

10. Hoogwaterafvoer

In hoofdstuk 9 is de afvoer van regenwater via kanalen en rivieren beschreven voor normale situaties. In dit hoofdstuk zal worden ingegaan op afvoeren in geval van hoogwatergolven (Engels: floods).

10.1. Hoogwatergolven

Hoge afvoeren vormen een fascinerend en belangrijk onderdeel van de hydrologie; de hoge waterstanden die ermee gepaard gaan kunnen ingrijpende gevolgen hebben voor de omgeving en ze kunnen het gezicht van een rivier in korte tijd drastisch veranderen. In Nederland zijn we ruim tien jaar geleden een aantal keren op onplezierige wijze geconfronteerd met hoogwater, voornamelijk als gevolg van langdurige zware regenval in het stroomgebied van de Maas. Deze gebeurtenissen illustreren dat de hydrologische en meteorologische wetenschap altijd gepaard gaan met onzekerheden; de natuur laat zich nooit precies voorspellen, en berekeningswijzen en voorspellingen moeten constant bijgesteld worden.

Met behulp van geavanceerde hydrologische computermodellen tracht men de ontwikkeling en voortplanting van hoge afvoeren zo goed mogelijk in verband te brengen met bepaalde neerslagpatronen, veranderingen in landgebruik en overige kenmerken van een stroomgebied; In sterk hellende gebieden met hoge neerslagintensiteiten kunnen hoge afvoergolven worden gegenereerd. Dit in tegenstelling tot het afvoerbeeld in vlakke gebieden met een matige neerslagintensiteit, zoals Nederland. Door de snelle voortplanting van hoogwatergolven kunnen in laaglandgebieden toch problemen ontstaan, zoals we in zuidoost-Nederland regelmatig gezien hebben. In tropische gebieden hebben hoogwatergolven vaak het karakter van kortstondige hoge afvoerpieken die een klein stroompje binnen enkele uren tot een kolkende rivier kunnen veranderen; aanleiding daarvoor zijn tropische regenbuien met vaak zeer grote intensiteiten. In figuur 9.1 staan alle processen weergegeven die leiden tot het tot stand komen van rivierafvoeren; de snelreagerende¹ afvoercomponenten zullen in de eerste plaats verantwoordelijk zijn voor het ontstaan van hoogwatergolven.

10.1.1. Maatschappelijke relevantie

Bij alle ingrepen die in en langs een rivierloop gedaan worden, is het nodig over goede informatie over piekafvoeren en afvoervolume te beschikken. Voor het ontwerp van dijken en kunstwerken moet men weten welke waterstanden verwacht kunnen worden, hoe lang hoogwater kan aanhouden en hoe groot de afvoeren en stroomsnelheden vervolgens zijn. Tijdens perioden van hoogwater kunnen gegevens over en kennis van afvoerverlopen een basis zijn voor de bediening van kunstwerken en het nemen van maatregelen bij overstromingsgevaar.

¹ In de Nederlandse situatie wordt meestal gesproken over langzaam- en snel reagerende componenten van rivierafvoeren, omdat hier nauwelijks oppervlakteafvoer voorkomt.

10.2. Voortplanting van hoogwatergolven (flood routing)

10.2.1. Inleiding

De Engelse term 'routing' verwijst naar de waterbeweging door of over een gegeven hydraulische component, zoals een kanaal of een stuk land waar oppervlakteafvoer plaatsvindt. Flood routing heeft dus betrekking op de beschrijving van de voortplanting en vormverandering van hoogwatergolven. Gegevens over een hoogwatergolf in een rivier op een grote afstand van een stad aan die rivier, zijn voor die stad van betrekkelijke waarde: er kunnen grote veranderingen optreden in het karakter van de hoogwatergolf. Over het algemeen zal de topafvoer lager worden en de duur van de golf langer; de hoogwatergolf strekt zich als het ware over een steeds grotere lengte uit, met als gevolg dat de piek afneemt.

Er is veel onderzoek gedaan naar het voorspellen van de kenmerken van een hoogwatergolf, met het doel overstromingsgevaar tijdig vast te kunnen stellen en watertransport door natuurlijke waterlopen en kanalen te verbeteren. Dit laatste kan van groot economisch belang zijn, als gedacht wordt aan scheepvaart, drinkwatervoorziening, waterkracht etc. Tevens kunnen de gevolgen van ingrepen in het regime worden onderzocht; hierbij kan gedacht worden aan rivierverbeteringen zoals die bijvoorbeeld voor de rivier de Maas zijn uitgevoerd.

Een hoogwatergolf kan zich voortplanten door een riviertraject of kanaal maar ook door een natuurlijk meer of reservoir; daarom wordt vaak onderscheid gemaakt tussen *river routing* of *open channel routing* en *reservoir routing* (zie ook 11.5).

10.2.2. Het stromingsmechanisme en benaderingswijzen

Golfvoortplanting door een kanaal of rivier is een geval van eendimensionale niet-stationaire stroming; de stroming wordt bepaald door:

- wrijvingsweerstand van bodem en oevers;
- behoud van massa
- component zwaartekrachtversnelling evenwijdig aan bodem;
- andere versnellingen (t.g.v. windkracht, coriolis kracht e.d.).

Al in 1871 formuleerde Barré de Saint Venant de basistheorie voor een eendimensionale beschrijving van niet-stationaire stroming. Deze vergelijkingen staan bekend als de Saint Venant vergelijkingen; door hun wiskundige complexiteit moesten vereenvoudigingen worden toegepast om tot bruikbare oplossingen te komen voor stromingsproblemen. Door de opkomst van de computer kunnen de Saint Venant vergelijkingen vanaf halverwege de 20^e eeuw in complete vorm worden opgelost.

De Saint Venant vergelijkingen zijn gebaseerd op het behoud van massa en de wet van Newton, $\Sigma F = ma$.

$$\frac{dv}{dt} + g \frac{\partial H}{\partial x} + f \frac{v|v|}{R} = 0$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

Waarin:

v	stroomsnelheid	$[LT^{-1}]$
H	waterstand	$[L]$
R	hydraulische straal	$[L]$
f	wrijvingsfactor	$[-]$
A	dwarsdoorsnede	$[L^2]$
Q	afvoer	$[L^3T^{-1}]$

Doordat deze vergelijkingen vroeger gelineariseerd en vereenvoudigd moesten worden om ze op te kunnen lossen, zijn er een aantal benaderende oplossingen (zogenaamde flood routing methoden) ontstaan, die ook nu nog nuttig zijn om inzicht te verkrijgen of om toe te passen als gegevens niet of onvoldoende voorradig zijn.

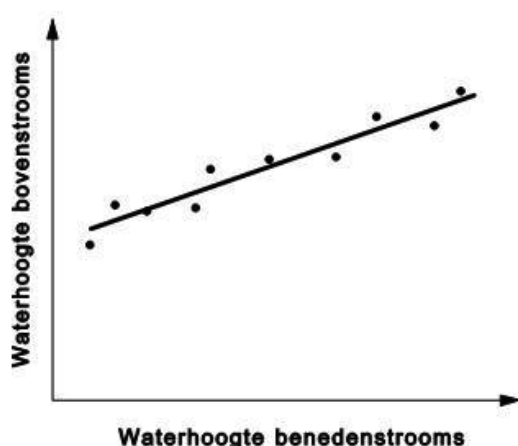
Flood routing methoden kunnen worden ingedeeld in *verdeelde* ('distributed') en *niet-verdeelde* ('lumped') modellen; de eerste worden ook wel aangeduid met 'hydraulic routing', terwijl bij de niet-verdeelde modellen de term 'hydrologic routing' gebruikt wordt. Bij een verdeeld model wordt de stroming berekend als een functie van de tijd, met als bijzonderheid dat dit tegelijkertijd op verschillende plaatsen in de waterloop gebeurt; bij een niet-verdeeld model wordt slechts op één plek in de waterloop de stroming als functie van de tijd berekend. Hier zullen alleen de niet-verdeelde modellen worden behandeld.

10.2.3. Niet-verdeelde modellen (lumped flood routing)

Met de Saint Venant vergelijkingen heeft men geprobeerd de fysische werkelijkheid zo goed mogelijk te benaderen; nadeel hiervan is dat ingewikkelde wiskundige bewerkingen nodig zijn om oplossingen te verkrijgen. Om op een meer eenvoudige wijze een schatting te maken van de voortplanting van hoogwatergolven zijn *conceptuele* modellen ontwikkeld. Conceptuele hydrologische modellen bevatten wel enige fysische gronden (bv. behoud van massa) maar proberen niet de werkelijkheid exact weer te geven. Hieronder zullen enkele van deze concepten worden behandeld.

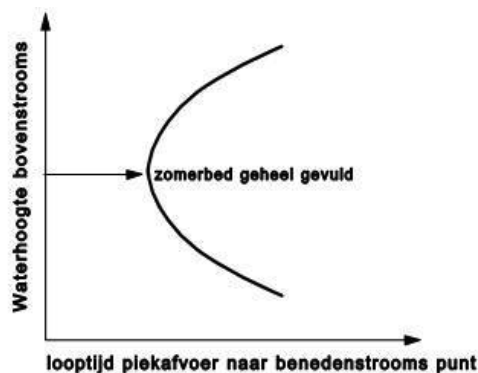
Flood routing zonder bergingscomponent

Vaak moet de ingenieur die zich met flood routing bezig houdt met weinig gegevens uit de voeten kunnen; wanneer er geen meetstations aanwezig zijn op een rivier en dus geen afvoerseries beschikbaar zijn, moet er vaak met incidentele waterhoogteregeeraties gewerkt worden. Meestal zijn dan de piekafvoeren bekend, omdat de bevolking langs een rivier hoge waterstanden vaak aangeeft op bijvoorbeeld een muur of brug. Er kan dan naar een relatie worden gezocht tussen hoge waterstanden bovenstrooms en benedenstrooms op een rivier als deze door dezelfde (extreme) omstandigheden worden veroorzaakt. Zo een benadering kan slechts gedaan worden als er geen belangrijke zijtakken op de rivier uitkomen tussen de twee beschouwde punten; de zijdelingse instroming moet eveneens minimaal zijn. Wanneer er genoeg waterhoogteregeeraties aanwezig zijn, is het op deze manier vaak toch mogelijk om waterhoogten benedenstrooms te relateren aan waterhoogten bovenstrooms (fig. 10.1).



Figuur 10.1 - Relatie bovenstroomse en benedenstroomse waterstand

Niet alleen de grootten van de afvoeren en hoogtes van de waterstanden zijn van belang, maar ook de *looptijden* die met de piekafvoeren samenhangen; de looptijd van de piekafvoer is gelijk aan de tijd die verstrijkt tussen het optreden van de hoogste waterstand (of de grootste afvoer) op twee verschillende plaatsen. Uit een aantal hoge afvoeren kan dan een kromme worden verkregen die bovenstroomse waterstanden relateert aan looptijden naar een bepaald benedenstrooms punt. Een typisch verloop van zo'n kromme is gegeven in fig. 10.2.



Figuur 10.2 - Looptijd piekafvoer naar benedenstrooms punt

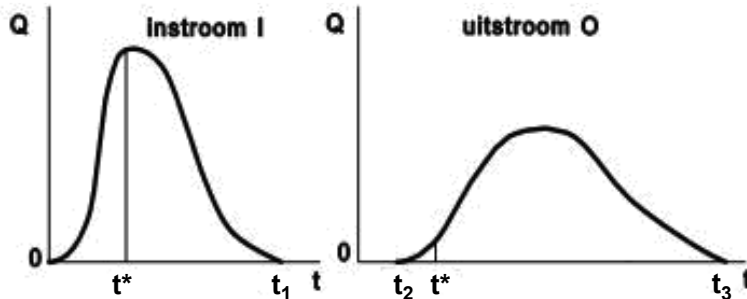
Bij hogere waterstanden zijn de afvoeren en snelheden groter, waardoor de looptijd eerst afneemt; nadat het zomerbed van de rivier geheel gevuld is geraakt, nemen de looptijden weer toe als gevolg van de verspreiding van de afvoergolf over de uiterwaarden en de vertraging door bergingseffecten. Neerslag-afvoerrelaties zijn over het algemeen echter zo gecompliceerd dat bovengenoemde methoden alleen gebruikt kunnen worden bij gemiddelde omstandigheden.

Hoge afvoeren kunnen worden veroorzaakt door hele verschillende neerslaggebeurtenissen met elk een eigen afvoerverloop; elk afvoerverloop zal benedenstrooms verschillende waterstanden en looptijden tot gevolg hebben, ook al zijn de piekafvoeren aan elkaar gelijk. Voordeel van het relateren van waterstanden is dat er geen Q-h relatie bekend hoeft te zijn om toch iets te kunnen zeggen over waterstanden benedenstrooms.

Flood routing met bergingscomponent (storage routing)

Wanneer door neerslag de rivierafvoer groter wordt, betekent dit dat er tijdelijk per rivierlengte meer water geborgen wordt. De afvoergolf op een bovenstrooms punt wordt beschouwd als

instroom (I) in een riviervak; het instroomvolume is dan de oppervlakte onder deze curve. Aan de benedenstroomse kant van het riviervak kan hetzelfde worden gedaan voor de uitstroom (O). In geval van hoge afvoeren kan de invloed van zijriviertjes en zijdelingse toestroming vaak worden verwaarloosd, zodat het instroomvolume gelijk mag worden gesteld aan het uitstroomvolume.



Figuur 10.3 - Afvoergolf bovenstrooms en benedenstrooms van een riviervak

In formulevorm:

$$V = \int_0^{t_1} I dt = \int_{t_2}^{t_3} O dt \quad [m^3] \quad [10.1]$$

Op tijdstip t^* is een hoeveelheid $\int_0^{t^*} I dt$ het vak binnengestroomd en een hoeveelheid $\int_0^{t^*} O dt$ heeft het vak verlaten. Het verschil wordt tijdelijk geborgen in het riviervak, zodat op tijdstip t^* de berging S^* wordt gegeven door:

$$S^* = \int_0^{t^*} (I - O) dt \quad [L^3] \quad [10.2]$$

Op elk moment geldt dan:

$$\frac{dS}{dt} = I - O \quad [L^3T^{-1}] \quad [10.3]$$

Deze continuïteitsvergelijking vormt de basis van alle flood routing methoden met berging. Het probleem is om O te vinden als een functie van de tijd, gegeven een instroomverloop I ; als over de berging geen informatie beschikbaar is, moeten hiervoor aannames worden gedaan. Omdat [10.3] niet direct kan worden opgelost, maken flood-routing procedures meestal gebruik van eindige differentie technieken. Er wordt dan een geschikt tijdsinterval Δt gekozen, waarbij voor de continuïteit geldt:

$$\frac{(I_1 + I_2)\Delta t}{2} - \frac{(O_1 + O_2)\Delta t}{2} = S_2 - S_1 \quad [L^3T^{-1}] \quad [10.4]$$

Periode Δt moet zo klein worden gekozen dat I en O gedurende die periode lineair mogen worden verondersteld. Bij het begin van een tijdstap zijn alle parameters bekend behalve O_2 en S_2 . Er is dus nog een tweede vergelijking nodig om O_2 te kunnen bepalen. Deze extra vergelijking geeft een verband tussen alleen S en O , of tussen zowel S en O als I . Zo kunnen opeenvolgende waarden voor O worden verkregen. De vorm van deze tweede bergingsvergelijking wordt bepaald

door de methode die voor de storage routing wordt gebruikt. Hieronder worden twee methoden behandeld: de Puls methode en de Muskingum methode, welke voortkomt uit rivier routing.

De Puls methode

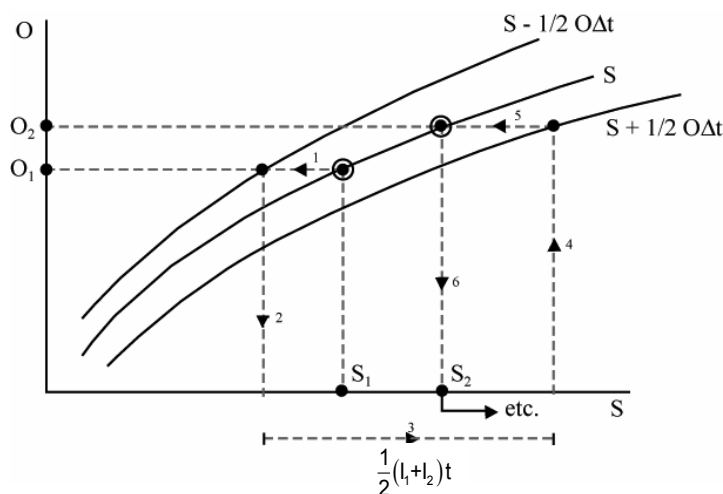
De Pulsmethode is in 1928 ontwikkeld door L.G. Puls. De methode gaat uit van een vaste relatie tussen afvoer en berging en een vaste helling van het wateroppervlak bij passage van de golf. De methode is daarom goed bruikbaar voor reservoir routing; voor kanalen en rivieren geeft de Pulsmethode een zeer grove benadering die goed is voor een eerste indruk. In een kromme is de vaste relatie afvoer-berging vastgelegd, de continuïteitsvergelijking bij deze kromme luidt:

$$I dt = O dt + dS$$

$$\frac{1}{2}(I_1 + I_2)\Delta t + S_1 - \frac{1}{2}O_1\Delta t = S_2 + \frac{1}{2}O_2\Delta t \tag{10.5}$$

De onderste vergelijking is de continuïteitsvergelijking uitgewerkt in eindige tijdsintervallen. De onbekenden staan in het rechterlid. De werkwijze is als volgt (onderstaande nummers komen overeen met de nummers in de grafiek):

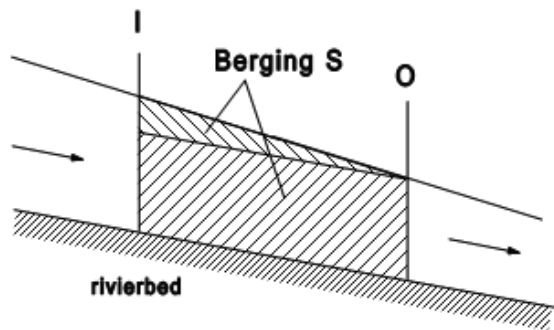
1. In de bekende O-S curve worden ook de $S - \frac{1}{2}O\Delta t$ en $S + \frac{1}{2}O\Delta t$ curven uitgezet.
2. Voor een bepaalde startwaarde O_1 wordt op de horizontale as de bijbehorende waarde $S_1 - \frac{1}{2}O_1\Delta t$ afgelezen.
3. Hier wordt vervolgens langs de horizontale as $\frac{1}{2}(I_1 + I_2)\Delta t$ bij opgeteld.
4. Uit de bijbehorende $S_2 + \frac{1}{2}O_2\Delta t$ waarde is langs de verticale as O_2 af te lezen.
5. De bij deze O_2 behorende $S - \frac{1}{2}O\Delta t$ waarde is de startwaarde voor de volgende stap in het proces. Op deze manier wordt een verloop van de uitstroom O in de tijd verkregen.



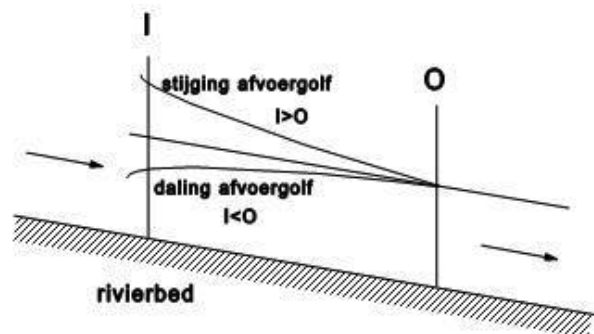
Figuur 10.4 - Werkwijze pulsmethode

Rivier routing

Voor een riviervak waar de waterspiegel niet parallel aan het rivierbed verondersteld mag worden is het geborgen volume een functie van waterstanden aan beide zijden van het riviervak, en niet alleen van de uitstroom O. Continuïteit wordt weer gegeven door [10.3].



Figuur 10.5 - Bergingscomponenten in een riviervak



Figuur 10.6 - Berging bij niet-stationaire stroming

De berging S is nu de som van twee bergingscomponenten zoals aangegeven in fig. 10.5. De onderste bergingscomponent, de prismaberging, wordt verondersteld alleen afhankelijk te zijn van de benedenstroomse waterstand; deze berging is dus een functie van de uitstroom O . De wigvormige bergingscomponent wordt veroorzaakt doordat de instroom verschilt van de uitstroom en kan dus als een functie van $(I-O)$ worden opgevat.

De totale berging kan geschreven worden als:

$$S = f_1(O) + f_2(I - O) \quad [L^3] \quad [10.6]$$

Wanneer de afvoer weer afneemt kan de wigberging negatief worden omdat dan $I < O$ (fig. 10.6). Er zijn dan twee vergelijkingen [10.6] en [10.3], waarmee S_2 gevonden kan worden door middel van eindige differentie berekeningen. We zullen nu de Muskingum methode beschrijven.

Muskingum methode

De functies f_1 en f_2 uit [10.6] worden lineair genomen, d.w.z.:

$$f_1(O) = kO \quad \text{en} \quad f_2(I - O) = xk(I - O)$$

$$S = xkI + (1-x)kO$$

Hieruit volgt de Muskingum vergelijking:

$$S = k[xI + (1-x)O] \quad [L^3] \quad [10.7]$$

Waarin x een dimensieloze wegingsfactor is voor I en O die aangeeft in hoeverre deze termen de berging bepalen; x ligt tussen de 0 en 0,5. Wanneer $x = 0$ wordt de berging alleen door de uitstroom O bepaald; voor $x = 0.5$ is een gemiddelde van I en O bepalend voor de berging. k heeft de dimensie van tijd en is de looptijd van de golf.

Substitutie van [10.7] in [10.4] geeft:

$$\frac{1}{2}(I_1 + I_2)\Delta t - \frac{1}{2}(O_1 + O_2)\Delta t = k[xI_2 + (1-x)O_2] - k[xI_1 + (1-x)O_1] \quad [10.8]$$

Breng termen met de onbekende O_2 naar de linkerkant:

$$O_2(-0,5\Delta t - k + kx) = I_1(-kx - 0,5\Delta t) + I_2(kx - 0,5\Delta t) + O_1(-k + kx + 0,5\Delta t) \quad [10.9]$$

Dan volgt:

$$O_2 = c_1 I_1 + c_2 I_2 + c_3 O_1 \quad [L^3 T^{-1}] \quad [10.10]$$

Waarin:

$$c_1 = \frac{\Delta t + 2kx}{\Delta t + 2k - 2kx} \quad [-]$$

$$c_2 = \frac{\Delta t - 2kx}{\Delta t + 2k - 2kx} \quad [-]$$

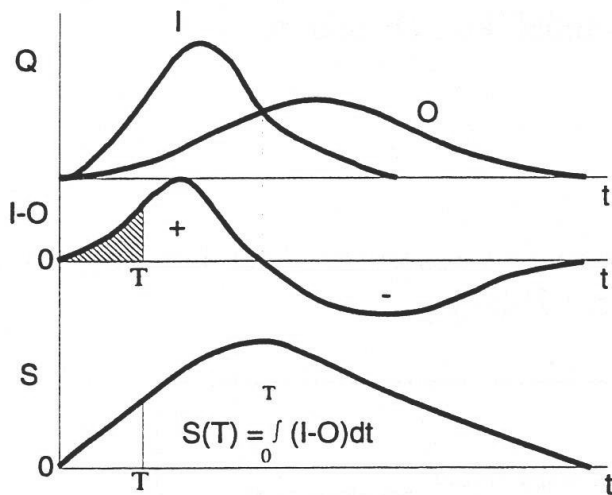
$$c_3 = \frac{-\Delta t + 2k - 2kx}{\Delta t + 2k - 2kx} \quad [-]$$

De som van de coëfficiënten c_1 , c_2 en c_3 is gelijk aan 1, zodat er twee bekend moeten zijn om de derde uit te kunnen rekenen. De uitstroom O_2 aan het eind van een tijdstap is dus de gewogen som van de in- en uitstroom aan het begin van de tijdstap en de instroom aan het eind van de tijdstap.

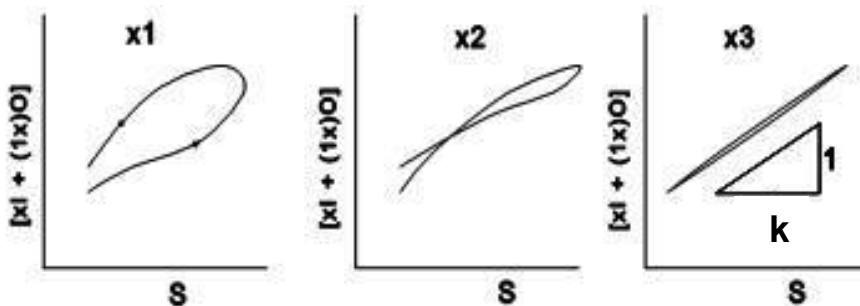
Bepaling van x en k

Er wordt gebruik gemaakt van geregistreeerde hoogwatergolven bij het begin- en eindpunt van een riviervak. Voor een aantal waarden van x wordt $[xI + (1-x)O]$ uitgezet tegen de berging zoals die bepaald kan worden uit de afvoergolven (fig. 10.7).

De juiste waarde van x zal een rechte lijn benaderen (fig. 10.8); de richtingscoëfficiënt van deze lijn geeft k volgens [10.7].



Figuur 10.7 - Bepaling van een berging in een riviervak



Figuur 10.8 - Trial and error voor x -waarden

Vaak heeft de beste lijn die voor x kan worden verkregen een kromming zodat de bepaling van k lastig is. Als x en k bepaald zijn kunnen de coëfficiënten c_1 t/m c_3 berekend worden. Vervolgens kunnen achtereenvolgende waarden voor O berekend worden volgens [10.10].

