzameldrain zijn in de regel hoger dan die van verzamelsloten. Bij verzamelsloten is het onderhoud kostbaarder. De algemene indruk bestaat dat samengestelde systemen op den duur goedkoper zijn dan enkelvoudige systemen;
- open sloten kunnen ook dienst doen als oppervlakteontwatering.
- een verzamelbuis vereist een groter verhang dan een verzamelsloot. Een samengesteld systeem vereist daarom een vrij groot beschikbaar verval. Dit geeft problemen in laag en vlak gelegen gebieden. Hoe groter echter de helling van het gebied hoe groter het gebied dat met een samengesteld systeem kan worden ontwaterd.



**Figuur 3.1: Patronen van samengestelde drainagesystemen**

Bij samengestelde systemen kan onderscheid worden gemaakt tussen verschillende niveaus van drains (figuur 3.1):

- tertiaire drains (greppels of zuigdrains);
- secundaire waterlopen (kavel- en wegsloten of verzameldrains);
- primaire waterlopen (tochten of hoofddrains).



**Figuur 3.2: Kruising drains**

Tertiaire waterlopen en zuigdrains zijn meestal evenwijdige ontwateringsmiddelen die dienen om de grondwaterstand te beheersen. Het water wordt verzameld in de secundaire waterlopen en verzameldrains en van hieruit getransporteerd naar de primaire waterlopen respectievelijk hoofddrains. Hiermee wordt het water verder uit het gebied getransporteerd. Het onderscheid tussen de functies is niet altijd even scherp: alle zuig- en verzameldrains of tertiaire en secundaire waterlopen hebben ook een transportfunctie terwijl alle verzamel- en hoofddrains of secundaire en primaire waterlopen in zekere mate ook de grondwaterstand beheersen.

drainage	ontwatering	De afvoer van water uit percelen over en door de grond en eventueel door drainbuizen en greppels naar een stelsel van groter waterlopen.
trench, grip, furrow	greppel	Ondiepe geeraven geul voor waterafvoer vanuit de kavel naar de sloot
field lateral (field drain)	zuigdrain	
collector drain	verzameldrain	
main drain	hoofddrain	
singular system	enkelvoudig systeem	
composite system	samengesteld systeem	

### 3.2 Ontwateringsmiddelen

Voor de ontwatering via de ondergrond kunnen de volgende ontwateringsmiddelen worden gebruikt:

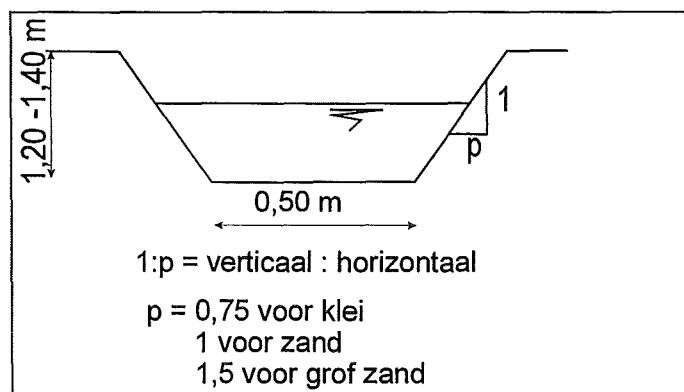
- sloten;
- moldrains;
- drainbuizen;
- verticale drainage (zandpalen, grindpalen, kunstofdrains);
- horizontale bronbemaling;
- verticale bronbemaling.

Sloten, moldrains en drainbuizen zullen hier worden besproken. Voor de andere ontwateringsmiddelen wordt verwezen naar het college *Waterbeheersing in de stad* (LW5510).

#### Sloten

Onder sloten worden in dit dictaat ook greppels en voren verstaan. Greppels zijn kleine sloten waar niet permanent water in staat. Sloten en greppels hebben een scherpe overgang van het talud naar het maaiveld en kunnen door machines alleen worden gepasseerd over de dammen. Voren zijn ondiepe sleuven met taluds onder een helling van ongeveer 1 : 10, die door machines kunnen worden gepasseerd. Greppels en voren worden vaak toegepast voor oppervlakteontwatering.

Sloten en greppels worden toegepast bij grotere slootafstanden waarbij de grond over grote diepte goed doorlatend is; in gebieden met een grote oppervlakteafvoer ten gevolge van een lage infiltratiecapaciteit of hoge neerslagintensiteit; in pas drooggelegde gronden ter versnelling van de rijping; en als ondiepe grondwaterspiegel gewenst is (grasland op veengronden). De afmetingen van ontwateringssloten zijn vaak zo klein dat minimum afmeting voor aanleg en onderhoud maatgevend zijn. In Nederland worden vaak de afmetingen aangehouden, die in figuur 3.3 zijn vermeld.



**Figuur 3.3: Afmetingen van sloten**

Voordelen van sloten ten behoeve van de ontwatering zijn:

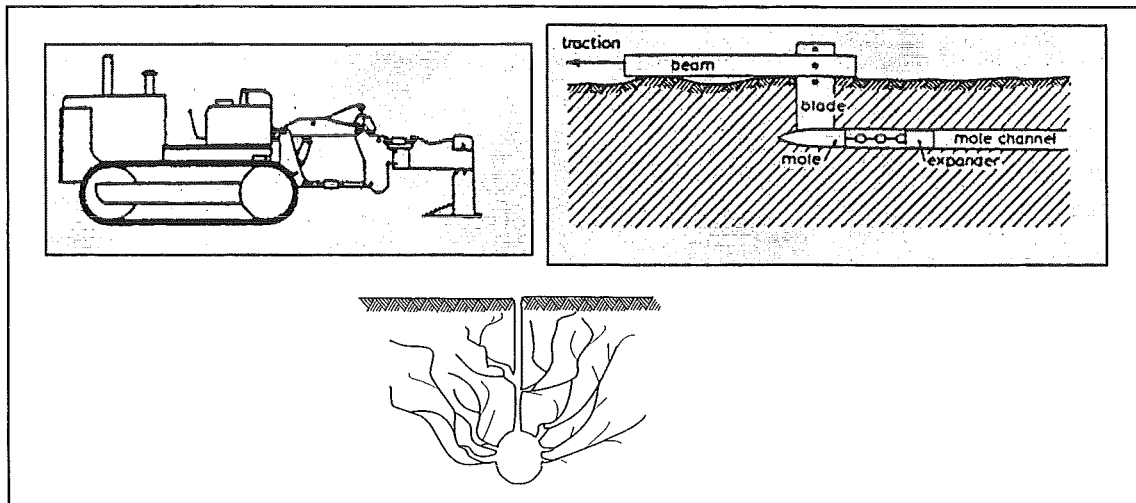
- sloten zijn geschikt voor zowel grondwater- als oppervlaktewaterafvoer;
- sloten vereisen een kleiner verhang dan buizen;
- sloten zijn gemakkelijk te inspecteren.

Nadelen van sloten en greppels zijn:

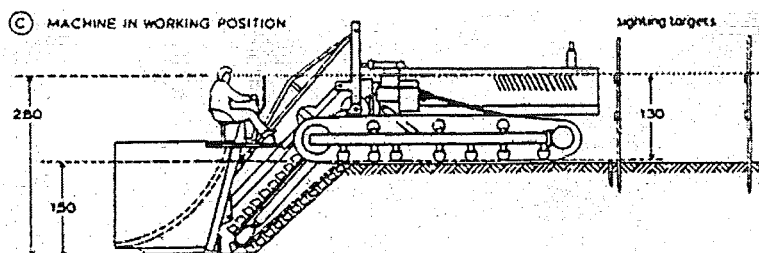
- de aanleg van sloten heeft een verlies aan grond tot gevolg (5-12%);
- sloten vereisen onderhoud om onkruidgroei en erosie tegen te gaan.

### Moldrains

Een moldrain wordt gemaakt door met behulp van een zogenaamde molploeg een kogel door de grond te trekken. Hierdoor ontstaat een natuurlijke "buis" in de grond. Moldrains worden meestal gebruikt om het maaiveld en de toplaag van de bodem van slecht doorlatende gronden met een schijngrondwaterspiegel te ontwateren (oppervlakteontwatering). Gezien de beperkte reikdiepte (60-75 cm) van molploegen zijn moldrains minder geschikt voor de beheersing van de grondwaterstand. Het water bereikt de molsgang door de scheuren en spleten die ontstaan zijn bij het trekken van de mol.



Figuur 3.4: Moldrainage



Figuur 3.5: Buizendrainage

Moldrainage is vooral geschikt bij vaste veengronden en zware, slecht doorlatende kleigronden. In Nederland wordt moldrainage slechts op bescheiden schaal toegepast op zware komkleigronden. In Engeland, Nieuw-Zeeland en Australië wordt moldrainage op grote schaal toegepast. Het voordeel van de moldrainage is dat het goedkoop is. Nadeel is de korte levensduur van moldrains.

### Drainagemateriaal

De allereerste drainbuizen bestonden uit sleuven gevuld met sintels, takkenbossen en stenen. In Engeland heten de drains nog steeds tiles, omdat daar 100 jaar geleden de eerste drainbuis werd gemaakt door 2 gebogen dakpannen (tiles) op elkaar te leggen. In Nederland was de eerste drain een rechte gebakken aardens buis van ca 30 cm lengte en een diameter van 5-15 cm. Later werd deze verbeterd, door er een kraag aan te maken. Als de grond niet te zuur was, werden ook wel betonnen buizen toegepast (de NS. voor de drainering van zandbanen).

Gebakken buizen hebben een lange levensduur. Er zijn voorbeelden bekend van 120 jaar oude buizen, die nog steeds dienst doen. Zij zijn echter duur. Soms laat de kwaliteit te wensen over, omdat de uiteinden niet recht zijn, de buizen niet recht zijn of krimpscheuren aanwezig zijn.

Tegenwoordig worden vrijwel uitsluitend kunststof drains toegepast. Bij de eerste proeven daarmee in Nederland, in de Bathpolder, werd een buis, vervaardigd uit polyetheen vanaf een haspel met behulp van een molploeg in de grond getrokken. Het water treedt bij een dergelijke drainage de buis binnen door perforatieopeningen of perforatiesleuven. Bij toepassing van het hardere, doch goedkopere polyvinyl (P.V.C.) is deze werkwijze niet mogelijk. De buis moet wegens zijn stugheid in een van te voren gegraven sleuf worden gelegd. ook kan een strip van P.V.C. vanaf een haspel via een mes van een molploeg in de grond worden geleid en door een op het mes bevestigd vormelement tot een buis worden vervormd. Het water kan de buis binnentreden door perforatieopeningen of langs de overlappende naad, die tijdens het vervormen van de strip tot buis is ontstaan. Van recentere datum zijn de ribbelbuizen van hard P.V.C. Zij zijn mechanisch sterker dan de gladde P.V.C. buizen, doch zijn hydraulisch ongunstiger. Het water kan door gaatjes tussen de ribbels binnentreden.

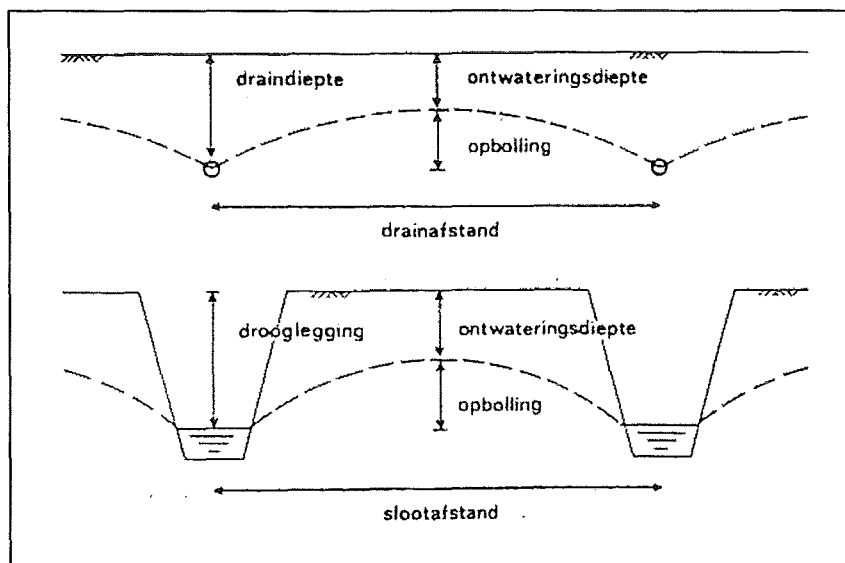
Ribbelbuizen kunnen vanaf haspels worden afgerold en zijn daardoor gemakkelijk mechanisch te verwerken.

### Diepteligging

In theorie geldt: hoe dieper de drains hoe groter de onderlinge afstand kan zijn. Er zijn echter vaak beperkende factoren:

- de waterstand in de verzamelsloot
- de aanwezigheid van minder geschikte grond op grotere diepte
- toename van kwelstroming
- uitvoeringsmogelijkheden van machines

In aride gebieden legt men de drains vaak dieper (ca. 2 m) dan in humide gebieden (Nederland meestal ca 1 m). In stedelijke gebieden kiest men o.a. ter voorkoming van beschadiging meestal voor een diepte van ca 2 m.



Figuur 3.6: De ontwateringsdiepte



**Helling**

De drains worden in vlakke gebieden meestal onder een helling gelegd van 0,5-2 ‰. Hierdoor treedt een grotere snelheid van het water op bij niet gevulde drainbuizen, waardoor minder bezinking plaatsvindt. Soms ook worden drains horizontaal gelegd, wat het voordeel biedt dat men in de zomer water via de drains kan infiltreren. In gebieden met gevaar voor ijzerafzettingen in de drainbuis, wordt deze zelfs wel met een negatieve helling gelegd met de uitmonding onder water.

**Lengte**

De lengte van de drain wordt vooral bepaald door de onderhoudsmogelijkheden ervan en de afvoercapaciteit van de buis (200-500 m).

**Afstand**

Voor de bepaling van de afstand tussen drainbuizen wordt verwezen naar par. 3.5.

**Diameter**

De benodigde diameter van de drain kan worden berekend als aangegeven in par. 3.5.

**Omhuilingsmaterialen**

Bij de aanleg van een drainagesysteem wordt in veel gevallen op of rond de drainbuizen een goed doorlatend materiaal aangebracht. De reden daarvoor is drieërlei:

- het materiaal heeft als filter een beschermende functie tegen in spoeling van zand en slib in de buis
- het materiaal biedt bescherming tegen stuk gaan van de draineerbuizen door in de sleuf vallende stenen.
- het materiaal vergroot het oppervlak waar doorheen toestroming van het grondwater door de drainbuis plaats heeft; de weerstand die het water in de omgeving van de drain moet overwinnen om door te dringen in de buis, de intreeweerstand, wordt hierdoor verkleind.

In Nederland wordt de meeste nadruk gelegd op de verlaging van de intreeweerstand.

De volgende afdekkingsmaterialen worden toegepast en/of beproefd: turfmolm, heide, riet, stro, vlas, houtkrullen, styromull, grasvlies, glaswol, lavaliet, grind, grof zand, en vele soorten synthetisch vilt. Er is veel onderzoek gedaan om inzicht te krijgen in de grootte van de intreeweersstanden bij de verschillende combinaties van drainbuizen en afdekkingsmaterialen.

Uit onderzoekingen blijkt:

- binnen één buissoort is de intreeweerstand lager naarmate volumineuzere afdekkingsmaterialen worden toegepast
- de intreeweerstand is lager naarmate de som van de diameter van buis en afdekkingsmateriaal groter is
- de doorlatendheid van de grond in de drainsleuf is van grote invloed op de grootte van de intreeweerstand

Voor de toepassingsmogelijkheden van drainagematerialen zie tabel 3.1.

**Tabel 3.1 Toepassingsmogelijkheden van drainagematerialen**

	<b>Grondsoort</b>	<b>Buismateriaal</b>	<b>Filtermateriaal</b>	
I	Klei en zware zavel	Geribbelde kunststof buis of gebakken kraagloze buis bij te verwachten onregelmatige inklinking of wanneer met onervaren personeel moet worden gewerkt verdienen kraagbuizen voorkeur boven kraagloze buizenheden	Geen filtermateriaal nodig	De drainsleuven worden opgevuld met goed gerijpte grond.
II	Klei op zware zavel op zand (zand op drainniveau)	Geribbelde kunststof buis of gebakken kraagloze buis (zie verder bij I)	Turfmolm (kwaliteit drainageturf), kokosband, vlasband of synthetisch vilt.	De drainsleuven worden opgevuld met goed gerijpte grond.
III	Lichte zavel	Als II	Als II	Als II
IV <sup>a</sup>	Zand (drainage boven de grondwaterstand)	Geribbelde kunststof buis of gebakken kraagbuis (zie verder bij I)	Turfmolm (kwaliteit drainageturf), kokosband, vlasband of synthetisch vilt.	
IV <sup>b</sup>	Zand (drainage beneden de grondwaterstand, loopzand)	Geribbelde kunststof buis	Kokosomhulling evt. krammatomhulling of synthetisch vilt	
IV <sup>c</sup>	Zand (infiltratie)	Geribbelde kunststof buis evt. gebakken kraagbuizen	Kokosomhulling evt. kokosband. Heide met laagje stro of synthetisch vilt	Bij toepassing met heide moet de drainsleuf minimaal 25 cm breed zijn
V	Met zand opgehoogde bouwpercelen	Geribbelde kunststof buis	Lavaliet, fijn grind, evt. kokosomhulling.	
VI	Veen	Geribbelde kunststof buis of gebakken kraagbuis	Turfmolm (kwaliteit drainageturf), kokosband, vlasband of synthetisch vilt.	

**Aanbrengen van drainage**

Vroeger gebeurde de aanleg van drainage alleen met de hand. Nu zijn er speciale draineermachines die wel tot ca. 5 m diepte drainbuis leggen onder de gewenste helling (figuur 3.5). Jaarlijks worden in Nederland ongeveer 15.000 km drain gelegd, waarvan zo'n 90% met P.V.C.-ribbelbuis.

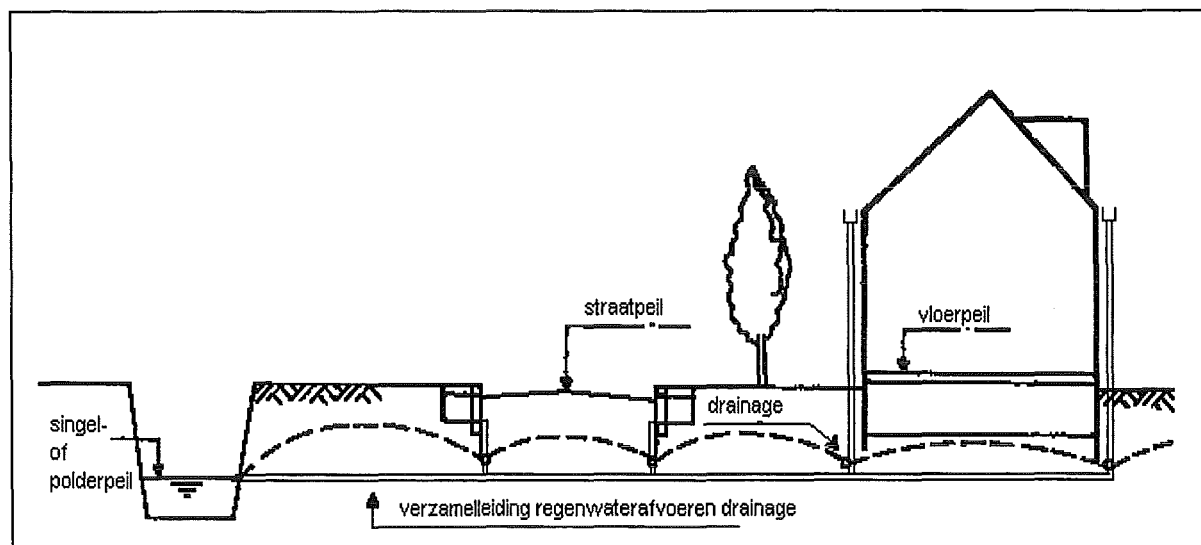
### 3.3 Doelstellingen voor ondergrondse ontwatering

Hoge grondwaterstanden hebben vervelende gevolgen voor verschillend grondgebruik. Bij het ontwerp van een ontwateringssysteem zal men zich moeten afvragen met welke kans van optreden een bepaalde grondwaterstand gedurende hoeveel dagen nog acceptabel is. De formulering van deze eis noemt men het drainagecriterium. De keuze van het drainagecriterium hangt van tal van omstandigheden af:

- hydrologische omstandigheden: hoeveel water moet in een bepaalde tijd worden afgevoerd.
- landbouwkundige omstandigheden: hoeveel water mag gedurende een bepaalde tijd in de wortelzone aanwezig zijn (afhankelijk van het soort gewas, de grondsoort en type landbouwbedrijf).
- bodemkundige omstandigheden: deze bepalen de relatie tussen vochtgehalte en beluchting, grondwaterstand en bodemvochtgehalte én grondwaterstand en capillaire opstijging.
- economische omstandigheden: de verhouding tussen de kosten en de baten. De kosten van aanleg en onderhoud; de baten van de verminderde opbrengst-depressies.

De complexe invloeden van en de verbanden tussen al deze omstandigheden maken dat het drainagecriterium als niet meer moet worden gezien dan een poging, om gebaseerd op empirische en theoretische kennis, de eisen uit te drukken in een standaardformulering. Drainagecriteria zijn dan ook vaak empirisch afgeleid uit veldonderzoeken of door gebruik te maken van bestaande ervaring.

Bij de formulering van drainagecriteria kan onderscheid worden gemaakt tussen stationaire en niet-stationaire drainagetoestanden. In werkelijkheid is de afvoer een niet-stationair verschijnsel, waarbij berging in de grond optreedt, in de praktijk blijken stationaire criteria in veel gevallen te voldoen. Een stationair drainagecriterium bestaat uit een ontwateringsdiepte (afstand tussen het maaiveld en het hoogst toelaatbare grondwaterspiegel) en een maatgevende afvoer.



**Figuur 3.7 Stedelijk ontwateringssysteem (met gescheiden rioolstelsel)**

De maatgevende afvoer is te vergelijken met de "ontwerpbelasting". Een niet-stationaire eis bestaande uit een ontwateringsdiepte, een maatgevende afvoer en een drainagetijd (de periode waarbinnen de droogleggingseis moet worden bereikt). Tabel 3.2 geeft voorbeelden van stationaire drainage criteria voor Nederlandse omstandigheden.

**Tabel 3.2: Veel gebruikte stationaire drainagecriteria in stedelijke en landelijke gebieden**

activiteit/bestemming	ontwateringsdiepte [m]	ontwerpafvoer [mm/etm]
<b>stedelijke gebieden</b>		
bouwfase	0,70 -0,80	10
woonfase (met kruipruimte)	0,70	5
woonfase (zonder kruipruimte)	0,50	5
stedelijk groen	0,50	7
kampeertreinen	0,50	10
begraafplaatsen	0,30 beneden onderkant kist	10
sportvelden	0,50	15
<b>landelijke gebieden</b>		
bouwland	0,50	7
grasland	0,20	10

De keuze van het drainagecriterium hangt af van het bodemgebruik, klimaat, hydrologische factoren, topografie en bodemeigenschappen. Het vaststellen van een drainagecriterium is een economische beslissing, waarbij kosten van het drainagestelsel en de schade en het ongemak door hoge grondwaterstand worden afgewogen.

In stedelijke gebieden zijn er een aantal redenen waarom de grondwaterstand moet worden beheerst. Er kan onderscheid worden gemaakt tussen de bouwfase in een stedelijk gebied en de woon- of gebruiksfase.

Voordat de bouwwerkzaamheden beginnen versnelt een goede ontwatering de zetting van de ondergrond, die optreedt als gevolg van het gewicht van opgespoten zand of opgebrachte grond, zodat er eerder een goed ontwaterd, draagkrachtig bouwterrein ontstaat. Tijdens de bouwwerkzaamheden moet geen hinder ondervonden worden van een hoge grondwaterstand. Werkzaamheden in bouwputten moeten in de droge kunnen worden uitgevoerd. Kabels en leidingen moeten in de droge worden aangelegd. Bouwterreinen moeten goed begaanbaar zijn en zo mogelijk toegankelijk voor zwaar materieel.

In de gebruiksfase kunnen gebouwen, woningen en bouwwerken op verschillende manieren schade ondervinden van te hoge grondwaterstanden. Via kruipruimtes en funderingsconstructies kan vocht optrekken binnen in de woningen en vochtverlast veroorzaken. Wisselende grondwaterstanden kunnen verschillende zettingen in de ondergrond veroorzaken, waardoor gebouwen verzakken. Bij hoge grondwaterstanden kunnen constructies gaan opdrijven. Ook voor de begaanbaarheid in de gebruiksfase dient de grondwaterstand niet te hoog te zijn. Voor het openbaar groen is drainage vaak onontbeerlijk. Te hoge grondwaterstanden leiden niet alleen tot het afsterven van groen, maar bijvoorbeeld ook tot het omwaaien van bomen. Voor speelvelden, zandbakken en andere recreatie-terreinen is een droge ondergrond een noodzaak.

In landelijke gebieden moet bij het vaststellen van het drainagecriterium vooral worden gelet op het doel waarvoor gedraineerd wordt. Naast de al genoemde begaanbaarheid moet groei van het gewas worden beschermd (gewasdrainage) en het zoutgehalte worden gecontroleerd (zoutdrainage). Gewasdrainage is noodzakelijk wanneer er een neerslagoverschot is in het groeiseizoen. In de natte tropen is gewasdrainage van evident belang. Een veel gebruikt (stationair) drainagecriterium in de tropen is een afvoer van 10 mm/etm bij een grondwaterstand van 1 m beneden maaiveld. Ook voor de Nederlandse situatie is gewasdrainage van belang, vooral in de groeifase van het gewas (voorjaar). Alleen bij voldoende beluchting, en dus bij lage grondwaterstanden, zal het wortelstelsel van de plant tot volle ontwikkeling komen. Het drainagecriterium dat voor deze omstandigheden wordt gesteld is veelal niet-stationair: een daling van de grondwaterspiegel in korte tijd tot onder de bewortelingszone van het gewas.

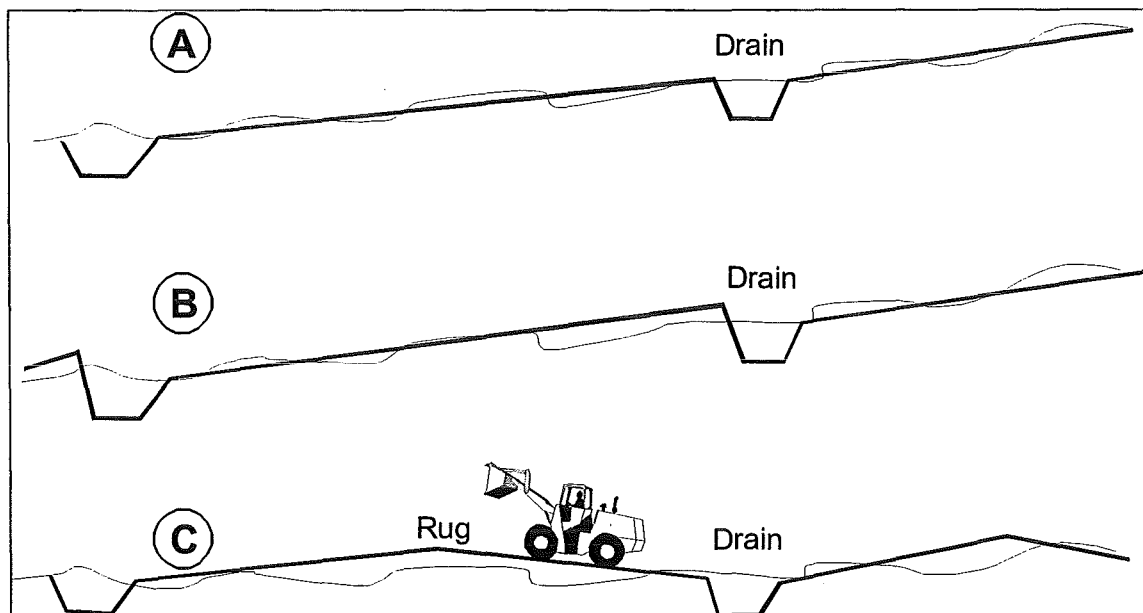
Zoutdrainage is noodzakelijk in aride gebieden waar zowel in als buiten het groeiseizoen een neerslagtekort is en waar regelmatig wordt geïrrigeerd. Ontwatering is nodig voor de afvoer van (onvermijdelijke) percolatieverliezen en voor de afvoer van zouten uit de wortelzone.

### 3.4 Oppervlakte ontwatering

Neerslag kan niet via de bodem worden afgevoerd, wanneer de bodem een lage infiltratiecapaciteit heeft ten opzichte van de neerslagintensiteit. De lage infiltratiecapaciteit zal in stedelijke gebieden vaak het gevolg zijn van de verharding van een groot percentage van het oppervlak. Water zal in deze omstandigheden op het maaiveld blijven staan of over de oppervlakte worden afgevoerd. Optimaal gebruik van dit soort gebieden zal in veel gevallen oppervlakteontwatering vereisen.

In hellende gebieden wordt oppervlakteontwatering toegepast om erosie tegen te gaan. De bekendste methode in de landbouw is het toepassen van greppels en voren. Om het water naar de greppels of voren langs de oppervlakte te laten stromen moet het land worden bewerkt door gladmaken of afvlakken. Het water stroomt over het bewerkte oppervlak naar de laagste punten, waar zich de voren bevinden, die het water afvoeren. Het gladmaken (smoothing) kan op eenvoudige wijze door de boer zelf worden uitgevoerd. Het afvlakken (grading) van het terrein is bewerkelijk en gebeurt met zwaar materiaal. Het land kan onder helling worden gelegd naar de voren of vanuit het midden hellend naar de voren (figuur 3.6). Boeren zullen meestal egaliseren, waarbij de laagste delen worden verbonden voor de afvoer van het water.

Deze oplossingen zijn oorspronkelijk ontwikkeld om te voorkomen, dat het regenwater te snel langs de oppervlakte afstroomt waardoor men erosie krijgt. In flauw hellend terrein met hellingen tot 2% worden vaak bolle akkers toegepast met breedten van 0 tot 30 m, evenwijdig aan de hoogtelijnen. Het ploegen gebeurt evenwijdig aan de hoogtelijnen. De akkers hebben lengten van 100-300 m en worden aan de kopeinden begrensd door voren die het water naar de sloot leiden. In sterk hellende terreinen worden terrassen aangelegd om de afvoer van het water te vertragen en tevens om water vast te houden. De terrassen liggen vlak en de sloten hebben geen verhang. Dit wordt bijvoorbeeld toegepast bij de rijst sawa's in Azië. Wanneer de terrassen alleen dienen ter bestrijding van erosie, worden ze vaak iets hellend gelegd, tegengesteld aan het verhang. De geulen, die hierdoor ontstaan krijgen een helling van 0,1 tot 0,6% om het water af te voeren.



Figuur 3.8: Drie manieren voor het egaliseren en afvlakken van hellend gebied

### 3.5 Ontwerp van ontwatering

#### 3.5.1 Inleiding

Bij het ontwerp van ontwatering moeten de volgende onderdelen worden bepaald:

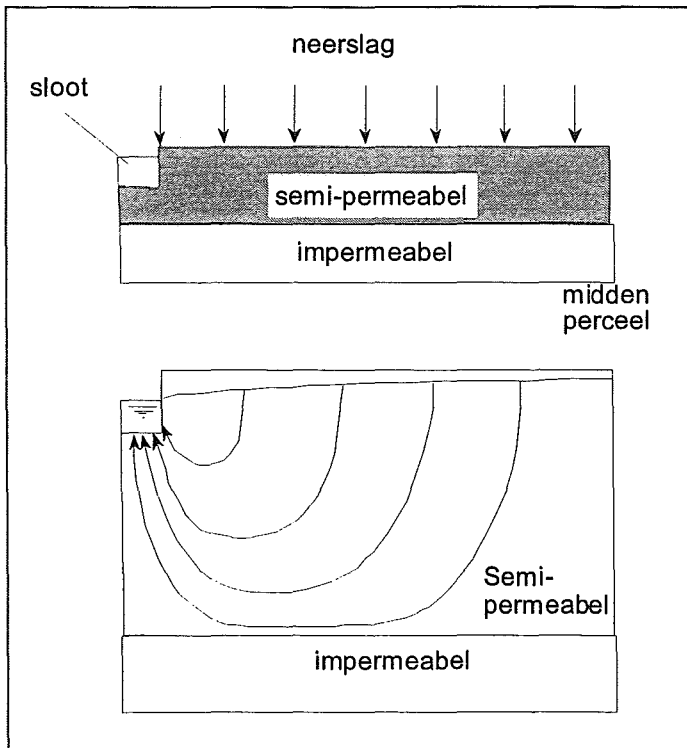
- de afstand tussen de ontwateringsmiddelen;
- de diepte van ontwateringsmiddelen;
- de buisdiameter of het slootprofiel.

Voor de berekening van deze variabelen zijn formules afgeleid. Drainageformules zijn gebaseerd op de aanname dat de stroming 2-dimensionaal is. Dit wil zeggen dat de stroming in elke dwarsdoorsnede loodrecht op de ontwateringsmiddelen gelijk is en dat de aanvoer van water is gelijkmatig verdeeld over het gehele oppervlak tussen de drains. Deze aanname geldt in feite alleen voor oneindig lange drains en bij een oneindig aantal drainreeksen. Bovengenoemde aanname heeft tot gevolg dat de drainagevergelijkingen slechts als benaderende oplossingen mogen worden beschouwd. Gebleken is dat deze oplossingen toch een hoge mate van nauwkeurigheid hebben, waardoor de praktische toepassing ervan meestal gerechtvaardigd is. Met computermodellen kunnen ook 3-dimensionale stromingen worden gemodelleerd.

Er wordt onderscheid gemaakt tussen een stationaire en niet-stationaire drainagevergelijkingen. De stationaire formules worden afgeleid onder de aanname dat de toevoer van water even groot is als de afvoer, zodat de grondwaterstand constant blijft. De niet-stationaire drainageformules beschrijven de veranderingen van de grondwaterstand in de tijd onder invloed van een niet-stationaire aanvoer van water.

#### 3.5.2 Stationaire drainagevergelijkingen

Met behulp van stationaire drainagevergelijkingen kan uit een droogleggingseis en een gegeven diepte van de ontwateringsmiddelen, de afstand van de drainagemiddelen worden bepaald. De stationaire vergelijking die hier worden besproken zijn de vergelijking van Donnan (1946) en de vergelijking van Hooghoudt (1936). Beide zijn gebaseerd op vereenvoudigingen van de werkelijke grondwaterstroming (figuur 3.7) De vergelijking van Donnan vereenvoudigt de stroming in de grond tot een 1-dimensionale, horizontale stroming. Hooghoudt onderscheidt een horizontale en een radiale stroming. De vergelijking van Ernst, die rekening houdt met een horizontale, een verticale en een radiale stroming zal worden besproken in het vak *Irrigatie en drainage* (LW4410).



Figuur 3.9: De grondwaterstroming

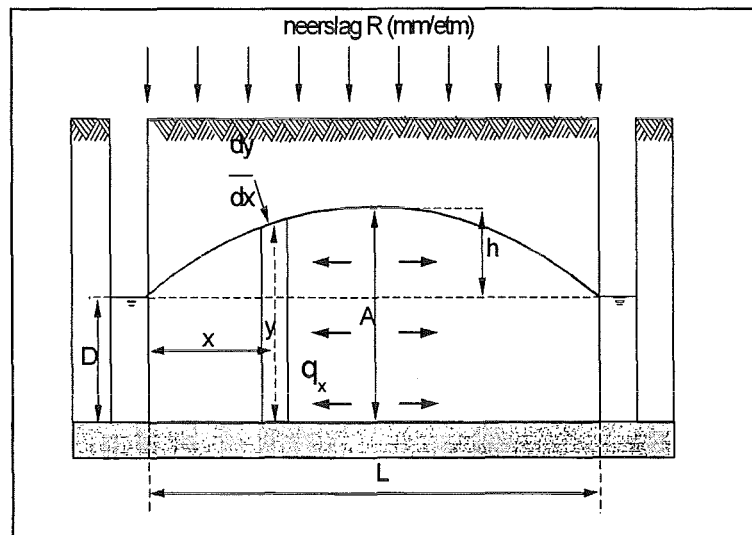
### De vergelijking van Donnan

Donnan nam aan dat vanaf de waterdoorlatende laag een 1-dimensionale, horizontale stroming plaatsvindt naar twee oneindig lange, evenwijdige sleuven, die reiken tot aan de waterdoorlatende laag. Onder deze aanname mag de wet van Darcy worden toegepast:

$$v = -k \cdot i \quad \text{Darcy (3.1)}$$

waarin:  $v$  = stroomsnelheid [m/etm];  
 $k$  = doorlatendheid [m/etm];  
 $i$  = verhang [-];

De vergelijking van Donnan is gebaseerd op de aanname van Dupuit-Forchheimer, die de werkelijk optredende grondwaterstroming benaderden door een horizontale stroming. Bij vraagstukken waarbij de watervoerende laag dun is ten opzichte van de uitgestrektheid van het stromingsveld is dit een goede aanname, ligt de ondoorlatende laag echter diep dan is de stroming veel meer radiaal naar de ontwateringsmiddelen gericht en mag de vergelijking van Donnan niet worden toegepast.



**Figuur 3.10: Dwarsdoorsnede voor de afleiding van de vergelijking van Donnan**

Beschouwd wordt nu de stroming door een verticale doorsnede op een afstand  $x$  van een sloot (figuur 3.8). De afstand tot aan de freatische lijn is  $y$ , ter plaatse is het verhang van de freatische lijn  $dy/dx$ . De neerslag die valt op het gebied rechts van de doorsnede tot aan het midden tussen de sloten zal op weg naar de sloot de doorsnede passeren.

Indien  $R$  de neerslag is in m/etm, dan is de stroming per tijdseenheid per m drainlengte door de beschouwde doorsnede:

$$-q_x = R \cdot (L/2 - x) \quad (3.2)$$

Volgens de wet van Darcy geldt tevens:

$$q_x = -k \cdot y \cdot \frac{dy}{dx} \quad (3.3)$$

Gelijkstelling levert de volgende vergelijking op:

$$k \cdot y \cdot dy = R \cdot (L/2 - x) dx \quad (3.4)$$

Integratie geeft dan:

$$\frac{1}{2}ky^2 + C = -\frac{1}{2}Rx^2 + \frac{1}{2}RLx \quad (3.5)$$

Als eerste randvoorwaarde geldt:

bij  $x = 0 : y = D$ ; dus  $C = -\frac{1}{2}kD^2$ , zodat

$$k(y^2 - D^2) = -Rx^2 + RLx \quad (3.6)$$

als tweede randvoorwaarde geldt:

bij  $x = \frac{1}{2}L : y = D+h$ , zodat:

$$8kDh + 4kh^2 = RL^2 \quad (3.7)$$

Dit resulteert in:

$$L^2 = \frac{8kDh + 4kh^2}{R} \quad (3.8)$$

waarin: L = afstand tussen de sloten [m];  
 k = horizontale doorlatendheid [m/etm];  
 A = hoogte van de GWS midden tussen de sloten ten opzichte van de ondoorlatende laag [m];  
 D = hoogte van de waterstand in de sloot ten opzichte van de waterondoorlatende laag [m];  
 R = neerslag [m/etm]; = afvoer q [m/etm];  
 h = A - D = de hoogte van de opbolling van de GWS midden tussen de sloten [m].

Merk op dat bij  $D=0$  de vergelijking is te schrijven als:

$$q = R = \frac{4k_b h^2}{L^2}$$

Dit is de waterstroom boven het vlak van het oppervlaktewaterniveau. De andere term levert:

$$q = \frac{4k_0 Dh}{L^2}$$

en deze stelt dan de waterstroom beneden het vlak van de drainwaterspiegel voor.

Dit geeft de mogelijkheid om, indien er verschillende grondsoorten zijn met de scheiding op het niveau van het oppervlaktewater, voor deze twee lagen de verschillende doorlatendheidscoëfficiënten (resp.  $k_b$  en  $k_0$ ) in de vergelijking in te voeren.

De vergelijking van Donnan kan met de substitutie van  $h = A - D$  ook worden geschreven als:

$$L^2 = \frac{4k(A^2 - D^2)}{R} \quad (3.9)$$



**Opgave**

Een drainagesysteem voor een stuk bouwland moet worden aangelegd. Uit bodemonderzoek is gebleken dat er op 2,5 m meter een ondoorlatende laag aanwezig is. De horizontale doorlatendheid ( $k$ ) van de grond is 1,2 m/etm. De maatgevende constante neerslag is 0,015 m/etm.

Er is gekozen voor een open drainagesysteem met sloten die tot de ondoorlatende laag reiken. De slootafstand ( $L$ ) is 30 m. Om een eerste indruk te krijgen in het ontwateringssysteem, wordt gevraagd het slootpeil te bepalen met behulp van de vergelijking van Donnan.

**Uitwerking**

De ontwateringsdiepte voor bouwland is 0,50 m (zie tabel 3.1). De hoogte van de grondwaterstand tussen de sloten t.o.v. de waterondoorlatende laag ( $A$ ) is dus  $2,5 - 0,5 = 2,0$  m. Alle termen in de vergelijking van Donnan zijn nu bekend behalve de slootdiepte  $D$ . De termen worden ingevoerd zodat er één vergelijking met één onbekende is:

$$L^2 = 30^2 = 900 = \frac{4k(A^2 - D^2)}{R} = \frac{4 \cdot 1,2 \cdot (2^2 - D^2)}{0,015} = 1280 - 320$$

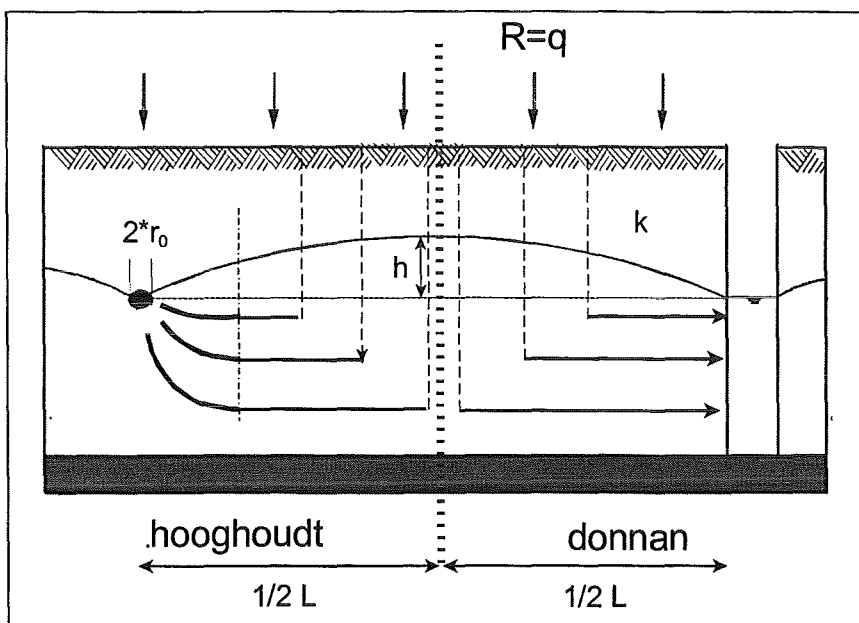
Om de gewenste ontwateringsdiepte te garanderen, blijkt het slootpeil ( $d$ ) 1,1 m boven de ondoorlatende laag te moeten liggen. Dit is  $2,5 - 1,1 = 1,4$  m -m.v.

**Voorbeeld 3.1: Vergelijking van Donnan**

### Vergelijking van Hooghoudt

Wanneer de sloten of sleuven niet tot aan de ondoorlatende laag reiken zullen de stroomlijnen niet meer evenwijdig lopen, maar convergeren (zie figuur 3.11) in de richting van de sloot of drain (radiale stroming). In dit geval kan het stromingsgebied niet meer worden vereenvoudigd tot een stroming met evenwijdige en horizontale stroomlijnen. De radiale stroming heeft een verlenging van de stroomlijnen tot gevolg en extra vervalverlies door het dicht bij elkaar komen van de stroomlijnen waardoor meer potentiaal verlies nodig is om de stroming te handhaven. Hooghoudt leidde voor het geval dat een drain ver boven de ondoorlatende laag ligt (figuur 3.10) een stromingsvergelijking af waarbij de stroom wordt verdeeld in een deel met horizontale stroming en een deel met radiale stroming.

Het dichtbij elkaar liggen van de stroomlijnen nabij de drainagebuis veroorzaakt daar een meer dan evenredig verlies aan drukhoogte, omdat de stroomsnelheid ter plaatse van het ontwateringsmiddel groter is dan elders. De verhoging van de grondwaterspiegel zal daarom groter worden als bij gelijkblijvend ontwateringsniveau de verticaal uitgegraven sleuven worden vervangen door drains of ondiepe sloten, die niet meer tot aan de waterdoorlatende laag



Figuur 3.11: Radiale en een-dimensionale benadering van stroomlijnen

Als de horizontale stroming boven de drains wordt verwaarloosd, dan kan vergelijking 3.8 worden herschreven als:

$$q = \frac{4KDh}{L^2} \quad \text{ofwel} \quad h = \frac{qL^2}{8KD} \quad (3.10)$$

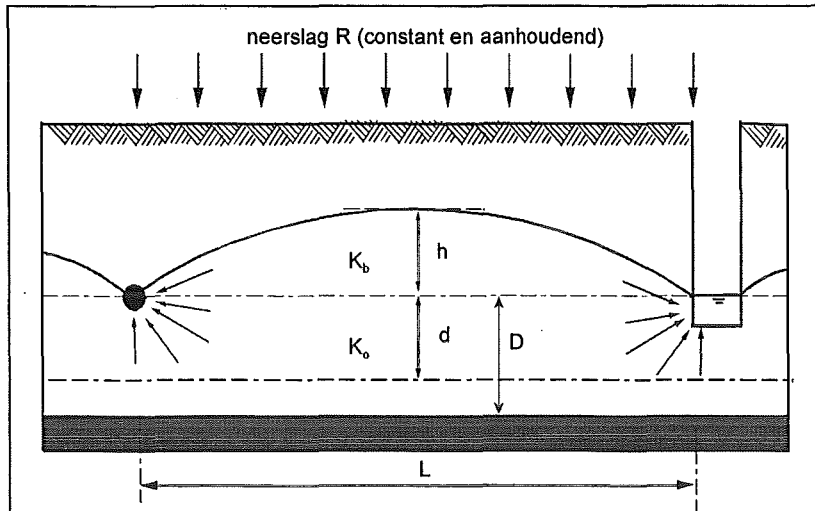
Hooghoudt stelde echter voor de situatie met radiale stroming voor:

$$h = \frac{qL}{K} * F_h \quad (3.11)$$

waarbij Hooghoudt de volgende uitdrukking voor  $F_h$  afleidde:

$$F_h = \frac{(L - D\sqrt{2})^2}{8 * D * L} + \frac{1}{\pi} \ln \frac{D}{r_0 \sqrt{2}} + f(D, L) \quad (3.12)$$

waarin:	$h$	=	hoogte van de grondwaterstand in het midden boven de drains [m];
	$q$	=	de afgevoerde water schijf (= neerslag R) [m/etm];
	$L$	=	drainafstand [m];
	$k$	=	doorlatendheid [m/etm];
	$F_h$	=	horizontale drukhoogte [m];
	$D$	=	hoogte van de waterstand in sloot / drainbuis t.o.v. de waterondoorlatende laag [m];
	$r_0$	=	straal van de drain [m].



**Figuur 3.12: Formule van Hooghoudt**

De eerste term van vergelijking 3.12 heeft betrekking op de horizontale stroming, de tweede en de derde term op de radiale stroming.  $f(D, L)$  is een functie van  $D$  en  $L$ , die in vele gevallen echter klein is in vergelijking met de andere termen van 3.12. Deze term wordt dan ook meestal verwaarloosd. In plaats van met vergelijkingen 3.11 en 3.12 te werken vond Hooghoudt dat het praktischer zou zijn als de vorm van vergelijking 3.8 gebruikt zou kunnen worden. Om de extra weerstand ten gevolge van de radiale stroming in rekening te kunnen brengen introduceerde hij een reductie van de diepte  $D$  tot een kleinere equivalente diepte  $d$ . Anders gezegd: er wordt een hypothetische ondoorlatende laag zodanig boven de werkelijke ondoorlatende laag verondersteld dat het aangenomen stromingsbeeld weer horizontaal is en de radiale weerstand is verrekend.

Om het potentiaalverlies ten gevolge van de radiale stroming in rekening te brengen moet dus bij alle voorgaande vergelijkingen  $D$  vervangen worden door  $d$ . Vergelijking 3.9 kan dan weer vervangen worden door een vergelijking in de "Donnan vorm" met  $d$  in plaats van  $D$ .

$$L^2 = \frac{8k_o \cdot d \cdot h + 4 \cdot k_b \cdot h^2}{q} \quad (3.13)$$

waarin:	$q$	=	de afgevoerde waterschijf (= neerslag R) [m/etm];
	$k_o$	=	doorlatendheid in het vlak onder de drainreeksen [m/etm];
	$k_b$	=	doorlatendheid in het vlak boven de drainreeksen [m/etm];
	$L$	=	drainafstand [m];
	$h$	=	hoogte van grondwaterstand (opbolling) in het midden boven drains [m];
	$d$	=	equivalentlaag, gerelateerd aan $D$ [m].

De waarden voor  $d$  voor diverse waarden van  $r_0$  en voor verschillende waarden van  $L$  en  $D$  zijn door Hooghoudt berekend en enkele voorbeelden zijn gegeven in de tabellen 3.3 en 3.4. Voor meer gegevens wordt verwezen naar Hooghoudt S. B., *Bijdragen tot de kennis van enige natuurlijke grootheden van de grond*, Verslagen Landbouwkundig Onderzoek no. 46(14)B, Den Haag 1940.

**Tabel 3.3: Waarden voor de equivalente diepte  $d$  [m] van Hooghoudt bij gegeven waarden van  $D$  en  $L$  en bij een  $r_0$  van 0,04 m**

D [m]	L																
	5	7,5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	75	100	150	200	250	300
0.5	0.39	0.42	0.44	0.46	0.47	0.48	0.48	0.48	0.48	0.49	0.49	0.49	0.49	0.50	0.50	0.50	0.50
0.75	0.47	0.53	0.58	0.64	0.67	0.69	0.70	0.71	0.72	0.73	0.74						
1.00	0.52	0.61	0.68	0.76	0.81	0.84	0.87	0.88	0.89	0.90	0.91	0.94	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99
1.25	0.53	0.66	0.74	0.87	0.94	1.00	1.05	1.07	1.09	1.10	1.11						
1.50		0.69	0.80	0.95	1.05	1.13	1.18	1.22	1.24	1.26	1.27						
1.75		0.71	0.84	1.02	1.14	1.23	1.30	1.34	1.38	1.42	1.45						
2.00			0.87	1.07	1.21	1.31	1.40	1.46	1.51	1.55	1.59	1.76	1.77	1.84	1.88	1.90	1.92
2.25			0.89	1.11	1.27	1.39	1.50	1.57	1.64	1.69	1.73						
2.50			0.90	1.14	1.31	1.46	1.57	1.67	1.74	1.81	1.85						
2.75				1.17	1.36	1.51	1.65	1.75	1.84	1.91	1.97						
3.00				1.19	1.40	1.56	1.71	1.83	1.92	2.00	2.07	2.31	2.45	2.61	2.70	2.75	2.79
3.25				1.21	1.43	1.61	1.77	1.90	2.00	2.09	2.17						
3.50				1.22	1.46	1.65	1.82	1.95	2.07	2.17	2.25						
3.75				1.23	1.48	1.68	1.86	2.00	2.14	2.25	2.34						
4.00					1.49	1.71	1.90	2.05	2.19	2.31	2.41	2.78	3.01	3.28	3.44	3.54	3.61
4.50					1.52	1.75	1.96	2.13	2.29	2.42	2.54						
5.00					1.54	1.79	2.01	2.20	2.37	2.52	2.64	3.15	3.47	3.87	4.10	4.25	4.36
5.50						1.81	2.05	2.25	2.44	2.60	2.75						
6.00						1.83	2.08	2.29	2.49	2.67	2.83	3.44	3.85	4.38	4.70	4.91	5.07
7.00							2.12	2.36	2.58	2.78	2.96	3.67	4.17	4.82	5.23	5.51	5.72
8.00								2.40	2.64	2.85	3.06	3.86	4.44	5.22	5.72	6.06	6.32
9.00									2.68	2.91	3.13	4.00	4.66	5.56	6.15	6.57	6.88
10,00									2.71	2.96	3.18	4.13	4.85	5.86	6.54	7.03	7.40
∞	0.53	0.72	0.90	1.23	1.55	1.86	2.15	2.44	2.73	3.01	3.28	4.61	5.88	8.31	10.7	12.9	15.2

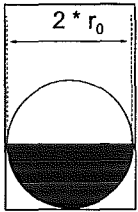
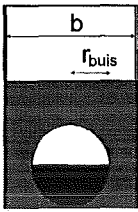
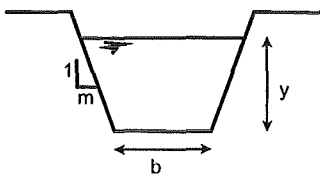
**Tabel 3.4: Waarden voor de equivalente diepte  $d$  [m] van Hooghoudt bij gegeven waarden van  $D$  en  $L$  en bij een  $r_0$  van 0,10 m**

D [m]	L										D [m]	L					
	5	7,5	10	15	20	25	30	35	40	45		50	75	100	150	200	250
0,5	0.47	0.48	0.49	0.49	0.49	0.50	0.50	-	-	-	0,5	0.50	-	-	-	-	-
0.75	0.60	0.65	0.69	0.71	0.73	0.74	0.75	0.75	0.75	0.76	1	0.96	0.97	0.98	0.99	-	-
1.00	0.67	0.75	0.80	0.86	0.89	0.91	0.93	0.94	0.96	0.96	2	1.72	1.80	1.85	1.90	1.92	1.94
1.25	0.70	0.82	0.89	1.00	1.05	1.09	1.12	1.13	1.14	1.14	3	2.29	2.49	2.60	2.72	2.70	2.83
1.50		0.88	0.97	1.11	1.19	1.25	1.28	1.31	1.34	1.35	4	2.71	3.04	3.24	3.46	3.58	3.66
1.75		0.91	1.02	1.20	1.30	1.39	1.45	1.49	1.52	1.55	5	3.02	3.49	3.78	4.12	4.31	4.43
2.00			1.08	1.28	1.41	1.50	1.57	1.62	1.66	1.70	6	3.23	3.85	4.23	4.70	4.97	5.15
2.25			1.13	1.34	1.50	1.69	1.69	1.76	1.81	1.84	7	2.43	4.14	4.62	5.22	5.57	5.81
2.50				1.38	1.57	1.69	1.79	1.87	2.04	1.99	8	2.56	4.38	4.95	5.68	6.13	6.43
2.75				1.42	1.63	1.76	1.88	1.98	2.05	2.12	9	3.66	4.57	5.23	6.09	6.63	7.00
3.00				1.45	1.67	1.83	1.97	2.08	2.16	2.23	10	3.74	4.74	5.47	6.45	7.09	7.53
3.25				1.48	1.71	1.88	2.04	2.16	2.26	2.35	12.5		5.02	5.92	7.20	8.06	8.68
3.50				1.50	1.75	1.93	2.11	2.24	2.35	2.45	15		5.30	6.25	7.77	8.84	9.64
3.75				1.52	1.78	1.97	2.17	2.31	2.44	2.54	17.5			6.44	8.20	9.47	10.4
4.00					1.81	2.02	2.22	2.37	2.51	2.62	20			6.60	8.54	9.97	11.1
4.50					1.85	2.08	2.31	2.50	2.63	2.76	25			6.79	8.99	10.7	12.1
5.00					1.88	2.5	2.38	2.58	2.75	2.89	30				9.27	11.3	12.9
5.50						2.20	2.43	2.65	2.84	3.00	40				9.44	11.6	13.4
6.00							2.48	2.70	2.92	3.09	45					11.8	13.8
7.00							2.54	2.81	3.03	3.24	50					12.0	14.3
8.00							2.57	2.85	3.13	3.35	60					12.1	14.3
9.00								2.89	3.18	3.43							14.6
10,0									3.23	3.48							
∞	0.71	0.93	1.14	1.53	1.89	2.24	2.58	2.91	3.24	3.56		3.88	5.38	6.82	9.55	12.2	14.7

### Opmerking 1

De waarde  $r_0$  is bij drains gelijk aan de straal van de drain. Bij open waterlopen kan bij benadering de natte omtrek van de waterloop gelijk worden gesteld aan  $\pi \cdot r_0$ . In het geval van een praktisch droge greppel kan de breedte van de bodem gelijk worden gesteld aan  $\pi \cdot r_0$  (zie tabel 3.5).

Tabel 3.5: Equivalente straal van ontwateringsmiddelen

ontwateringsmiddel		natte omtrek (u)	equivalente straal (r <sub>0</sub> )
drainbuis		$2 * \pi * r_0$	$\frac{1}{2} * D$
drainbuis met omhullingsmateriaal		$b + 2 * r_{buis}$	$\frac{u}{\pi} = \frac{b + 2 * r_{buis}}{\pi}$
sloot / greppel		$b + 2y * \sqrt{m^2 + 1}$	$\frac{u}{\pi} = \frac{b + 2y * \sqrt{m^2 + 1}}{\pi}$

**Opmerking 2**

Als alleen de stroming onder het drainniveau wordt beschouwd, dan verandert vergelijking 3.13 in:

$$q = \frac{8 \cdot k \cdot d \cdot h}{L^2} \tag{3.14}$$

Deze vergelijking moet overeenkomen met vergelijking 3.11, waaruit volgt dat:

$$d = \frac{L}{8 \cdot F_h} \tag{3.15}$$

De equivalente diepte d is evenals F<sub>h</sub> een functie van L, D en r<sub>0</sub>. De waarden van d voor r<sub>0</sub> is gelijk aan 0,1 en 0,04 m en voor verschillende waarden van L en D zijn gegeven in de tabellen 3.2 en 3.3. Voor andere draindiameters kan gebruikt worden gemaakt van nomogrammen van Boumans. Zoals in de tabellen 3.3 en 3.4 te zien is neemt d toe bij groter wordende D tot D = 1/4L. Bij grotere waarden van D blijft de equivalente diepte d ongeveer constant. Blijkbaar wordt dan het stromingspatroon niet meer beïnvloed door de diepte van de ondoorlatende laag.

In vergelijking 3.12 heeft de eerste term van de factor F<sub>h</sub> betrekking op de horizontale stroming. Wanneer 3.12 wordt vergeleken met de vergelijking van Donnan dan blijkt dat de horizontale stroming plaatsvindt over een afstand (L - D√2) i.p.v. L en de radiale stroming over een afstand 1/2D√2 links en rechts van de drains. Wanneer f(D, L) wordt verwaarloosd en als verder wordt aangenomen dat:

$$F_h = \frac{(L - D\sqrt{2})^2}{8 \cdot D \cdot L} \tag{3.16}$$

$$F_r = \frac{1}{\pi} \ln \frac{D}{r_0 \sqrt{2}} \tag{3.17}$$

dan kan 3.12 geschreven worden als:

$$F = F_h + F_r \quad (3.18)$$

waarin:  $F$  = totale drukhoogte [m];  
 $F_h$  = horizontale drukhoogte [m];  
 $F_r$  = radiale drukhoogte [m].

Hierdoor verandert 3.11 in:

$$h = \frac{q \cdot L}{K} \cdot F_h + \frac{q \cdot L}{K} F_r = h_h + h_r$$

Dit betekent dat de totale drukhoogte is gelijk aan de som van de drukhoogte voor de horizontale stroming en de drukhoogte voor de radiale stroming.

### Opgave

Voor drainage in een irrigatiegebied worden drainbuizen met een diameter van 20 cm toegepast. Deze worden aangebracht op een diepte van 1,8 m -m.v. Op 6,8 m -m.v. wordt een relatief ondoorlatende laag aangetroffen en m.b.v. een boorgatmeting is een hydraulische doorlatendheid van 0,8 m/etm voor de bovenliggende laag geschat. Stel dat éénmaal per 20 dagen geïrrigeerd wordt en de gemiddelde verliezen in die periode 40 mm bedragen. Deze verliezen mogen als stationair worden beschouwd. Welke drainafstand moet worden toegepast als gestreefd wordt naar een gemiddelde grondwaterstand van 1,20 -m.v.?

### Uitwerking

De gemiddelde afvoer van het drainagesetstel is 2 mm/dag (40 mm gedeeld door 20 dagen). Uit diameter drainbuis = 0,20 m volgt  $r_0 = 0,10$  m. Er kan gebruikt worden gemaakt van tabel 3.3. Bovenstaande informatie in de vergelijking van Hooghoudt geeft:

$$L^2 = 1920 \cdot d + 576$$

De drainafstand L volgt uit deze vergelijking en tabel 3.3 met behulp van trial en error.

Poging 1: Stel  $L = 80$  m. Uit tabel 3.3 volgt:  $d = 3,55$  m  
 $L^2 = 1920 \cdot (3,55) + 576 = 7392 \text{ m}^2$   
 $L = 86$  m

Poging 2: Stel  $L = 87$  m. Uit tabel 3.3 volgt:  $d = 3,63$  m  
 $L^2 = 1920 \cdot (3,63) + 576 = 7546 \text{ m}^2$   
 $L = 87$  m

De benodigde drainafstand is 87 m.

**Opmerking 3**

De "trial and error" methode voor het bepalen van de drainafstand  $L$  (zie voorbeeld 3.2) kan worden vermeden door gebruik te maken van nomogrammen (o.a. Boumans, 1963). Het voordeel is dat deze voor diverse waarden van  $r_0$  kunnen worden gebruikt. Ook worden hiervoor computerprogramma's toegepast.

**Opgave**

Voor een drainagesysteem zijn de volgende ontwerpparameters vastgesteld:

$$r_0 = 0,04 \text{ m}$$

$$D = 5,50 \text{ m}$$

$$q = 0,01 \text{ m/etm}$$

$$K_0 = K_b = 1 \text{ m/etm}$$

De draindiepte is op gemiddeld 0,90 m.v. gekozen. De ontwateringsdiepte is 0,30 m m.v.

Gevraagd wordt de benodigde drainafstand te bepalen.

**Uitwerking**

De toelaatbare opbolling ( $h$ ) mag 0,60 m bedragen (gemiddelde draindiepte - ontwaterings-diepte).

Uit de vergelijking van Hooghoudt volgt:

$$L^2 = \frac{8k_0 * d * h + 4 * k_b * h^2}{q} \Rightarrow L^2 = 480d + 144$$

De drainafstand valt niet direct uit deze vergelijking te bepalen. Daarom wordt eerst een afstand geschat:

Poging 1: Stel  $L = 20$  m. Uit tabel 3.2 volgt dan:  $d = 1,54$  m

$$L^2 = 480 \cdot (1,54) + 144 \quad \vee \quad L = 29,7 \text{ m}$$

Poging 2: Stel  $L = 35$  m. Uit tabel 3.2 volgt:  $d = 2,25$  m

$$L^2 = 480 \cdot (2,25) + 144 \quad \vee \quad L = 34,98 \text{ m}$$

dit klopt met de aangenomen waarde van  $L (= 35 \text{ m})$ .

De benodigde drainafstand is dus 35 m.

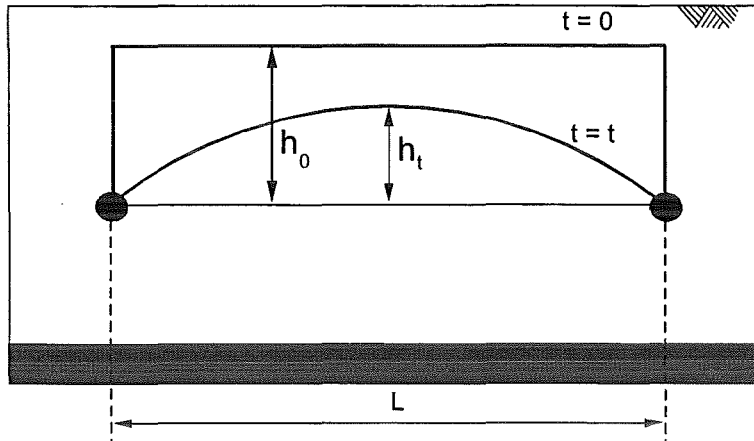
**Opmerking 4**

De grondwaterstroming is ook met grondwatermodellen te berekenen. Aspecten als kwel-van groot belang in Nederlandse polders-kan dan worden meegenomen (zie college LW4460, Polders en hoogwaterbeheersing).



### 3.5.3 Niet-stationaire drainagevergelijkingen

In gebieden met periodieke irrigatie of zeer intensieve kortdurende neerslag is de aanname van stationaire invoer niet langer gerechtvaardigd. Onder deze omstandigheden moet het stromingsprobleem door semi-stationaire of niet-stationaire berekeningsmethoden worden opgelost. De formulering van het drainagecriterium voor niet-stationaire omstandigheden wordt uitgedrukt in een bepaalde snelheid waarmee de grondwaterstand moet kunnen worden verlaagd. Dit drainagecriterium wordt teruggevonden in niet-stationaire drainagevergelijkingen, zoals die van Glover-Dumm.



Figuur 3.13: Schematisering Glover-Dumm

Bij de semi-stationaire methode wordt de berekening uitgevoerd over kleine tijdseenheden m.b.v. stationaire vergelijkingen, waarbij de einduitkomsten van de ene periode de beginwaarden vormen voor de volgende periode. Niet-stationaire oplossingsmethoden zijn onontbeerlijk wanneer werkelijke niet-stationaire grondwaterstandveranderingen en drainafvoeren die uit metingen zijn verkregen, moeten worden geëvalueerd.

Voor een drainagecriterium in niet-stationaire situaties (bijvoorbeeld. t-dagen na een irrigatie moet de grondwaterstand gedaald zijn van  $h_0$  tot  $h_t$ , meter) hebben Glover-Dumm twee vergelijkingen ontwikkeld: vergelijking 3.19 voor vlakke grondwaterspiegels en vergelijking 3.20 voor grondwaterspiegels volgens een 4e-gradsparabool.

$$h_t = \frac{4}{\pi} * h_0 * e^{-\alpha t} = 1,27 * h_0 * e^{-\alpha t} \quad (\text{voor vlakke grondwaterspiegel}) \quad (3.20)$$

$$h_t = 1,16 * h_0 * e^{-\alpha t} \quad (\text{grondwaterspiegel 4e-gradsparabool}) \quad (3.21)$$

waarin:

$$\alpha = \frac{\pi^2 * KD}{\mu * L^2} = \text{reactiefactor in } \text{etm}^{-1} \quad (3.22)$$

$h_t$  = droogleggingseis (gewenste grondwaterstand na t dagen) [m];

$h_0$  = grondwaterstand voor drainage [m];

t = drainagetijd [dag];

$\alpha$  = reactiefactor [ $\text{etm}^{-1}$ ];

$\mu$  = bergingscoëfficiënt [-].

D = hoogte van de oppervlaktewaterstand boven de ondoorlatende laag.

k = doorlatendheid [m/etmaal]

De uitdrukking voor de drainafstand (L) wordt dan:

$$L = \pi * \left[ \frac{kDt}{\mu} \right]^{\frac{1}{2}} * \left[ \ln 1,16 \frac{h_0}{h_t} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Glover-Dumm (3.23)}$$

Om in de gevallen die Hooghoudt onderscheidde ook hier de radiale weerstand van de stroming naar de ontwateringsmiddelen, die niet tot aan de ondoorlatende laag reiken, in rekening te brengen kan  $D$  weer vervangen worden door  $d$ .

De Glover-Dumm vergelijking wordt vooral gebruikt om de drainafstanden in irrigatiegebieden te berekenen. Bij irrigatie van gronden treedt immers een snelle aanvoer van water op het land op, die niet stationair in de tijd kan worden gesteld. De toepassing van de Glover-Dumm vergelijking vereist de bepaling van de bodemeigenschappen  $k$ ,  $D$  en  $\mu$ , de geometrie van de ontwateringsmiddelen en een drainagecriterium. De bergingscoëfficiënt  $\mu$  is voor elke grondwaterstandstijging op een bepaalde diepte beneden maaiveld te berekenen door het aantal mm neerslag te delen door het aantal mm grondwaterstandstijging. De coëfficiënt  $\mu$  varieert meestal tussen 5% en 15%.

### Opgave

In een irrigatiegebied wordt om de 10 dagen geïrrigeerd. Bij deze irrigatie percoleert 5 mm water naar het grondwater. De ontwateringsdiepte is gesteld op 1 m +m.v. Op 1,8 m +m.v. liggen drains met een straal ( $r_0$ ) van 0,1 m.

De bergingscoëfficiënt ( $\mu$ ) van de grond is 0,05, de doorlatendheid van de grond  $k = 1$  m/etm. Op een diepte van 9,5 m +m.v. ligt een ondoorlatende laag.

Bepaal de drainafstand met behulp van de vergelijking van Glover-Dumm.

### Uitwerking

Eén irrigatiegift resulteert in een onmiddellijke toevoer  $R_i = 0,025$  m. Deze toevoer veroorzaakt een onmiddellijke stijging van het grondwater van  $\Delta h = R_i / \mu = 0,025 / 0,05 = 0,5$  m.

De maximale opbolling  $h_0 = 1,8 - 1,0 = 0,8$  m. De grondwaterstand moet in 10 dagen 0,5 m dalen, omdat anders bij de volgende irrigatie de ontwateringsdiepte wordt overschreden. De opbolling  $h_{10} = h_0 - \Delta h = 0,8 - 0,5 = 0,3$  m.

Substitutie van bovenstaande gegevens in de vergelijking van Glover-Dumm (met  $D$  vervangen door  $d$ ) geeft:

$$L = \pi * \left[ \frac{KDt}{\mu} \right]^{\frac{1}{2}} * \left[ \ln 1,16 \frac{h_0}{h_i} \right]^{\frac{1}{2}} = \pi * \left[ \frac{1 * D * 10}{0,05} \right]^{\frac{1}{2}} * \left[ \ln 1,16 \frac{0,8}{0,3} \right]^{\frac{1}{2}} = 41,8 * \sqrt{d}$$

Uit deze vergelijking en tabel 2.3 kan de drainafstand worden bepaald met  $D = 7,7$  m.

Poging 1:  $L = 80$  m

uit tabel 2.3 volgt  $d = 4,4$  m en  $L = 88$  m

Poging 2:  $L = 100$  m

uit tabel 2.3 volgt  $d = 4,8$  m en  $L = 92$  m

Poging 3:  $L = 90$  m

uit tabel 2.3 volgt  $d = 4,7$  m en  $L = 90$  m

### Voorbeeld 3.4: Vergelijking van Glover-Dumm.

### 3.5.4 Bepaling van de buisdiameter

Na het intreden van het water in de drainbuis stroomt het water door de buis naar de sloot of verzameldrain. Het debiet wordt daarbij groter dicht bij de verzameldrain. Er zijn drie manieren om de benodigde buisdiameter te bepalen: met behulp van de formules van Wesseling, met behulp van nomogrammen en met behulp van tabellen.

De benodigde diameter van de drain kan worden berekend met de formule van Wesseling:

$$h = 9,55 * 10^{-4} * a * D^{-4,75} * \left(\frac{q}{L}\right)^{1,75} * \left[L^{2,75} - (L - X)^{2,75}\right] \quad \text{Wesseling (3.24)}$$

waarin:

- h = drukhoogte berekend op een afstand X vanaf de uitmonding [m];
- a = coëfficiënt, afhankelijk van het type buis [-];
- D = draindiameter [m];
- q = debiet [m<sup>3</sup>/s];
- L = drainlengte [m];
- X = afstand van de uitmonding tot het punt in de drainreeks waarvoor h wordt berekend [m].

Er zijn nomogrammen ontwikkeld, waarmee bij verschillende hellingen en ontwerpafvoeren de oppervlakten zijn te bepalen die met draineerbuizen van verschillende inwendige diameters kunnen worden ontwaterd. 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 IJsselmeerpolders). Er is uitgegaan van een (bij de ontwerpafvoer) op ieder punt geheel gevulde buis.

Op basis van nieuwe gegevens en een nieuwe analyse van eerdere gegevens hebben Dekker en Ven een gewijzigde formule opgesteld voor de berekening van de afvoercapaciteit van drainbuizen. Voor de veel toegepaste ontwerpafvoer van 7 mm/etm geven zij de maximaal te ontwateren oppervlakte voor verschillende draindiameters. Voor andere ontwerpafvoeren kan men de maximaal te ontwateren oppervlakte eenvoudig berekenen, omdat de gedraineerde oppervlakte omgekeerd evenredig is met de ontwerpafvoer. Met andere woorden bij een ontwerpafvoer van 5 mm/etm dienen alle oppervlakten te ontwateren met 7/5 te worden vermenigvuldigd. Vaak wordt bij horizontaal aangelegde buizen uitgegaan van een hydraulische helling van 10 cm per 100 m.

**Tabel 3.5: Maximaal te ontwateren oppervlakte [ha] van PVC-ribbelbuizen, bij een ontwerpafvoer van 7 mm/etm en toepassing van een reductie in verband met vervuiling, bij verschillende hydraulische hellingen**

D <sub>drain</sub> [mm]	hydraulische helling i [cm per 100 m]									
	4	5	6	8	10	15	20	25	30	40
50/44	0.09	0.11	0.12	0.15	0.18	0.23	0.28	0.32	0.36	0.44
60/54	0.20	0.23	0.26	0.31	0.36	0.48	0.58	0.67	0.75	0.91
65/57	0.24	0.28	0.31	0.38	0.44	0.57	0.69	0.81	0.91	1.10
80/72	0.53	0.61	0.69	0.84	0.97	1.27	1.54	1.79	2.02	2.45
100/92	1.19	1.38	1.56	1.88	2.19	2.87	3.47	4.03	4.55	5.51

## Hoofdstuk 4      Afwatering

### *Leerdoelen*

Na bestudering van dit hoofdstuk moet u kennis hebben van:

- de beginselen van afwatering;
- de relatie tussen de afvoer uit een gebied en de gebiedskenmerken (landelijk of stedelijk gebied, vlak of hellend gebied);
- enkele typen lozing en enkele typen berging, en de relatie tussen lozing en berging;
- enkele typen polders;
- de beginselen van het ontwerpen van afwateringssystemen;
- enkele methodes om de maatgevende afvoer uit vlakke en hellende gebieden te bepalen;

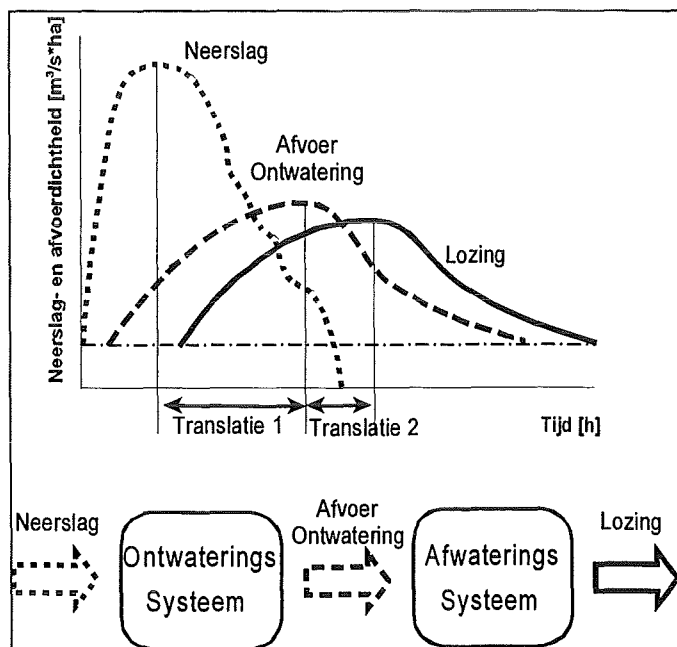


## 4 AFWATERING

### 4.1 Inleiding en begrippen

In het vorige hoofdstuk is uitgebreid gesproken over ontwatering. Het transport van water vanaf het lozingspunt van het ontwateringssysteem tot aan het lozingspunt van het gebied noemt men afwatering. Afwatering geschiedt meestal door middel van open waterlopen. In de Engelse taal kent men geen onderscheid tussen ontwatering en afwatering en wordt het totale proces van afvoer van overtollig water "drainage" genoemd.

Tussen de afvoer van het ontwateringssysteem en de afvoer van het afwateringssysteem (de lozing) bevindt zich de transformatiefunctie van het afwateringssysteem (figuur 4.1). In beginsel zijn het ontwateringssysteem en het afwateringssysteem twee achter elkaar geschakelde systemen. De afvoer van het ontwateringssysteem is de aanvoer voor het afwateringssysteem. Het onderscheid tussen ontwatering en afwatering is vaak niet scherp. Bij samengestelde drainagesystemen is een duidelijke transport- en afvoerfunctie te onderscheiden terwijl afwateringsmiddelen (b.v. perceelsslotten) tevens een heel duidelijke ontwateringsfunctie kunnen hebben. Het ontwerp van ontwaterings- en afwateringssysteem is daardoor sterk aan elkaar gerelateerd.

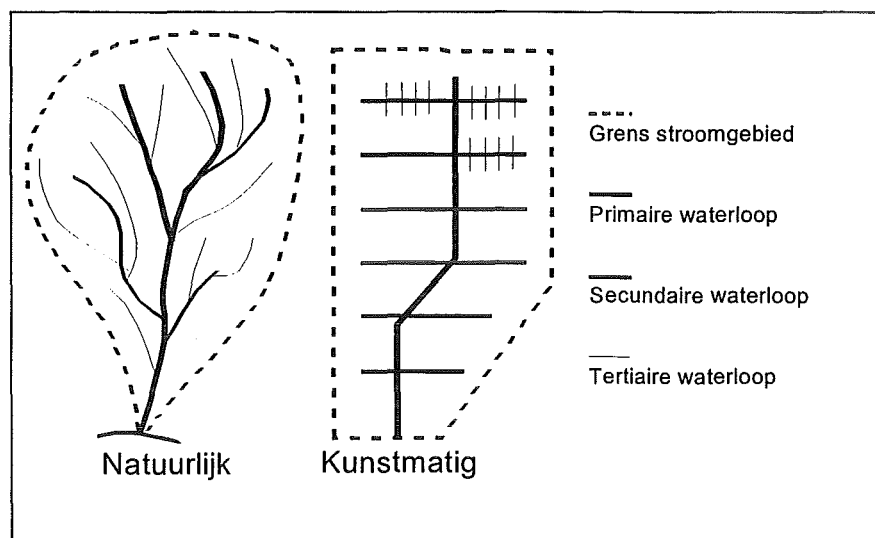


Figuur 4.1: Transformatie van neerslag naar afvoer

Voor het afzonderlijk ontwerpen van een afwateringssysteem moet de afvoer van het ontwateringssysteem bekend zijn. Deze gegevens zijn echter zelden beschikbaar. Daarom moet meestal worden gewerkt met neerslaggegevens (die meestal in Nederland in lange reeksen beschikbaar zijn) in combinatie met gebiedsparameters of afvoergegevens. Ontwatering en afwatering kunnen dan gecombineerd ontworpen worden. Hoewel de bepaling van de maatgevende afvoer aan de hand van de gegevens over het ontwateringssysteem nog van weinig praktische betekenis is, zal er toch aandacht worden besteed, omdat hierdoor een beter begrip wordt verkregen van de fysische achtergrond van de relatie tussen neerslag en afvoer.

Een afwateringssysteem is een infrastructuur-element en is gerelateerd aan andere infrastructuur-elementen. Het zal daarom in onderlinge samenhang moeten worden beschouwd met andere waterlopen, wegen, spoorwegen of pijpleidingen. Kruisingen met andere infrastructuur vragen in de praktijk meestal bijzondere aandacht vanwege de kostbare kunstwerken die hierbij moeten worden aangelegd.

Net als ontwateringssystemen, worden afwateringssystemen meestal gekenmerkt door een hiërarchische opbouw van waterlopen. Waterlopen van lage orde komen samen in waterlopen van hogere orde om uiteindelijk samen te stromen in een waterloop van de hoogste orde die voert tot aan het lozingspunt van de afwateringseenheid (rivier, meer of zee). Deze hiërarchische opbouw is zowel bij natuurlijke als bij kunstmatig aangelegde afwateringssystemen te onderscheiden (figuur 4.2). De verschillende niveaus van afwatering kennen in Nederlandse poldergebieden specifieke namen zoals perceel-sloot (tertiaire waterlopen), kavelsloot, dijksloot en bermsloot (secundaire waterlopen) en (hoofd)vaart, (hoofd)tocht, of wetering (primaire waterlopen).



**Figuur 4.2: Natuurlijke en kunstmatige afwateringssystemen**

Afwateringsgebieden of onderdelen ervan kunnen op tal van manieren worden gekarakteriseerd. Dit kan bijvoorbeeld gebeuren op basis van fysische kenmerken van het gebied zoals helling, bodemgebruik, grondsoort, en grootte. Voor Nederland wordt onderscheid gemaakt naar het bodemgebruik (landelijk of stedelijk) en de helling van de gebieden (vlak of hellend). In Nederland komen eigenlijk geen sterk hellende gebieden voor. In het hiernavolgende zal kort op de specifieke kenmerken van genoemde gebieden worden ingegaan.

#### 4.2 Landelijke en stedelijke gebieden

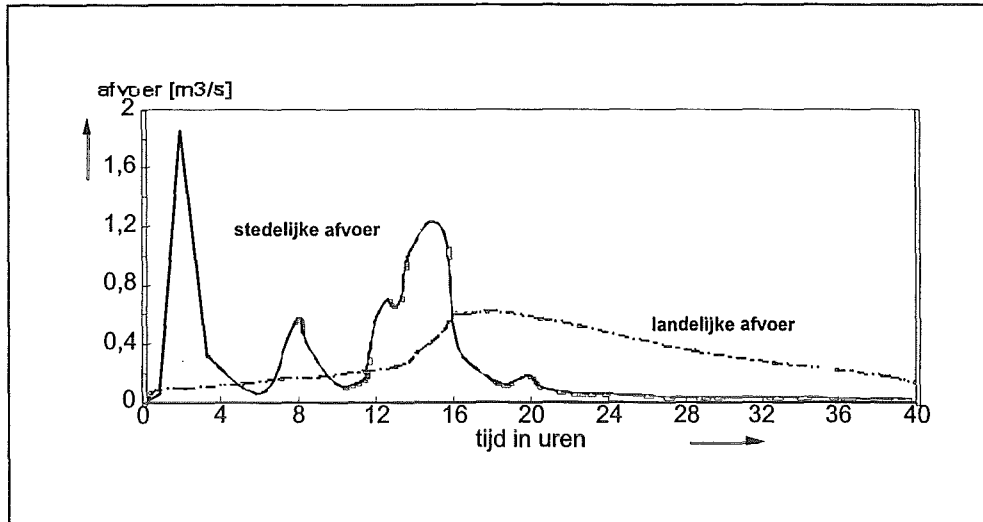
De verschillen tussen de afvoer uit landelijke en stedelijke gebieden worden vooral veroorzaakt door het verschil in neerslag-afvoerprocessen tussen beide gebieden. In landelijke (onverharde) gebieden zal water in de bodem worden geborgen en dus langzamer afgevoerd worden dan in stedelijke (verharde) gebieden, waar een snelle oppervlakte-afvoer plaatsvindt. De vertraging die de neerslag ondervindt om tot afvoer te komen varieert van enkele uren tot enkele dagen voor het "snelle" deel tot soms zelfs enkele maanden voor het "langzame" deel van de grondwaterstroming.

De verschillen tussen landelijke en stedelijke waterbeheersingssystemen komen tot uiting in de afvoerhydrograaf van beide gebieden zoals die schematisch in figuur 4.3 zijn weergegeven. Uit de figuur blijkt dat verharde gebieden een grotere piekafvoer hebben en dat de top van de afvoer van de landelijke afvoer later valt. Dit komt doordat de afvoer sneller op de neerslag reageert in verharde gebieden.

De afvoerhydrograaf van een gebied hangt onder andere af van:

- neerslagintensiteit;
- infiltratiecapaciteit;
- maaiveldhelling;
- de grootte van de gebieden;
- de plaats van het stedelijk gebied in het afwateringsgebied.

In landelijke (onverharde) gebieden wordt de neerslag als gevolg van stroming door en over de bodem sterk gereduceerd en vertraagd. Onder Nederlandse omstandigheden zal het grootste deel van de neerslag in de bodem infiltreren: de infiltratiecapaciteit van de bodem is relatief groot terwijl de regenintensiteit relatief laag is en de maaiveldhellingen klein zijn. Water dat in de bodem infiltreert vult eerst de onverzadigde zone op tot veldcapaciteit (zie paragraaf 1.4). De rest percoleert naar het grondwater en veroorzaakt een verhoging van de grondwaterstand. Het grondwater dat zich boven het ontwateringsniveau bevindt zal relatief snel door het ontwateringssysteem worden afgevoerd (snelle grondwatercomponent van de afvoer). Het deel van het grondwater dat zich onder het ontwateringsni-

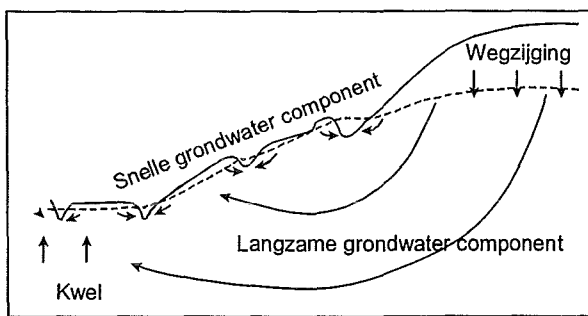


**Figuur 4.3: Schematische weergave van de afvoer in stedelijke en landelijke gebieden**

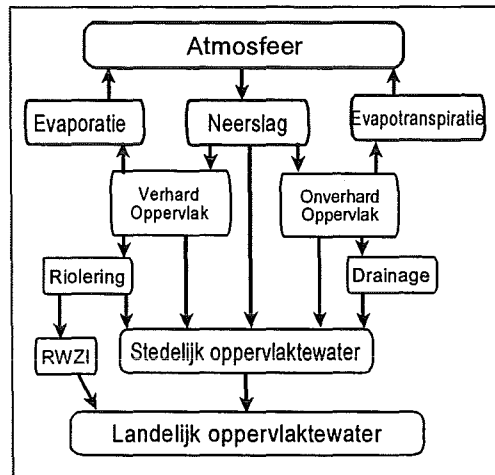
veau van het (detail)ontwateringssysteem bevindt zal slechts langzaam via diepe grondwaterstroming tot afvoer komen: dit heet de langzame grondwatercomponent van de afvoer (figuur 4.4).

In stedelijke (verharde) gebieden zal slechts een klein gedeelte van de neerslag in de bodem infiltreren.

Het grootste deel van de neerslag zal via goten en buizen (riolen) vrij direct naar het open watersys-



**Figuur 4.4: grondwatercomponenten**



**Figuur 4.5: neerslag-afvoersysteem van een stedelijk gebied**

teem worden afgevoerd. Kasgebieden lijken qua waterbeheersing meer op stedelijke gebieden. De berging in het leidingsysteem is meestal klein in vergelijking met de berging in de bodem. De vertraging die de neerslag op weg naar het open water ondervindt is meestal niet meer dan enkele tientallen minuten. In figuur 4.5 is het neerslag-afvoersysteem van een stedelijk gebied schematisch weergegeven.



Als grote delen van onverharde gebieden worden verhard, kan het oorspronkelijke (landelijke) afwateringssysteem de grotere piekafvoer niet verwerken. Afwateringssystemen zullen als gevolg van verstedelijking en ontwikkelingen in de glastuinbouw moeten worden herdimensioneerd.

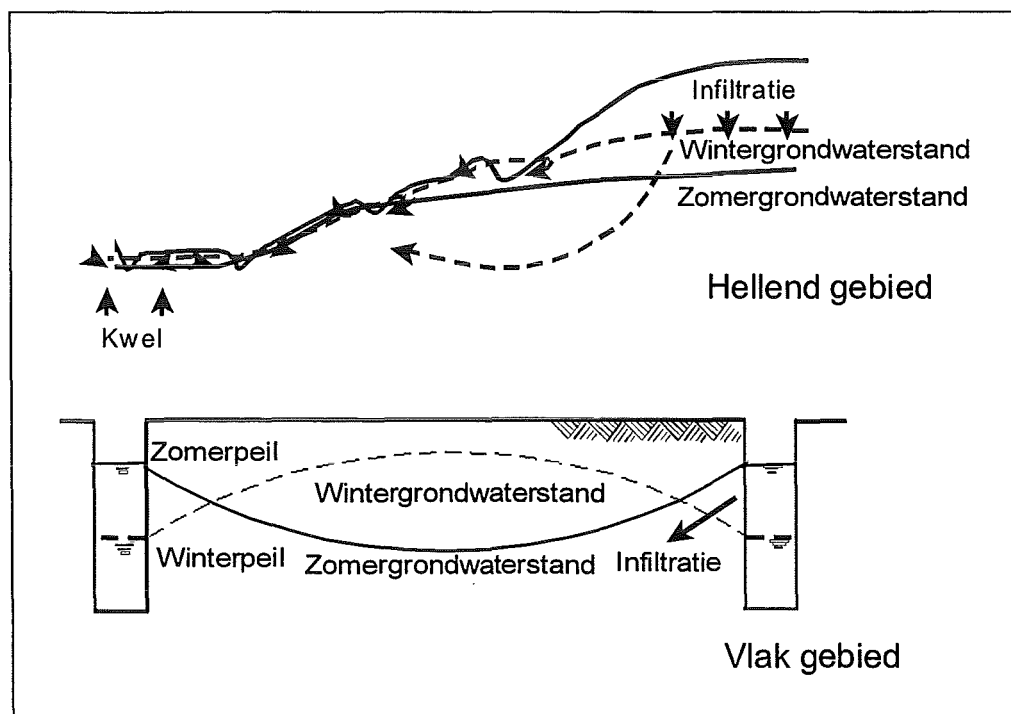
### 4.3 Hellende en vlakke gebieden

De begrippen hellend en vlak zijn vaak nauwelijks gedefinieerd. Van plaats tot plaats zal men er een eigen betekenis aan geven. Grofweg kan de grens worden gelegd bij 0,2% - 0,5%, afhankelijk van de begroeiing en de bodemgesteldheid van het gebied. Deze grens is gebaseerd op het feit dat bij hellingen groter dan deze waarden de oppervlakteafvoer een overheersende rol gaat spelen bij de afvoer van de neerslag. De benaming hellende en vlakke gebieden wordt in Nederland vaak gerelateerd aan de wijze van lozing. Hellende gebieden lozen op natuurlijke wijze, terwijl in vlakke gebieden het water moet worden opgepompt (kunstmatig lozing).

#### Grondwaterstroming

In hellende gebieden komen naast grote maaiveldverschillen ook grote grondwaterstandverschillen voor en vindt er grondwaterstroming plaats van de hogere gebieden naar de lagere (figuur 4.6). Het peil in de open waterlopen wordt hoofdzakelijk bepaald door de grondwaterstand. In droge perioden zakt deze - vooral in de hogere delen - zodanig dat de waterlopen droog vallen. De sterke seizoengevoeligheid van grondwaterstand en open waterpeilen is een kenmerkende eigenschap van de hellende gebieden.

In vlakke gebieden zijn de verschillen in grondwaterstanden meestal klein. In polders en beekdalen ligt de grondwaterspiegel vaak zo ondiep dat als gevolg van het intensieve drainage- en waterlopenstelsel de grondwaterstand kan worden beheerst door het open watersysteem. De grondwaterstanden variëren in de verschillende seizoenen niet meer dan 1 à 1,5 m. In de lagere, vlakke gebieden zal kwel vanuit de hoger gelegen gebieden plaatsvinden.



Figuur 4.6: Waterpeilen en grondwaterstanden in hellend en vlak gebied

**Berging**

In de hellende gebieden is de mogelijkheid om water in het open watersysteem te bergen erg gering. Door het plaatsen van stuwen kan deze berging worden vergroot. Door de veelal diepe ligging van de grondwaterspiegel is de berging in de bodem erg groot.

In vlakke gebieden daarentegen is de berging in de bodem relatief gering door de hoge grondwaterstand. De mogelijkheid om water in het open waterlopend systeem te bergen is in vlakke gebieden meestal voldoende aanwezig.

**Watervoorziening**

De mogelijkheid om in hellende gebieden water in droge perioden via waterlopen aan te voeren is over het algemeen klein. Er moet worden getracht in de natte perioden zoveel mogelijk water vast te houden in de hoog gelegen gebieden of er moet gebruik worden gemaakt van grondwater. De laatste jaren zijn een aantal onderzoeken verricht naar de economische haalbaarheid van het oppompen van water via de kanalen en waterlopen naar de hoog gelegen gebieden.

In vlakke gebieden is de watervoorziening meestal geen probleem. In poldergebieden kan men water onder vrij verval inlaten vanuit de boezem. Vaak zet men in de zomer ook het waterpeil in de polder hoger (zomerpeil) om water (eventueel via het drainagesysteem) in de bodem te kunnen infiltreren.

**4.4 Lozing en berging****4.4.1 Inleiding**

De afvoer van het overtollige water kan geschieden door natuurlijke (vrije) lozing en door kunstmatige lozing (bemaling). Wanneer het hoogteverschil tussen het ontwateringsniveau van een punt in een afwateringsgebied en het waterniveau bij het lozingspunt van het gebied voldoende groter is om het water door het afwateringssysteem te voeren, dan is vrije lozing mogelijk. Is dit niet het geval, dan moet worden gepompt en is er sprake van kunstmatige lozing. Het vereiste niveauverschil voor natuurlijke lozing varieert van 30-40 cm bij oppervlakteontwatering tot 120-200 cm bij ondergrondse ontwatering.

Het buitenwater (water waarop wordt geloosd) zal zelden een constante waterstand hebben: bij rivieren zal de waterstand afhankelijk zijn van de afvoer, terwijl bij getijderivieren en zeeën de waterstand van het getij afhangt. Als de tijdsduur dat het binnenpeil hoger is dan het buitenpeil voldoende lang is (2 à 3 uur per getijde) dan kan gebruik worden gemaakt van een uitwateringssluis. Bij deze sluis worden de deuren automatisch door het verschil in waterstand geopend en gesloten. Om in geval van hoge buitenwaterstanden niet direct in de problemen te komen is in die situaties altijd gezorgd voor een voldoende bergingsmogelijkheid in het open watersysteem (groot oppervlak open water).

Het overtollige water, dat wordt geloosd via het gemaal of de uitwateringssluis, wordt naar open water (zee, rivieren, beken) gevoerd. Bemaling van polders geschiedt door middel van een gemaal rechtstreeks op het open water of indirect via een gesloten water of stelsel van wateren. Een stelsel van watergangen van de kavelsloten waarop wordt geloosd heet een boezem.

**4.4.2 Natuurlijke lozing**

Bij een niet te groot, min of meer constant verschil tussen de waterstand boven en beneden ( $h_3 > 2/3 h_1$ ) sluis wordt de afvoer benaderd door de formule:

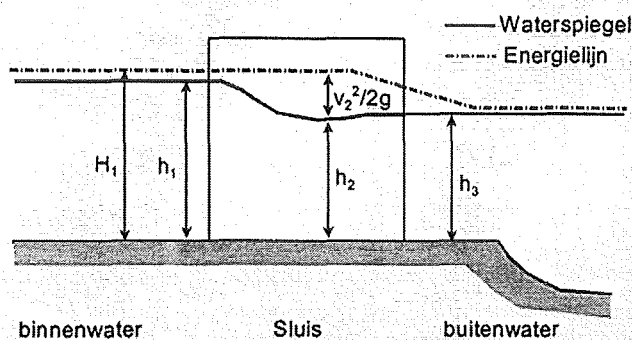
$$Q = B * C * h_3 * \sqrt{2 * g * (h_1 - h_3)} \quad (4.1)$$

waarin:	Q	= afvoer [m <sup>3</sup> /s];
	B	= breedte van de sluis [m];
	C	= afvoercoëfficiënt [-];
	h <sub>3</sub>	= benedenwaterstand [m];
	g	= versnelling van de zwaartekracht [m <sup>2</sup> /s];
	h <sub>1</sub>	= bovenwaterstand [m].

Bij een groot verval ( $h_3 < 2/3 h_1$ ) geldt de benadering met de formule voor de lange overlaat (vergelijking 4.2). De achterwaterstand  $h_3$  heeft dan geen invloed op het doorstromend debiet.

$$Q = 1,7 * C * B * h_1^{\frac{3}{2}} \quad (4.2)$$

Formule 4.1 is eenvoudig af te leiden met behulp van de wet van Bernoulli.



In bovenstaande figuur geldt:

$$\frac{v_2^2}{2g} = h_1 - h_2$$

Het verschil tussen  $H_1$  en  $h_1$  is hierbij verwaarloosd. Omdat de buitenwaterstand  $h_3$  makkelijker te meten is dan de waterstand in de sluis ( $h_2$ ) wordt  $h_2$  vervangen door  $h_3$  met een correctiecoëfficiënt  $C_h$ .

Er geldt dus:

$$v_2 = \sqrt{2g} * \sqrt{h_1 - h_2} = C_h * \sqrt{2g} * \sqrt{h_1 - h_3}$$

Verder is gegeven dat:  $Q = v_2 * A_2$  en  $A_2 = B * h_2 = C_A * B * h_3$

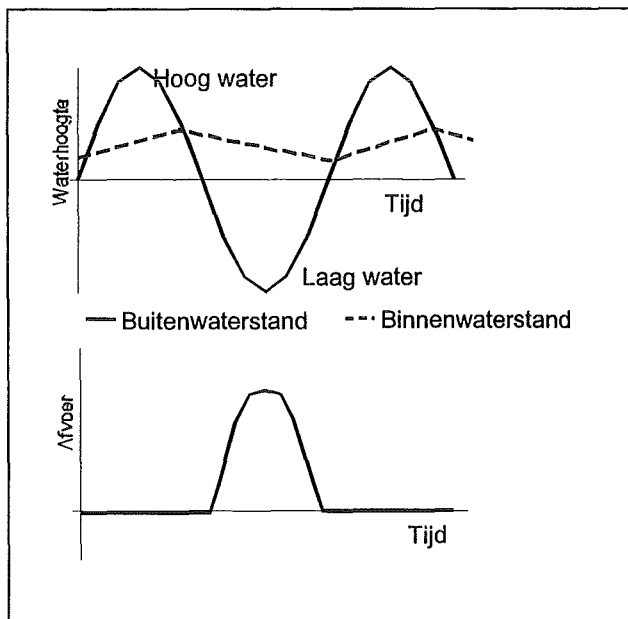
Door  $Q$  en  $A_2$  in te vullen, en  $C_h$  en  $C_A$  te vervangen door  $C_{tot}$  is de vergelijking voor  $Q_2$  te schrijven als:

$$Q = C_{tot} \sqrt{2g} * B * h_3 * \sqrt{h_1 - h_3}$$

Dit komt overeen met vergelijking 4.1.

Bij lozing naar zee maakt men gebruik van wachtdeuren: deuren die bij laagwater vanzelf open gaan en bij hoogwater door het opkomend buitenwater automatisch worden gesloten. Om het te laag weglopen van het binnenwater te voorkomen kan dit worden opgehouden door één of meerdere stuwen. Stuwen belemmeren echter de afvoer, vooral bij grote afvoeren. Regelbare stuwen verkleinen dit probleem maar vereisen bediening. De lozingsmogelijkheid hangt af van de mate waarin hier dagelijks laagwater onder het gewenste polderpeil komt en de duur van deze onderschrijding. De frequenties van de waargenomen laagwaterstanden spelen daarbij een rol: hoeveel dagen achtereen

kan er niet gespuid worden als gevolg van de astronomische laagwaters, de verhoging daarvan door de wind, of de hoogwaterstanden van de rivier.



Figuur 4.7: Waterstanden en afvoer bij een uitwateringssluis in een getijdengebied

#### 4.4.3 Kunstmatige lozing

Wanneer lozing onder vrij verval niet of slecht mogelijk is zal kunstmatige lozing met behulp van bemalingsinstallaties moeten plaatsvinden om een gebied te ontwateren. Elke bemalingsinstallatie bestaat uit een opvoerwerktuig, een krachtwerktuig en een overbrenging. Het opvoerwerktuig moet voldoende capaciteit hebben om het overtollige water binnen een vastgestelde tijd uit het gebied te kunnen verwijderen. De capaciteit ervan wordt uitgedrukt in  $\text{m}^3/\text{s}$  of  $\text{m}^3/\text{min}$ . Het krachtwerktuig moet voldoende arbeidsvermogen hebben om door het opvoerwerktuig de vereiste waterhoeveelheid te kunnen laten verwijderen. De overbrenging zet het toerental van het krachtwerktuig om in dat van het opvoerwerktuig.

In de gehele installatie vinden verliezen plaats door wrijving, turbulentie en waterstroming. Deze verliezen worden meestal weergegeven in rendementen. Gunstige rendementen zijn: voor het krachtwerktuig 80-95%; voor de pomp 60-85% en voor de overbrenging 90%, zodat het totale rendement 50 à 75% bedraagt. Het bruto arbeidsvermogen wordt dus verkregen door vermenigvuldiging van het netto arbeidsvermogen met  $100/75$  à  $100/50$ .

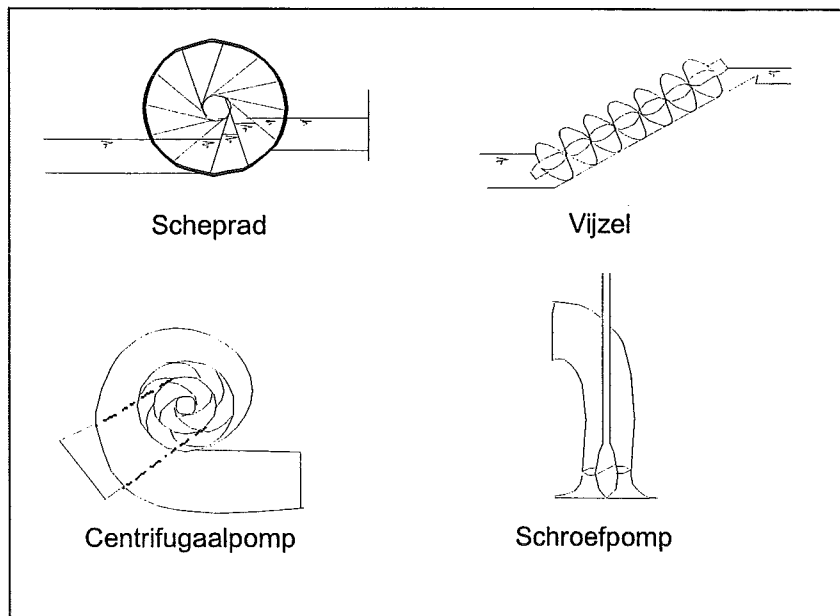
$$N_{\text{netto}} = 9,8 * Q * H \quad (4.3)$$

$$N_{\text{bruto}} = \frac{N_{\text{netto}}}{\eta} \quad (4.4)$$

waarin:  $N_{\text{netto}}$  = netto vermogen [kW];  
 $Q$  = waterverzet [ $\text{m}^3/\text{s}$ ];  
 $H$  = opvoerhoogte [m];  
 $N_{\text{bruto}}$  = bruto vermogen [kW];  
 $\eta$  = rendement [-].

### Opvoerwerktuig

Veel voorkomende opvoerwerktuigen zijn het scheprad, de vijzel, de centrifugaalpomp en de schroefpomp (zie figuur 4.8).



**Figuur 4.8: Enkele soorten opvoerwerktuigen**

Het scheprad is een groot verticaal schoepenrad, dat het water opvoert van de achterwaterloop naar de voorwaterloop over een opleider tussen krimpuren. In de voorwaterloop is een wachtdeur geplaatst om het teruglopen van het water tegen te gaan. Een dergelijke afsluiting, ook vaak als klep uitgevoerd, maakt men bij alle laaggelegen opvoerwerktuigen, waar gevaar voor terugstroming of hevelen aanwezig is. Schepraderen worden vrijwel uitsluitend nog toegepast bij watermolens.

De vijzel bestaat uit een as met schroefvormige bladen in een halfcilindrische goot, de zogenaamde opleider. Vroeger gebruikte men een houten as met een schroefgang, die was gevormd uit duigen. Tegenwoordig is de vijzel samengesteld uit een stalen as waarop een stalen schroefgang is gezet, meestal bestaande uit drie gangen door elkaar. De opvoerhoogte kan 3 tot 4 m bedragen. De vijzel heeft bij de juiste waterstanden een groot rendement, van 70 tot 85%.

De centrifugaalpomp bestaat uit een slakkenhuis met een waaier, die een horizontale of een verticale as heeft. De aanzuiging geschiedt axiaal door onderdruk; de afvoer door de centrifugaalkracht. Deze pompen hebben een hoog toerental, waardoor rechtstreekse koppeling aan de motor van het gemaal mogelijk is. De zuighoogte is maximaal 6 à 7 m. De zuigbuis moet voldoende ver onder het water liggen met het oog op luchtaanzuigen. Verlenging van de buizen bij peilverlaging is betrekkelijk eenvoudig. Het rendement bedraagt 60 à 85%, afhankelijk van de opvoerhoogte.

De schroefpomp bestaat uit een waaier of een schroef in de plaatselijk verwijde zuig-persbuis. Deze perst het water axiaal in de persbuis. De schoepen zijn vaak verstelbaar voor wisselende opvoerhoogten en zelfs voor wisselende pomprichting. Bij kleine opvoerhoogte is het rendement groter dan bij een centrifugaalpomp.

### Krachtwerktuig

De eerste krachtwerktuigen waren de windmolens die in het begin van de vijftiende eeuw in gebruik kwamen. In de negentiende eeuw deden stoomgemalen hun intrede, in de twintigste eeuw gevolgd door diesel- en elektrische gemalen.

Het maalbereik van een windmolen loopt van windsnelheden van 6 tot 11 m/s, dit is ongeveer 25% van de tijd. Moderne windmolens met aërodynamische wieken kunnen ook bij lagere windsnelheden worden gemalen. Windmolens zijn duur in bediening en onderhoud. De nog in gebruik zijnde molens

zijn vaak voorzien van een machinale hulpbemaling of hulpaandrijving.

Het stoomgemaal vraagt een grote investering door het ketelhuis, de schoorsteen, de zware fundering en de dure bediening. Het stoomgemaal kan daarom tegenwoordig alleen nog worden toegepast bij continu-bemaling over lange perioden. Door reparaties en ketelinspectie kunnen stoomgemalen vele dagen achtereen buiten gebruik zijn.

Ook het dieselgemaal wordt steeds minder toegepast. De bediening vraagt goed geschoold personeel. Onder- en overbelasting kunnen goed worden opgevangen, zij het met een rendementsverlies.

Het elektrische gemaal is eenvoudig te bedienen en is het meest geschikt voor geautomatiseerde besturing op afstand. De motor zelf en het gebouw zijn goedkoop in aanschaf. De kabelaanleg en de transformator kunnen de aanleg duur maken, afhankelijk van de afstand, waarover de elektrische energie moet worden overgebracht. Het elektrische gemaal leent zich voor een automatisch bedrijf, waarbij de motor door een vlotter wordt in- en uitgeschakeld en voor afstandsbediening. Bij de gemalen blijft overigens altijd controle en smeren nodig. Ook het krooshek moet regelmatig worden schoongemaakt.

Indien een polder of een boezem meerdere gemalen, of althans meerdere opvoerwerktuigen heeft, komt bemalingsspreiding (spreiden van de bemaling over meerdere energiebronnen) in aanmerking. Men verkrijgt daardoor grotere bedrijfszekerheid. Men kan een dergelijke spreiding ook bereiken door de polders elkaar te laten helpen.

#### Opgave

Een polder moet worden bemalen. De opvoerhoogte van het water is 5 meter. Het debiet uit de polder is  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ . Er wordt gekozen voor een centrifugaalpomp ( $\eta = 70\%$ ), een elektrische motor ( $\eta = 85\%$ ). Het rendement van de overbrenging wordt geschat op  $90\%$ . Wat is het bruto vermogen dat nodig is voor deze bemaling?

#### Uitwerking

Het totale rendement van de bemalingsinstallatie is:

$$\eta_{\text{totaal}} = \eta_{\text{pomp}} * \eta_{\text{motor}} * \eta_{\text{overbrenging}} = 0,7 * 0,85 * 0,9 = 0,54$$

Het netto vermogen is:

$$N_{\text{netto}} = 9,8 * Q * H = 9,8 * 10 * 4 = 392 \text{ kW}$$

Het bruto vermogen is het netto vermogen gedeeld door het totale rendement:

$$N_{\text{bruto}} = \frac{N_{\text{netto}}}{\eta} = \frac{392}{0,54} = 726 \text{ kW}$$

#### Voorbeeld 4.1: Bemaling

Het ontwerpen van gemalen wordt nader behandeld in het college gz5550 "Transport onder druk".

#### 4.4.4 Berging

Door berging van water in een afwateringsgebied kunnen de piekdebieten in het afwateringsstelsel worden beperkt. Vooral in gebieden waar de piekdebieten hoog zijn (verharde, stedelijke gebieden) is dit van groot belang. Daarnaast kan berging dienen om water tijdens periode dat de lozing gestremd is (verval niet aanwezig, gemaal buiten bedrijf) op te slaan. Bij een indirecte lozing wordt water eerst tijdelijk geloosd op een reservoir: het water wordt geborgen.

##### **Berging tijdens stremmingen**

Bij natuurlijke lozing op rivieren of beken moet rekening worden gehouden met het afvoerregime van de rivier. Tijdens hoogwater kan de waterlozing gestremd zijn. De open waterberging in de polder moet dan zo groot zijn, dat een dergelijke periode overbrugd kan worden. Men kan ook naast de uitwateringssluis nog een hulpemaal plaatsen. De natuurlijke lozing geschiedt in het meest benedenwaarts gelegen punt van de polder. Waar dat niet mogelijk was, moest men vaak kilometers lange parallelwatergangen aanleggen om een voldoende laag punt aan de rivier te bereiken. Dit is vaak nodig door het klinken van de polder, waardoor men een nieuw, verder stroomafwaarts gelegen lozingspunt moest scheppen.

Bij de lozing op de zee of de zeearmen wordt gebruik gemaakt van het getij, als gevolg waarvan tweemaal daags laagwaters optreden. De sluisen moeten in een vrij korte tijdsduur het overtollige water spuien, waardoor zij een grotere capaciteit dienen te hebben dan die van het afwateringssysteem.

Bovendien moet in de polder een vrij grote waterberging aanwezig zijn om de stroming van de lozing over een hoogwater te kunnen overbruggen en bij stormvloeden zelfs over meer. Men kan daarbij gebruik maken van bergboezems en voorboezems, waarin het water bij hoge buitenwaterstanden tijdelijk kan worden geborgen.

##### **Indirecte lozing**

Bij indirecte lozing wordt het water eerst tijdelijk geloosd op een boezem of een andere polder, waarna het verder wordt geloosd op het open buitenwater.

Bij lozing op boezems is de capaciteit van de lozingsmiddelen vanuit de boezem naar het open buitenwater vaak kleiner dan de som van de capaciteiten van de polderlozingen. Dit komt omdat (een deel van de) polders wordt bemalen terwijl de lozing van de boezem geheel of gedeeltelijk natuurlijk is.

Men onderscheidt verschillende soorten boezems. Een besloten boezem is een boezem, waarvoor een maalpeil geldt. Zodra de waterstand op de boezem het maalpeil heeft bereikt, mogen de polders niet langer op de boezem lozen wegens gevaar voor doorbraak van de kaden. Een vrije boezem is een boezem, waarop de polders ten alle tijde mogen lozen. Een bergboezem is een binnen de polder gelegen omdijkt gebied, waarin tijdelijk water kan worden geborgen bij hoge binnenwaterstanden. Een voorboezem is een boezem, waarop bij hoge buitenwaterstanden het water tijdelijk kan worden geborgen. Een voorboezem wordt ook wel gebruikt aan zee door tijdens het hoogwater deze te vullen en tijdens het laagwater met groot verval te ledigen, waardoor de toegangseuwl met kracht kan worden doorgespoten.

Bij lozing op een andere lagere polder zijn voor de peilbeheersing afsluitbare duikers, stuwen of sluisen nodig zijn. Bij hogere ligging is het nodig gebruik te maken van een bemalingsinrichting. De sluisen of duikers en de gemalen dienen te worden berekend op dezelfde afvoerfactor als de polder zelf.

De berging in een polder bestaat uit twee componenten: de open waterberging en de gesloten berging. De open waterberging is gelijk aan de waterschijf die in het open wateroppervlak van een polder geborgen kan worden (vergelijking 4.5). De gesloten berging is gelijk aan de hoeveelheid neerslag die in de grond geborgen kan worden totdat de maximaal toelaatbare grondwaterstand wordt bereikt (vergelijking 4.6).

$$B_o = \frac{W * p}{O} \quad (4.5)$$

$$B_g = \frac{1}{1000} * \mu * (h_o - h_{\max}) * \frac{(O - W)}{O} \quad (4.6)$$

waarin: $B_o$	= open waterberging [mm];
$W$	= oppervlakte open water [ha];
$O$	= totale oppervlakte van het bemalingsgebied [ha];
$p$	= toelaatbare peilstijging van het open water [mm];
$B_g$	= gesloten waterberging [mm];
$\mu$	= bergingscoëfficiënt [-];
$h_o$	= oorspronkelijke grondwaterstand [m];
$h_{\max}$	= maximaal toelaatbare grondwaterstand [m];

### Opgave

Een polder watert natuurlijk af op zee, met behulp van een uitwateringssluis. Er mag voor een eerste benadering worden uitgegaan van een constante afvoer uit de polder van  $3 \text{ m}^3/\text{min}$ . Gedurende periode met hoog opgewaarde zeewaterstand kan de polder soms twee achtereenvolgende laagwaters niet natuurlijk lozen. Tijdens andere laagwater kan er 3 uur geloosd worden. De oppervlakte van het open water in de polder is 1,5 ha.

1. Bereken de waterstandsverhoging door berging van de polder.
2. Bereken de capaciteit van de uitwateringssluis.

### Uitwerking

1. Als er twee laagwater niet geloosd kan worden, moet het water ongeveer 36 uur worden geborgen. Dit betekent dat de bergingscapaciteit moet zijn:

$$V_{\text{berging}} = Q * t = 3 * 36 * 60 = 6480 \text{ m}^3$$

Dit water wordt geborgen op het open wateroppervlak van de polder. De waterstandsverhoging die hiervan het gevolg is, is:

$$h = \frac{V_{\text{berging}}}{A_{\text{berging}}} = \frac{6480}{1,5 * 10000} = 0,43 \text{ m}$$

2. In 3 uur tijd moet er vervolgens  $6.480 \text{ m}^3$  worden geloosd. Dit betekent dat de capaciteit van de uitwateringssluis moet zijn:

$$Q_{\text{sluis}} = \frac{6480}{3} = 2160 \text{ m}^3 / \text{h} = 600 \text{ l/s}$$

### Voorbeeld 4.2: Berging in polder



## 4.5 Polders

Gebieden waar tijdelijk of permanent het afwateringsniveau onder de buitenwaterstand bij het lozingspunt is gelegen, worden polders genoemd. De algemene definitie van een polder luidt: "Een gebied waarin de waterstand onafhankelijk van de omgeving kan worden beheerst en door bepaalde voorzieningen beschermd wordt tegen hoge buitenwaterstanden". Wanneer de waterstand wordt geregeld met een gemaal dan is de waterstand in de polder onafhankelijk van de waterstand in de omgeving. In het geval van toepassing van een uitwateringssluis is de onafhankelijkheid niet volkomen.

Polders zijn afgesloten van het omringende land en water door dijken (hoge waterkeringen) of door kaden (lage waterkeringen). De scheiding tussen twee polders wordt polderkade genoemd. De landscheiding is in feite een waterscheiding, het geeft de grens aan tussen twee boezemgebieden. Waterkeringen, welke het land beschermen tegen het open water (de zee of de rivieren) worden hoofdwaterkeringen genoemd. Dijken, die achter de hoofdwaterkering zijn gelegen worden binnendijken, slaperdijken of droge dijken genoemd. Vaak zijn het oorspronkelijke hoofdwaterkeringen, die door inpoldering van het voorliggende land tot tweede kering zijn vervallen.

Een polder kan bestaan uit één geheel of kan verdeeld zijn in polderafdelingen, welke ieder afzonderlijk verschillende peilen hebben. Eigenlijk zijn deze afdelingen dus zelf ook weer polders. De onderlinge scheiding van de afdelingen bestaat uit kaden. Handhaving van het peil geschiedt meestal door middel van stuwen, afsluitbare duikers en bemaling.

Al naar gelang de ligging, het ontstaan, de bodemsoort en het bodemgebruik kan men de polders indelen in verschillende groepen:

1. *Indeling van de polders naar de ligging*  
Rivierpolders zijn polders, welke hun overtollig water lozen op rivieren. Hiertoe behoren delen van de Betuwe, de Lijmers, het Rijk van Nijmegen en het Land van Maas en Waal. Buitenpolders zijn polders, die buiten de hoofdwaterkering liggen, omgeven door een dijk. Binnenpolders zijn polders die binnen de hoofdwaterkering liggen. Zomerpolders liggen buiten de hoofdwaterkering en lopen meestal onder bij hoge rivierwaterstanden of stormvloedstanden. 's Zomers zijn zij in de meeste gevallen watervrij. Deze toestand kan ook ontstaan doordat zij zomers wel worden bemalen en 's winters niet, zoals in Friesland wel voorkomt.
2. *Indeling van de polders naar het ontstaan*  
Droogmakerijen zijn polders, welke zijn ontstaan door het droogmaken van plassen, meren of zeebodems. Zij komen voor in Zuid-Holland, Noord-Holland, Utrecht, Friesland en Groningen. De nieuwste droogmakerijen zijn de IJsselmeerpolders. Indijkingen of bedijkingen zijn ontstaan door het bedijken van buitendijks gelegen gronden zoals kwelders, schorren en gorzen, welke ook bij hoogwater drooggelegen zijn en de slikken en blikken, welke alleen bij laagwater droogvallen.
3. *Indeling van de polders naar de bodemsoort*  
Veenpolders zijn polders, waarvan de bodem uit veen bestaat; Kleipolders zijn polders, waarvan de bodem uit klei of zavel bestaat; Zandpolders, zijn polders, waarvan de bodem uit zand bestaat. Dit woord is nog niet ingeburgerd, omdat dergelijke gebieden tot nu toe nog weinig zijn ingepolderd.
4. *Indeling van de polders naar het bodemgebruik*  
Bouwpolders zijn polders, welke voornamelijk uit bouwland bestaan; Weipolders of koepolders zijn polders, welke voornamelijk uit grasland bestaan; Veenpolders zijn polders, welke na de omdijking worden uitgeveend. Stedelijke polders zijn ingepolderde stedelijke gebieden.

## 4.6 Ontwerp van afwateringssystemen

### 4.6.1 Inleiding

Het ontwerp van een afwateringssysteem is erop gericht waterlopen en benodigde kunstwerken zodanig te dimensioneren dat binnen de gestelde (ook financiële) randvoorwaarden aan het gestelde doel wordt voldaan. Het ontwerp van een afwateringssysteem bestaat uit de volgende onderdelen:

- 1) Bepaling van doelstellingen en functies;
- 2) Bepaling van tracé van de waterlopen en de plaats van de kunstwerken;
- 3) Bepaling ontwerpnormen (gewenste peilen);
- 4) Bepaling van de verschillende maatgevende afvoeren;
- 5) Dimensionering van waterlopen en kunstwerken.

### 4.6.2 Bepaling van doelstellingen en functies

De bepaling van doelstellingen en functies bestaat uit het opstellen van het programma van eisen. Het programma van eisen volgt uit de doelstelling van het afwateringsplan en de aanwezige, of te stellen, randvoorwaarden. Bij het ontwerpen van afwateringssystemen zijn zelden alle noodzakelijk gegevens beschikbaar zoals neerslaggegevens, gebiedsparameters, bergingscoëfficiënten, doorlaatvermogen, afstand tussen ontwateringsmiddelen, grondwaterstanden en afvoergegevens. In de praktijk van het ontwerpen van waterbeheersingsplannen wordt uitgegaan van min of meer algemeen geldende ontwerpeisen die door ervaring en onderzoek zijn verkregen. Men dient zich er van bewust te zijn dat deze normen niet zonder meer overal en te allen tijde toepasbaar zijn, maar afhankelijk zijn van plaats en tijd.

De primaire functie van het afwateringssysteem is het afvoeren van water vanaf het lozingspunt van het ontwateringssysteem tot aan de grenzen van het afwateringsgebied. Deze afvoer vindt plaats via afwateringsmiddelen: open waterlopen, gesloten leidingen en kunstwerken. Daarnaast kan het afwateringssysteem nog een aantal functies vervullen:

- Afvoer- en bergingsfunctie voor stedelijk en/of industrieel afvalwater, al of niet via een zuiveringsinstallatie lozend op het waterlopensysteem;
- Scheepvaartfunctie;
- Scheidingsfunctie (veekering of perceelscheiding);
- Recreatiefunctie (zwemwater, vaarwater of viswater).

Bij het ontwerp van een afwateringssysteem zal ook rekening moeten worden gehouden met deze extra functies.

### 4.6.3 Tracé en inrichting van het afwateringssysteem

Bij het maken van een ontwerp van een afwateringsplan is de vaststelling van het tracé (het ruimtelijk plan) van de waterlopen een belangrijk onderdeel. Hiervoor kan geen eenduidig recept worden gegeven omdat het tracé door tal van factoren wordt bepaald. De drie belangrijkste factoren voor de tracébeoordeling, die meestal met elkaar strijdig zijn, zijn:

1. *Hydraulische randvoorwaarden*  
Primaire waterlopen moeten zoveel mogelijk de meest laag gelegen delen van een gebied volgen, terwijl de secundaire en tertiaire waterlopen de daaropvolgende, minder laag gelegen delen van het gebied moeten volgen. Een dergelijk tracé waarborgt een goed verhang voor de afvoer van water via het ontwaterings- en het afwateringssysteem naar het lozingspunt. Op deze wijze bepaalt de topografie van een gebied de inrichting van het systeem.
2. *Het ontwateringssysteem*  
Het gekozen ontwateringssysteem (patroon van greppels, sloten of drainbuizen) vormt op tertiair niveau een belangrijke randvoorwaarde voor het afwateringssysteem. Bij de uitmonding van het ontwateringssysteem begint namelijk het afwateringssysteem. In poldergebieden wordt de lengte van de drainbuizen vooral bepaald door de onderhoudsmogelijkheden ervan. In hellende gebieden komen samengestelde drainagesystemen voor die een veel grotere lengte kunnen hebben.

### 3. *De bedrijfsvoering*

Een efficiënte bedrijfsvoering vereist een regelmatig patroon van de kavels; het liefst rechthoekig van vorm. De eisen van een optimale bedrijfsvoering hangen uiteraard af van het bodemgebruik (landbouw, veeteelt, tuinbouw, etc.).

In vlakke gebieden wegen de hydraulische eisen minder zwaar en kan men bijvoorbeeld ondiepten opvullen met de grond uit de nieuw te maken waterlopen. In hellende gebieden zal de tracering veel duidelijker door de topografie van het gebied worden bepaald. De hydraulische eisen wegen verder bij primaire waterlopen zwaarder dan bij tertiaire waterlopen. Het aansluiten van het te realiseren afwateringssysteem bij het natuurlijk afwateringssysteem is meer gewenst naarmate men dichter bij het lozingspunt van het systeem komt. In het algemeen kan nog worden gesteld dat de kortste weg naar het lozingspunt moet worden gevolgd.

Bij de discussie over de uiteindelijke inrichting zijn veelal meerdere disciplines betrokken. Elk van de disciplines zal daarin zijn specifieke belangen behartigen. Zo zal de waterbeheerder er primair opletten dat er geen hydraulisch foute beslissingen worden genomen. Als belangrijke randvoorwaarde gelden daarbij voortdurend de kosten, die gemoeid zijn met een bepaalde oplossing.

#### **4.6.4 Peilnormen voor de afwatering**

In een polder tracht men door ontwatering een vaste waterstand te handhaven, het zogenaamde polderpeil. Vaak wordt daarnaast alleen de eis gesteld dat de afwatering geen belemmering mag worden voor een goede ontwatering. De ontwateringsnorm ("een bepaalde drooglegging bij een bepaalde afvoer") die geldt voor het ontwateringssysteem wordt dan ook voor het afwateringssysteem gebruikt. Door het verschil in het gedrag van het ontwaterings- en van het afwateringssysteem is het niet eenvoudig eenduidige relaties te vinden tussen afwaterings- en ontwateringsnormen. De belangrijkste grootte bij de afwatering is het waterpeil (t.o.v. maaiveld is dit de drooglegging). Het waterpeil is het resultaat van een bepaalde afvoer in een waterloop met een bepaald bodemverhang, bepaalde afmetingen en een zekere wandruwheid.

Op een peilenplan worden de waterpeilen aangegeven, die in de waterlopen moeten worden gehandhaafd gedurende de periode dat de maatgevende afvoer plaatsvindt. In principe wordt het gewenste peil in de waterlopen gevonden door de maaiveldhoogte te verminderen met de vereiste drooglegging op dat moment. In de praktijk is het echter onrendabel, zo niet onmogelijk op elk punt de gewenste drooglegging te realiseren. Als basis voor het ontwerp wordt dan ook een peilenkaart opgesteld, waarop de gewenste peilen staan aangegeven voor gebiedsdelen van een zekere omvang. Bij het berekenen van het plan, zal naar nog groter aaneengesloten gebiedsdelen worden gezocht, waarvoor een acceptabel peil met één doorgaande waterlijn kan worden gerealiseerd.

Er dient dus een marge te worden aangegeven, waarbinnen een afwijking van de gewenste drooglegging acceptabel is. Daarnaast wordt op grond van afweging van kosten en baten meestal geaccepteerd dat niet de gehele oppervlakte aan deze droogleggingseis voldoet. Een marge van 10% van de oppervlakte is in dit verband gebruikelijk.

Voor aan- en afvoersituaties voor de verschillende frequenties van voorkomen, kunnen aparte droogleggingseisen worden gesteld. Het uiteindelijke peilenplan komt dan ook tot stand als het resultaat van een optimaliseringsproces, waarbij tevens de kosten zo goed mogelijk tegen de baten worden afgewogen. In de praktijk worden bij deze afweging vuistregels gehanteerd, gebaseerd op bovengenoemde overwegingen:

- Vlak gebied: peilvlakken minimaal 400 ha; verschil tussen peilvlakken minimaal 0,25 m.
- Hellend gebied: peilvlakken minimaal 150 ha; verschil tussen peilvlakken minimaal 0,40 m.
- Gewenste drooglegging voor 90% van het peilvlak gerealiseerd.

Indien men de relatie tussen peilen en afvoeren kent kan ook met de afvoer als norm voor de afwatering worden gewerkt. In het landelijk gebied worden voor het ontwerpen van afwateringsstelsels drie karakteristieke grootheden gehanteerd.

a. *Normaal waterpeil (N.W.-peil)*

Het N.W.-peil is het peil dat 10 à 20 dagen per jaar wordt bereikt of overschreden. Deze grootheid geeft aan welke afvoeren in de winter met vrij grote frequentie voorkomen en wordt tevens gebruikt ter beoordeling van de afwatering in het groeiseizoen. In dit seizoen moet de ontwatering optimaal kunnen functioneren, ook bij enige begroeiing in de waterlopen.

b. *Hoog waterpeil (H.W.-peil)*

Het H.W.-peil is het peil dat 1 à 2 dagen per jaar wordt bereikt of overschreden. In bemalen gebieden is de bij het H.W.-peil behorende afvoer bepalend voor de capaciteit van de bemaling.

c. *Maximaal waterpeil (M.W.-peil)*

Het M.W.-peil is het peil dat 1 à 2 dagen per 100 jaar wordt bereikt of overschreden. Dit peil moet zodanig zijn, dat ook bij deze zeldzame overschrijdingen geen kunstwerken worden beschadigd of dure gewassen en gebouwen in het water komen te staan. De waarde kan in veel gevallen door extrapolatie worden verkregen.

In Nederland is in verschillende gebieden met ongestremde lozing onderzoek verricht naar het verband tussen de bovengenoemde karakteristieke grootheden en de bijbehorende afvoerdebieten. Er bestaat een globale relatie, die in tabel 4.1 is weergegeven.

Ontwerpeisen kunnen worden gebaseerd op de hierboven genoemde waterpeilen. Zo is de ontwerpeis om inundaties te voorkomen, dat het M.W.-peil gelijk is aan het maaiveld. Het H.W.-peil of een combinatie van H.W.-peil en M.W.-peil worden ook als norm gehanteerd (tabel 4.2). Kolom 1 geeft waarden voor het H.W.-peil. Als er wordt uitgegaan van de combinaties van H.W.-peil en N.W.-peil, dan zijn de waarden van de N.W.- of de H.W.-norm te vinden in de kolommen 2a en 2b van tabel 4.2.

**Tabel 4.1: Waterpeilen in landelijk gebied**

Peil	afvoer	waterdiepte	frequentie
N.W.	$Q_n$	$h_n$	10 -20 dagen per jaar
H.W.	$Q_h = 2^*Q_n$	$h_h = 1,4^*h_n$	1-2 dagen per jaar
M.W.	$Q_m = 4^*Q_n$	$h_m = 2.0^*h_n$	1-2 dagen per 100 jaar

**Tabel 4.2: Droogleggingseisen voor verschillende gronden (bodemgebruik: bouwland)**

	kolom 1	kolom 2a	kolom 2b
	H.W	H.W.	M.W.
zware klei	0,90	0.60	1.10
lichte klei	1,00	0.60	1.20
zavel en löss	1,10	0.60	1.30
veen	0,90	0.60	1.00
klei op zand	1,00	0.60	1.10
lemig zand, veen op zand	0,80	0.50	1.00
fijn zand	0,75	0.50	0.90
grof zand	0,70	0.50	0.80

#### 4.6.5 Bepaling van de maatgevende afvoer

##### 4.6.5.1 Inleiding

De bepaling van de maatgevende afvoer is een belangrijk onderdeel van het ontwerpproces. Er is echter geen eenduidige manier te geven hoe de maatgevende afvoer moet worden bepaald. In de praktijk bestaan een zeer groot aantal benaderingsmethoden voor de vaststelling van de maatgevende afvoer. De toepassingsmogelijkheden van deze methoden hangen af van de beschikbaarheid van gegevens en het type ontwateringssysteem. Hier worden drie methodes kort besproken: de empirische methode, statistische neerslag-methoden (regenduurlijnen) en niet-stationaire afvoermodellen. Het afwateringssysteem van een hoogheemraadschap of waterschap bestaat meestal uit boezems waarop onder andere de aanliggende polders lozen. Onder een polder wordt verstaan: een gebied, dat door een waterkering beschermd is tegen water van buiten en waarbinnen de waterstand beheerst kan worden [Verklarende hydrologische woordenlijst, TNO; 1986]. In de polders wordt gestreefd naar een waterstand die het best past bij de bodemsoort en het gebruik daarvan. Dit streefpeil wordt het polderpeil genoemd en is vaak seizoens- en gebiedsafhankelijk. Gedurende de winter is het peil lager dan in de zomer, dit wordt onder andere gedaan zodat de boeren in het voorjaar het land eerder kunnen bewerken.

Het overschot aan water in de polder wordt door middel van een gemaal op de boezem geloosd. De toegestane bemalingscapaciteit van de polder wordt beperkt door de capaciteit van de boezem. Om tijdens periode van hevige regenval de peilstijgingen van de polder binnen toelaatbare grenzen te houden is meestal open water berging nodig.

#### 4.6.5.2 Gemengde hellende/vlakke gebieden

Indien in het geheel geen gegevens van het afwateringsgebied bekend zijn dan zal de maatgevende afvoer moeten worden geschat op grond van ervaring opgedaan in vergelijkbare gebieden. Deze empirische normen berusten alle op ervaringen die men in de loop der tijd heeft opgedaan. De afvoernormen worden gedifferentieerd op basis van heel globale gebiedskenmerken zoals:

- de grootte van het afvoergebied;
- topografie (hoogteligging, helling, ontwateringstoestand);
- vorm van het stroomgebied;
- grondwaterstand;
- bodemgebruik.

Empirische normen kunnen verschillend van vorm zijn. Ze variëren van lijsten afvoercoëfficiënten voor verschillende situaties tot vergelijkingen die een groot aantal gebiedskenmerken in rekening brengen. Hier worden drie voorbeelden kort besproken: de normen van Blauw en Oostra, de Cypress Creek formule en de rationele methode.

Een groot nadeel van het gebruik van empirische normen en formules is de beperkte toepasbaarheid. Ze gelden in principe alleen voor de klimatologische omstandigheden en het ontwateringssysteem het gebied waarvoor ze zijn ontwikkeld.

De Blauw en Oostra formuleerden voor Noord-Brabant een empirische methode, waarbij de afvoercoëfficiënten afhankelijk zijn van de oppervlakte van het afwateringsgebied en de topografie (zie tabel 4.3).

**Tabel 4.3 Afvoercoëfficiënten De Blauw en Oostra**

Q = C * F (Q= debiet [l/s]; C= afvoercoëfficiënt [l/s.ha]; F = oppervlak [ha])	
gebied	afvoercoëfficiënt [l/s.ha]
oppervlakte (F) kleiner dan 10.000 ha	0,333 a
oppervlakte (F) groter dan 10.000 ha	a * (0,533 - 0,05 log F)
samengesteld gebied	( $\Sigma F * a$ ) / $\Sigma F$
Voor a kunnen de volgende waarden worden aangehouden. a = 1: voor gebieden zonder zichtbare afwatering (winter gws > 140 cm ±m.v.) a = 2: hoge landbouwlanden met incidenteel sloten (winter gws 70 – 100 cm ±m.v.) a = 3: voor laaggelegen gebieden met sloten (winter gws < 70 cm ±m.v.) a = 4: voor laaggelegen gebieden met kwel	

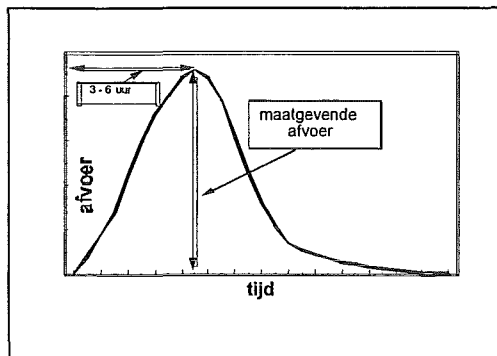
In het buitenland komen empirische formules voor die er in algemene vorm uitzien als de Cypress Creek formule (vergelijking 4.7). In deze formule is de grootte, de vorm en de geaardheid van het stroomgebied opgenomen, alsmede de regenintensiteit (let op eenheden!).

$$Q = b * A^m$$

Cypress Creek (4.7)

waarin:

- Q = maatgevende afvoer [ $\text{m}^3/\text{s}$ ];
- b = een coëfficiënt waarin de vorm en geaardheid stroomgebied en de regenintensiteit verwerkt zijn [ $\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{km}^2$ ];
- A = oppervlakte stroomgebied [ $\text{km}^2$ ];
- m = coëfficiënt (0,5 - 0,85 al naar gelang de inzichten van de opstellers).



Figuur 4.9: Afvoerverloop in hellend gebied

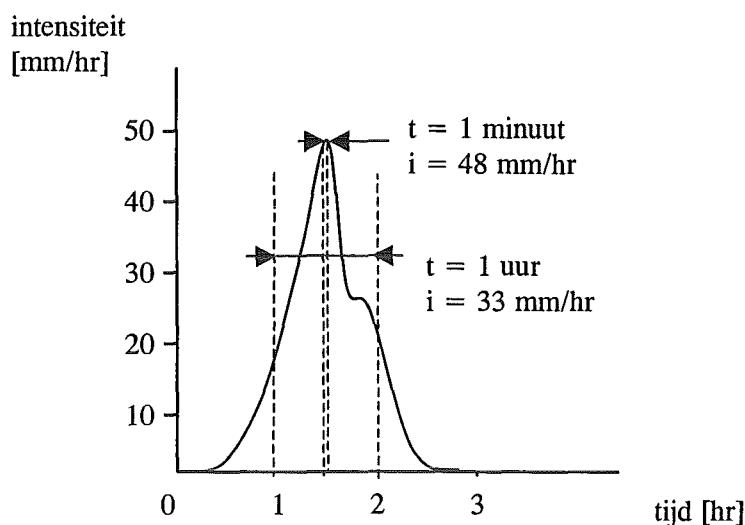
In sterk hellende gebieden speelt de oppervlakteafvoer een overheersende rol. De afvoer zal dan ook een sterk gepiekt verloop te zien geven (figuur 4.9). De maatgevende afvoer wordt in hoge mate bepaald door buien met een hoge neerslagintensiteit. De maatgevende tijdsduur ligt meestal in de orde van grootte van enkele uren. Waar in vlakke gebieden het ontwerp gebaseerd kan zijn op een gemiddeld hoge afvoer, in hellende gebieden moet men het ontwerp baseren op de hoogste pieken van de afvoer.

#### 4.6.5.3 Hellende gebieden met snelle afvoer, rationele methode

Er zijn een groot aantal methoden ontwikkeld om de maatgevende piekafvoeren van sterk hellende gebieden te bepalen. Het zijn alle min of meer empirische methoden die soms sterk beperkt zijn in hun toepassingsgebied. De **rationele methode** wordt hier kort besproken. In gevallen waar hydrologische gegevens beperkt zijn kan deze methode een goede hulp zijn bij het schatten van de piekafvoer. Voor de principes en het gebruik van deze en andere methoden wordt verwezen naar de colleges he3010 *Hydrologie* en lw5510 *Stedelijke waterbeheersing*.

De rationele methode is een veelgebruikte simpele (en dus grove) methode om de piek oppervlakteafvoer te schatten. De rationele methode is oorspronkelijk ontwikkeld voor stedelijke gebieden en is in principe slechts toepasbaar voor kleinere afwateringsgebieden tot zo'n 4000 ha. De methode berust op een stationaire homogeen verdeelde ontwerpneerslagintensiteit ( $i$ ) en een afvoercoëfficiënt ( $C$ ) tot een maatgevende afvoer. (Voor grotere gebieden worden de  $i$  en de  $C$  variabel genomen als functies van gebiedsgrootte, neerslagverloop, topografie en bodemsoort. Deze methoden worden behandeld in het college *Irrigatie en Drainage*, lw4410).

## Tijdsduur en gemiddelde intensiteit binnen een regenbui



## Waargenomen regenbui

De regenbui wordt ontleed in neerslagperioden met toenemende tijdsduur en bijbehorende maximale constante gemiddelde intensiteit.

Uit bovengeschetste waarneming wordt b.v. gevonden:

bij een tijdsduur  $t = 1/60$  uur (minuut) is de maximale gemiddelde intensiteit  $i = 48 \text{ mm/hr}$

bij een tijdsduur  $t = 1$  uur is de maximale gemiddelde intensiteit  $i = 33 \text{ mm/hr}$

Deze analyse wordt voor een grote reeks tijdsduren uitgevoerd voor alle beschikbare waargenomen regenbuien in een reeks van jaren.

Van deze waarnemingen reeks worden van de combinaties van tijdsduur met intensiteit de statistische kans van voorkomen uit de waarnemingen reeks afgeleid. Deze statistische kans wordt meestal uitgedrukt in de herhalingskans in jaren.

De gevonden waarden voor b.v. de herhalingskans van tijdsduur-intensiteits combinatie van 1 : 5 jaar (d.w.z. ieder jaar 20% kans dat deze combinatie wordt bereikt of overschreden) in een grafiek uitgezet. Meestal gebruikt men logaritmisch of dubbel-logaritmisch papier zodat de grafiek uit zo recht mogelijke lijnen bestaat die goed zijn te interpoleren.

Dit wordt ook gedaan voor tijdsduur-intensiteits herhalingskansen van b.v. 1 jaar, 10 jaar, 20 jaar, 50 jaar.

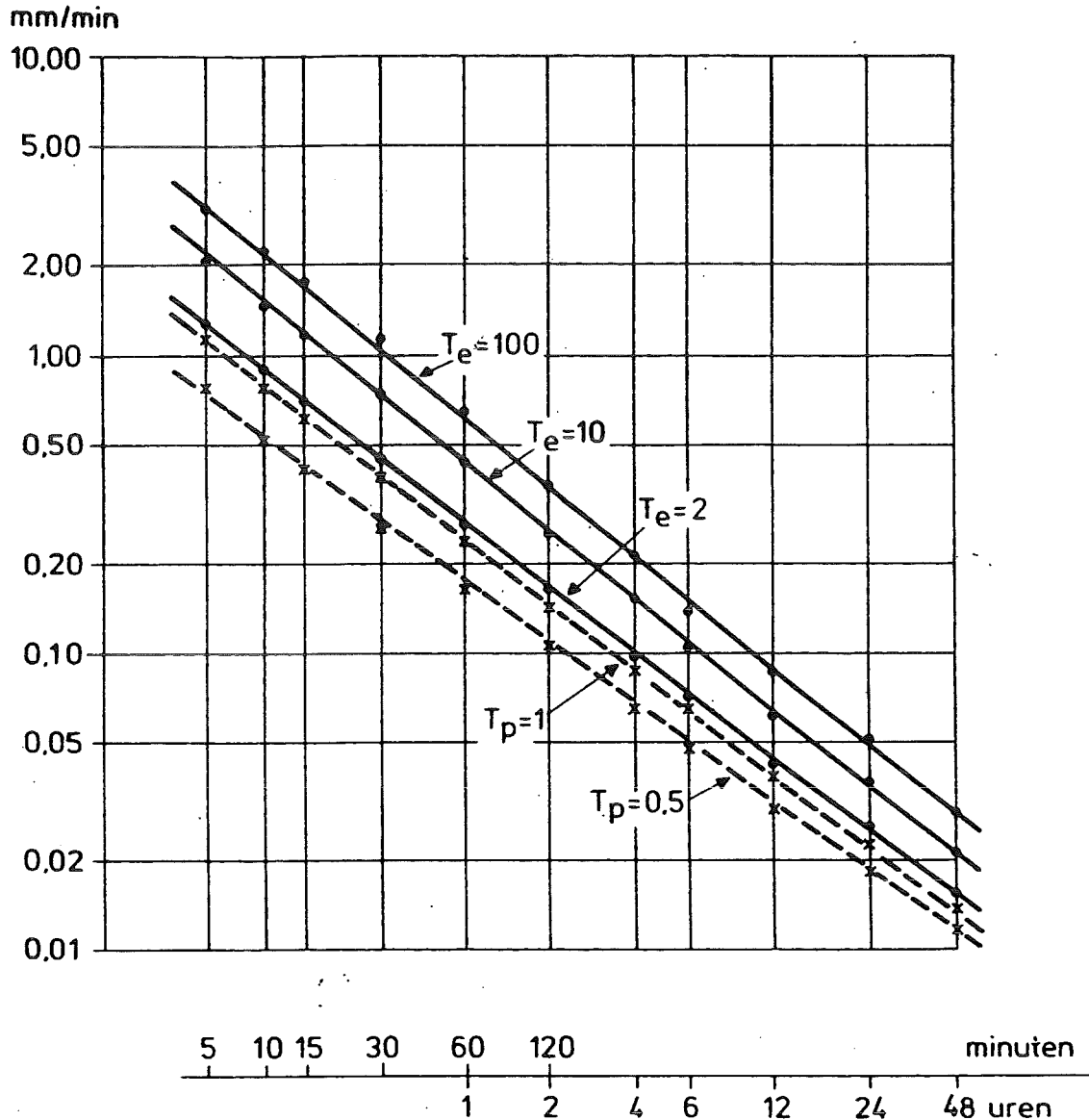
Men heeft nu een grafiek waaruit bij een gekozen kans van statistisch voorkomen voor iedere tijdsduur de maximale gemiddelde intensiteit van de neerslag is af te leiden.

**Figuur 4.10: Tijdsduur en gemiddelde neerslagintensiteit binnen een bui**

De ontwerpneerslagintensiteit kan worden bepaald met behulp van een set neerslaggegevens met een herhalingsduur waarop het stelsel wordt gedimensioneerd. In de regenval-intensiteitlijn is te zien dat de gemiddelde intensiteit van de neerslag [mm/uur] afneemt naarmate een bui langer duurt. De piekafvoer van het gebied treedt op wanneer de eerste regendruppel van het verste weg gelegen punt tegelijk afstroomt met de laatste regendruppel van het meest nabij gelegen punt van het afvoerend areaal. De hoogste piekafvoer zal worden gevonden bij een buiduur die even lang duurt als de afstroomtijd van



het water van het meest verafgelegen punt in het stroomgebied. Deze afstroomtijd noemt men de concentratietijd ( $t_c$ ). Om deze te schatten moet de langst afstromende waterloop (goot, beek, riool) en de gemiddelde watersnelheid in deze waterloop bekend zijn, of zo nauwkeurig mogelijk worden geschat. Hieruit volgt de concentratietijd, of wel de kritieke buiduur die de hoogste piekafvoer zal genereren.



Extreme neerslagintensiteiten voor De Bilt (1906-1977) voor duren van 5 minuten tot 48 uren. De herhalings tijden  $T_p$  en  $T_e$  zijn uitgedrukt in jaren.

bron:

KNMI, klimaat van Nederland, Neerslag en verdamping  
TA Buishand, CA Velds fig 8.8

**Figuur 4.11: Neerslagintensiteit – tijdsduur lijnen**

$$t_c = \frac{L}{v} * \frac{1}{3600} \quad (4.8)$$

waarin:  $t_c$  = kritische buiduur [uur];  
 $L$  = lengte langste waterloop [m];  
 $v$  = stroomsnelheid in langste waterloop [m/s].

De afvoercoëfficiënt volgt uit het percentage verhard terrein dat in het beschouwde gebied optreedt. In Nederland is de afvoercoëfficiënt voor verhard gebied ongeveer 1, voor onverhard gebied is deze 0.1. De afvoercoëfficiënt bij hevige regenval wordt geschat aan de hand van grondsoort en terreinhelling en kan variëren van 0,01 tot 0,8. Dit is per gebied in lokale studies vastgelegd. Door het oppervlak van het afwaterend gebied, de neerslagintensiteit en de afvoercoëfficiënt met elkaar te vermenigvuldigen wordt de maatgevende afvoer bepaald.

$$Q = C * i * A * \frac{10}{3600} \quad (4.9)$$

waarin:  $Q$  = maatgevende afvoer [ $m^3/s$ ];  
 $C$  = afvloeiingscoëfficiënt [-];  
 $i$  = kritische neerslagintensiteit [mm/uur];  
 $A$  = afvoerend areaal [ha];  
 $10/3600$  = omrekening naar  $m^3/s$ .

**Opgave**

Een afwateringskanaal voor een areaal van 100 ha moet worden gedimensioneerd. Gegeven is bovenstaande regenval-intensiteitskromme met een stochastische kans van 1:5 jaar. In het gebied is 75% van het oppervlak verhard. De lengte van de langste waterloop is 2880 m. De geschatte stroomsnelheid in deze waterloop is 0,4 m/s.

**Uitwerking**

De kritieke buiduur is 2 uur:

$$t_c = \frac{L}{v} = \frac{2880}{0,4} * \frac{1}{3600} = 2 \text{ uur}$$

Uit de neerslag-intensiteitslijn kan worden afgelezen dat de ontwerpneerslagintensiteit (herhalings-tijd 5 jaar; duur 2 uur) 6,2 mm/uur is (let op dubbele logschaal).

De afvoercoëfficiënt is:  $C = 0,75 * 1 + 0,25 * 0,1 = 0,78$

De combinatie van ontwerpneerslagintensiteit, afvoercoëfficiënt en oppervlakte levert een ontwerp-afvoer van 1,34 m<sup>3</sup>/s op voor het afvoerend areaal.

$$Q = C * i * A * \frac{10}{3600} = 0,78 * 6,2 * 100 * \frac{10}{3600} = 1,34 \text{ m}^3 / \text{s}$$

**4.6.5.4 Vlakke gebieden en polders**

Om uit het enorme aantal neerslag gegevens dat in de loop der jaren is gemeten te komen tot een hanteerbaar drainage ontwerpcriterium is de statistische neerslag methode ontwikkeld. Hierbij worden neerslag gegevens via statistische benadering tot een ontwerpcriterium herleid.

De benodigde drainagecapaciteit of gemaalcapaciteit van een gebied wordt bepaald door gebruik te maken van de met de 'regenduurlijn' bepaalde maatgevende "regenbui". In het verleden zijn verschillende methoden ontwikkeld die uitgaan van een statistisch / empirisch bepaalde ontwerpneerslag. Enkele van deze methoden worden in deze paragraaf toegelicht:

- Methode Simons & Greve;
- Methode voor de Wieringenmeer;
- Methode De Zeeuw & Hellinga;
- Methode Van Rossum & De Vries;
- Regenduurlijn methode.

**Methode Simons & Greve**

Bij de eerste bepalingen van de benodigde bemalingscapaciteit werd er van uit gegaan dat het grootst bekende neerslagoverschot in één maand (196 mm in oktober 1841), ook in één maand moest worden afgevoerd. Waarbij het neerslagoverschot werd gebaseerd op de neerslag vermeerderd met kwel en verminderd met de verdamping van open water (196 mm + 7 mm kwel). Dit kwam neer op 6.8 mm/dag. Naderhand werd ingezien dat benodigde bemalingscapaciteit te hoog werd ingeschat omdat er slechts zeer zelden een dusdanig hoog neerslagoverschot had plaats gevonden. Gesteld werd dat het maatgevende neerslagoverschot 129 mm per maand betrof, dit werd vermeerderd met 7 mm kwel per maand zodat de benodigde bemalingscapaciteit 136 mm/maand betrof (4.5 mm/dag) [Simons & Greve, 1844].

**Methode voor de Wieringenmeer**

Bij de eerste berekeningen ten behoeve van het bepalen van het waterbezwaar onder maatgevende omstandigheden voor de Wieringenmeer werd aangenomen dat de neerslag die in één dag viel, gelijkmatig verdeeld over drie dagen tot afvoer kwam. Deze berekeningen waren gebaseerd op de neerslag van 13 - 16 november 1915 in de Haarlemmermeer. Deze periode was, volgens de toen bekende neerslaggegevens, voor polderbemaling het meest ongunstig. Het aldus berekende waterbezwaar werd als maatgevend beschouwd. De benodigde bemalingscapaciteit kwam neer op 7,4 mm/dag [Dienst der Zuiderzeewerken, 1921].

**Methode De Zeeuw & Hellinga**

Bij de volgende methode (De Zeeuw & Hellinga) wordt een stroomgebied c.q. droogmakerij gekarakteriseerd door een reaktiefactor (vertraging). In de droogmakerij kunnen meerdere gebieden worden onderscheiden die ieder een eigen reaktiefactor bezitten, en daardoor verschillend op de neerslag kunnen reageren. Bij deze methode wordt er van uit gegaan dat de afvoer evenredig is met de grondwaterstand boven de ontwateringsbasis. De reaktiefactor en de bergingscoëfficiënt zijn empirische parameters die nog bepaald moeten worden. Het bepalen van de reaktiefactor  $\alpha$  kan zowel uit afvoermetingen als grondwaterstandsmetingen geschieden. De methode van De Zeeuw & Hellinga mag slechts worden toegepast indien de weerstand tegen de waterbewegingen nabij de ontwateringsmiddelen is geconcentreerd [De Zeeuw & Hellinga, 1958].

**Methode Van Rossum & De Vries**

De volgende methode om de benodigde bemalingscapaciteit te bepalen houdt eveneens rekening met vertraging tussen neerslag en afvoer. Deze methode is in principe een verfijning van de methode die gebruikt werd voor het bepalen van het waterbezwaar voor de Wieringenmeer. Voor een periode van tientallen jaren werd nagegaan welke ongunstige neerslaggebeurtenissen zich in een periode van een aantal opeenvolgende dagen voordeden. De neerslaghoeveelheden die hooguit één keer per tien jaar voorkwamen werden buiten beschouwing gelaten. De neerslag zal na kortere of langere tijd aan het grondwater worden toegevoegd en via greppels, drains of kavelsloten worden afgevoerd. Voor de verschillende gebieden wordt een afvoer periode aangenomen, de lengte van de afvoer periode hangt af van de aanwezigheid van drainage en de grondsoort.

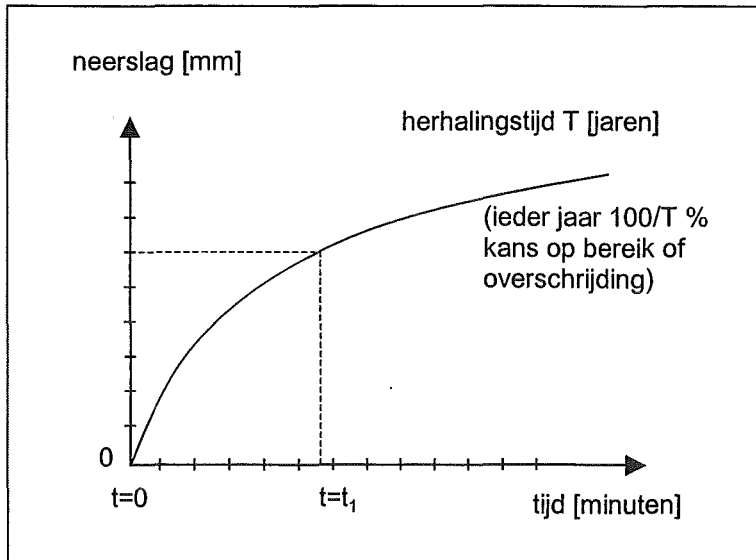
**De regenduurlijnmethode**

De regenduurlijnmethode wordt in de volgende paragraaf behandeld:

#### 4.6.5.5 Regenduurlijnmethode

##### Een regenduurlijn

De regenduurlijnmethode is een methode waarmee in snel op neerslag reagerende vlakke gebieden op grond van historische neerslaggegevens de benodigde afvoer- en / of bergingscapaciteit kan worden berekend. Een "regenduurlijn" geeft de maximaal te verwachten hoeveelheid neerslag vanaf het moment dat de neerslag begint ( $t=0$ ) tot het tijdstip  $t$  ( $t=t_1$ ), voor een bepaalde herhalingstijd  $T$  (zie figuur 4.12). Een herhalingstijd van  $T$  jaar betekent dat er ieder jaar een kans van  $1/T \cdot 100\%$  (voor  $T > 1$  jaar) is dat het maximum wordt bereikt of overschreden.



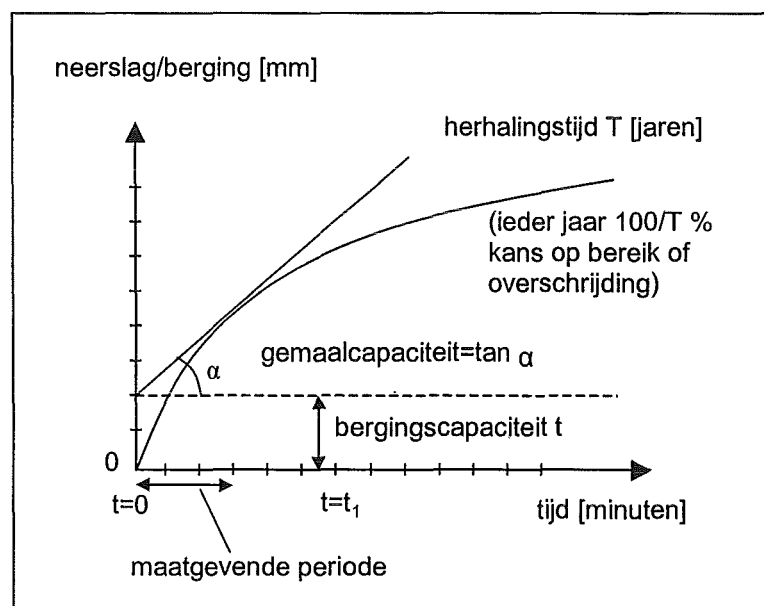
Figuur 4.12: Een regenduurlijn

Een regenduurlijn is dus een presentatie van een statistische analyse van historische neerslagmetingen met als doel deze metingen te kunnen gebruiken voor ontwerp doeleinden. Het is geen werkelijke neerslaggebeurtenis of maximale regenbui, noch geeft het verloop van een regenbui weer.

##### Toepassing van regenduurlijnen

In vlakke gebieden die relatief snel op de neerslag reageren en waar de berging niet te groot is (zodat de lange golf verschijnselen verwaarloosbaar zijn), is het gebruik van de regenduurlijn soms een goed hulpmiddel om de maatgevende afvoer te bepalen. Deze methode wordt vaak in polders gebruikt voor de bepaling van de gemaalcapaciteit of de benodigde open waterberging.

Afhankelijk van de beoogde toepassing is een regenduurlijn met een bepaalde herhalingstijd  $T$  en een bepaald tijdsverloop (onderverdeeld in minuten, uren of dagen) op de horizontale as nodig. Zo is voor snel reagerende stedelijke gebieden is een regenduurlijn met op de horizontale as een tijdsspanne van uren en een onderverdeling in minuten nodig, voor een trager reagerende polder kan worden volstaan met een tijdsspanne van dagen en een onderverdeling van uren. De herhalingstijd volgt uit de eisen die er aan het falen van het systeem worden gesteld.



**Figuur 4.13: Het gebruik van een regenduurlijn voor het bepalen van de gemaalcapaciteit**

In het volgende wordt aan de hand van twee figuren besproken hoe de gemaalcapaciteit kan worden berekend bij bekende bergingscapaciteit, en hoe de bergingscapaciteit kan worden afgelezen bij gegeven gemaalcapaciteit. In beide gevallen mag het systeem eens in de T jaar falen. Ieder jaar is de kans dus  $100/T$  % dat de piekafvoer wordt bereikt of overschreden!

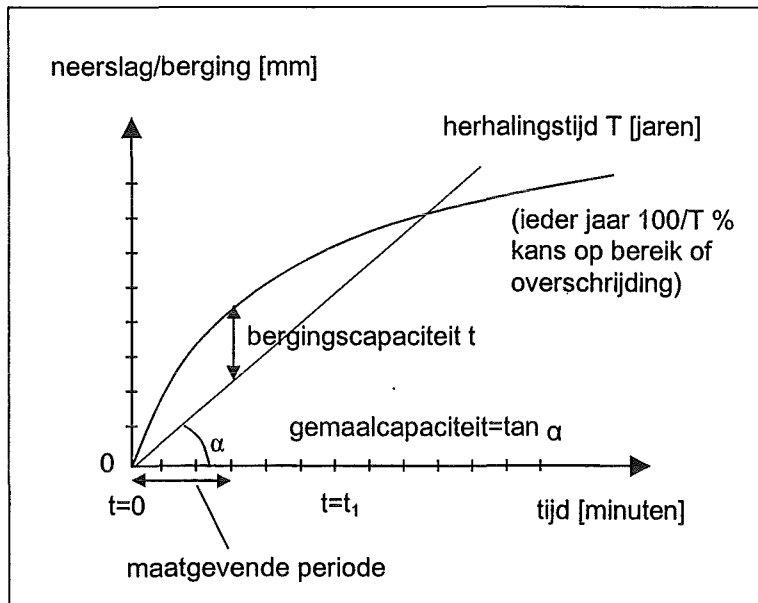
Bij een gegeven bergingscapaciteit kan de gemaalcapaciteit worden berekend door allereerst de bergingscapaciteit als een horizontale lijn op de juiste hoogte weer te geven (zie figuur 4.13). Vanuit het snijpunt van deze lijn en de verticale as trekt men een raaklijn aan de regenduurlijn. De tangens van de hellingshoek  $\alpha$  van deze raaklijn is de afvoercapaciteit die bij gegeven bergingscapaciteit eens in de T jaar tot bereiken of overschrijden van de bergingscapaciteit leidt. De maatgevende periode is de waarde van  $t$  bij het raakpunt.

Bij een gegeven gemaalcapaciteit kan de benodigde bergingscapaciteit worden berekend door een lijn met een hellingshoek  $\alpha$  waarvan de tangens gelijk is aan de gemaalcapaciteit vanuit het nulpunt van de regenduurlijn grafiek uit te zetten (zie figuur 4.14). De maximale verticale afstand tussen de regenduurlijn en de getrokken rechte is de bergingscapaciteit die eens in de T jaar zal worden bereikt of overschreden. De tijd waarop deze maximale bergingscapaciteit nodig is, is de maatgevende periode.

Hoewel de regenduurlijn methode eenvoudig is in gebruik zijn er grote bezwaren verbonden aan deze methode. De onnauwkeurigheden van de methode zijn het gevolg van:

- de aanname dat al de neerslag zonder vertraging tot afvoer komt;
- het feit dat er geen rekening wordt gehouden met het verloop van de neerslag in de tijd;
- het feit dat er geen rekening wordt gehouden met stromingsverschijnselen.

De methode is dan ook vooral geschikt voor een eerste benadering van benodigde capaciteiten.



**Figuur 4.14: Het gebruik van een regenduurlijn voor het bepalen van de bergingscapaciteit**

### Het construeren van regenduurlijnen

Op grond van de beoogde toepassing van de regenduurlijn kunnen de criteria worden geformuleerd waaraan de meetgegevens waaruit de regenduurlijn wordt geconstrueerd moeten voldoen.

Als vuistregel kan met betrekking deze criteria worden gesteld:

- Voor een herhalingsperiode van  $T$  jaar is een meetreeks van tenminste  $2 \cdot T$  jaar nodig;
- De meetintervallen moeten maximaal van dezelfde grootte orde zijn als de schaalverdeling op de horizontale as (voor een schaalverdeling in uren moeten dus minimaal uurtijfers van de neerslag beschikbaar zijn);

Hoewel er methoden bestaan om met beperkte meetgegevens regenduurlijnen te construeren, is een continue meetreeks aan te bevelen.

In het volgende wordt een voorbeeld gegeven van een methode om regenduurlijnen te construeren. Het gaat daarbij om regenduurlijnen voor herhalingsperiodes van 2, 5 en 10 jaar, en een tijdschaal in minuten. Daartoe heeft men de beschikking over tien-minuten neerslagsommen over een periode van 20 jaar (voor een jaar met 365 dagen zijn er dus 52560 10-minuten vakken waarvoor een neerslagdiepte bekend is).

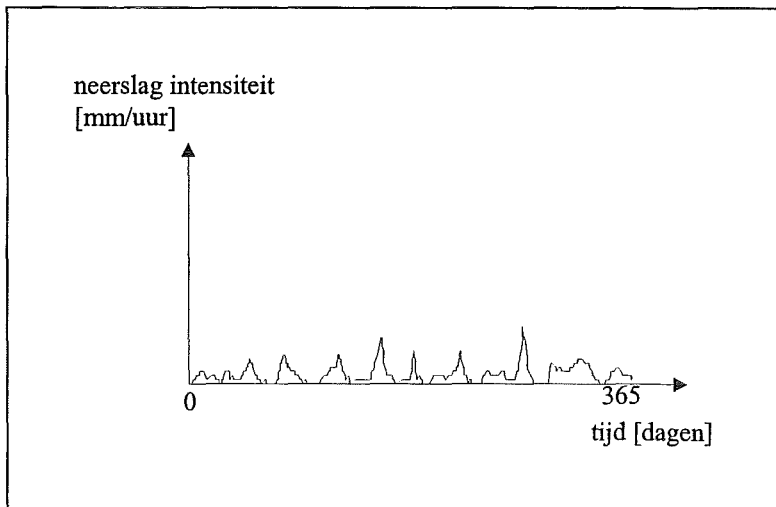
Voor de achtergronden van de gebruikte methode en voor een discussie over de verschillende andere methodes die toegepast kunnen worden, wordt verwezen naar relevante literatuur [o.a.: ing. A.G. van de Herik en ir. M.T. Kooistra, *5-minuten regens, regenintensiteiten en overstorten bij rioleringen*, Grontmij 1973, (de standaard regenduurlijnen voor Nederland); Gumbel, E.J., *Statistics of extremes*, Columbia Univ. Press, New York, 1958; Ven Te Chow, *Open channel hydraulics*, McGraw-Hill, New York, 1959].

Overigens is het construeren van regenduurlijnen een tijdrovende bezigheid. Het is dan ook aan te bevelen om de regenduurlijnen, indien mogelijk, aan te kopen van onderzoeksinstituten.

Bepaal de maximale neerslag in 10-, 20-, 30-, ... minuten voor elk jaar. Op de gegevens voor elk jaar ( $j$ ) apart wordt de volgende analyse toegepast:

- Zoek de maximale 10-minuten neerslag ( $y_{10,j}$ ).
- Bepaal de maximale 20-minuten neerslag ( $y_{20,j}$ ). Bereken daartoe de neerslagsom over achtereenvolgens het 1<sup>e</sup> en 2<sup>e</sup> tijdvak van tien minuten, het 2<sup>e</sup> en 3<sup>e</sup> tijdvak van tien minuten, het 3<sup>e</sup> en 4<sup>e</sup> tijdvak van tien minuten etc. De maximale 20-minuten neerslag is nu het maximum van deze berekende neerslagsommen. Deze methode wordt de *moving period* methode genoemd.

- Bepaal de maximale 30 minuten neerslag ( $y_{30,j}$ ) op overeenkomstige wijze.
- Enzovoort tot de maximale 180 minuten neerslag ( $y_{180,j}$ ).



**Figuur 4.15: Het neerslagverloop over één jaar**

Van het neerslagverloop over één jaar (figuur 4.15) resteren dan 18 waarden (tabel 4.4).

**Tabel 4.4: De 18 cumulatieve maxima van één jaar**

10 minuten max.	20 minuten max.	... ..	170 minuten max.	180 minuten max.
$y_{10,j}$	$y_{20,j}$	... ..	$y_{170,j}$	$y_{180,j}$

Nadat deze analyse voor elk jaar is uitgevoerd beschikt men over de volgende 18 reeksen: 20 maximale 10-minuten neerslagen ( $y_{10,1} \dots y_{10,20}$ ) (het betreft dus telkens één waarde per jaar), 20 maximale 20-minuten neerslagen ( $y_{20,1} \dots y_{20,20}$ ), 20 maximale 30-minuten neerslagen ( $y_{30,1} \dots y_{30,20}$ ) etc.

### Construeer de regenduurlijn

De hoeveelheid neerslag die er met een herhalingstijd van T jaar valt in een bepaalde periode, wordt afgeleid uit de reeks met maximale neerslagen voor die periode; de hoeveelheid neerslag die er in bijvoorbeeld 30 minuten valt met een herhalingstijd van T jaar, wordt dus afgeleid uit de reeks met 30-minuten maxima. Omdat in een regenduurlijn wordt weergegeven wat de verwachte neerslagen zijn voor allerlei perioden, moeten alle gevonden reeksen met  $i \cdot 10$ -minuten neerslagen worden bewerkt. De procedure is, in het kort, als volgt:

- 1) Bepaal aan welke verdeling de 10-minuten maxima voldoen (een verdeling legt vast wat de kans is op voorkomen van een gebeurtenis, dus: met welke herhalingstijd een bepaalde neerslagdiepte in een bepaalde periode verwacht kan worden).
- 2) Bepaal op grond van die gevonden verdeling wat de neerslagdiepte is die in 10 minuten met een herhalingstijd van respectievelijk 2, 5 en 10 jaar verwacht kan worden.
- 3) Zet deze drie waarden uit in een assenstelsel met op de horizontale as de tijd in minuten en op de verticale as de neerslagdiepte in mm. Zorg er voor dat duidelijk is bij welke herhalingstijd de uitgezette punten horen.
- 4) Herhaal de stappen 1), 2) en 3) voor de reeksen met 20- tot 180-minuten maxima.
- 5) Verbind de punten met gelijke herhalingstijd, de regenduurlijnen zijn gereed!



Realisatie van de stappen 1) en 2) geschiedt als volgt: Een gemakkelijk te gebruiken manier om de verdeling (veelal bijv. de normale-, de lineair-Gumbel- of de logaritmisches-Gumbel verdeling) te vinden is gebruik te maken van (voor deze verschillende verdelingen ontwikkeld) waarschijnlijkheidspapier. Bepaal daartoe eerst de plotpositie T van elke gebeurtenis (zie tabel 4.5):

- Rangschik de gebeurtenissen binnen de reeks met 10 minuten neerslagen naar afnemende grootte.
- Bepaal met behulp van de volgende formule de plotpositie van elke waarde  $y_{i,j}$  uit de reeks:

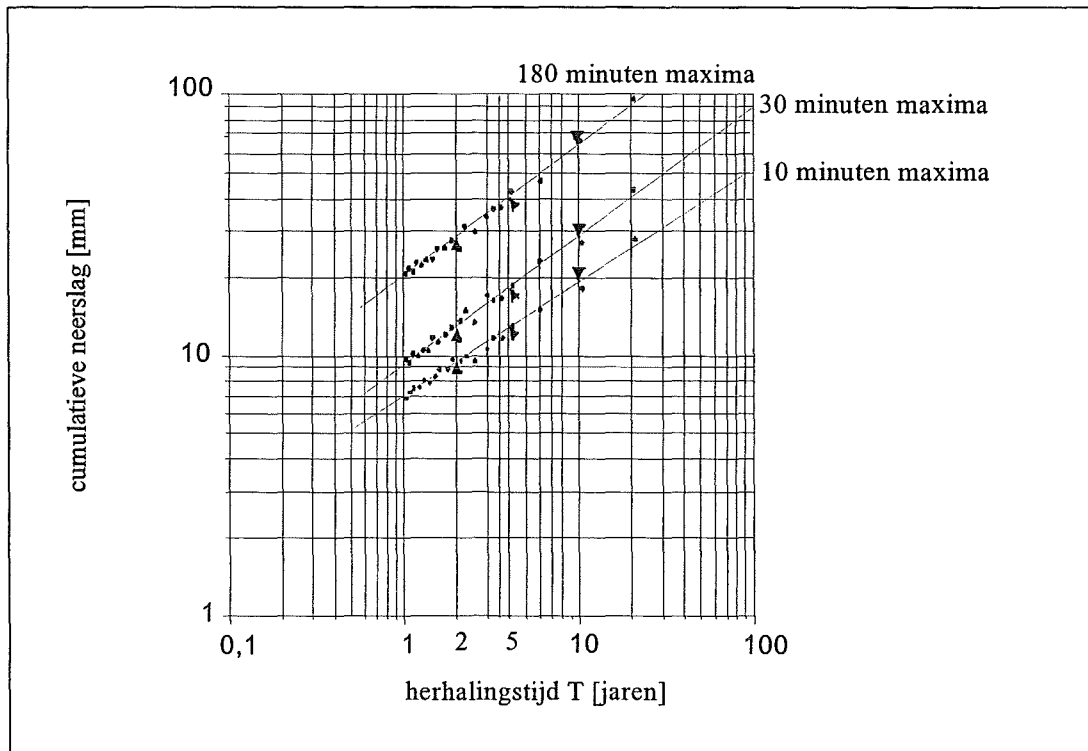
$$T(y_{i,j}) = (N+1)/m(y_{i,j}),$$

waarin:  $T(y_{i,j})$  = de plotpositie en herhalingstijd van gebeurtenis  $y_{i,j}$ ;  
 $N$  = het aantal gebeurtenissen in de reeks;  
 $m(y_{i,j})$  = de plaats van de gebeurtenis  $y_{i,j}$  in de reeks.

**Tabel 4.5: Rangschikken en bepalen van de plotpositie van 10-minuten maxima**

10 min-max [mm]	gerangschikt	m	T
$y_{10,1}$	$y_{10,2}$	1	21
$y_{10,2}$	...	2	10.5
$y_{10,3}$	$y_{10,1}$	...	...
...	$y_{10,20}$	...	...
...	$y_{10,3}$	19	1.1
$y_{10,20}$	...	20	1.05

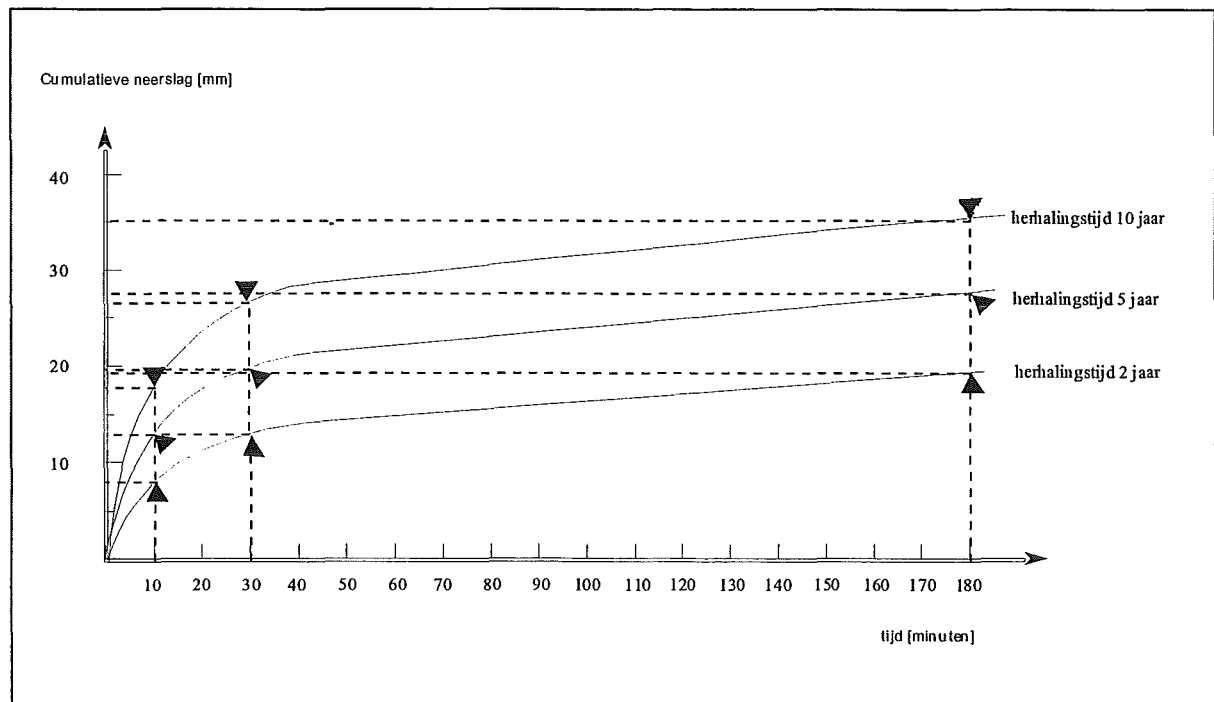
- Zet vervolgens de gebeurtenissen uit tegen hun plotpositie. Doe dit op verschillende soorten waarschijnlijkheidspapier (zie figuur 4.16 voor de een weergave hiervan op logaritmisches Gumbel papier).
- Trek op elk papier door de puntenwolk de beste rechte (de rechte met als bijschrift '10 minuten maxima' in figuur 4.16). Het papier waarop de mooiste "beste rechte" kan worden gevonden beschrijft de verdeling van het beschouwde fenomeen kennelijk het beste en wordt verder gebruikt.
- Lees uit de figuur af welke neerslaghoeveelheid in 10 minuten met een kans van eens in de 2 respectievelijk eens in de 5 en 10 jaar kan worden verwacht. In figuur 4.16 is bijvoorbeeld te zien dat eens in de 10 jaar een neerslag van 18 millimeter in 10 minuten bereikt of overschreden zal worden.



**Figuur 4.16: 10-,20- en 180- minuten cumulatieve neerslag maxima uitgezet op log-log**

Vervolgens, stap 3) worden deze waarden uitgezet in een assenstelsel waarin de regenduurlijn wordt geconstrueerd. Herhaal de stappen 1), 2) en 3) totdat ook de reeks met 180-minuten maxima is verwerkt. Verbind tenslotte de punten in de figuur met elkaar (zie figuur 4.17).

N.B. Omdat regenduurlijnen vlakker worden bij langere duur, zijn in dit gebied minder punten nodig om de regenduurlijn te kunnen construeren. Er kan hier dan ook worden volstaan met minder berekende punten.



Figuur 4.17: Constructie van regenduurlijnen

#### 4.6.5.6 Niet-stationaire afvoermodellen

Stationaire modellen of methoden voorspellen de maximale afvoer. Niet-stationaire modellen voorspellen het verloop van de afvoer in de tijd. In principe zijn er drie soorten modellen denkbaar:

- stochastische modellen;
- parametrische modellen;
- deterministische modellen.

Bij stochastische modellen wordt uit de kansverdeling van de input (toevoer) berekend hoe de kansverdeling van de output (afvoeren) zal zijn. Stochastische modellen zijn black-box modellen, waarbij de input en de output gelinkt worden zonder naar de inhoud van de transformatie te kijken. Parametrische modellen berekenen het verloop van de output via een aantal wiskundige relaties. Als de parameters van deze relaties eenmaal bekend zijn, wordt gerekend zonder aandacht te schenken aan de fysische betekenis van de wiskundige beschrijving. Parametrische modellen zijn vaak beperkt in hun toepassingsgebied.

Deterministische modellen zijn opgebouwd uit een aantal relaties die elk een deelproces beschrijven. Deterministische modellen beschrijven zoveel mogelijk de werkelijkheid, maar vereisen vaak een grote reken capaciteit. Modellen die de effecten van historische neerslagreeksen narekenen worden op dit moment veel gebruikt.

De parameters van een ontwateringssysteem zijn die grootheden die als karakteristieke coëfficiënten voorkomen in de modellen, waarmee een reactie van het ontwateringssysteem op een al dan niet stationaire invoer wordt beschreven.

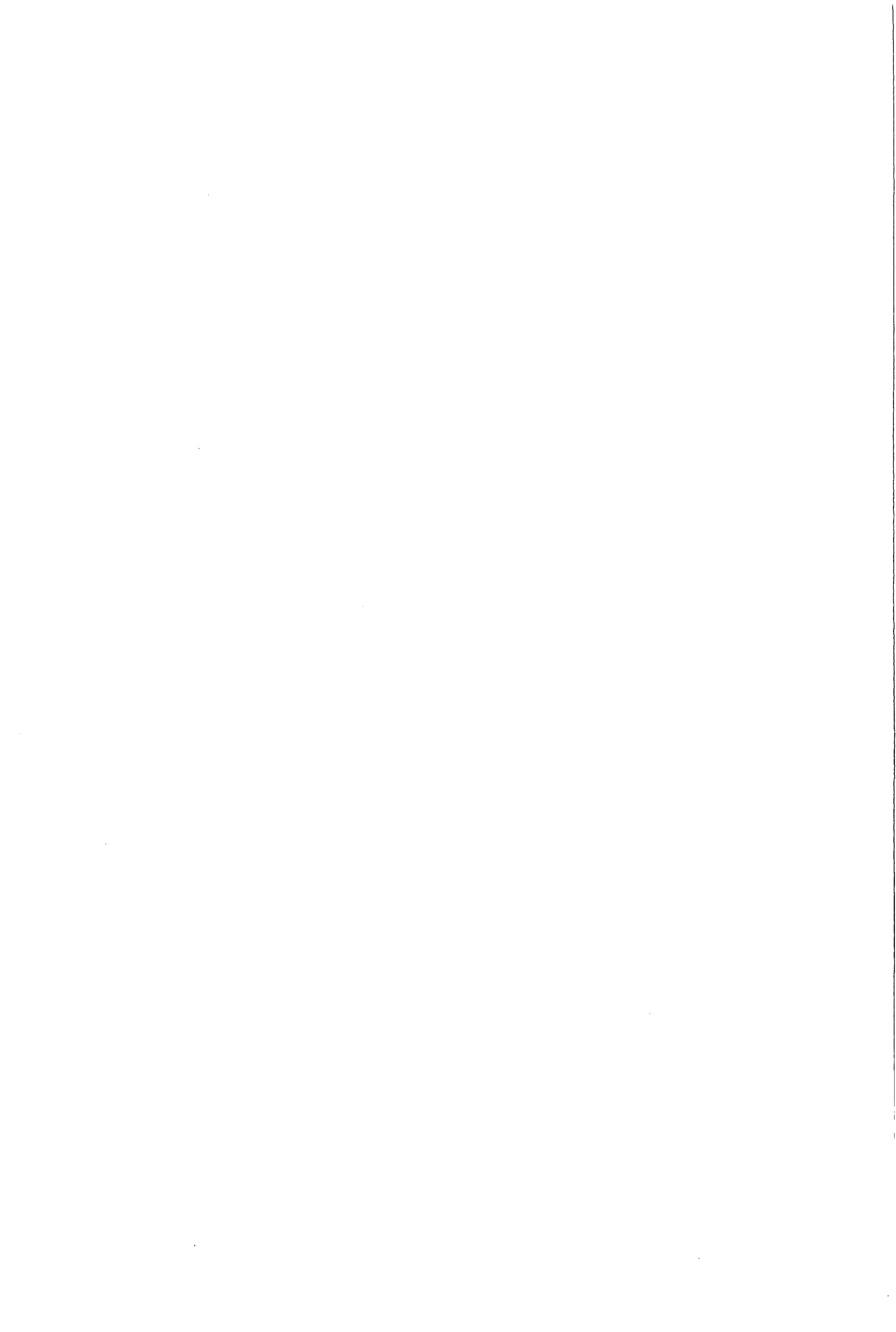
In Nederland zijn verschillende modellen ontwikkeld. Het model van Kraijenhoff van de Leur en de Unit Hydrograph methode worden besproken in het college HE3010 *Hydrologie*. Andere modellen en methodieken worden besproken in de colleges LW4410 *Irrigatie en drainage* en LW5510 *Stedelijke waterbeheersing*.

## **Hoofdstuk 5      Wateraanvoerbehoefte**

### *Leerdoelen*

Na bestudering van dit hoofdstuk moet u kennis hebben van:

- de beginselen van de wateraanvoerbehoefte;
- enkele methoden om de wateraanvoerbehoefte te bepalen, met nadruk op de waterbehoefte van de landbouw;
- de relevantie van de wateraanvoerbehoefte voor het bepalen van het wateraanvoersysteem;



## 5 WATERAANVOERBEHOEFTE

### 5.1 Inleiding en begrippen

De wateraanvoerbehoefte van een gebied is de hoeveelheid water die aangevoerd moet worden om de beschouwde watergebruikers in het gebied optimaal te laten functioneren. Zoals in hoofdstuk 1 reeds is geconstateerd heeft de menselijke waterbeheersing ten doel het waterhuishoudkundige systeem geschikt te maken aan de maatschappelijke behoeften. Deze behoeften bestaan uit globale doelstellingen zoals veiligheid, leefbaarheid, economische activiteiten en handhaving van natuur- en milieuwaarden.

Hierbij is de kering en afvoer van overtollig water in tijden van overschot van belang en daarnaast de aanvoer van water in tijden van behoefte aan water. Waterverbruik waarvoor door mensen beheerste (kunstmatige) aanvoer noodzakelijk is, betreft voornamelijk:

huishoudelijk water:	drinken, koken, wassen, blussen;
industriewater:	proceswater, wassen, koelen;
scheepvaart:	op peil houden stuwpanden in rivieren en kanalen;
landbouw:	evapotranspiratie van gewassen, vorstbescherming, zoutwaterdoorspoeling;
natuurgebieden:	evapotranspiratie, voorkoming van verdroging;
stedelijke gebieden:	op peil houden en doorspoelen stadswateren;
recreatie:	op peil houden van kanalen en meren.

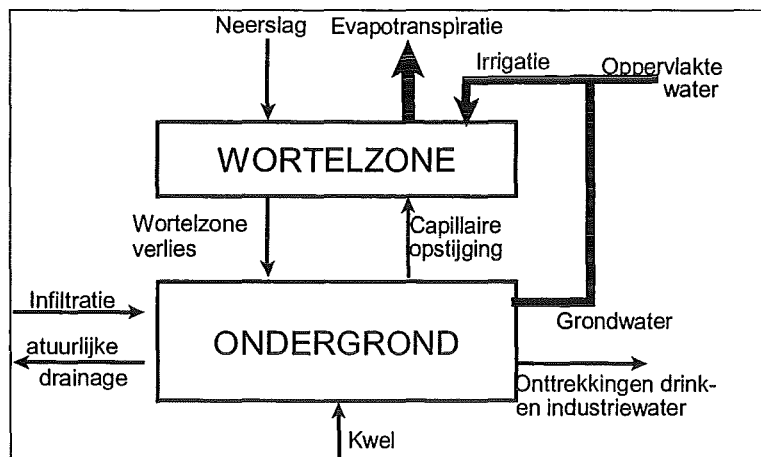
### Waterbalans voor Nederland in het groeiseizoen (april - september) in miljoen m<sup>3</sup> (bron CHO-TNO en Rijkswaterstaat)

	Gemiddelde zomer	Zeer droge zomer (1976)
<b>Aanvoer</b>		
Neerslag	14900	8100
Rivierinstroming	34700	17900
Opp. reservoir	500	500
Grondwateronttrekking	4800	3800
Hergebruik	1200	1200
<b>TOTAAL</b>	<b>56100</b>	<b>31500</b>
<b>Verbruik</b>		
niet-geïrrigeerde evapotranspiratie	14600	14060
irrigatie incl. doorspoelen	2500	3140
huishoud en industrie	2300	2300
rivierafvoer	36700	11000
<b>TOTAAL</b>	<b>56100</b>	<b>31500</b>

Ook in het relatief natte Nederland blijkt de geïrrigeerde landbouw de grootste door mensen beheerste waterverbruiker te zijn, groter dan het verbruik van huishoudelijk en industrieel water. Wel staat dit nog ver achter bij de evapotranspiratie van niet kunstmatig aangevoerd water dat verbruikt wordt door landbouw, natuurgebieden en open water. Het valt op dat zelfs in zeer droge zomers zoals in 1976 in Nederland nog 11.000.000.000 m<sup>3</sup> zoet water als rivierafvoer de zee in stroomt, dit is nagenoeg alle water dat wordt verbruikt, en slechts wat zout drainagewater naar zee wordt geloosd.

Maar in Nederland is de situatie in extreem droge zomers kritieker dan op het eerste gezicht lijkt, immers de rivieruitstroming naar zee is geen overschot maar is hard nodig om te voorkomen dat de zouttong te ver de rivierarmen binnendringt en de waterkwaliteit voor menselijk gebruik en landbouw

ongeschikt maakt. In dit college zullen wij ons beperken tot het op eenvoudige wijze vaststellen van de waterbehoefte van landbouw- en natuurgebieden. Waterbehoefte van andere gebruikers worden in de relevante gespecialiseerde colleges gezondheidstechniek en waterbouwkunde besproken.



**Figuur 5.1: Landelijke waterhuishouding bij wateraanvoer**

## 5.2 Wateraanvoerbehoefte ten behoeve van de landbouw

### 5.2.1 Inleiding

Wateraanvoer naar landelijke gebieden is nodig om het water te vervangen dat is verdwenen door evapotranspiratie. Evapotranspiratie is de som van transpiratie van de vegetatie en de evaporatie van het grondoppervlak. Evaporatie is de omzetting van water in vloeibare fase naar de gasfase door de transformatie van hitte. Transpiratie is de evaporatie van water uit vegetatie. Als de evaporatie de effectieve regenval overtreft, is extra wateraanvoer nodig. Deze extra wateraanvoer wordt gerealiseerd door middel van irrigatie. Irrigatie is de kunstmatige aanvoer van water ten behoeve van de landbouw, de stelselmatige verdeling van het water over het terrein en de afvoer naar de natuurlijke afvoerwegen nadat zoveel mogelijk nut van het water is getrokken.

Uit cultuur-technische en klimatologische gegevens kan de referentie evapotranspiratie worden berekend, die in combinatie met het gewaspatroon de gewaswaterbehoefte per maand oplevert. De netto-irrigatiebehoefte is de gewaswaterbehoefte minus de effectieve neerslag. De wateraanvoerbehoefte van een gebied brengt ook de verliezen of efficiëntie in rekening.

De waterbehoefte van de gewassen vormt de basis waarop de capaciteit van het irrigatiestelsel wordt vastgesteld. De waterbehoefte kan vrij betrouwbaar worden berekend uit de klimaatomstandigheden in het gebied. Waar aanwezig moet gebruik worden gemaakt van resultaten van proefvelden en ervaringen op naburige projecten.

### 5.2.2 Referentie evapotranspiratie

De referentie evapotranspiratie is de verdamping van een standaard gewasoppervlak, bijvoorbeeld een grasveld of open wateroppervlak. Er zijn een aantal methoden om de referentie evapotranspiratie te berekenen, zoals de pan-methode, de Penman-formule en de Makking-formule. Hier worden de Penman-Monteith methode en de Makking-formule kort besproken. Voor de andere methoden en achtergronden wordt verwezen naar *Hydrologie* (HE301), *Irrigatie en drainage* (LW441) en Mededeling van de Vakgroep nummer 67 (Ankum, 1996).

De Penman formule is een wereldwijd veel gebruikte methode om de referentieverdamping te bepalen. De evapotranspiratie (totale verdamping vanaf het grondoppervlak en via de wortelzone vanaf het

gewasoppervlak) van een kort geschoren, actief groeiend, goed van water voorzien grasveld wordt als referentie niveau gebruikt ( $ET_0$ ).  $ET_0$  waarden kunnen met redelijke nauwkeurigheid worden berekend uit een aantal klimaatparameters. Doorgaans is het voldoende de gemiddelde waterbehoefte per maand te berekenen. In de loop der tijd is de Penman formule een aantal keren aangepast en verbeterd. Vergelijking 4.1 is de Penman-Monteith-formule van de FAO (Smith 1992, Allen 1994).

$$ET_0 = \frac{0,0353 \Delta}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u)} * [(1 - \alpha) * R_s - R_{nl}] + \frac{86400 * \gamma}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u)} * E_{aero}$$

waarin:  $ET_0$  = referentie evapotranspiratie [mm/dag];  
 $\Delta$  = helling van de "vapour pressure curve" [kPa/EC];  
 $\gamma$  = psychometrische constante [kPa/EC];  
 $\alpha$  = albedo = 0,23 voor het referentiegewas, kort geschoren gras [-];  
 $R_s$  = inkomende zonnestraling [ $W/m^2$ ];  
 $R_{nl}$  = uitgaande straling [ $W/m^2$ ];  
 $E_{aero}$  = aërodynamische evaporatie equivalent [ $kg/m^2s$ ];  
 $u$  = windsnelheid 2 meter boven maaiveld [km/dag].

Een aantal parameters in vergelijking 5.2 zullen met behulp van andere formules moeten worden bepaald. Als alle parameters bekend zijn kan de referentie evapotranspiratie worden berekend, zie voorbeeld 5.1.

De Makking-vergelijking wordt in Nederland veel gebruikt voor het berekenen van de referentie evapotranspiratie. Deze formule is eenvoudiger van vorm dan de Penman-Monteith-vergelijking en voldoet goed voor specifieke Nederlandse omstandigheden.

$$ET_{0,makking} = \frac{0,0353\Delta}{\Delta + \gamma} * [0,65 * R_s] \quad \text{Makking(5.2)}$$

waarin:  $ET_{0, makking}$  = referentie evapotranspiratie [mm/dag];  
 $\Delta$  = helling van de "vapour pressure curve" [kPa/EC];  
 $\gamma$  = psychometrische constante [kPa/EC];  
 $R_s$  = inkomende zonnestraling [ $W/m^2$ ].



**Opgave**

Een nieuw irrigatiesysteem in Ethiopië moet ontworpen worden. Om een indruk te krijgen van de wateraanvoerbehoefte in het gebied wordt de referentie-evapotranspiratie in juni berekend. Uit een aantal proeven en berekeningen zijn de volgende parameters bekend:

$$\begin{aligned} R_s &= 249 \text{ W/m}^2 \\ R_{nl} &= 57 \text{ W/m}^2 \\ \Delta &= 0,252 \text{ kPa/C}^\circ \\ \gamma &= 0,066 \text{ kPa/C}^\circ \\ u &= 2,53 \text{ m/s} \\ E_{aero} &= 2,71 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^2\text{s} \end{aligned}$$

**Uitwerking**

Bovenstaande parameters invoeren in de vergelijking van Penman-Monteith, levert op:

$$\begin{aligned} ET_{0, makking} &= \frac{0,0353\Delta}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u)} * [(1 - \alpha) * R_s - R_{nl}] + \frac{86400 * \gamma}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u)} * E_{aero} \\ &= \frac{0,0353 * 0,252}{0,252 + 0,066(1 + 0,34 * 2,53)} * [(1 - 0,23) * 249 - 57] + \frac{86400 * 0,066}{0,252 + 0,066(1 + 0,34 * 2,53)} * 2,71 * 10^{-4} \\ &= 3,20 + 4,12 = 7,32 \text{ mm/dag} \end{aligned}$$

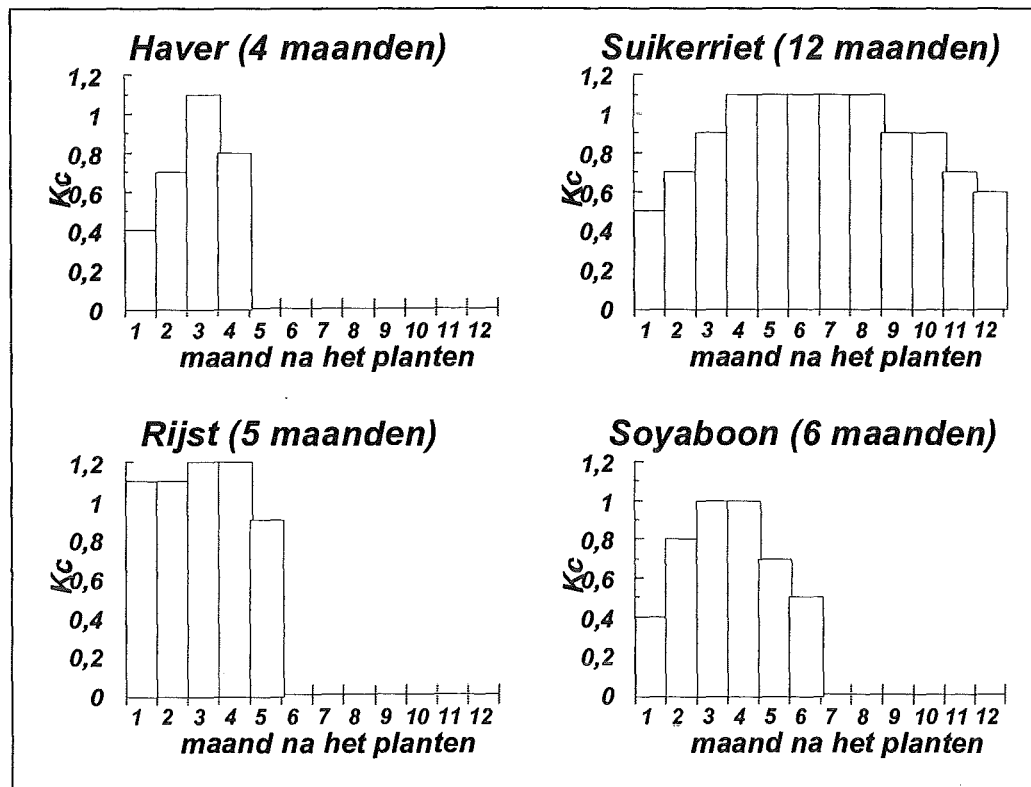
De evapotranspiratie van het referentiegewas in de maand juni 7,32 mm/dag

**Voorbeeld 5.1: Penman-Monteith berekening****5.2.3 Gewaswaterbehoefte**

De verdamping van elk willekeurig gewas wordt berekend met behulp van de referentie evapotranspiratie en een gewasfactor  $K_C$ . Deze factor geeft aan hoeveel meer of minder het betreffende gewas verdampt vergeleken met het referentiegewas. De waarde van de gewasfactor is dus mede afhankelijk van het referentiegewas waarvoor de  $ET_0$  is berekend. Gewasfactoren kunnen variëren van 0,3 (jong gewas met gering blad oppervlak) tot 1,2 (hoog, aërodynamisch ruw, volledig gronddekkend gewas). De waarde van de gewasfactor hangt af van het soort gewas en de groeifase waarin het gewas verkeert. Deze waarden moeten proefondervindelijk worden bepaald; voor de meeste gangbare gewassen zijn de gewasfactoren bekend (FAO, Yield response to water, 1986). Een aantal gewasfactoren zijn weergegeven in figuur 5.3.

$$ET_{crop} = ET_0 * K_C \quad (5.3)$$

waarin:  $ET_{crop}$  = gewasverdamping [mm/etm];  
 $ET_0$  = referentie evapotranspiratie [mm/etm];  
 $K_C$  = gewasfactor [-].



Figuur 5.2: Gewasfactoren  $K_c$  voor enkele gewassen (lengte groeiseizoen)

#### 5.2.4 Netto gewaswaterbehoefte

De  $ET_{crop}$  geeft aan hoeveel water het gewas uit de wortelzone verdampt en dus moet worden aangevuld, óf door regen óf door irrigatie. De netto irrigatie behoefte in de wortelzone is de gewasverdamping ( $ET_{crop}$ ) minus de effectieve regenval ( $P_{eff}$ ).

$$I_{netto} = ET_{crop} - P_{eff} \quad (5.4)$$

waarin:  $I_{netto}$  = netto irrigatiewaterbehoefte [mm/maand];  
 $ET_{crop}$  = gewasverdamping [mm/maand];  
 $P_{eff}$  = effectieve regenval [mm/maand].

De effectieve neerslag is dat deel van de neerslag dat ten goede komt aan het gewas. De effectiviteit van de regenval is een moeilijk meetbare factor. Een veilige eerste benadering is dat 70% van de neerslag ook daadwerkelijk ten goede komt aan het gewas.

#### 5.2.5 Overige veldwaterbehoefte

Naast de gewaswaterbehoefte zal er ook een zekere hoeveelheid water nodig zijn voor de landbewerking van bebouwde gronden. Voor de voorbereiding van het land (bijvoorbeeld in de natte rijstbouw) kan in korte tijd een grote hoeveelheid water vereisen, en deze levert dus een aanzienlijke bijdrage aan de piekbehoefte van het hoofdirrigatiesysteem. Voor gewassen als aardnoten kan het nodig zijn nog een irrigatiegift te geven na het afrijpen van het gewas teneinde de grond zacht te maken en te kunnen oogsten. Daarnaast kan water nodig zijn om zouten uit te spoelen. Deze vóór- en na-irrigatie zijn in de voorbeelden verwaarloosd, in de praktijk is dit meestal ongeoorloofd.

### 5.2.6 Rotatie van gewassen

Met de keuze van de gewassen en door te schuiven met de groei-kalenders (rotatie) zal men trachten de piekwaterbehoefte te beperken en het verloop van de waterbehoefte zo goed mogelijk te synchroniseren met de beschikbaarheid van water in de tijd. Doorgaans zullen er in een gebied diverse gewassen worden geteeld. De waterbehoefte van het totale gebied wordt dan berekend op basis van het areaal dat elk van deze gewassen iedere maand beslaat. In een groter areaal verschillende gewassen worden geteeld, waardoor de piekwaterbehoefte van het ene areaal kan samenvallen met lage waterbehoefte van een naastliggend areaal. De piekwaterbehoefte van het gezamenlijke areaal neemt hierdoor af.

### 5.2.7 Opzet wateraanvoerbehoefteberekening

Indien voor een bepaald gebied de referentie evapotranspiratie  $ET_0$  berekend kan worden en voor de voorgestelde te verbouwen gewassen de gewasfactoren bekend zijn alsmede de effectieve precipitatie ( $P_{eff}$ ) en de noodzakelijke voorirrigatie-waterbehoeften dan kan de waterbehoefte voor ieder gewas afzonderlijk en voor het totale gewaspatroon worden geschat zoals in tabel 5.2 is weergegeven.

Het voorbeeld van een waterbehoefteberekening in tabel 5.2 is gegeven voor een gebied met tomaten, katoen, aardnoten en maïs. Het eindresultaat van deze tabel geeft de maandelijkse waterbehoefte in de wortelzone van het gewas voor het gemiddeld gewaspatroon (dat is in realiteit noot als zodanig op 1 hectare zal voorkomen). Voor de wateraanvoerbehoefte op het tertiaire vak bij de tertiaire inlaatsluis moet nog gerekend worden met de verliezen binnen het tertiaire vak (zie verder hoofdstuk 5).

Tabel 5.1: Schema waterbehoefteberekening

	Aardnoten 60%				tomaten 20%					aardnoten 60%			
	maïs 40%				katoen 80%					maïs 40%			
MAAND	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
ET <sub>0</sub> [mm/mnd]	150	160	148	170	150	180	210	200	180	200	150	160	
Eff. neerslag (P <sub>eff</sub> )	36	18	0	25	40	30	20	10	0	30	33	28	
<b>TOMATEN</b>													
gewasfactor K <sub>c</sub>					0,4	0,8	1,6	0,8					
ET <sub>crop</sub>					60	144	336	160					
I <sub>netto</sub>					20	114	316	150					
<b>KATOEN</b>													
gewasfactor K <sub>c</sub>					0,4	0,75	1,0	1,0	0,7				
ET <sub>crop</sub>					60	135	210	200	126				
I <sub>netto</sub>					20	105	190	190	126				
<b>AARDNOTEN</b>													
gewasfactor K <sub>c</sub>	1	0,8	0,55								0,45	0,7	
ET <sub>crop</sub>	150	127	81								68	112	
I <sub>netto</sub>	114	111	81								35	84	
<b>MAÏS</b>													
gewasfactor K <sub>c</sub>	1,05	0,85	0,6								0,5	0,75	
ET <sub>crop</sub>	158	135	89								75	120	
I <sub>netto</sub>	123	117	89								42	92	
<b>GEMIDDELD VELD</b>													
Tomaten (20%)					4	23	63	30					
Katoen (80%)					16	84	152	152	101				
Aardnoten (60%)	68	67	49								22	50	
Maïs (40%)	49	47	36								17	37	
Vóór-irrigatie				50						25			
Totale I <sub>netto</sub> [mm/mnd]	117	114	85	50	20	107	215	182	101	25	39	87	
Netto waterbehoefte bij de wortel [l/s*ha]	0,45	0,44	0,33	0,19	0,08	0,41	0,73	0,73	0,49	0,10	0,15	0,34	

mm/mnd ↑

■ tomaten  
□ voorirrigatie  
■ maïs  
■ aardnoten  
□ katoen

J F M A M J J A S O N D  
maand →

### 5.2.8 Computerprogramma's

De bepaling van waterbehoefes in een irrigatiegebied vereisen de herhaling van een steeds dezelfde berekening. Gelukkig zijn hier computerprogramma's voor beschikbaar, bijvoorbeeld Cropwat en CRIWAR. Deze programma's zijn ontwikkeld door respectievelijk de FAO en ILRI. Met behulp van deze programma's kunnen de lange reeksen berekeningen in veel minder tijd worden gedaan. Het is belangrijk de systematiek van de bepaling van waterbehoefes te kennen en te begrijpen, om op een intelligente wijze gebruik te kunnen maken van deze rekenmethodieken.

*De hoeveelheid invoergegevens die nodig zijn voor de berekening van de referentie-evapotranspiratie is kleiner bij gebruik van het computerprogramma Cropwat. Het programma bevat namelijk al een groot aantal standaardgegevens in relatie tot de hoogte, breedte en lengtegraad van een gebied. Voor de berekening van de referentie-evapotranspiratie en de gewaswaterbehoefte zijn de volgende gegevens nodig.*

<b>berekening</b>	<b>algemene gegevens</b>	<b>klimaatgegevens per maand</b>
referentie-evapotranspiratie	* hoogte boven zeeniveau [m] * breedtegraad [E] * lengtegraad [E]	* gemiddeld dagtemperatuur [EC] * gemiddelde vochtigheidsgraad [% of kPA] * windsnelheid [km/h of m/s] * uren zonneschijn [% of h]
gewaswaterbehoefte	* berekeningswijze effectieve regenval (keuze uit 4) * gewassen * plantdatum (maand + dag)	* neerslag [mm]

### 5.3 Waterbronnen

De keuze van de waterbron bepaalt voor een groot deel het ontwerp en de omvang van een waterdistributienetwerk. Waterbronnen zijn oppervlaktewater, grondwater en afvalwater. Water kan tijdelijk worden opgeslagen in reservoirs om het te bewaren voor tijden dat de wateraanvoerbehoefte hoog is.

Oppervlaktewater wordt al eeuwenlang gebruikt voor irrigatie. Het is vaak eenvoudig (met behulp van de zwaartekracht) en goedkoop op het land te brengen. Ook voor huishoudelijke en industriële toepassingen is oppervlaktewater traditioneel een bron. Door de toenemende vervuiling is echter de kwaliteit van veel oppervlaktewater zodanig aangetast dat er een zware zuivering vooraf moet gaan aan het eigenlijke gebruik.

Grondwater moet worden opgepompt en is daardoor meestal duurder dan oppervlaktewater. Grondwater is vaak van een zeer goede kwaliteit en vereist dus weinig of geen zuivering. Door overmatig gebruik van grondwater kan uitputting van de grondwatervoorraad (verdroging) optreden.

Een alternatieve waterbron is stedelijk of huishoudelijk afvalwater, dat na zuivering kan worden hergebruikt. Hergebruik is vooral haalbaar in droge gebieden, zoals Israël en het zuid-westen van de Verenigde Staten. Afvalwater dient voordat het wordt hergebruikt gezuiverd te worden om aan de kwaliteitseisen voor de nieuwe toepassing te voldoen. Irrigatie stelt minder hoge kwaliteitseisen aan water dan huishoudelijk en industrieel gebruik. Maar ook in de landbouw levert onvoldoende gezuiverd afvalwater risico's op voor de volksgezondheid (boeren en consumenten), planten en bodem, en verhoogt de onderhoudseisen van een systeem.

## **Hoofdstuk 6      Wateraanvoersystemen**

### *Leerdoelen*

Na bestudering van dit hoofdstuk moet u kennis hebben van:

- de beginselen van wateraanvoersystemen;
- enkele typen veldirrigatiesystemen;
- de ontwerp-criteria van wateraanvoersystemen (waarbij o.a. van belang zijn: de keuze van de distributiemethodiek en van de regelkunstwerken, de capaciteitslijn, de efficiëntie);
- verschillende typen reservoirs en hun toepassing;



## 6 WATERAANVOERSYSTEMEN

### 6.1 Inleiding en begrippen

#### 6.1.1 Algemeen

Wateraanvoersystemen zijn nodig om water aan te voeren en het verdelen over de verschillende gebruikers in een gebied. Voorbeelden van wateraanvoersystemen zijn de natuurlijke systemen als rivieren, meren en grondwataquaifers en de kunstmatige systemen als waterleidingsstelsels voor drinkwater, irrigatiestelsels en scheepvaartkanalen. Het ontwerp van verschillende kunstmatige wateraanvoersystemen volgt hetzelfde stramien. In dit college zal voornamelijk aandacht worden besteed aan wateraanvoersystemen ten behoeve van de landelijke gebieden; wateraanvoersystemen voor andere gebruikers worden gedetailleerd behandeld in de desbetreffende colleges. Daarnaast zal blijken dat het verzorgen van wateraanvoer voor landelijke gebieden ten behoeve van de landbouw en natuurbeheer zeer gecompliceerd is en dat als men inzicht heeft in het oplossen van wateraanvoerproblemen hiervoor, dit inzicht ook toepasbaar is voor de andere gebruikers.

In de eerste plaats zullen wij ons concentreren in de aanvoer ten behoeve van de landbouw. De waterbehoefte van de landbouw is complex omdat deze varieert:

- in de tijd, afhankelijk van het klimaatverloop in de seizoenen;
- naar gebied, afhankelijk van grondsoort en topografie;
- naar type gewas en de planttijd van dit gewas.

De aanvoer van water in een irrigatiestelsel is dus niet het leveren van een continu debiet maar van debieten die variëren naar tijd en naar plaats. Het wateraanvoersysteem moet in staat zijn de variërende debieten naar verschillende punten in het stelsel te distribueren.

Irrigatiestelsel kunnen worden onderverdeeld in een aanvoerstelsel, een verdelingsstelsel en een afvoerstelsel. Het aanvoer- en verdelingsstelsel kunnen worden vergeleken met het afwaterings- en het ontwateringsstelsel in een drainagesysteem. De twee systemen zijn nu echter andersom geschakeld: eerst moet het water worden gewonnen en getransporteerd, om vervolgens op kleinere schaal te worden verdeeld. Het afvoerstelsel van een irrigatiestelsel kan worden gezien als een deel van het irrigatiestelsel zelf, of als een apart drainagestelsel.

In “gemengde” stelsels vindt aanvoer van irrigatiewater en afvoer van drainagewater plaats in dezelfde kanalen. In “gescheiden” stelsels zijn er twee gescheiden netten van kanalen: één voor de aanvoer van water, en één voor de afwatering.

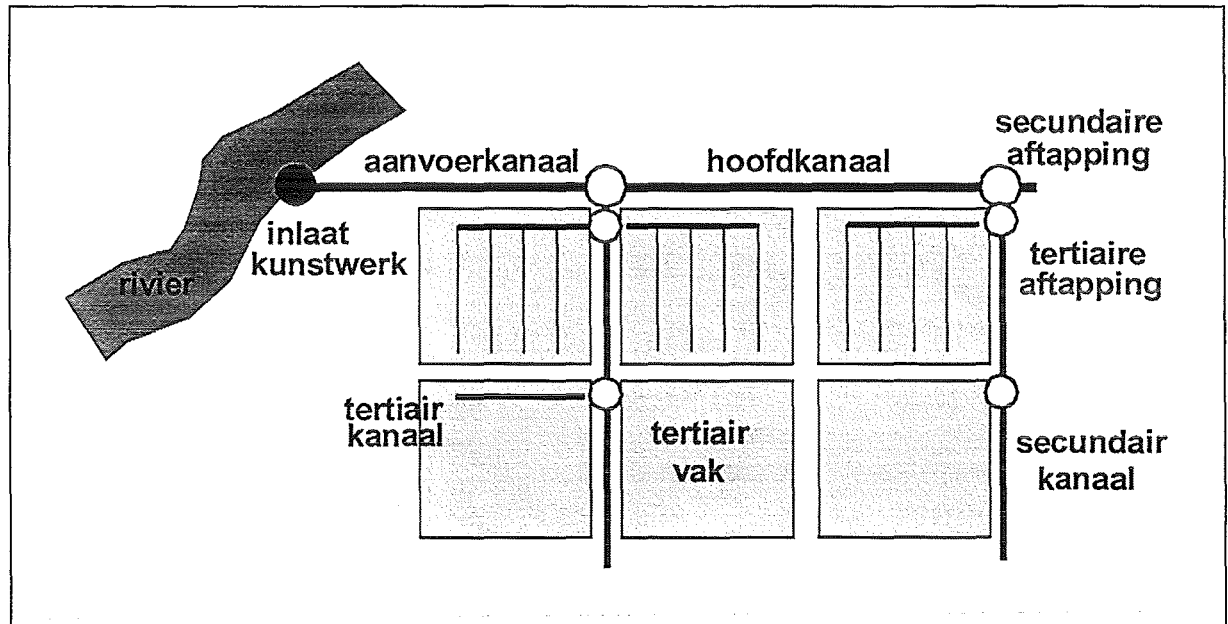
Het nut van irrigatie bestaat voornamelijk uit de (meerdere) landbouw opbrengst die met behulp van het aangevoerde water gerealiseerd kan worden. Irrigatie zorgt voor de bevochtiging van de grond om het tekort aan regenwater aan te vullen. Daarnaast kan irrigatie echter nog een aantal andere functies vervullen:

- bemesting door de aanvoer van opgeloste en gesuspenderde voedingsstoffen;
- verbetering van de structuur van de bodem;
- colmatage (ophoging van terreinen door het herhaald neerslaan van slibdelen);
- grondwataaanvulling;
- regeling van bodemtemperatuur;
- leaching (uitspoelen van schadelijke stoffen, met name zout, uit de bodem);
- bestrijding van onkruid en ongedierte door het tijdelijk onder water zetten van gronden;
- bestrijding van ziekten en plagen door toevoeging van bestrijdingsmiddelen aan irrigatiewater.



### 6.1.2 Indeling van een wateraanvoersysteem

In een irrigatiesysteem worden (net als een drainagesysteem) verschillende niveaus van waterlopen onderscheiden (zie figuur 6.1). Het primaire kanaal (hoofdkanaal) is de waterloop die het water van de watervang of pomp vervoert naar het irrigatiegebied. De naam tertiair kanaal is gereserveerd voor de hoogste orde kanalen binnen het tertiaire vak. Dit is per definitie dat gebied waarbinnen de eindgebruikers zelf de verdeling van het water en het beheer en onderhoud van de kanalen en kunstwerken verzorgen. Secundaire kanalen zijn de distributiekanaalen tussen het hoofdkanaal en de inlaten van de tertiaire vakken. De bevolkingsvakken (tertiaire eenheden) kunnen in uitzonderingsgevallen ook direct aftappen van het hoofdkanaal. Quartenaire kanalen en lagere orde kanalen zijn waterlopen die het water vanuit de tertiaire kanalen verder over het bevolkingsvak verdelen, en per definitie onder beheer van de eindgebruikers.



Figuur 6.1: Opbouw van een irrigatiestelsel

## 6.2 Veldirrigatiesystemen

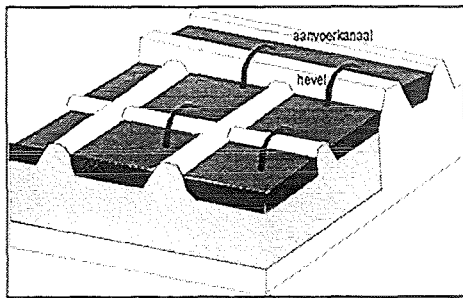
Een veldirrigatiesysteem is het systeem waarmee water op het veld wordt gebracht. De meest gebruikte bevoeiingssystemen zijn in te delen in vier categorieën: instuwing oppervlakte-irrigatie, beregening en druppelirrigatie.

### Instuwing

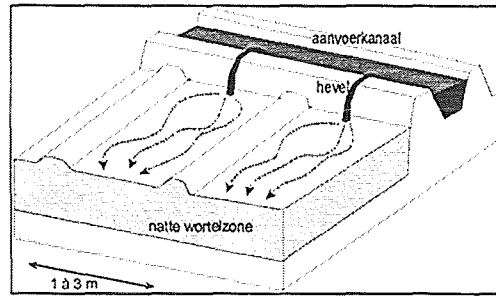
Hierbij wordt vanuit de kanalen met hoge waterstand het water ondergronds het veld ingestuwd. Soms kunnen de ondergrondse drainagebuizen daarbij een rol spelen als irrigatieaanvoerbuis.

### Oppervlakte-irrigatie

Oppervlakte-irrigatie is het toepassen van water onder natuurlijk verval over de oppervlakte van het maaiveld. De bekendste vormen van oppervlakte-irrigatie zijn kombevoeiing en vorenirrigatie. Oppervlakte-irrigatie is in het algemeen goedkoop, maar het levert grote waterverliezen op.

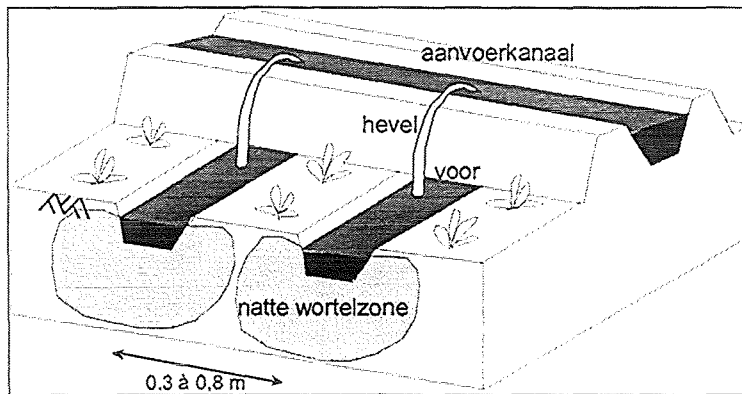


Figuur 6.2: Kom bevoeiing



Figuur 6.3: "Border strip" bevoeiing

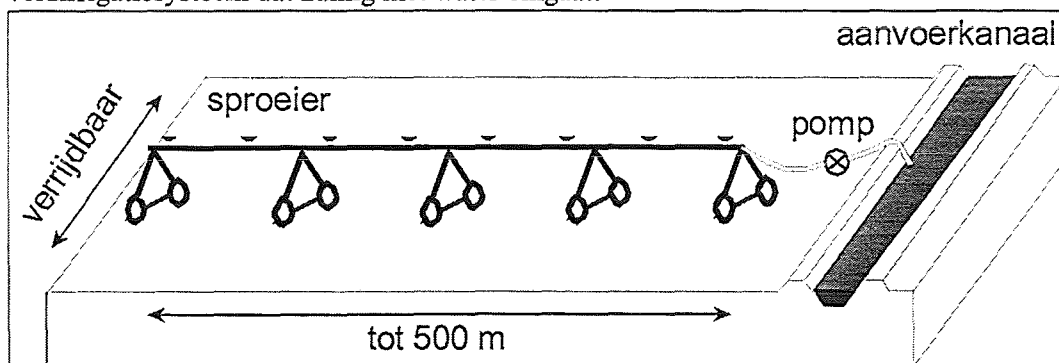
Bij kombevoeiing worden platte stukken land, omringd door lage dijkes, onder water. In bergachtige gebieden is het noodzakelijk terrassen aan te leggen. Kombevoeiing is alleen geschikt voor gewassen die langere tijd onder water kunnen staan en wordt vooral toegepast in de natte rijstbouw (figuur 6.2). Bij "border strip"- bevoeiing wordt het water in een dun filter over smalle stroken akkers gevoerd (figuur 6.3). Voren zijn kleine sloten, die het water tussen rijen gewas leiden. Water infiltreert in de grond terwijl het door de voren loopt. Vorenirrigatie is geschikt voor gewassen die in rijen worden geteeld, zoals suikerriet, aardappelen en maïs. Water kan in de voren worden ingelaten met behulp van openingen in de dijk of hevels (figuur 6.4).



Figuur 6.4: Voren irrigatie

### Beregening

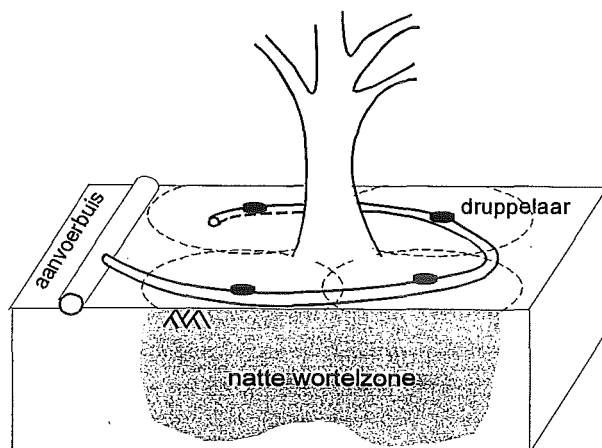
Bij beregening wordt het water door sproeiers over het land verspreid. Het water wordt aangevoerd door een gesloten leidingensysteem onder druk. Er bestaan verschillende types vaste en verplaatsbare sproeiers voor beregening (zie bijvoorbeeld figuur 6.5). Beregening is een relatief dure irrigatiemethode en wordt daarom alleen toegepast bij gewassen met een hoge opbrengst. Beregening is een veldirrigatiesysteem dat zuinig met water omgaat.



Figuur 6.5: Beregening

### Druppelirrigatie

Bij druppelirrigatie wordt het water via ongeveer 1 cm dikke slangen met kleine druppelaars op het land gebracht. Het water wordt in een buizensysteem onder druk aangevoerd. Druppelirrigatie is een duur veldirrigatiesysteem dat water distribueert met minimale verliezen. Het wordt toegepast bij meerjarige gewassen (bijvoorbeeld fruitteelt) wanneer water schaars is.



**Figuur 6.6: Druppelirrigatie**

<i>irrigation</i>	<i>irrigatie</i>	<i>De aanvoer en verdeling van water en toediening hiervan aan land, in het algemeen ter bevordering van de gewasgroei</i>
<i>field application system</i>	<i>veldirrigatiesysteem</i>	
<i>surface irrigation</i>	<i>oppervlakte-irrigatie</i>	
<i>flood irrigation (basin irrigation)</i>	<i>kombevloeiing</i>	
<i>furrow irrigation</i>	<i>vorenirrigatie</i>	
<i>sprinkler irrigation</i>	<i>beregening</i>	
<i>drip irrigation (trickle irrigation)</i>	<i>druppelirrigatie</i>	

### 6.3 Ontwerpcriteria van wateraanvoersystemen

#### 6.3.1 Capaciteit van aanvoerstelsel

De benodigde kanaalcapaciteit ( $Q_{100\%}$ ) is gelijk aan de piekwaterbehoefte van het achterliggend areaal. Kanaalcapaciteiten worden gegeven in l/s of  $m^3/s$ . De benodigde capaciteit van een kanaalpand dat een gebied "A" van water voorziet is een ontwerpkenmerk die onafhankelijk is van de tijd. De waterbehoefte van een gebied "A" is een tijdsafhankelijk begrip. De begrippen capaciteit en wateraanvoerbehoefte worden ten onrechte vaak door elkaar gebruikt.

#### Efficiëntie

Bij het transport van water van de bron naar de wortelzone treden diverse verliezen op: de bruto irrigatiebehoefte (aan de bron) is gelijk aan de netto behoefte plus de verliezen. Verliezen worden veelal uitgedrukt in termen van "efficiëntie" voor een beschouwde periode.

$$e_{\text{totaal}} = \frac{V_{\text{nuttig gebruikt}}}{V_{\text{aangevoerd}}} \quad (6.1)$$

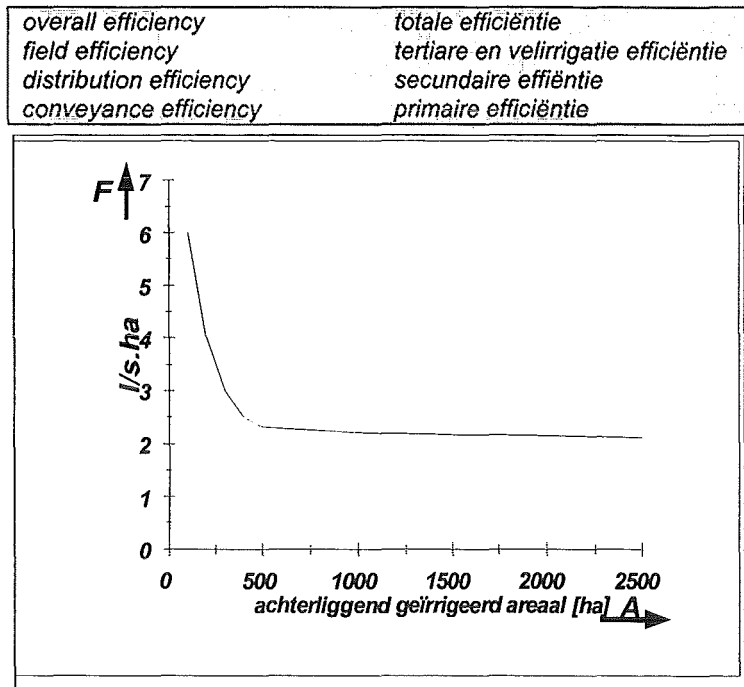
waarin:  $V_{\text{nuttig gebruikt}}$  = nuttig op het leveringspunt opgenomen water [ $m^3$ /periode];  
 $V_{\text{aangevoerd}}$  = totaal aangevoerde hoeveelheid water [ $m^3$ /periode];  
 $e_{\text{totaal}}$  = totale efficiëntie [-].

In het kanaalsysteem van een irrigatiestelsel treden verliezen op: de efficiëntie van een irrigatiestelsel neemt meestal af naarmate het gebied groter is, omdat er tussen het aanvoerpunt en het leveringspunt water verloren gaat door lekkage, bedieningsfouten en vultijdverliezen. Dit betekent dat de waterbehoefte per hectare voor een groter areaal hoger is dan voor een kleiner areaal. De efficiëntie van een irrigatiestelsel is afhankelijk van een groot aantal factoren, zoals de veldirrigatiesysteem, distributiemethodiek, de bekleding van kanalen, de staat van onderhoud en de kundigheid van het personeel dat de te leveren debieten berekent en de verdeelkunstwerken bedient. Doordat de verhouding tussen  $V_{\text{nuttig gebruikt}}$  en  $V_{\text{aangevoerd}}$  niet in alle seizoenen gelijk hoeft te zijn, kan de efficiëntie in de seizoenen variëren. Van belang voor een ontwerp is de combinatie ( $V_{\text{nuttig gebruikt}}$  en  $e_{\text{totaal}}$ ) van die maand die tot het hoogste aanvoerdebiet leidt.

De totale efficiëntie van een systeem bestaat uit:

- \* de tertiaire + veldirrigatie efficiency; Deze verrekent de verliezen binnen het tertiaire vak (oppervlakte afstroming en diepe percolatie op de akker en de verliezen in de kleine verdeelkanalen binnen het tertiaire vak).
- \* de secundaire/distribution efficiency; Dit geeft de verliezen weer die optreden bij het verdelen van het water, zoals lekverliezen, verliezen door bedieningsfouten en vultijdverliezen.
- \* de primaire/conveyance efficiency; Dit is efficiëntie van de aanvoer van het water (verliezen worden veroorzaakt door lek, bedieningsfouten en vultijdsverliezen).

De totale efficiëntie van een systeem moet bij het ontwerp niet te hoog worden geschat. Veel irrigatieprojecten zijn gedeeltelijk mislukt omdat de efficiëntie te rooskleurig is gesteld en de capaciteit van kanalen dus onvoldoende bleek om in de waterbehoefte te voldoen. Een eerste schatting voor de totale efficiëntie ligt, afhankelijk van de omstandigheden tussen de 40 en 70%.



**Figuur 6.7: Voorbeeld capaciteitslijn (relatieve capaciteit)**

### Capaciteitslijn

Efficiëntie, rotatie, de gewaswaterbehoefte per hectare en het oppervlakte van het achterliggend geïrrigeerd areaal bepalen de te bouwen capaciteit van kanalen en kunstwerken. Deze capaciteit kan worden vastgelegd met behulp van de capaciteitslijn, waarin de waterbehoefte per eenheid oppervlakte wordt uitgezet tegen het achterliggende areaal. Uit de capaciteitslijn kan voor elk kanaal de capaciteit worden afgelezen als het door het kanaal gevoede oppervlak (het achterliggende areaal) bekend is. Een voorbeeld van een capaciteitslijn is gegeven in figuur 5.7. In het college *Irrigatie en drainage* (LW441) zal op het vaststellen van de capaciteitslijn nader worden ingegaan.

Door rotatie kan de piekcapaciteit voor het hele systeem teruglopen maar voor de eindvakken (tertiaire vakken) met 100% dezelfde gewassen is het effect van rotatie nihil. De totale efficiëntie [de waterverliezen] van het benedestroomse kanaalstelsel worden steeds lager [groter] naarmate men verderbovenstrooms van de eindgebruiker komt. Lagere efficiëntie [hogere verliezen] leidt tot grotere nodige capaciteit. Deze beide factoren werken tegengesteld in het capaciteitscriterium.

De capaciteit ( $Q_d$ ) van ieder te bouwen kunstwerk of kanaalpand in het aanvoersysteem wordt bepaald als:

$$Q_d = F * A \quad (6.2)$$

waarin:  $Q_d$  = ontwerpcapaciteit [l/s];  
 $F$  = relatieve capaciteitsfactor [l/s/ha];  
 $A$  = achterliggend geïrrigeerd areaal [ha].

De naamgeving van wateraanvoerbehoeftes kan tot verwarring leiden. In plaats van wateraanvoerbehoefte spreekt men ook wel van bruto-irrigatiewaterbehoefte. Ook wordt het begrip wateraanvoerbehoefte vaak verward met het begrip capaciteit van het irrigatiestelsel. Om dubbelzinnigheid te voorkomen, kan men het best de plaats van de wateraanvoerbehoefte waarover men spreekt expliciet noemen, bijvoorbeeld "wateraanvoerbehoefte t.p.v. tertiaire inlaat" of "gebiedswateraanvoerbehoefte".

**Opgave**

(zie de gewaswaterbehoefteberekening in tabel 4.2)

Van het beschouwde gebied is door deskundigen vastgesteld dat monocropping (gebied met eenzelfde gewas beplant) kan voorkomen tot een oppervlakte van 50 ha. Bij grotere arealen zal een rotatie van verschillende gewassen optreden. Bij een areaal van 5000 ha of groter kan men verwachten dat het gemiddelde gewaspatroon van tabel 4.2 optreedt.

Men heeft uit onderzoek de volgende efficiencies vastgesteld:

tertiaire + veldirrigatie efficiency: 0,7

secundaire/distribution efficiency: 0,8

primaire/conveyance efficiency: 0,9

1. Wat is de benodigde kanaal en sluis capaciteit van de tertiaire inlaat, uitgaande van tertiaire vakken van 50 ha?
2. Wat is de benodigde kanaal- en sluis capaciteit van het hoofd inlaat kunstwerk en het eerst pand van het primair kanaal voor het totale areaal van 8000 ha?
3. Met welk capaciteits criterium kan het aanvoerstelsel berekend worden?

**Uitwerking**

1. Het gewas met de hoogste maand-waterbehoefte is "tomaten" met een irrigatiewaterbehoefte bij de wortel van 316 mm in de maand juli, dat is 1,21, l/s/ha. Dit gewas kan als monocultuur op 50 ha voorkomen. Met een tertiaire efficiency van 0,7 wordt de noodzakelijke relatieve capaciteit:

$$F = \frac{1,21}{0,7} = 1,73 \text{ l/s/ha}$$

De inlaatsluis capaciteit voor 50 ha tertiair vak wordt dan:

$$Q_d = 50 \text{ ha} * 1,73 \text{ l/s/ha} = 87 \text{ l/s}$$

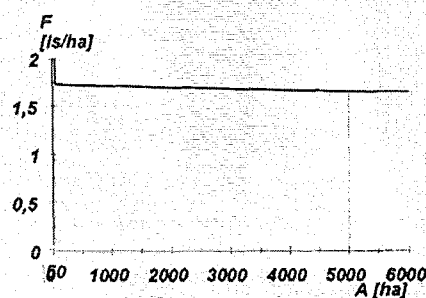
2. Bij meer dan 5000 ha kan op het gemiddeld gewaspatroon gerekend worden. Dit heeft een piekwaterbehoefte van 0,83 l/s/ha in de maand juli. De relatieve capaciteit met een tertiaire, secundaire en primaire efficiency van respectievelijk 0,7; 0,8 en 0,9 is:

$$F = \frac{0,83}{0,7 * 0,8 * 0,9} = 1,65 \text{ l/s/ha}$$

De capaciteit van het inlaat kunstwerk voor 8000 ha wordt dus:

$$Q_d = 8000 \text{ ha} * 1,65 \text{ l/s/ha} = 13,200 \text{ l/s} = 13,2 \text{ m}^3 / \text{s}$$

3. Met 1,73 l/s/ha voor 50 ha en 1,65 l/s/ha voor 5000 ha kan men als eerste opzet een vlak verlopende capaciteits criterium aanhouden. Voor de kleinere kanalen binnen het tertiaire vak loop het relatieve capaciteits criterium snel op omdat men zal trachten het water in hanteerbare depbieten van zo'n 30 l/s bijeen te roteren over de verschillende kleine boerenkanalen.

**Voorbeeld 6.1: Capaciteitsberekening**

### 6.3.2 Inleiding distributiemethodiek

De irrigerende landbouwer en zijn gewassen bepalen de vraag naar water op het veld. De waterbron bepaalt het wateraanbod. Om de vraag en aanbod op elkaar af te stemmen zal een distributiemethodiek moeten worden vastgesteld. De leveringsmethodiek bepaalt de frequentie, de hoeveelheid, de duur en de timing van de waterlevering aan boeren. De volgende vragen spelen bij de distributietechniek een belangrijke rol:

- wie bepaalt het aan de irrigerende boer te leveren debiet?
- wordt het in een bepaalde periode te leveren volume water continu of intermitterend aangeleverd?

De leveringsmethodiek in een irrigatiestelsel kan per niveau verschillen. Zo wordt vaak water in het hoofdsysteem continu aangevoerd naar tertiaire aftappingen, terwijl boeren binnen het vak een intermitterende beurtregeling hebben.

#### Continu of intermitterend

Bij continue levering wordt de stroom uit het hoofdkanaal continu en gelijktijdig gedistribueerd over de verschillende tertiaire vakken. De boeren ontvangen 24 uur per dag water. De watergift aan een boer moet liggen in de orde van 20-50 l/s, wat een hoeveelheid is klein genoeg om nog door één persoon gehanteerd te kunnen worden, maar groot genoeg om één persoon efficiënt bezig te houden, waardoor een efficiënt watergebruik in het veld mogelijk wordt. Een irrigatiegift van deze grootte wordt een "main d' eau" genoemd. Op basis van een continue toelevering van 1,0-1,5 l/s.ha valt af te leiden dat, in geval van continue toelevering de bedrijfsgrootte van een boer niet kleiner moet zijn dan 20-30 ha.

Bij intermitterende (beurtelingse) levering gebruiken boeren om de beurt de volledige aanvoer van een kanaal. Bijvoorbeeld een tertiair vak met 8 boeren met elk een bedrijf van 4 ha, zal een continue aanvoer vereisen van ongeveer 40 l/s (ontwerpaanvoer 1,25 l/s.ha). De 40 l/s wordt verstrekt aan bedrijf 1 op dag 1, aan bedrijf 2 op dag 2, etc. Na 8 dagen krijgt bedrijf 1 deze aanvoer weer en een nieuwe cyclus wordt begonnen. Elke boer heeft dus recht op het gebruik van de volledige aanvoer naar het vak gedurende een gehele dag per periode van de beurtregeling (= 8 dagen). Rotatie van irrigatiewater vindt vaak plaats binnen een tertiair vak, waar de boeren zelf een beurtregeling instellen. Beurtelingse toelevering is een geschikt systeem voor kleine bedrijven (< 10-15 ha) met verschillende gewassen. Deze bedrijven zijn te klein voor een continue aanvoer van dusdanige grootte dat een hoge efficiëntie van werkinspanning en waterverbruik kan worden bereikt.

#### Vast leveringsschema of levering op aanvraag

Bij een vast leveringsschema is van te voren vastgesteld welke debieten op welke plaatsen gedurende welke periode zullen worden geleverd. Dit kan plaatsvinden door een continue levering van een deel van het irrigatiewater of een tijdelijke (intermitterende) levering van al het irrigatiewater uit een kanaal.

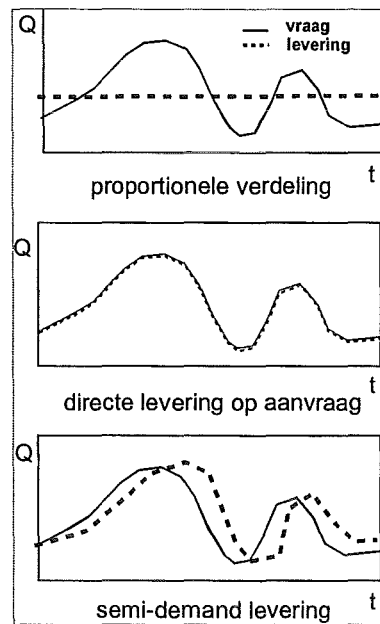
Bij een proportionele verdeling krijgt iedere boer, gewogen naar het oppervlakte van zijn land, continu een bepaald deel van het irrigatiewater geleverd. Leveringsschema's kunnen ook periodiek worden vastgesteld door de waterbeheerder in overleg met de boeren. Op deze manier kan rekening worden gehouden met grondcondities en voorgenomen gewaspatronen. Een periodiek (flexibeler) leveringsschema betekent dat de waterlevering beter aansluit bij de werkelijke watervraag van de boeren. Vanuit het beheerstandpunt gezien is een vast leveringsschema een eenvoudige methode. Bij proportionele verdeling kunnen in principe vaste kunstwerken worden gebruikt. Bij periodieke leveringsschemas hoeven de verdeelwerken slechts op gezette tijden bijgeregeld te worden, en kunnen handmatig bediende kunstwerken worden gebruikt.

Bij de levering op aanvraag kan de boer naar eigen inzicht irrigatiewater uit een irrigatiekanaal nemen. Dit is voor de boer het meest gunstige en meest flexibele alternatief, maar levert stelt hoge eisen aan de waterlevering. Bij levering op aanvraag moet het kanaal zodanig zijn gedimensioneerd dat de vraag van iedere individuele landbouwer altijd kan honoreren. Het kanaal en het wateraanbod zal dus te maken krijgen met hoge piekvragen. Bij semi-demand levering ontvangen boeren hun water enige tijd nadat zij dat aangevraagd hebben (levering 1-2 dagen na verzoek). Levering on demand stelt hoge eisen aan het technisch functioneren van het kanaalsysteem, het bedieningspersoneel, de organisatiegraad bij de waterlevende instantie, en kundige boeren die zelf kunnen vaststellen wanneer en hoeveel water hij nodig heeft.

Wanneer er een goede institutionele structuur aanwezig is, maakt levering op aanvraag of semi-demand levering een efficiënt watergebruik en een bevoeiing van de gewassen in nauwe relatie met de gewasbehoefte mogelijk.

Bij vaste leveringsschema's is de toelevering van te voren vastgesteld op basis van geschatte waterbehoeften. Dit kan tegelijkertijd leiden tot watertekorten en waterverspilling. Als de omstandigheden voor een goed functioneren van de levering op aanvraag niet aanwezig zijn, dan verdienen vaste leveringsschema's aanvoer de voorkeur.

De kosten van het water in het geval van levering op aanvraag zijn normaal gebaseerd op de verbruikte hoeveelheden water. Bij een vast leveringsschema worden de kosten gewoonlijk bepaald op een basis van het landbezit (omslag per ha).

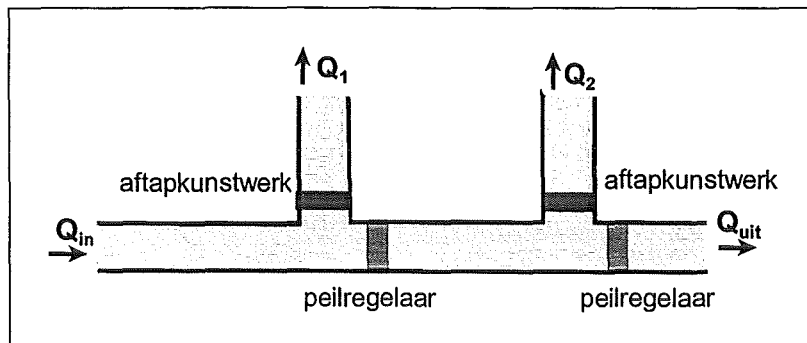


**Figuur 6.8: Leveringsschema's**



### 6.3.3 Eenvoudige type meet- en regelkunstwerken

Meet- en regelkunstwerken hebben tot doel het water te verdelen tussen het doorgaande kanaal en een aftappend lagere orde kanaal. Er bestaan een groot aantal soorten meet- en regelkunstwerken, een aftapping bestaat uit een peilregelaar in het doorgaande kanaal en een debietregelaar in het aftappende kanaal (zie figuur 6.9).



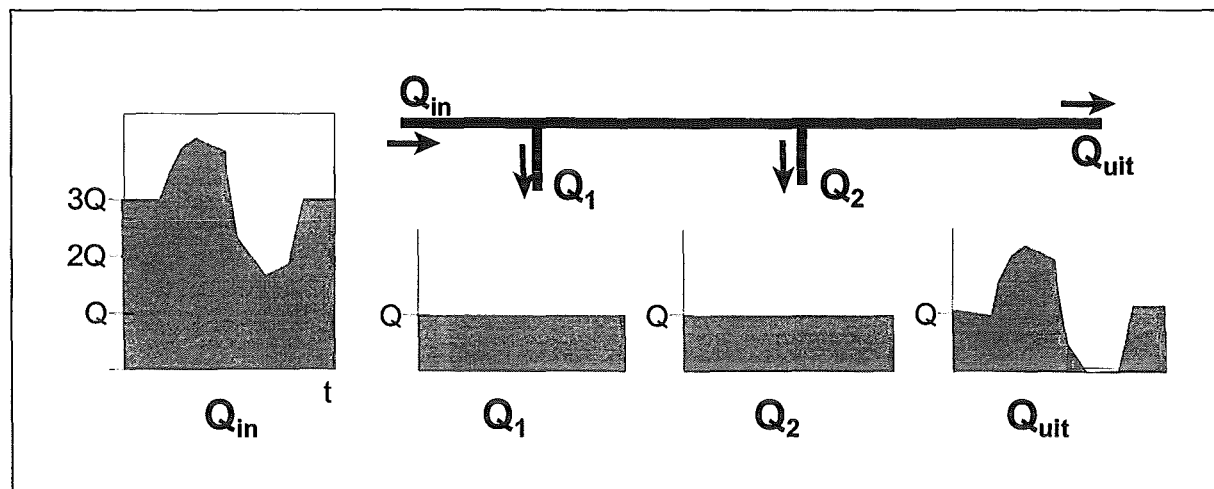
**Figuur 6.9: Hoofdkanaal met twee aftappingen**

Afhankelijk van het type kunstwerken wordt het water op een bepaalde manier verdeeld naar de aftappende kanalen. Er bestaan drie soorten peilregelaars: vast, handbediend en automatisch. Er bestaan drie soorten aftapkunstwerken: overlaten, onderspuiers, en kunstwerken met een constant debiet. Er zijn vijf nuttige combinaties van deze kunstwerken (zie tabel 6.1), die of een proportionele levering of een constante levering in de aftappende kanalen opleveren (zie figuren 6.10 en 6.11).

**Tabel 6.1: Combinaties van peilbeheersers en aftapkunstwerken**

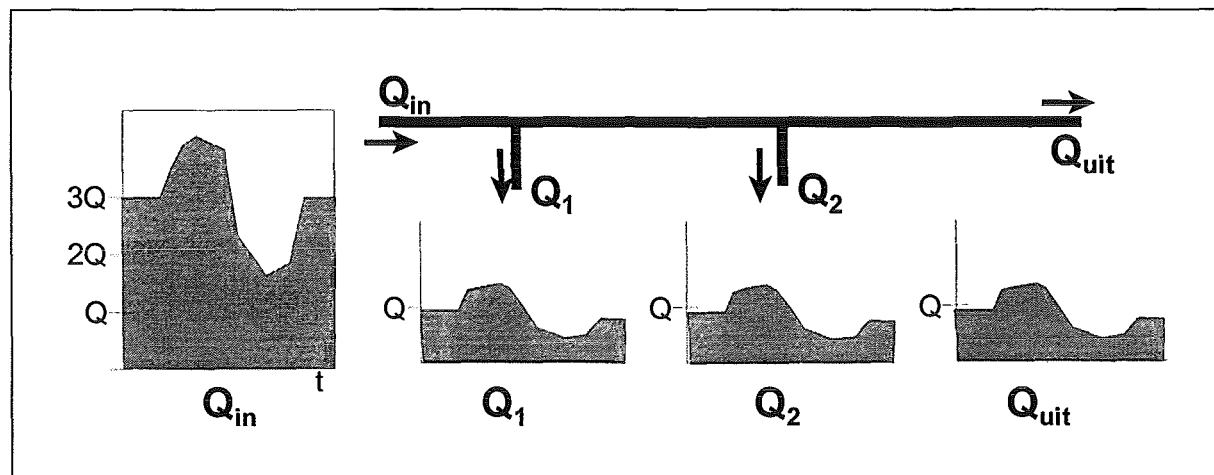
peilregelaar aftapkunstwerk	vast	Handbediend	automatisch
overlaat	proportionele levering	Proportionele levering	
onderspuier		Proportioneel/constant	
constant debiet	constante levering		constante levering

Bij een constante levering krijgt een aftappend kanaal een constant debiet, onafhankelijk van het instromend debiet in het hoofdkanaal. Een nadeel van constante levering in een bovenstrooms kanaal-pand, is dat er bij lage debieten geen water overblijft voor de benedenstroomse gebruikers.



**Figuur 6.10: Constante levering**

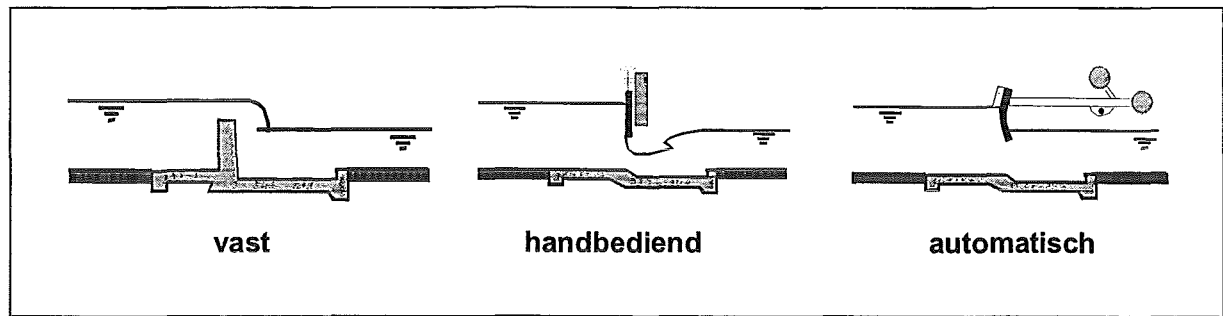
Bij proportionele levering krijgt elk aftappend kanaal een gelijk (in de tijd variërend) debiet, dat een proportioneel deel is van het inkomend debiet. Een nadeel van proportionele levering is dat elke boer afhankelijk is van het instromende debiet.



**Figuur 6.11: Proportionele levering**

#### vast, handbediend of automatisch

De keuze tussen een vast, een handbediend en een geautomatiseerde systeem voor de peilregeling wordt in de eerste plaats bepaald door de bedieningsfrequentie. Vaste kunstwerken zijn niet beweegbaar of regelbaar, handbediende kunstwerken worden door een operator (bedienend personeel) met de hand bediend en automatische systemen hebben een hydraulische of elektronische bediening. In vaste systemen zijn de aftappings voorzien van vaste overlaten, en is de verdeling van het water proportioneel. Bij (semi)demand levering zullen de regelaars zeer frequent moeten worden geopereerd, en zal worden gekozen voor een automatisch systeem. Bij vaste leveringsschemas kunnen vaak handbediende systemen worden geïmplementeerd. De toepassing van geautomatiseerde systemen vereist een goed georganiseerde organisatiedienst met voldoende technische kennis.

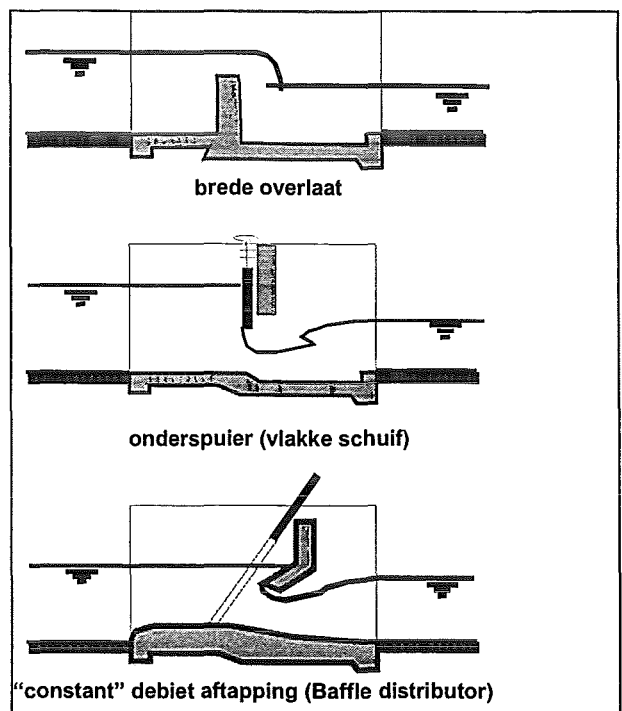


Figuur 6.12: Bediening van de kunstwerken

### zelfregelend/niet-zelfregelend

Bij een niet-zelfregelend systeem moet de beheerder zelf het in te laten debiet instellen overeenkomstig de aftappende debieten benedenstrooms. Een goede communicatie is nodig tussen de bediening op de verschillende niveaus van het wateraanvoersysteem: een operator bovenstrooms moet immers inspelen op de veranderingen die zijn collega benedenstrooms doorvoert.

Bij een zelfregelend systeem wordt het in te laten debiet automatisch op de watervraag of het wateraanbod ingesteld. Dit gebeurt doordat de regeling van het kunstwerk is gekoppeld aan het waterpeil in het aangrenzende kanaalpand. Als dit het bovenstroomse kanaalpand is, spreekt men van upstream control, anders van downstream control. Upstream control reageert op veranderingen in het waterpeil bovenstrooms van een kunstwerk (bijvoorbeeld hoogwatergolven) en wordt daarom zelfregelend naar het wateraanbod. Downstream control reageert op veranderingen in het benedenstroomse kanaalpand die worden veroorzaakt door de watervraag. Downstream control is daarom zelfregelend naar de vraag, en wordt toegepast bij levering op aanvraag.



Figuur 6.13: Voorbeelden aftapkunstwerken

### Overlaat, onderspuier of constant debiet

De aftapkunstwerken in een irrigatiestelsel zijn óf overlaten, óf onderspuiers óf constant debiet aftappingen. De keuze van een aftapkunstwerk hangt af van de levering die wordt beoogt achter het aftapkunstwerk (proportioneel of constant, zie tabel 6.1). Daarnaast is het verval dat beschikbaar is voor een kunstwerk een belangrijke parameter. Andere overwegingen die meespelen zijn de kosten van een kunstwerk, bedieningsgemak, en het onderhoud. Aftapkunstwerken moeten zo robuust en simpel mogelijk worden uitgevoerd gegeven de omstandigheden, maar eenvoud mag niet ten kosten gaan van de kwaliteit van de waterlevering.

Naast overlaten en onderspuiers bestaan er kunstwerken die min of meer onafhankelijk van de voorwaterstand een constant debiet doorlaten. Een voorbeeld van zo'n kunstwerk is de baffle-distributor.

<i>headworks</i>	<i>inlaat kunstwerk</i>
<i>culvert</i>	<i>duiker</i>
<i>fixed regulation</i>	<i>vaste bediening</i>
<i>manual regulation</i>	<i>handbediening</i>
<i>automatic regulation</i>	<i>automatische bediening</i>
<i>self-regulating</i>	<i>zelfregulerend</i>
<i>primary canal</i>	<i>primair kanaal</i>
<i>secondary canal</i>	<i>secundair kanaal</i>
<i>tertiary canal</i>	<i>tertiair kanaal</i>
<i>tertiary unit</i>	<i>bevolkingsvak</i>
<i>discharge measuring structure</i>	<i>meet en regelkunstwerk</i>
<i>water -level regulator</i>	<i>peilregelaar</i>
<i>discharge regulator</i>	<i>debietregelaar</i>
<i>orifice</i>	<i>onderspuier</i>
<i>water delivery schedule</i>	<i>distributiemethodiek</i>
<i>fixed scheduling</i>	<i>vast leveringsschema</i>
<i>delivery on demand</i>	<i>levering op aanvraag</i>
<i>proportional delivery</i>	<i>proportionele levering</i>
<i>semi-demand (arranged scheduling)</i>	<i>semi -demand</i>
<i>on-going canal</i>	<i>doorgaand kanaal</i>
<i>offtake</i>	<i>aftapping</i>
<i>offtake canal</i>	<i>aftappend kanaal</i>
<i>weir</i>	<i>overlaat</i>
<i>vertical gate</i>	<i>vlakke schuif</i>

## 6.4 Reservoirs

### 6.4.1 Inleiding

In de gezondheidstechniek kent men drinkwater reservoirs om dagelijkse fluctuaties in het watergebruik te bufferen en retentiebekkens om pieken in de rioolwaterafvoer af te vlakken. In de landbouw worden reservoirs toegepast bij wateraanvoer om de wateraanvoer uit het bijbehorende stroomgebied zodanig te reguleren, dat een zo goed mogelijke aanpassing aan het verbruik (de waterbehoefte) wordt verkregen. Nevenfuncties van reservoirs zijn onder andere het afvlakken van stormvloedafvoeren, recreatie en visteelt. De maat en locatie van reservoirs hangen af van de functie die ze vervullen. Dalafsluitingen of stuwmeren zijn reservoirs om het water in de bovenstroom van een rivier te verzamelen en vandaar uit, met voldoende vrij verval, over een gebied te verdelen. Seizoensreservoirs houden het water in het natte seizoen, als irrigatie niet nodig is, vast tot in het droge seizoen watergebrek optreedt. In veel irrigatiegebieden worden nachtreservoirs toegepast, zodat de (continue) instroom van water door boeren overdag kan worden gebruikt. In het Nederlandse polderboezemsysteem vervult de boezem een reservoirfunctie voor zowel aanvoer als afvoer.

### 6.4.2 Dalafsluitingen

Reservoirs kunnen voor meerdere waterbehoeften worden gebruikt: veel stuwmeren zullen bijvoorbeeld zowel drink- als industrie- en irrigatiewater leveren. Een stuwmeer of dalafsluiting ontstaat door de bouw van een stuwdam in een dal van een rivier. Een stuwdam kan een droog of nat gebouwde aarden dam zijn, een dam van gestorte of gezette steen, een dam van metselwerk of beton. De grootste stuwdam van Nederland is de afsluitdijk. De aanleg van stuwmeren is een zeer ingrijpende maatregel, die vaak ecologische en sociale problemen met zich meebrengt, hetgeen tot een zeer zorgvuldige afweging van belangen noodzaakt, en een daaraan aangepast ontwerp en beheer.

### 6.4.3 Seizoensreservoirs

In gebieden met een klimaat met een uitgesproken regentijd en een uitgesproken droge tijd zijn de rivierdebieten erg onregelmatig. Bovendien zijn de rivierdebieten het hoogst in de regentijd, als de waterbehoefte juist het laagst is. Door het water in de regentijd op te slaan kunnen grote watertekorten in de droge tijd te voorkomen

#### 6.4.4 Nachtreservoirs in irrigatiegebieden

Nachtreservoirs zijn reservoirs waar het water dat 's nachts een irrigatiegebied binnenstroomt overdag the kunnen toepassen. Vaak zal er gedurende de nacht geen water door de boeren worden afgenomen, maar alleen overdag worden geïrrigeerd. Overdag gaat het ingelaten water rechtstreeks naar de velden; 's nachts gaat het naar een reservoir van waaruit het de volgende dag, samen met de rechtstreekse toevoer, naar de velden gaat. Benedenstreams van een nachtreservoir dient de kanaalcapaciteit te worden vergroot.

##### Opgave

In het irrigatieproject uit voorbeeld 6.1 worden nachtreservoirs aan het begin van de tertiaire eenheden geplaatst. Uit sociologisch onderzoek is gebleken dat de boeren in het gebied maar tien uur per dag irrigeren.

1. Hoe groot moeten de reservoirs worden, gegeven een diepte van 2 meter?
2. Wat moet de kanaalcapaciteit met benedenstreams van het reservoir zijn?

Er mag worden aangenomen dat de plaatsing van reservoirs geen extra waterverliezen tot gevolg heeft.

##### Uitwerking

1. De reservoirs moeten gedurende 14 uur per dag aanvoer ter grootte van de bovenstroomse kanaalcapaciteit kunnen opvangen. Deze capaciteit van de tertiaire inlaat was berekend (voor het piekdebiet dat bestaat bij 50 ha tomaten) op  $50 \text{ ha} \times 1,73 \text{ l/s/ha} = 87 \text{ l/s}$ . Het volume van het nachtreservoir is dus:

$$V_{res} = 14 * 3600 * 8,7 = 438.000 \text{ l} = 438 \text{ m}^3$$

Het volume gedeeld door de diepte ( $y = 2\text{m}$ ) levert het oppervlak van het reservoir op. Het oppervlak van het reservoir is  $200 \text{ m}^2$ , dit is 0,4% van de oppervlakte van het tertiaire vak (50 ha).

$$A_{res} = \frac{V_{res}}{y} = \frac{438}{2} = 219 \text{ m}^2$$

2. Het kanaal benedenstreams van het reservoir moet in 10 uur het volume doorlaten dat bovenstrooms in 24 uur door een kanaal stroomt. De kanaalcapaciteit is dus 24/10 maal zo groot:

$$Q_{kanaal} = \frac{24}{10} * 8,7 = 20,9 \text{ l/s}$$

#### Voorbeeld 6.2: Toepassen van nachtreservoirs

#### 6.4.5 Stedelijke berging

In stedelijk gebied wordt water in reservoirs geborgen om de piekafvoer van ontwateringssystemen te reduceren. In principe kan men berging creëren op daken, in regentonnen, op straat en in greppels, sloten vijvers of laagten. Als stedelijk drainagewater wordt opgeslagen in reservoirs, zal de waterkwaliteit verbeteren door bezinking en (bio)chemische processen die zich voordoen in het stilstaande water.

#### 6.4.6 Ontwerp van reservoirs

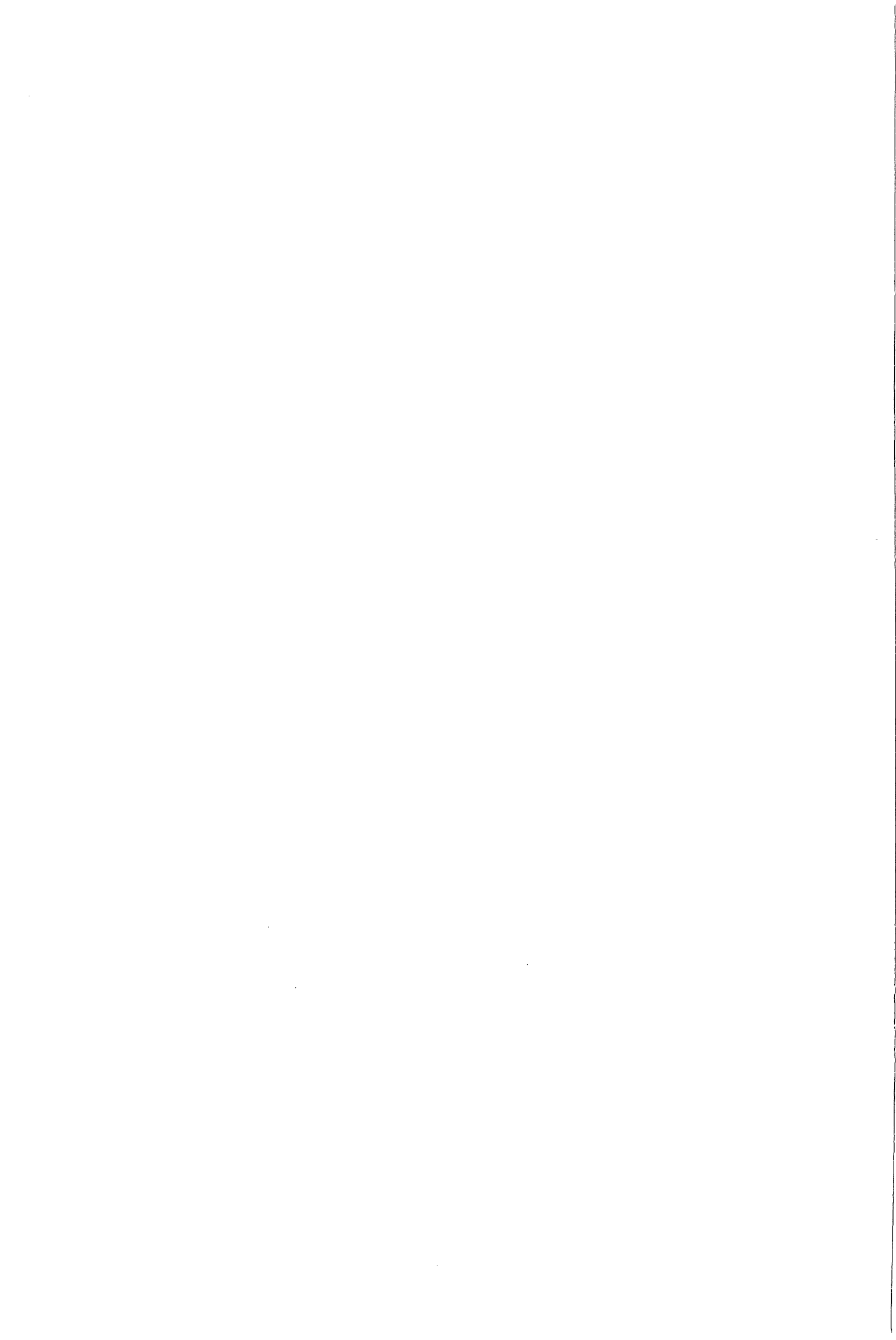
Het optimaliseren van reservoirinhoud en ontwerp van reservoirs zal nader worden behandeld in het college *Irrigatie en drainage* (LW4410).

## **Hoofdstuk 7      Ontwerpen en dimensioneren**

### *Leerdoelen*

Na bestudering van dit hoofdstuk moet u kennis hebben van:

- de voor het ontwerpen van leidingen en kunstwerken in de waterbeheersing relevante vloeistofmechanica;
- de wijze waarop op basis van de functionele eisen aan een watersysteem de transportleidingen worden gedimensioneerd;
- de beginselen van het dimensioneren van kunstwerken;



## 7 ONTWERPEN EN DIMENSIONEREN

### 7.1 Vloeistofmechanica

#### 7.1.1 Toepassen van vloeistofmechanische begrippen

De vloeistofmechanica is van eminent belang voor het ontwerpen en dimensioneren van leidingen en kunstwerken in de waterbeheersing. Begrip van enkele vloeistofmechanische begrippen is daarom onontbeerlijk. In deze paragraaf worden enkele begrippen kort genoemd, voor verdere uitleg wordt verwezen naar de colleges *vloeistofmechanica* (ME210).

Typen stromingen kunnen worden ingedeeld op het getal van Reynolds (turbulentie) of het getal van Froude (kritische stroming). De manier van berekenen van een stroming wordt gekenmerkt door de tijdsafhankelijkheid (stationair of niet-stationair) en de plaatsafhankelijkheid (eenparig of niet-eenparig).

#### 7.1.2 Kentallen: Reynolds en Froude

Stroming van water is turbulent of laminair. Het type stroming wordt bepaald door het getal van Reynolds. Open waterlopen zal over het algemeen kunnen worden gekarakteriseerd door een turbulente stroming (Reynolds groter dan 2000).

Het getal van Froude karakteriseert of water (sub-kritisch) stroomt of (superkritisch) schiet. Als  $Fr = 1$  dan treedt er kritische stroming op, hieronder sub-kritische stroming en hierboven superkritische stroming.

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{g \cdot a}} \quad \text{Froude (7.1)}$$

waarin:  $Fr$  = getal van Froude [-];  
 $u$  = gemiddelde snelheid [m/s];  
 $g$  = versnelling van de zwaartekracht ( $9,81 \text{ m/s}^2$ );  
 $a$  = hydraulische diepte (nat oppervlak gedeeld door breedte waterspiegel)[m].

#### 7.1.3 Tijds- en plaatsafhankelijkheid

De manier van berekenen van een stroming wordt gekenmerkt door de tijdsafhankelijkheid (stationair of niet-stationair) en de plaatsafhankelijkheid (eenparig of niet-eenparig). Afhankelijk van hoe een stroming van water door waterlopen varieert met de tijd en naar plaats kan een classificatie worden opgesteld zoals weergegeven in tabel 7.1.

Tabel 7.1: Classificatie van stromingen

		tijdsafhankelijk, variërend	
		nee	ja
plaatsafhankelijk, variërend	nee	stationair eenparig Strickler/Manning/Chézy (§7.4.1)	niet-stationair eenparig
	ja	stationair niet-eenparig Verhanglijnen, stuwkrommen (§7.4.2)	niet-stationair niet-eenparig Lange golven (korte golven) Modellen (§7.6)

Stationaire eenparige stroming varieert niet naar tijd en plaats. Deze situatie is met de hand door te rekenen met behulp van stromingsvergelijking, zoals die van Chézy, Strickler of Manning. Het stationair eenparig doorrekenen van waterlopenstelsels moet worden gezien als een simplificatie van wat er zich in werkelijkheid afspeelt. In werkelijkheid zijn stromingen in de natuur haast altijd tijdsafhankelijk en plaatsafhankelijk. Omdat het stationair doorrekenen met de hand kan gebeuren, is dit van oudsher de rekenwijze geweest. Tegenwoordig worden niet-stationaire berekeningen echter steeds algemener door de ontwikkeling van snellere computers.



Bij niet-eenparige stroming hangt de snelheid af van de plaats. Bij geleidelijk veranderende stromingen varieert de snelheid zwak in de stroomrichting en de wrijvingsweerstand overheerst. Verhanglijnen (stuw- en valkrommen) behoren tot de geleidelijk veranderende stromingen. Bij sterk veranderende stromingen verandert de snelheid sterk en is de wrijvingsweerstand meestal klein. Op sterk veranderde stromingen zal hier niet verder worden ingegaan.

De keuze tussen stationair (handmatig) en niet-stationair (computer) rekenen is een kosten-batenafweging. Aan de ene kant levert een nauwkeurige computerberekening vaak besparingen op in de bouwfase van een waterlopenstelsel. Hier staat tegenover dat de ontwerpkosten (kostbare computertijd en specialistische kennis) hoger zullen zijn naarmate er dynamischer wordt ontworpen.

Stationaire benaderingen komen bij sommige hydraulische systemen beter overeen met de werkelijkheid dan bij andere. Wanneer de veranderingen in peilen en stroomsnelheden in de waterlopen als gevolg van de afvoer klein zijn ten opzichte van de snelheden waarmee veranderingen zich in de waterlopen voortplanten kan veelal met een stationaire berekeningsmethode worden volstaan. Wanneer echter als gevolg van snelreagerende gebieden (sterke helling, verhard oppervlak) de veranderingen in de debieten, waterstanden en stroomsnelheden in een korte tijd plaatsvinden zal meestal een niet-stationaire berekening tot een beter en goedkoper ontwerp leiden.

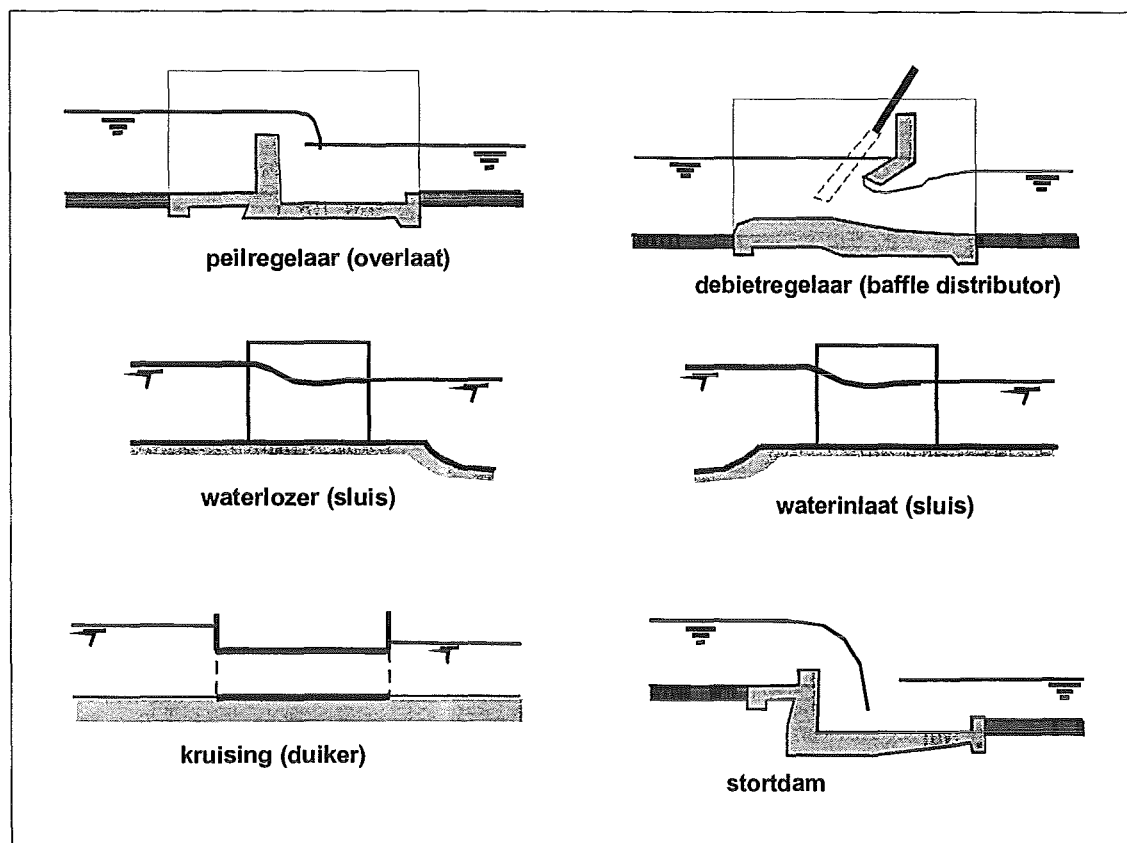
Bij de keuze om al dan niet stationaire te rekenen, moet ook worden gekeken naar de toepasbaarheid van niet-stationaire uitkomsten. In geautomatiseerde systemen met moderne beheersstrategieën (zoals in het Nederlands waterbeheer) zijn niet-stationaire berekeningen vaak onontbeerlijk om de bestaande infrastructuur optimaal te gebruiken. In een systeem van waterlopen dat niet dynamisch wordt beheerd, zal de toepasbaarheid van dynamische uitkomsten zeer beperkt zijn.

## **7.2 Inleiding: Samenhang functionele criteria en ontwerp transport en regelsystemen**

### **7.2.1 Soorten kunstwerken**

Kunstwerken in een irrigatie- en afwateringstelsels zijn onder te verdelen naar functie in:

- Peilregelaars; Deze handhaven een gewenst peil in een kanaal (bijvoorbeeld stuwen);
- Debietregelaars; Verdeelwerken en aftakinrichtingen dienen om het water dat in een leiding wordt aangevoerd te verdelen over twee of meer andere leidingen;
- Waterlozers; Gemalen en spuisluizen dienen om water af te voeren of te lozen. Deze kunstwerken zijn besproken in paragraaf 3.4.1.
- Waterinlaatkunstwerken; Watervangen, inlaatgemalen en pompen dienen om water een irrigatiestelsel in te laten. Watervangen worden behandeld in het college LW4410 *Irrigatie en drainage*.
- Kruisingen met ander infrastructuur; Op plaatsen waar een irrigatiekanaal andere waterlopen kruist moeten onderleiders, duikers of aquaducten worden aangebracht. Bij kruisingen met wegen moeten duikers, bruggen of aquaducten worden aangebracht.
- Snelheidsbeperkers; Bij steile kanalen moet het teveel aan energie en snelheid worden vernietigd door stortdammen, hellende goten of woelbakken. Snelheidsbeperkers worden behandeld in het college LW4410 *Irrigatie en drainage*.



**Figuur 7.1:** Voorbeelden van verschillende soorten kunstwerken

### 7.2.2 Eisen transport- en regelsystemen

Het ontwerp van een transport- en regelsysteem zal worden bepaald door de topografie van een gebied. Nadat de lay-out van een systeem is bepaald, zijn voor elk traject de beschikbare vervallen bekend uit de terreinverlopen. Het verval over een geheel transporttraject zal moeten worden gebruikt voor het verhang van de kanalen en het verval over de kunstwerken (zie figuur 7.5). Bij het ontwerp van het transport- en regelsysteem beïnvloeden de deelontwerpen van kunstwerken en kanaalpanen elkaar. Het ontwerp van een transport- en regelsysteem is dus een iteratief proces, waarbij de optimale combinatie van deelontwerpen moet worden bepaald.

## 7.3 Dimensioneren transportleidingen

### 7.3.1 Eenparige stationaire stroming

Eenparige stroming in een kanaal kan worden beschreven met behulp van de Chézy formule, de Manning formule of de Strickler formule. In principe zijn al deze methoden gelijk, het verschil zit hem in de manier van de ruwheidscoëfficiënt bepalen. Strickler wordt vooral gebruikt door irrigatie- en drainage-ingenieurs van het Europese continent, terwijl Manning populair is in Engels sprekende landen. De vergelijking van Chézy wordt vooral in de rivierwaterbouwkunde gebruikt.

**Chézy**

Het nadeel van de vergelijking van Chézy is dat de ruwheidscoëfficiënt  $C$  afhankelijk is van de diepte van de waterloop en met behulp van een andere formule moet worden berekend. In dit college zal daarom alleen aandacht worden besteed aan het ontwerp van kanalen met behulp van de vergelijking van Strickler.

$$Q = C * A * R^{\frac{1}{2}} * s^{\frac{1}{2}} \quad \text{Chézy (7.2)}$$

waarin:  $Q$  = debiet [ $\text{m}^3/\text{s}$ ];  
 $C$  = Chézy (ruwheids)coëfficiënt [ $\text{m}^{1/2}/\text{s}$ ];  
 $A$  = natte doorsnede [ $\text{m}^2$ ];  
 $R$  = hydraulische straal [ $\text{m}$ ];  
 $s$  = energieverhang (in Nederlandse literatuur ook aangeduid als  $i$ ) [-];

**Strickler/Manning**

De vergelijkingen van Strickler en Manning lijken erg op elkaar. Het verschil tussen deze formules zit hem in de ruwheidscoëfficiënt, waarbij de Manning-coëfficiënt gelijk is aan één gedeeld door de Strickler-coëfficiënt

$$Q = \frac{1}{n} * A * R^{\frac{2}{3}} * s^{\frac{1}{2}} \quad \text{Manning (7.3)}$$

$$Q = k * A * R^{\frac{2}{3}} * s^{\frac{1}{2}} \quad \text{Strickler (7.4)}$$

waarin:  $Q$  = debiet [ $\text{m}^3/\text{s}$ ];  
 $n$  = Manning (ruwheids)coëfficiënt [ $\text{s}/\text{m}^{1/3}$ ];  
 $k$  = Strickler(ruwheids)coëfficiënt [ $\text{m}^{1/3}/\text{s}$ ];  
 $A$  = natte doorsnede [ $\text{m}^2$ ];  
 $R$  = hydraulische straal [ $\text{m}$ ];  
 $s$  = energieverhang (in Nederlandse literatuur ook aangeduid als  $i$ ) [-].

De Strickler-coëfficiënt is onafhankelijk van de waterdiepte, maar sterk afhankelijk van de staat van onderhoud van kanalen. Een eerste schatting van de Strickler-coëfficiënt voor goed onderhouden onbeklede kanalen is  $30\text{-}40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ .

**Opgave**

Uit veldmetingen zijn de afmetingen van een kanaal bepaald:

$$s = 1 \cdot 10^{-3}$$

$$b = 2 \text{ m}$$

$$w = 6 \text{ m}$$

$$y = 1 \text{ m}$$

De Strickler-ruwheidscoëfficiënt van het kanaal wordt geschat op  $25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  net na het onderhoud en op  $15 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  in slecht onderhouden staat. Bepaal de capaciteit van het kanaal voor beide situaties.

**Uitwerking**

Bereken het talud van het kanaal: 
$$m = \frac{w-b}{2y} = \frac{6-2}{2 \cdot 1} = 2$$

De natte doorsnede en de hydraulische straal kunnen nu worden berekend:

$$A = (b + my) \cdot y = (2 + 2 \cdot 1) \cdot 1 = 4 \text{ m}^2$$

$$R = \frac{A}{b + 2y\sqrt{1+m^2}} = \frac{4}{2 + 2 \cdot 1 \cdot \sqrt{1+2^2}} = 0,62 \text{ m}$$

Alle parameters uit de Strickler-vergelijking zijn nu bekend en kunnen worden ingevuld. Voor de ruwheidscoëfficiënt ( $25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ) geldt:

$$Q = k \cdot A \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot s^{\frac{1}{2}} = 25 \cdot 4 \cdot 0,62^{\frac{2}{3}} \cdot (1 \cdot 10^{-3})^{\frac{1}{2}} = 2,30 \text{ m}^3/\text{s}$$

Voor het slecht onderhouden kanaal (ruwheidscoëfficiënt  $15 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ) geldt:

$$Q = k \cdot A \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot s^{\frac{1}{2}} = 15 \cdot 4 \cdot 0,62^{\frac{2}{3}} \cdot (1 \cdot 10^{-3})^{\frac{1}{2}} = 1,38 \text{ m}^3/\text{s}$$

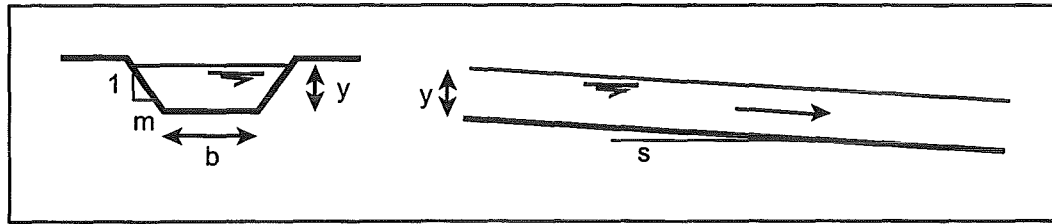
**Voorbeeld 7.1: Bepaling kanaalcapaciteit**

Bij het ontwerpen van een trapezoïdaal kanaal zullen in het algemeen vier onbekende maten moeten worden bepaald: bodembreedte ( $b$ ), de diepte ( $y$ ), het talud ( $m$ ) en het verhang ( $i$ ). De combinatie van bodembreedte, diepte en talud bepaalt de natte doorsnede ( $A$ ) en de hydraulische straal ( $R$ ) van het kanaal. In de praktijk zijn meestal enkele van deze parameters bepaald door de randvoorwaarden voor een kanaal. Zo is in vlakke gebieden als Nederland het beschikbare verhang erg klein. In andere gevallen zal een bijkomende scheepvaartfunctie eisen stellen aan de breedte of de diepte van het kanaal. Ook kan het talud bij onbekende kanalen zijn bepaald door de stabiliteit van de grondsoort.

$$A = (b + my) \cdot y \tag{7.5}$$

$$R = \frac{A}{b + 2y\sqrt{1+m^2}} \tag{7.6}$$

waarin:  $A$  = natte doorsnede [ $\text{m}^2$ ];  
 $b$  = bodembreedte [ $\text{m}$ ];  
 $y$  = diepte [ $\text{m}$ ];  
 $m$  = talud [-];  
 $R$  = hydraulische straal [ $\text{m}$ ];



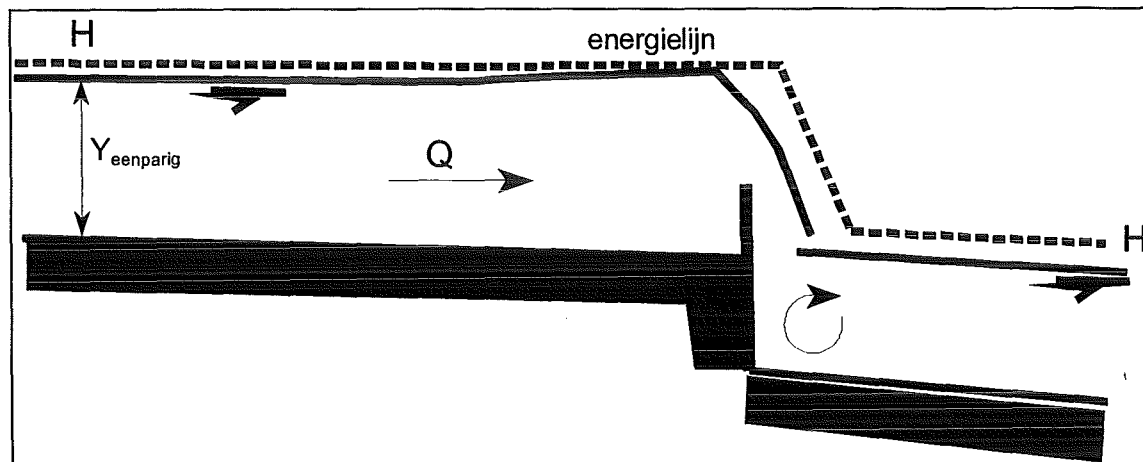
**Figuur 7.2: Parameters in de Strickler formule**

Het ontwerpen van een kanaal met behulp van de Strickler-formule is een iteratief proces: uit het debiet kunnen niet rechtstreeks de andere parameters worden bepaald. Veel rekenwerk kan worden bespaard door het programma "Profile" oor de toepassing van de Strickler formule. Het programma "Profile" dat beschikbaar is bij de secretaresse van de Sectie Land- en Waterbeheer, TU Delft.

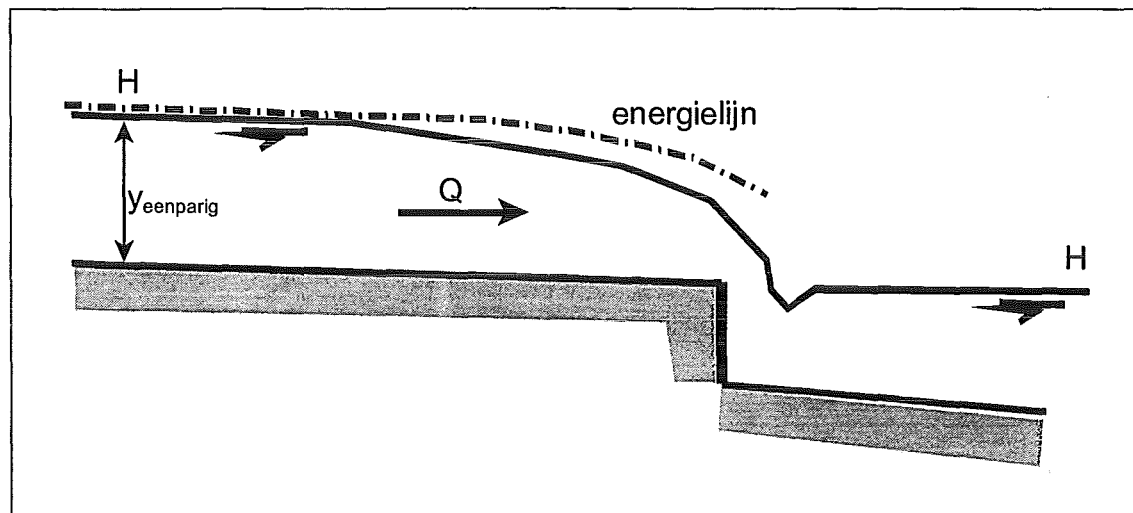
### 7.3.2 Niet-eenparige stationaire stroming

Bij niet-eenparige stroming hangt de snelheid af van de plaats. Bij geleidelijk veranderende stromingen varieert de snelheid zwak in de stroomrichting en de wrijvingsweerstand overheerst. Verhanglijnen (stuw- en valkrommen) behoren tot de geleidelijk veranderende stromingen. Bij sterk veranderende stromingen verandert de snelheid sterk en is de wrijvingsweerstand meestal klein. Op sterk veranderde stromingen zal hier niet verder worden ingegaan.

In open waterlopen treedt vaak opstuwing of afzuiging op, waardoor de stroming niet meer als eenparig kan worden aangemerkt. Verhanglijnen treden bovenstrooms van een kunstwerk of uitstroming van een kanaal op. Er is sprake van opstuwing als de energiediepte bij het kunstwerk groter is dan de uniforme energiediepte van het bovenstroomse pand (zie figuur 7.3). Afzuiging treedt op als de energiediepte bij het kunstwerk of de uitmonding lager is dan de uniforme energiediepte in het bovenstroomse pand (zie figuur 7.4).



**Figuur 7.3: Opstuwing**



**Figuur 7.4: Afzuiging**

Verhanglijnen kunnen analytisch of numeriek worden berekend door het oplossen van de differentiaalvergelijking. Met de ontwikkeling van de computer zijn de mogelijkheden van numerieke integratietechnieken sterk toegenomen.

Bij het ontwerp van waterlopenstelsels wordt vaak als vuistregel gehanteerd dat de toelaatbare opstuwing  $z$  als gevolg van een kunstwerk bij de maatgevende piekafvoer niet groter mag zijn dan de helft van het verval tussen het beschouwde en het bovenliggende kunstwerk. Dit betekent dat de invloed van de opstuwing net niet meer te merken mag zijn bij het bovenliggende kunstwerk. Dit is echter voor kleine verhangen een te optimistische aanname. In vlakke poldergebieden blijkt de opstuwing vaak over de gehele lengte van de waterloop doorwerken en kan men fouten maken van 100%. In het algemeen zal men bij afwateringssystemen te maken hebben met meerdere kunstwerken die op korte afstand van elkaar kunnen voorkomen. Het totale beschikbare verval moet worden verdeeld tussen dat in de waterloop en dat in de kunstwerken. De juiste verdeling moet worden bepaald op grond van economische en technische factoren.

Bij berekening van een groot aantal kunstwerken in serie moet worden gedacht dat de eventueel resterende opstuwing van een benedenstrooms gelegen duiker moet worden meegenomen bij de verrekening van de opstuwing van de volgende bovenstrooms gelegen kunstwerk. Dit is het makkelijkst te doen met behulp van computers.

**Opgave**

Ontwerp een drainagekanaal (nauwkeurigheid breedte 1m; diepte 0,1m ) gegeven de volgende data. Het ontwerpdebiet is 15 m<sup>3</sup>/s. Omdat het traject van het kanaal erg vlak is mag het verhang (s) niet meer zijn dan  $0,5 \cdot 10^{-4}$ .

Er vindt scheepvaart plaats op het kanaal. De eisen van de scheepvaart zijn:

- \* minimale breedte van het kanaal: 10m;
- \* minimale diepte van het kanaal 2 m.
- \* het talud moet 1:2 zijn.

De natte doorsnede van het kanaal moet zo klein mogelijk zijn, om het grondverzet te beperken. Als eerste schatting voor de Strickler-coëfficiënt wordt 35 m<sup>1/3</sup>/s aangehouden.

**Uitwerking**

Eerste poging: kanaal met minimale breedte en diepte (b = 10 m; y = 2 m; m = 2):

$$A = (b + my) \cdot y = (10 + 2 \cdot 2) \cdot 2 = 28 \text{ m}^2$$

$$R = \frac{A}{b + 2y\sqrt{(1+m^2)}} = \frac{28}{10 + 2 \cdot 2 \cdot \sqrt{(1+2^2)}} = 1,48 \text{ m}$$

$$Q = k \cdot A \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot s^{\frac{1}{2}} = 35 \cdot 28 \cdot 1,48^{\frac{2}{3}} \cdot (0,5 \cdot 10^{-4})^{\frac{1}{2}} = 9,0 \text{ m}^3 / \text{s}$$

De kanaalcapaciteit van dit minimale kanaal is te klein. Er worden twee pogingen gedaan om dit te verbeteren: een dieper kanaal met de minimale breedte, of een breder kanaal met de minimale diepte.

Tweede poging: dieper kanaal (b = 10 m; y = 2,7 m; m = 2):

$$A = (b + my) \cdot y = (10 + 2 \cdot 2,7) \cdot 2,7 = 41,6 \text{ m}^2$$

$$R = \frac{A}{b + 2y\sqrt{(1+m^2)}} = \frac{41,6}{10 + 2 \cdot 2,7 \cdot \sqrt{(1+2^2)}} = 1,88 \text{ m}$$

$$Q = k \cdot A \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot s^{\frac{1}{2}} = 35 \cdot 41,6 \cdot 1,88^{\frac{2}{3}} \cdot (0,5 \cdot 10^{-4})^{\frac{1}{2}} = 15,7 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Derde poging: breder kanaal (b = 18 m; y = 2 m; m = 2):

$$A = (b + my) \cdot y = (18 + 2 \cdot 2) \cdot 2 = 44 \text{ m}^2$$

$$R = \frac{A}{b + 2y\sqrt{(1+m^2)}} = \frac{44}{18 + 2 \cdot 2 \cdot \sqrt{(1+2^2)}} = 1,63 \text{ m}$$

$$Q = k \cdot A \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot s^{\frac{1}{2}} = 35 \cdot 44 \cdot 1,63^{\frac{2}{3}} \cdot (0,5 \cdot 10^{-4})^{\frac{1}{2}} = 15,1 \text{ m}^3 / \text{s}$$

De kanalen die zijn ontworpen bij de tweede en de derde poging hebben allebei de gewenste kanaalcapaciteit. Het diepere, minder brede kanaal verdient echter de voorkeur omdat de natte doorsnede (en dus het grondverzet) kleiner is. De afmetingen van het kanaal zijn dus:

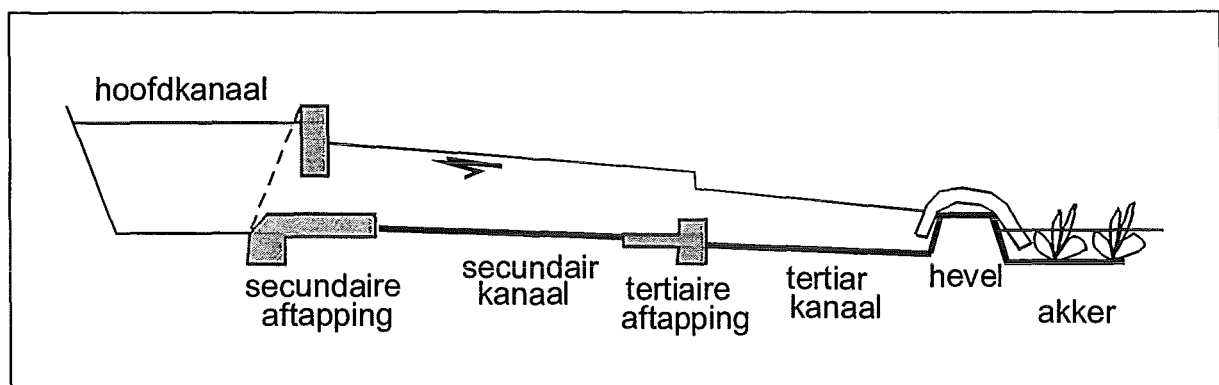
$$b = 10 \text{ m; } y = 2,7 \text{ m.}$$

**Voorbeeld 7.2: Ontwerp van trapezoidaal kanaal**

<i>uniform flow</i>	<i>eenparige stroming:</i>	<i>Stroming in een open leiding met constante dwarsdoorsnede waarbij de waterdiepte gelijk is in alle dwarsdoorsneden.</i>
<i>discharge capacity</i>	<i>Afvoercapaciteit</i>	<i>De hoogste afvoer die onder bepaalde omstandigheden een waterloop of kunstwerk kan passeren</i>
<i>bankfull capacity</i>	<i>Capaciteit van het rivierbed</i>	
<i>side slope</i>	<i>Talud</i>	
<i>Wetted area</i>	<i>natte oppervlakte</i>	<i>Onder de waterspiegel gelegen oppervlakte van de dwarsdoorsnede van een leiding</i>
<i>Wetted perimeter</i>	<i>Natte omtrek</i>	<i>Lengte van de grenslijn tussen het water van de wanden en bodem in de dwarsdoorsnede van de leiding.</i>
<i>hydraulic radius</i>	<i>hydraulische straal</i>	<i>Verhouding tussen het natte oppervlakte en natte omtrek van een leiding (<math>R=A/P</math>)</i>
<i>Hydraulic gradient</i>	<i>(waterspiegel) verhang</i>	<i>Het quotiënt van het verval tussen twee punten en hun afstand</i>
<i>energy gradient</i>	<i>energieverhang</i>	<i>Verhang van de energielijn van een open of gesloten leiding</i>
<i>roughness coefficient</i>	<i>ruwheidcoëfficiënt</i>	<i>Een factor in de formules van Darcy-Weisbach, Manning en anderen voor het berekeningen van de gemiddelde snelheid van water in een waterloop. Deze factor geeft het energieverlies ten gevolge van de ruwheid aan.</i>
<i>backwater curve</i>	<i>verhanglijn</i>	
<i>freeboard</i>	<i>Waking</i>	

### 7.3.3 Lengteprofielen

Een lengteprofiel geeft een overzicht van de vervallen, verhangen en waterdieptes in een kanaal bestaande uit een aantal kanaalpanden. Middels een lengteprofiel kan op eenduidige wijze worden vastgesteld welk minimaal verval benodigd is over de diverse kunstwerken. Figuur 7.5 geeft een schematisch weergave van het hoofdkanaal naar het tertiaire vak. Het minimale waterpeil in het hoofdkanaal kan nu worden bepaald aan de hand van de hoogte van het maaiveld, het verval over de tertiaire en secundaire aftappingen en het verhang in de kanalen.



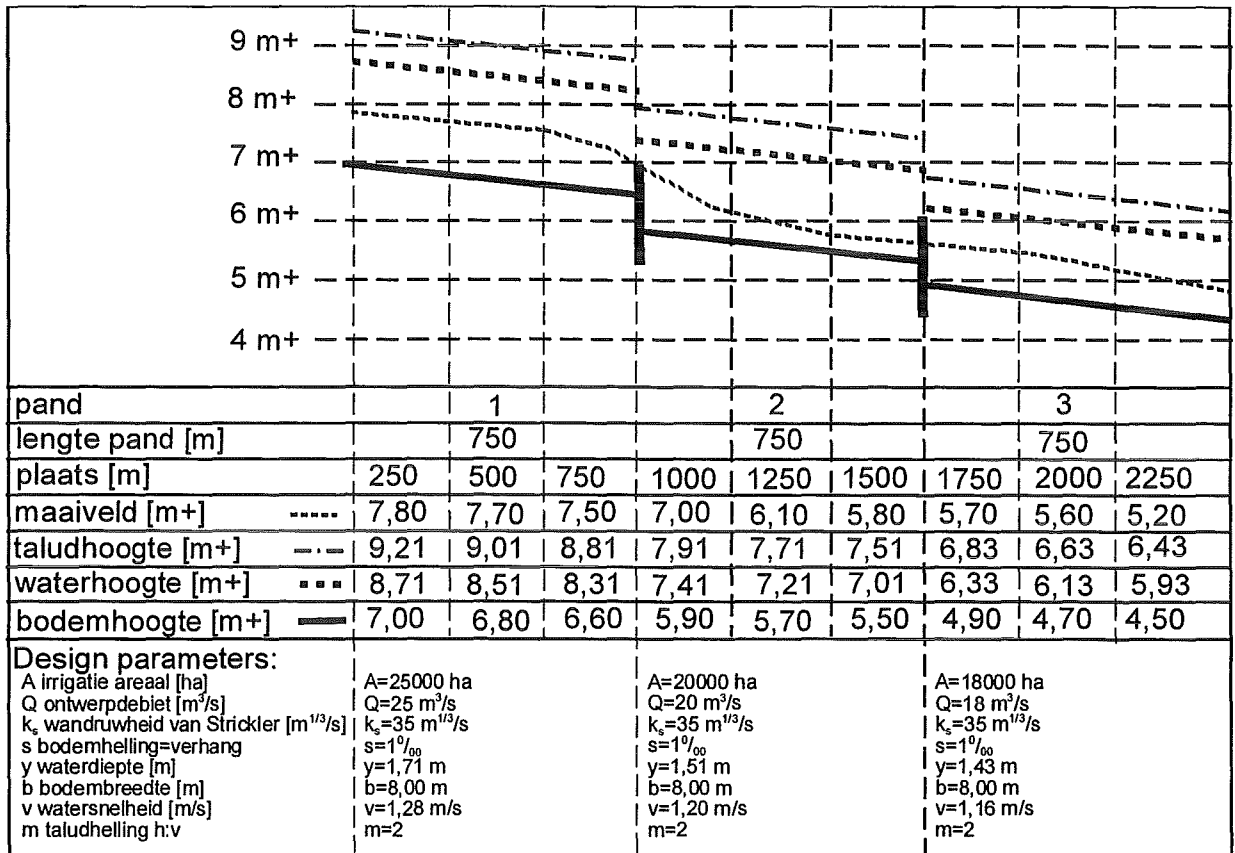
**Figuur 7.5: Kanaalpeilen in een irrigatiestelsel**

Een schematische uitwerking voor één kanaal met drie panden wordt gegeven in figuur 7.6. Het lengteprofiel bestaat uit een grafische weergave en een opsomming van de waterlijn, de maaiveldhoogte, taludhoogte en de bodemhoogte van een kanaal.

Van ieder pand wordt uit het ontwerpplan vastgesteld hoe groot het achterliggende irrigatie areaal  $A$  is. Met het capaciteits criterium wordt dan vastgesteld wat het bijbehorende ontwerpdebiet  $Q$  van ieder pand zal zijn. Bij gegeven of uitgetoende waarden van  $m$  (taludhelling horiz:vert), het beschikbare



verhang  $s$  en de ruwheidsfactor van Strickler ( $k_s$ ) worden dan geschikte waarden voor  $y$  (waterdiepte),  $b$  (bodembreedte) en  $v$  (watersnelheid) bepaald. Door al deze gegevens systematisch in het lengteprofiel te noteren zijn controles en correcties snel uit te voeren. Eventuele wijzigingen van het ontwerp zijn direct op hun consequenties na te rekenen.



Figuur 7.6: Schematisch lengteprofiel van irrigatiekanaal

## 7.4 Dimensioneren regelkunstwerken

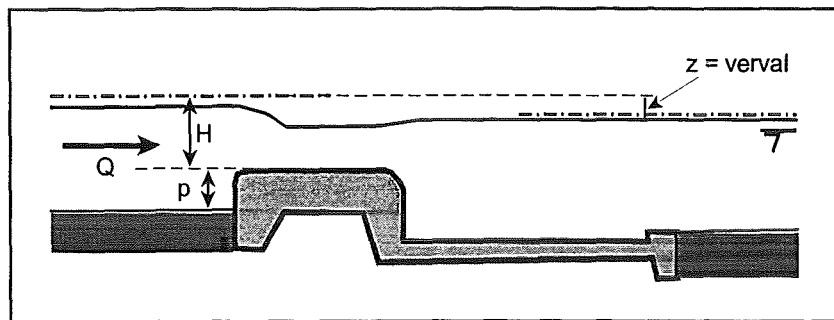
### 7.4.1 Inleiding

Naast het ontwerpen van open waterlopen is ook het dimensioneren van regelkunstwerken van eminent belang voor het ontwerpen van een wateraanvoer- of waterafvoerstelsel. Drie simpele kunstwerken zullen hier worden besproken: de overlaat, de onderspuier en de duiker.

Weir, barrage	stuw	Vaste of beweegbare constructie die alleen dient om de waterstand bovenstrooms van de constructie te verhogen c.q. te regelen
broad-crested	brede overlaat	
sharp-crested	scherpe overlaat	
orifice	onderspuier	
gate	schuif	
culvert	duiker	Kokervormige constructie (met meestal een vrije waterspiegel), die twee waterlopen met elkaar verbindt
regulating	regelkunstwerk	
conveyance	doorvoerkunstwerk	

**7.4.2 Overlaten**

Een overlaat is een lokale verhoging in een waterloop. Overlaten worden naar de lengte van hun kruin ingedeeld in lange overlaten en scherpe overlaten. Bij lange overlaten lopen de stroomlijnen boven de kruin evenwijdig, bij korte overlaten zijn de stroomlijnen gekromd. Korte overlaten hebben bij een zelfde voor waterstand een grotere afvoer dan een lange overlaat. De stroming over een overlaat met vrije afstroming wordt berekend met behulp van vergelijking 7.7. Om vrije afstroming te garanderen moet het verval over een brede overlaat groter zijn dan eenderde van de energiehoogte boven de overlaat (vergelijking 7.8).



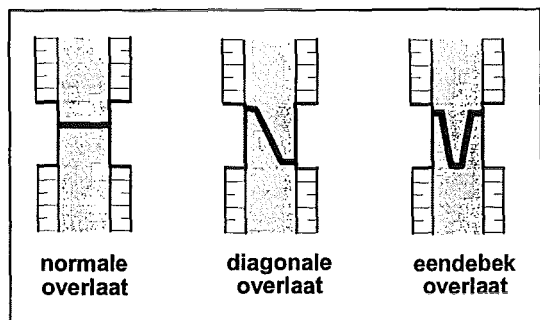
**Figuur 7.7 : Lange overlaat**

Verschillende vormen van korte overlaten, hun afvoercoëfficiënten en de condities voor vrije afstroming zijn weergegeven in figuur 7.9.

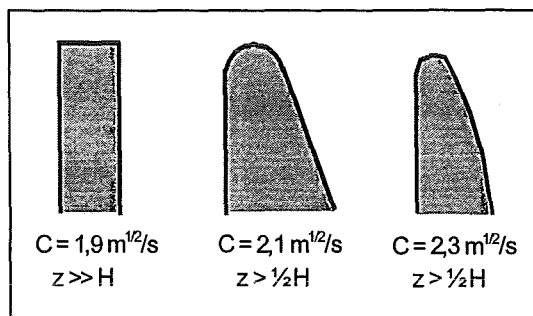
$$Q = c * b * H^{3/2} \tag{7.7}$$

$$z \geq \frac{1}{3} * H \tag{7.8}$$

- waarin: Q = debiet [m<sup>3</sup>/s];  
 c = overlaatcoëfficiënt (1,7 voor lange overlaat; korte overlaat zie figuur 7.9) [m<sup>1/2</sup>/s];  
 b = breedte overlaat [m];  
 H = energiehoogte boven overlaat [m];  
 z = verval [m].



**Figuur 7.8: Verschillende vormen van vaste overlaten**

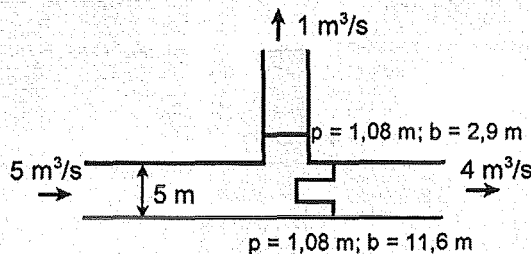
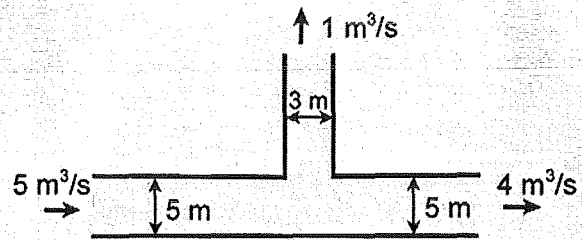


**Figuur 7.9: Scherpe overlaat met afvoercoëfficiënt en conditie voor vrije afstroming**

**Opgave**

In een irrigatiegebied met proportionele verdeling moet een aftapping worden ontworpen. Gekozen wordt voor twee overlaten met dezelfde kruinhoogte. Het debiet van het bovenstroomse kanaal is  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Van dit debiet moet 20% worden afgetapt naar de offtake. De breedte van het doorgaande kanaal is  $5 \text{ m}$ , de uniforme energiehoogte in het bovenstroomse kanaal is  $1,38 \text{ m}$ . De breedte van het aftappende kanaal is  $3 \text{ m}$  (zie nevenstaande doorsnede). Het maximaal beschikbare verval over de overlaat is  $0,15 \text{ m}$ . Er moet vrije afstroming plaatsvinden.

Ontwerp de aftapping met behulp van twee korte overlaten met in het aftappende kanaal en het doorgaande kanaal met dezelfde kruinhoogte. De korte overlaten hebben een cilindrische kruin (middelste type figuur 7.9,  $c = 2,1 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ ;  $z = 1/2 H$ ).

**Uitwerking**

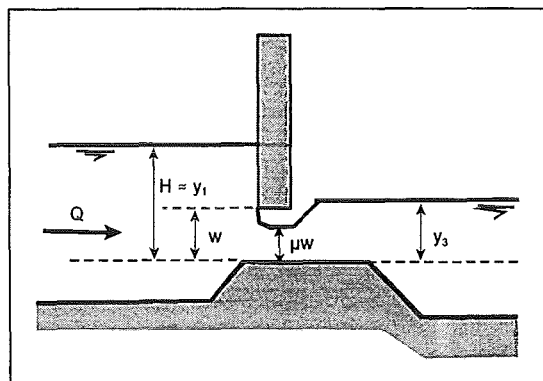
Het maximale verval is  $0,15 \text{ m}$ . Voor vrije afstroming moet de minimale energiehoogte boven de kruin  $2 * 0,15 = 0,30 \text{ m}$  zijn. De som van de kruinhoogte ( $p$ ) en de energiehoogte boven de kruin ( $H$ ) is gelijk aan de bovenstroomse waterdiepte =  $1,38 \text{ m}$ . De kruinhoogte ( $p$ ) is minimaal  $1,08 \text{ m}$ .

$$b = \left( \frac{Q}{c * H^{3/2}} \right) = \left( \frac{4}{2,1 * 0,3^{1,5}} \right) = 11,6 \text{ m}$$

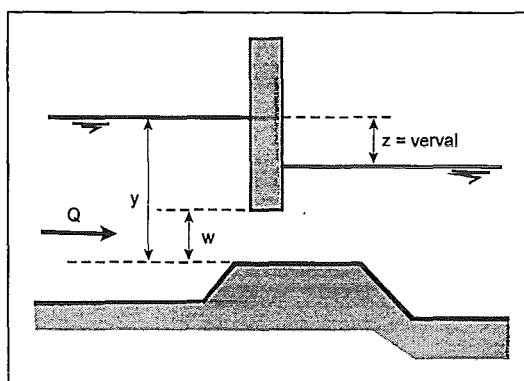
De breedte van de overlaat in het aftappende kanaal ( $Q = 1 \text{ m}^3/\text{s}$ ) is  $2,9 \text{ m}$ . De overlaat in het doorgaande kanaal is breder dan het kanaal zelf. Deze overlaat kan worden uitgevoerd als een eendebekoverlaat (zie figuur).

**Voorbeeld 7.3: Ontwerp overlaat****7.4.3 Onderspuiers**

Bij de onderspuier vindt de vernauwing van het doorstroomprofiel plaats aan de bovenkant van het doorstroomprofiel, en niet aan de onderkant zoals bij de overlaat. Dit levert een ander afvoer karakteristiek op. Soorten (beweegbare) onderspuiers zijn de vlakke schuif, de Crump-de Gruijter schuif, Baffle distributors en kleppen.



**Figuur 7.10: Onderspuier (vrije afstroming)**



**Figuur 7.11: Verdrongen onderspuier**

Als het verval over een onderspuier voldoende groot is, vindt er vrije afstroming plaats. De afvoercharacteristiek voor deze situatie (figuur 7.10) is gegeven in vergelijking 7.10. Let erop dat bij lage debieten, als de schuif het water niet raakt, er sprake is van een overlaat met vrije afstroming. Vergelijking 7.10 geldt als voldaan wordt aan vergelijking 7.9.

$$y_3 < 0,37 * y_1 + 0,75w \quad (7.9)$$

$$Q = \mu * b * w * \sqrt{2g(H - \mu w)} \quad (7.10)$$

waarin:  $Q$  = debiet [ $m^3/s$ ];  
 $\mu$  = contractiecoëfficiënt [-] . 0,6;  
 $b$  = breedte onderspuier [m];  
 $w$  = opening van de schuif [m];  
 $g$  = zwaartekrachtversnelling [ $m/s^2$ ];  
 $H$  = energiehoogte t.p.v. onderspuier [m];

Als het verval over een onderspuier klein is zal er geen vrije maar verdrongen afstroming optreden (figuur 7.11). De afvoercharacteristiek voor een verdrongen onderspuier wordt beschreven door formule 7.11. De afvoercoëfficiënt is afhankelijk van het Froude-getal en de verhouding tussen de waterstand en de hoogte van de doorstroomopening ( $y/w$ ) en ligt tussen 0,1 en 0,6. De onderspuier wordt verder behandeld in het college *Polders en Hoogwaterbeheersing* (LW4460).

$$Q = c * A * \sqrt{2gz} \quad (7.11)$$

waarin:  $c$  = onderspuiercoëfficiënt [], ligt tussen 0,1 en 0,6;  
 $z$  = verval = waterstandsverschil [m].

Bij een onderspuier hebben variaties in de voorwaterstand weinig invloed op het doorgevoerde debiet. Dit is te zien aan de afvoerformules waar de energiehoogte ( $H$ ) of het waterstandsverschil ( $z$ ) onder het wortelteken staat. Bij de overlaat heeft de voorwaterstand grotere invloed op het debiet, de energiehoogte staat hier immers tot de  $3/2$  macht in de afvoercharacteristiek.

#### 7.4.4 Duikers

Een duiker is een kunstwerk dat een kanaal onder een weg, een spoorlijn of een waterloop doorvoert. De stroming door een duiker hangen af van het debiet, de doorsnede, de lengte en de benedenstroomse condities. Het verval over een duiker is de som van het intreeverlies, het wrijvingsverhang, en het uittreeverlies. Het wrijvingsverhang in een duiker is uit te rekenen met behulp van de Strickler-formule.

$$\Delta H_{tot} = \Delta H_{in} + \Delta H_{uit} + i_{wr} * L = c_{in} * \frac{v^2}{2g} + c_{uit} * \frac{v^2}{2g} + \frac{v^2}{k^2 R^{4/3}} * L$$

waarin:  $\Delta H_{tot}$  = totaal verval over duiker [m];

$i_{wr}$  = wrijvingsverhang [-];

$L$  = lengte van de duiker [m];

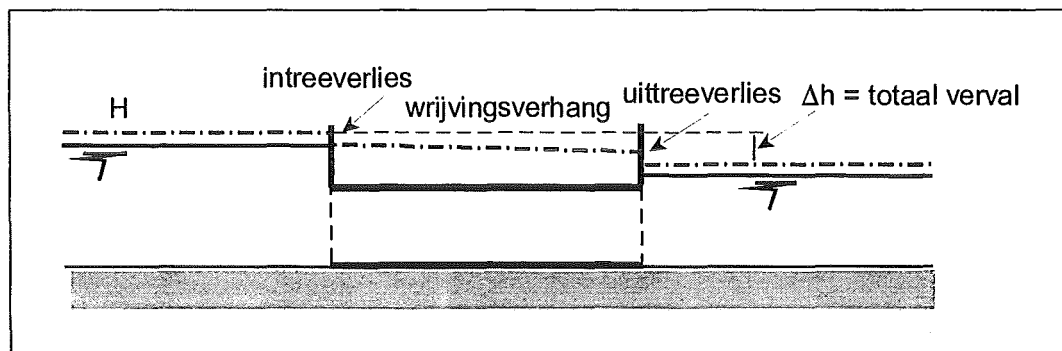
$c_{in}$  = coëfficiënt voor intreeverlies = 0,5 [-];

$c_{uit}$  = coëfficiënt voor uitreeverlies = 1 [-];

$v$  = stroomsnelheid in buis [m/s];

$K$  = Strickler(ruwheids)coëfficiënt [ $m^{1/3}/s$ ];

$R$  = hydraulische straal [m];



**Figuur 7.12: Duiker**

**Opgave**

In een kanaal moet een duiker worden aangelegd, omdat het kanaal een weg kruist. De lengte van de duiker is 10m. Het debiet van het kanaal is 1 m<sup>3</sup>/s. Het maximale verval over de duiker is 0,1 m. De duiker wordt gemaakt van een betonnen pijp (K = 60 m<sup>1/3</sup>/s). Er zijn pijpen aanwezig met de volgende diameters: 80 cm; 90 cm; 100 cm; 110 cm; en 120 cm. Bepaal de diameter van de duiker.

**Uitwerking**

De stroomsnelheid in de buis is afhankelijk van de diameter in de buis. Daarom is de diameter alleen te bepalen met een iteratief proces.

Eerste schatting: D = 1 m r = R = 0,5 m; A = π r<sup>2</sup> = 0,79 m<sup>2</sup>; v = Q/A = 1,27 m/s

$$\Delta H_{tot} = c_m * \frac{v^2}{2g} + c_{uit} * \frac{v^2}{2g} + \frac{v^2}{k^2 R^{4/3}} * L = 0,041 + 0,081 + 0,011 = 0,133 \text{ m}$$

Tweede schatting: D = 1,2 m r = R = 0,60 m; A = π r<sup>2</sup> = 1,13 m<sup>2</sup>; v = Q/A = 0,88 m/s

$$\Delta H_{tot} = c_m * \frac{v^2}{2g} + c_{uit} * \frac{v^2}{2g} + \frac{v^2}{k^2 R^{4/3}} * L = 0,019 + 0,039 + 0,004 = 0,058 \text{ m}$$

Derde schatting: D = 1,1 m r = R = 0,55 m; A = π r<sup>2</sup> = 0,95 m<sup>2</sup>; v = Q/A = 1,05 m/s

$$\Delta H_{tot} = c_m * \frac{v^2}{2g} + c_{uit} * \frac{v^2}{2g} + \frac{v^2}{k^2 R^{4/3}} * L = 0,028 + 0,056 + 0,006 = 0,085 \text{ m}$$

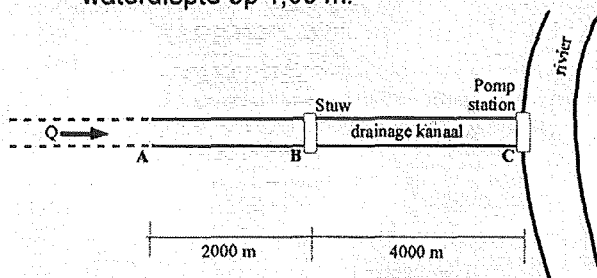
**Voorbeeld 7.4: Berekening duiker****7.5 Niet-stationaire stromingsberekeningen**

Voor niet-stationaire stromingsberekeningen zal gebruik moeten worden gemaakt van computerprogramma's. Met behulp van deze programma's is het mogelijk voor elk punt van een watersysteem de waterstand en de afvoer op elk tijdstip te berekenen. Een computerprogramma schematiseert een watersysteem tot een beperkt aantal takken en knopen. In de takken worden de debieten berekend volgens de stromingsvergelijking. In de knopen worden de waterstanden berekend volgens de continuïteitsvergelijking. De hoeveelheid knopen en takken waarmee een watersysteem wordt geschematiseerd moet een balans zijn tussen de benodigde rekentijd en de gewenste nauwkeurigheid van de uitkomsten. Hoe meer elementen (knopen en takken) er in een model zitten, hoe meer rekentijd een model kost. Minder elementen betekent echter een grovere benadering van de werkelijkheid.

**Opgave**

Een drainage kanaal A-B-C met een ontwerpdebiet van  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  en een lengte van  $6 \text{ km}$  moet worden ontworpen (zie figuur). Het maaiveld is volledige vlak, en ligt juist op het referentiepeil  $0,00 \text{ m}+$ . Het waterpeil in het kanaal moet tenminste  $0,50 \text{ m}$  onder het maaiveld blijven. Bij B zal er een stuw in het kanaal komen te liggen. Het verval over deze stuw tijdens het ontwerp debiet moet klein zijn, en mag niet meer bedragen dan  $0,05 \text{ m}$ . Het kanaal eindigt bij een pompstation in C. Het waterpeil in het kanaal bij het pompstation wordt steeds op het streefpeil van  $-1,00 \text{ m}+$  gehouden.

1. Bepaal de verhanghelling van de waterlijn bij het ontwerpdebiet in het kanaal. Teken de waterlijn met de relevante peilen in een lengteprofiel.
2. Ontwerp de dwarsdoorsnede van het kanaal. De taluds van het kanaal zullen op  $1_{\text{vert}} : 2_{\text{hor}}$  liggen, en de ruwheidscoëfficiënt bedraagt  $40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ . De breedte/diepte verhouding is  $n = 5$ .
3. Ontwerp de hydraulische afmetingen van de stuw met een vertikaal bewegende deur. De bodembreedte van het kanaal mag u aannemen op  $b = 5,00 \text{ m}$ , en een waterdiepte op  $1,00 \text{ m}$ .

**Uitwerking**

1. Verhang  $[0,50 - 0,05] / [6 \times 10^3] = 0,075 \times 10^{-3}$ .

2. Strickler:  $2 = 40 \underline{AR}^{2/3} (0,075 \times 10^{-3})^{1/2}$ , waardoor  $\underline{AR}^{2/3} = 5,77$

Natte oppervlak voor  $\underline{b} = 5 \underline{h}$ :  $\underline{A} = (\underline{b} + \underline{m}\underline{h})\underline{h} = 7 \underline{h}^2$ ,

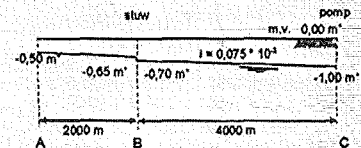
Hydraulische straal  $\underline{R} = [7 \underline{h}^2] / [\underline{b} + 2 \underline{m} \underline{h} \sqrt{(1 + \underline{m}^2)}]$

$= [7 \underline{h}^2] / [5 + 4 \sqrt{5}] \underline{h} = 0,50 \underline{h}$

Zodat voor  $\underline{AR}^{2/3} : 7 \underline{h}^2 (0,50 \underline{h})^{2/3} = 5,77$  of  $4,41$

$\underline{h}^{8/3} = 5,77$  zodat  $\underline{h} = 1,11 \text{ m}$  en  $\underline{b} = 5,55 \text{ m}$ .

3. laag verval bij ontwerp debiet  $Q_{\text{max}}$ : verval  $z = 1,5 v^2/2g$  (maar groot verval bij debiet  $Q < Q_{\text{max}}$ ). Dus  $0,05 = 1,5 v^2/2g$  en de snelheid  $v$  in het kunstwerk  $v = 0,81 \text{ m/s}$ . De waterdiepte  $\underline{h} = 1,00 \text{ m}$ , waardoor de breedte van het kunstwerk  $\underline{b} = Q / [\underline{h} v] = 2,47 \text{ m}$ .



Voorbeeld 7.5: Drainagekanaal met stuw

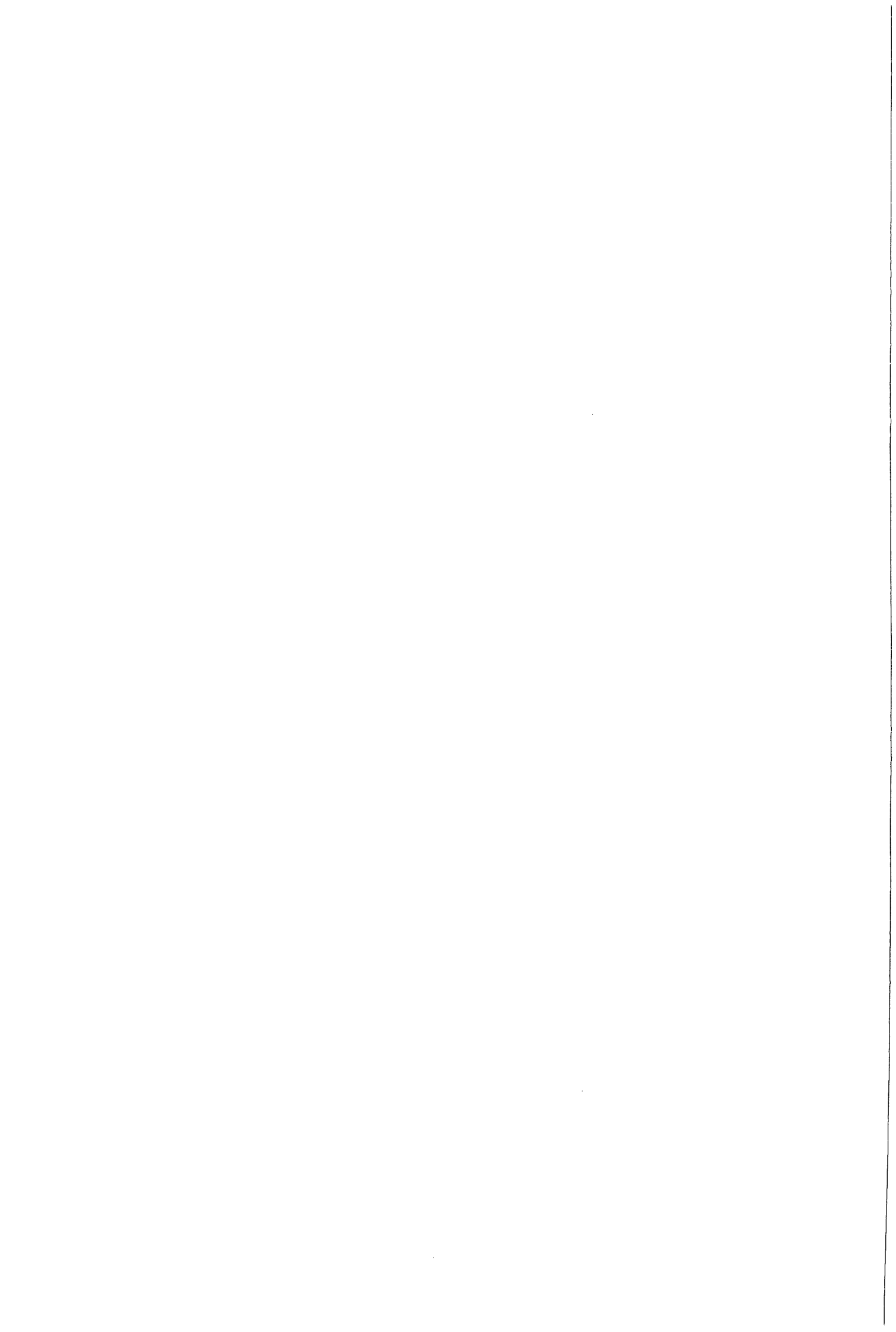
## **Hoofdstuk 8    Beheersorganisatie**

### *Leerdoelen*

Na bestudering van dit hoofdstuk moet u kennis hebben van:

- het feit dat een beheersorganisatie een onlosmakelijk onderdeel van het watermanagementsysteem is;
- waar operationeel waterbeheer voor staat;
- waar onderhoud voor nodig is;
- hoe een beheersorganisatie is opgezet ;





## 8 BEHEERSORGANISATIE

### 8.1 Inleiding

Het begrip "beheer" heeft in de Nederlandse waterbeheersorganisatie drie samenhangende componenten:

- bedienen van de regelkunstwerken (operationeel beheer)
- onderhouden van het bestaande stelsel
- beleid, plannen organiseren van het gehele systeem

(In het engels spreekt men voor de duidelijkheid dan ook meestal van "operation, maintenance and management").

De levensduur van een waterbeheerssysteem is niet eeuwig en moet gezien worden in generaties van 20 -30 jaar. Na elke generatie moet het systeem "gerehabiliteerd" worden. In Nederland kent de landinrichtingsdienst een cyclus van ongeveer 60 jaar voor het vernieuwen van regionale waterhuishoudsystemen. Deze rehabilitatie richt zich op het bijwerken van achterstalling onderhoud, het technisch moderniseren van het waterbeheerssysteem en het aanpassen van het stelsel aan nieuwe eisen. Ook hiervoor moeten tijdig plannen worden gemaakt.

Over het aspect van plannen en organiseren op de korte en lange termijn is in paragraaf 1.2.5 reeds het nodige gezegd. De aspecten van operationele bediening en onderhoud worden in de volgende paragrafen besproken.

### 8.2 Operationeel waterbeheer

Operationele waterbeheer is gericht op het doelmatig bedienen van de verschillende onderdelen van een wateraanvoerstelsel, zoals stuwen, sluizen en pompstations. In moderne waterbeheerssystemen zijn traditionele doelstellingen vervangen door complexere, onderling afhankelijke, doelstellingen. Zowel bij afwatering als bij wateraanvoer zullen de gewenste debieten en peilen in het watersysteem fluctueren in de tijd. Meet- en regelkunstwerken zijn (op afstand) te sturen. Operationeel waterbeheer is de afstelling van kunstwerken, zodat op de gewenste watersysteem variabelen (debieten, peilen, kwaliteit) worden gerealiseerd.

Een beheerder van een wateraanvoersysteem dient een van te voren bepaalde besturingsmethodiek te implementeren. Hiervoor is kennis van het dynamische gedrag van water noodzakelijk. Deze kennis kan worden verkregen door het modelleren van een wateraanvoersysteem met behulp van experimentele data en fysische balansen. Operationeel waterbeheer was vroeger grotendeels gebaseerd op ervaring, maar wordt steeds dynamischer met toepassing van computersturing en toepassing van meet- en regeltechniek. Besturing (operational control) van watersystemen wordt gedoceerd in het vak *operationeel waterbeheer* (1w5490).

Hierbij komt de moderne besturing en automatisering in het waterbeheer aan de orde.

### 8.3 Onderhoud

Onderhoud van waterlopen en dijken is gericht op de volgende doelen:

- voorkomen van verzanding van kanalen door sedimentatie. Een irrigatie- of drainagesysteem moet zo ontworpen worden dat er zo min mogelijk sedimentatie optreedt. Toch zal vaak plaatselijk periodiek het neergeslagen sediment moeten worden verwijderd.
- beheersen van planten- en algengroei. Plantengroei bevordert de stabiliteit van de kanaalaluds, maar vermindert het doorstroomprofiel.
- voorkomen en herstel van het afschuiven of verzakken van kanaalaluds, oevers, dijken en kaden. Dit kan het gevolg zijn van een te steil ontwerp, beschadiging door mens, dier of landbouw machines, infiltratie van water met te hoge snelheden of overbegrazing door koeien of schapen.

Onderhoud van kunstwerken is nodig om hun functionaliteit te handhaven en veiligheid te waarborgen en kent de volgende aandachtspunten:

- Uitschuring en erosie benedenstreams van de kunstwerken of door onderloopsheid.
- Biologische en chemische afbraak van materialen. Hout beton en staal kunnen rotten en oxideren. Vooral in zout of brak water zullen hier maatregelen tegen genomen moeten worden.

- Verstopping van kunstwerken door sedimentatie en accumulatie van begroeiing en drijfvuil. Bagger en slib in de buurt van kunstwerken moet worden verwijderd, evenals drijfvuil, losse waterplanten en maaiafval. Dit kan automatisch gebeuren (krooshek) of met de hand.
- Opdrijven van kunstwerken. Zodra piping grote overdrukken veroorzaakt, bestaat er het gevaar van opdrijven. Opdrijven van kunstwerken is meestal het gevolg van constructiefouten en herstel is een kostbare aangelegenheid.
- Mechanische slijtage. Slijtage van bewegende onderdelen zoals scharnieren en elektromechanische onderdelen.

In Nederland zijn drie partijen betrokken bij het onderhoud aan kanalen. Boeren verzorgen een aanzienlijk deel van het klein onderhoud op hun eigen terrein (>50%). De waterschappen en hoogheemraadschappen zijn verantwoordelijk voor het onderhoud van grotere kanalen. Daarnaast wordt een deel van de kanalen onderhouden door derden, zoals de Nederlandse Spoorwegen en gemeentes, en is het Rijk verantwoordelijk voor de grote kanalen en rivieren.

#### 8.4 Beheersorganisaties

Het totale waterbeheersstelsel wordt in principe door twee groepen beheerd en onderhouden

- de eindgebruiker (voor de landbouw de boer) die op zijn eigen perceel het waterstelsel stuurt en voor het onderhoud verantwoordelijk is
- de overheid (waterschap, gemeente) die verantwoordelijk is voor debieten, peilen en kwaliteit in het grote aanvoersysteem.

##### *de eindgebruiker*

- kan op zijn eigen perceel naar eigen inzicht het water beheren
- is verplicht zich daarbij aan overheidsregels te houden zoals ze daar zijn:
  - vergunning tot grondwaterwinning
  - vergunning tot lokaal verhogen of verlagen van het waterpeil
  - verplichting tot onderhoud van watergangen (en soms ook kleine kunstwerken)
- verplichting tot het betalen van een bijdrage (waterschapslasten) aan de overheid
- kan zich met andere lokale eindgebruikers verenigen (polderschap, water users association) om tot betere resultaten te komen

##### *de overheid*

- stelt de rechten en plichten vast waaraan de eindgebruikers gebonden zijn
- stelt de eisen vast waaraan het watersysteem moet voldoen (te handhaven peilen, te leveren debieten, kwaliteitsnormen)
- bedient de kunstwerken
- onderhoudt het grote waterbeheersstelsel
- stelt de hoogte van de noodzakelijke heffingen vast
- onderhoudt een effectieve organisatie voor de uitvoering van haar taken met deskundig personeel bemand en efficiënt geadmistreerd

In de Nederlandse situatie zijn de eindgebruikers vertegenwoordigd in het bestuursorgaan van de overheid (b.v. het Waterschaps bestuur) zodat deze overheid door de belanghebbende zelf worden aangestuurd en gecontroleerd.

Een dergelijke beheersorganisatie is internationaal bekend als een "dual managed system". Voor een goed beheer van een dual-managed systeem zijn de volgende organisaties vereist:

1. een hoogste autoriteit;
2. een beheersorganisatie;
3. de eindgebruikers.

**hoogste beheersautoriteit**

De hoogste autoriteit is de beleidsbepalende en leidinggevende instantie van een waterbeheersgebied, die besluiten kan nemen en afdwingen. Voor het goed functioneren van een systeem is het belangrijk dat de hoogste autoriteit niet identiek is aan de beheersorganisatie.

**uitvoerende beheersorganisatie**

De uitvoerende organisatie implementeert het beleid van de hoogste autoriteit, en draagt zorg voor de besturing van de kunstwerken en het onderhoud aan het waterbeheerssysteem. Daarnaast moet de uitvoerende organisatie beleidsvoorbereidend werk verrichten voor de hoogste autoriteit.

**eindgebruikersorganisatie**

De eindgebruikers zullen in het algemeen bestaan uit boeren, stedelingen en gemeenten en anderen die belang hebben bij het waterbeheer. Deze belanghebbenden kunnen zich indien nodig voor effectieve organisatie en besluitvorming verenigen in functionele belangengroepen (b.v. fracties in het waterschapsbestuur) of lokale watergebruikersorganisaties (polderschappen, irrigation water associations). Idealiter zal de watergebruikersorganisatie samenvallen met al bestaande sociologische en juridische eenheden zoals dorpen. Omdat waterbeheersontwikkeling vaak plaatsvindt op basis van "watergrenzen" zullen de eenheden en de watergebruikersorganisaties echter zelden samenvallen met al bestaande organisaties.

<i>operation and maintenance</i>	<i>bediening en onderhoud</i>
<i>operational water</i>	<i>operationeel waterbeheer</i>
<i>management</i>	
<i>highest authority</i>	<i>hoogste autoriteit</i>
<i>operation and maintenance</i>	<i>beheersorganisatie</i>
<i>agency</i>	
<i>water users association</i>	<i>watergebruikersorganisatie</i>
<i>waterboard</i>	<i>waterschap</i>
<i>water committee</i>	<i>water comité</i>
<i>autonomous enterprise</i>	<i>onafhankelijke onderneming</i>

