

## 11. Reservoirs

### 11.1. Algemeen

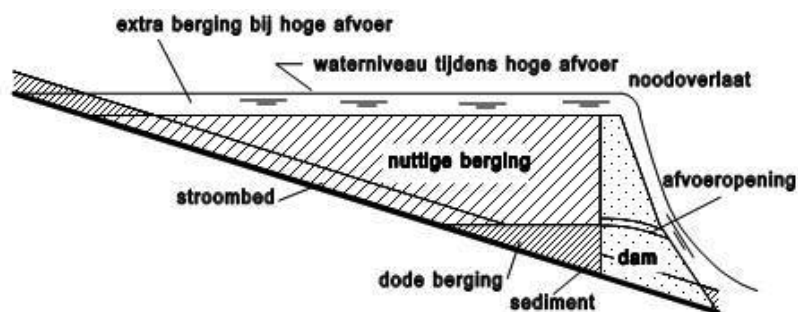
Opslag van water kan zowel bovengronds als ondergronds plaatsvinden. Bij een reservoir denken we echter meestal aan bovengrondse opslag, bijvoorbeeld in een afgesloten dal waar na afsluiting een stuwmeer is ontstaan. In vlakke gebieden zoals Nederland komen echter ook reservoirs voor. De Biesboschbekkens dienen bijvoorbeeld voor de opslag van rivierwater dat voor drinkwater gebruikt wordt en ook het IJsselmeer, de Deltabekkens en de boezemwateren hebben een reservoirfunctie. Bij zulke reservoirs hebben dijken de functie van waterkering, zoals dalwanden bij een stuwmeer.

Het principe van een reservoir is als volgt: in een periode waarin de beschikbare hoeveelheid water groter is dan de hoeveelheid die nodig is voor gebruik (voor bv. drinkwater, irrigatie, waterkracht etc.) kan het overtollige water worden opgeslagen tot er een periode van watertekort aanbreekt. Een bijkomende functie van een reservoir kan het opslaan zijn van hoge afvoeren, waardoor het overstromingsgevaar benedenstrooms wordt verminderd. Soms worden zelfs speciaal voor dit doel reservoirs aangelegd.

Omdat in stedelijke gebieden de vraag naar water nogal kan variëren gedurende de dag hebben veel steden *distributiereservoirs* in hun watervoorzieningsstelsel. Zo kan worden ingespeeld op de dagelijkse fluctuaties en kunnen pompstations en zuiveringsinrichtingen op een redelijk constant niveau opereren. De voornaamste functie van een reservoir kan dus worden omschreven als het stabiliseren van de af- of aanvoer van water, ofwel door regulering van een variabele natuurlijke stroming ofwel door te voldoen aan een wisselende vraag van de uiteindelijke gebruikers.

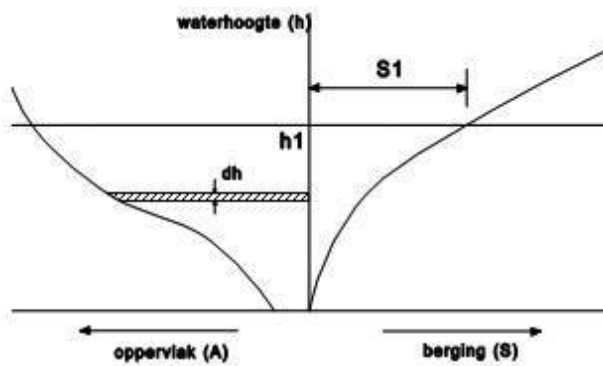
### 11.2. Kenmerken van een reservoir

Fig. 11.1 toont een aantal algemene kenmerken van een reservoir. De bergingscapaciteit kan worden bepaald aan de hand van de belangrijkste functie en de bijbehorende omstandigheden.



Figuur 11.1 - Karakteristieken van een reservoir met stuwdam

Bij een 'natuurlijk' gevormd reservoir zoals een dalafsluiting hangt de capaciteit af van de topografie; het wateroppervlak varieert met de waterhoogte, waardoor de inhoud geen lineair verband vertoont met de waterhoogte. Door meting van het wateroppervlak bij verschillende waterhoogten kan een oppervlakte-waterstandskromme worden getekend (Engels: area-elevation curve). De integraal van deze kromme geeft de *capaciteitskromme* van het reservoir, die het verloop van de inhoud (bergingsvolume) als functie van de waterhoogte geeft (fig. 11.2).



Figuur 11.2 - Relatie wateroppervlak-berging

In fig. 11.2 geldt:

$$S_1 = \int_0^{h_1} A(h)dh \quad [L^3]$$

Waarin  $S_1$  de berging van het reservoir is bij een waterstand  $h_1$  en  $A(h)$  het oppervlak als functie van de waterstand.

Duidelijk is te zien dat nooit de gehele inhoud van het reservoir kan worden gebruikt: het water beneden de laagste afvoeropening vormt de *dode berging*. Deze dode berging is geen verlies maar zorgt ervoor dat het reservoir nooit droog kan komen te staan, dit zou namelijk grote milieuproblemen kunnen veroorzaken zoals vissterfte, stank en blijvende ecologische schade. Ook kan in dit gedeelte van het reservoir sedimentatie plaatsvinden zonder dat hiermee het nuttige reservoirvolume afneemt. De maximale berging onder normale omstandigheden wordt bij de meeste reservoirs bepaald door de hoogte van de noodoverlaat. Tijdens extreme afvoeren kan het waterniveau nog stijgen door stroming over de noodoverlaat, hierdoor wordt er tijdelijk een extra berging gevormd die aanzienlijk kan zijn, omdat het oppervlak  $A$  maximaal is. Deze berging kan echter niet worden vastgehouden en is dus oncontroleerbaar.

In het oorspronkelijke stroombed van de rivier werd ook al een variabele hoeveelheid water geborgen. Namelijk de hoeveelheid water die zich op een bepaald moment in dat stuk van de rivier bevond. Deze berging is aangegeven in fig. 11.1 door de lijn die evenwijdig aan het stroombed loopt. Voor doeleinden zoals het verminderen van overstromingsgevaar benedenstrooms moet er rekening mee worden gehouden dat deze oorspronkelijke berging niet meegenomen wordt bij bepaling van de toename van de bergingscapaciteit. De toename van de berging wordt ook wel aangeduid met de *effectieve berging*.

### 11.3. Waterlevering

Een belangrijke eigenschap van een reservoir, dat als belangrijkste factor waterlevering heeft, is de relatie tussen bergingscapaciteit en leveringscapaciteit (Engels: yield). De leveringscapaciteit geeft aan hoeveel water het reservoir kan afgeven gedurende een bepaalde tijd. Deze tijd kan variëren van een dag voor een klein distributiereservoir tot een jaar of langer voor een groot opslagreservoir. De leveringscapaciteit hangt af van de instroming in het reservoir en kan dus variëren. De maximale hoeveelheid water die kan worden gegarandeerd tijdens een maatgevende droge periode wordt aangeduid met de term *safe yield* (vaste leveringscapaciteit). Natuurlijk is er

altijd een kans aanwezig dat een nog drogere periode plaatsvindt met een leveringscapaciteit kleiner dan de safe yield. Omdat de safe yield niet met zekerheid is vast te stellen worden vaak probabilistische benaderingen gebruikt om een goede schatting te maken. De maximale waterlevering gedurende een bepaald tijdsinterval is gelijk aan de gemiddelde instroming minus verdamping en lekverliezen. Wanneer de instroming altijd gelijk zou zijn aan de waterlevering (inclusief verdamping en lekverliezen), zou een reservoir overbodig zijn. Echter, met de toename van de fluctuatie in de instroming of de uitstroming neemt ook de benodigde reservoircapaciteit toe.

Voor elk gebied en dus voor elk reservoir wordt een andere leveringscapaciteit nagestreefd. Afhankelijk van de toegestane kans dat de leveringscapaciteit niet altijd wordt gehaald, kan de capaciteit voor het reservoir worden bepaald. Een reservoir voor stedelijke watervoorziening mag maar een zeer kleine kans hebben dat niet voldaan kan worden aan de vraag. Een irrigatiesysteem echter kan wel 20% van de tijd functioneren met een waterlevering beneden de ontwerpcapaciteit.

#### 11.4. Capaciteitsbepaling

De vereiste capaciteit van een reservoir wordt bepaald door simulatie van de werking van het reservoir gedurende een bepaalde periode. Daarbij wordt altijd gebruik gemaakt van de balansvergelijking van water, in de meest simpele vorm:

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

Voor capaciteitsbepaling is de sommatie van instroming (I) en uitstroming (O) van belang. Uit de balansvergelijking zien we direct dat het verschil van de sommaties de berging geeft.

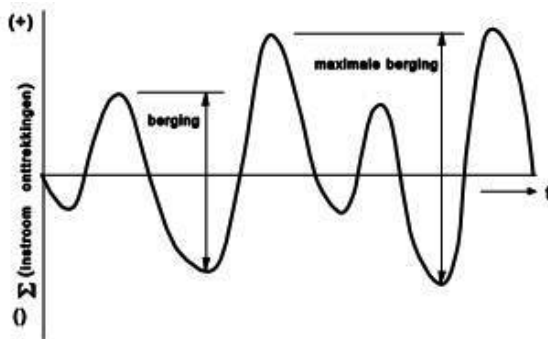
$$\int_{t_0}^{t_1} Idt - \int_{t_0}^{t_1} Odt + S_0 = S \quad [L^3]$$

Zoals we hierna zullen zien zijn de keuzes van het startmoment  $t_0$  en de aanname van de berging  $S_0$  op  $t_0$  bepalend voor de interpretatie van de methode voor de capaciteitsbepaling.

#### Grafische methoden

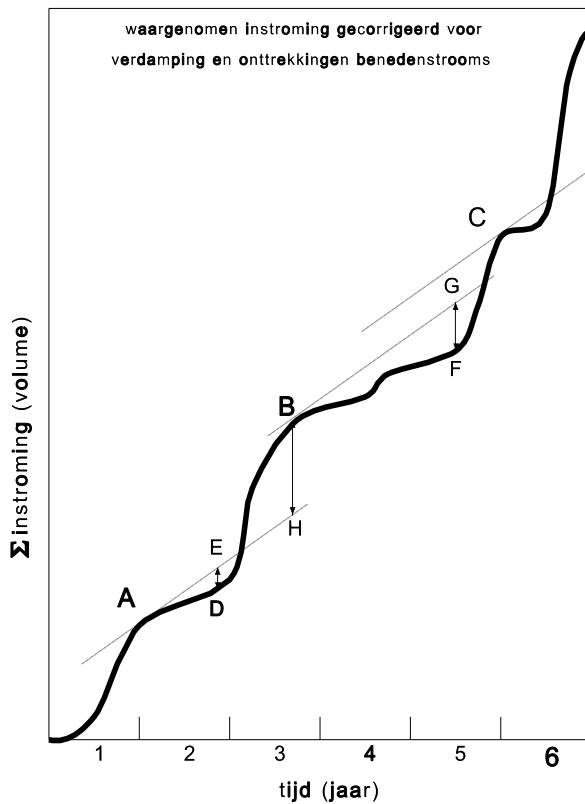
Voor het bepalen van de (benodigde) capaciteit van een reservoir zijn er verschillende methoden. Hieronder worden de twee belangrijkste grafische methoden beschreven.

**1)** In fig. 11.3 is de cumulatieve som van instroming minus onttrekkingen (inclusief verdamping en lekverliezen) berekend als functie van de tijd. Het begin volume  $S_0$  is in eerste instantie arbitrair gekozen. Uit het verschil tussen een dal en een top kan men de benodigde berging afleiden. Het verschil tussen de hoogste top en het laagste dal geeft dan de maximaal benodigde bergingscapaciteit. Na deze analyse wordt het laagste dal gepositioneerd op een nuttige berging van 0.



Figuur 11.3 – bepaling maximaal benodigde bergingscapaciteit

2) Voor de bepaling van de capaciteit van een reservoir, waar een rivier doorheen stroomt, wordt vaak gebruikt gemaakt van de sommatiekromme van de instroming, die in dit verband wordt aangeduid met *Rippl diagram* (ingevoerd door Rippl in 1883). Sommatie van de instroming geeft een continu niet dalende lijn waarvan de helling in ieder punt evenredig is met de instroming op dat moment. Als we ervan uitgaan dat de watervraag constant is en er dus een constante levering moet plaatsvinden, kan dit door rechte lijnen worden weergegeven. De lijnen worden zo verschoven dat ze raken aan de uiterste punten van de sommatiekromme zoals getekend in fig. 11.4 (A, B en C; in deze punten gaat de vulling van het reservoir over in onttrekking). We nemen aan dat het reservoir op dat startmoment vol is ( $S_0 = S_{\max}$ ). Vanaf het raakpunt overtreft de vraag naar water de instroming en de berging neemt dus af; als ervan uitgegaan wordt dat het reservoir weer precies vol is wanneer een vraaglijn de sommatiekromme snijdt, geeft de maximale afstand tussen een vraaglijn en de sommatiekromme de vereiste capaciteit om aan de vraag te voldoen. In fig. 11.4 is dit het volume gegeven door afstand FG. De verticale afstand tussen twee opeenvolgende vraaglijnen (BH) geeft de hoeveelheid water die niet meer kan worden geborgen en via de noodoverlaat wordt afgevoerd.

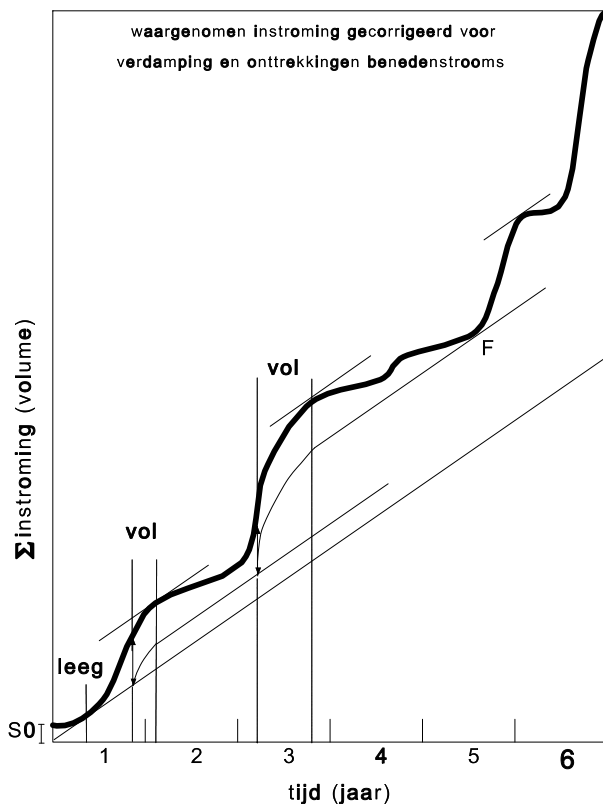


Figuur 11.4 – Rippl diagram

Het kan natuurlijk ook voorkomen dat de vraag niet constant is en er moet worden voorzien in een variabele waterlevering; de vraaglijn wordt dan een kromme maar de analyse blijft hetzelfde. Belangrijk is dan wel dat de vraagkromme chronologisch overeenkomt met de sommatiecurve, dus alleen verticale verplaatsing.

Een sommatiekromme kan ook gebruikt worden om de te verwachten waterlevering te bepalen bij een gegeven capaciteit; de vraaglijnen worden dan zo getekend dat de maximale afstand tot de sommatiekromme de gegeven capaciteit niet overtreft. De hellingen van de vraaglijnen geven dan aan wat in iedere periode de maximale levering is. Een voorwaarde is dat een vraaglijn de sommatiekromme moet snijden wanneer hij doorgetrokken wordt; als dit niet het geval is zal het reservoir niet meer gevuld worden.

De exploitatie van een reservoir in een bepaald tijdvak kan worden gevolgd door de sommatiekrommen uit te zetten zoals in fig. 11.5.



Figuur 11.5 - Exploitatie van een reservoir met behulp van sommatiekrommen

Aan het begin van het eerste jaar is er een voorraad  $S_0$  nodig, zodat de reservoirinhoud af kan nemen tot 0 na enkele maanden; door de daaropvolgende grote instroming raakt het reservoir vol; de pijl komt overeen met afstand FG uit fig. 11.4. Vanaf dit moment, tot aan het tijdstip dat de levering weer groter is dan de instroom, zal er water afgevoerd worden via de noodoverlaat; de verticale afstand tussen instroming en totale uitstroming verandert dus niet zolang het reservoir vol zit. Hierna volgt een periode van onttrekking gevolgd door een periode van vulling totdat weer de capaciteit van het reservoir bereikt is. Fig. 11.4 laat zien dat het reservoir precies leeg is in punt F; dit klopt natuurlijk omdat de capaciteit berekend was op het verschil tussen vraag en instroming in dit punt.

### Computer simulaties voor capaciteitsbepaling

Een andere manier om de benodigde capaciteit voor een reservoir te bepalen is met behulp van computersimulaties. In simulaties wordt gebruikt gemaakt van historische of kunstmatig gegenereerde tijdreeksen voor instroming. Per tijdstap wordt dan een waterbalans opgemaakt van al het instromende water en het water wat het reservoir verlaat. Het voordeel is dat uitgaande termen als verdamping, lekverliezen en water dat over de noodoverlaat stroomt per tijdstap afhankelijk kunnen worden gemaakt van de actuele berging. Voor open water verdamping is de reservoir oppervlakte van belang, die door de capaciteitskromme aan de berging is gerelateerd. Men kan er nog voor kiezen de verdamping tevens van weerparameters te laten afhangen. Bij een bepaald vraagpatroon voor water uit het reservoir kan dan de capaciteit gekozen worden die aan de verwachtingen voldoet. Men kan men er namelijk voor kiezen dat een bepaald percentage van de tijd niet aan de vraag kan worden voldaan. Bijvoorbeeld voor reservoirs die irrigatie water leveren is een veel hoger percentage van falen acceptabel dan voor drinkwater reservoirs. Het voordeel van een hogere faalkans is dat vaak een aanzienlijke goedkoper reservoir kan worden aangelegd vanwege de kleinere capaciteit.

Per tijdstap  $\Delta t$  wordt de berging als volgt bepaald

$$S_2 = S_1 + I\Delta t - (O + E + L)\Delta t - N\Delta t \quad [L^3]$$

Onder de voorwaarde dat  $S_2 > 0$  en  $S_2 \leq S_{\max}$ . In het geval dat  $S_2 < 0$  wordt, betekent dit dat de vraag  $O$  moet worden gereduceerd. In het geval dat  $S_2 \geq S_{\max}$ , zal er een hoeveelheid water ( $N$ ) over de overlaat stromen. Gemakshalve wordt vaak  $N$  zodanig bepaald zodat  $S_2 = S_{\max}$ . Indien  $S_2 \leq S_{\max}$  geldt uiteraard dat  $N = 0$ . Zie voorbeeld 11.1 voor een nadere uitwerking van deze methode.

#### Voorbeeld 11.1 - Waterbalans van een reservoir

Van een natuurlijk reservoir in een rivier zijn in onderstaande tabel voor opeenvolgende maanden de instroming en de gewenste onttrekking gegeven. De onttrekking is inclusief verdamping en lekverliezen. We gaan uit van alleen nuttige berging en dat het reservoir aanvankelijk leeg is. De nuttige berging wordt op maximaal  $80 \text{ Mm}^3$  gesteld.

Met deze randvoorwaarden kunnen we nu maand voor maand een waterbalans opstellen, waarbij we in de gaten houden dat het reservoir niet boven de maximale bergingscapaciteit uitkomt en dat er mogelijk momenten zijn dat er onvoldoende water is om aan de ontrekkingsvraag te voldoen.

De waterbalans kan per tijdstap geschreven worden als:

$$S_2 = S_1 + I\Delta t - (O + E + L)\Delta t - N\Delta t \quad [L^3]$$

Waarin:

$S_2$	=	berging aan het eind van de tijdstap
$S_1$	=	berging aan het begin van de tijdstap
$I\Delta t$	=	Instroming
$O\Delta t$	=	Onttrekking inclusief verdamping en lekverliezen
$N\Delta t$	=	Water over de noodoverlaat

RESERVOIRS

	Instroming Mm <sup>3</sup> /mnd	Gewenste Onttrekking Mm <sup>3</sup> /mnd	Werkelijke Onttrekking Mm <sup>3</sup> /mnd	Overlaat Mm <sup>3</sup> /mnd	Berging Mm <sup>3</sup>
					0
Oct	25	25	25	0	0
Nov	30	25	25	0	5
Dec	35	25	25	0	15
Jan	50	25	25	0	40
Feb	80	25	25	15	80
Mar	40	25	25	15	80
Apr	20	25	25	0	75
Mei	15	25	25	0	65
Juni	15	25	25	0	55
Juli	10	25	25	0	40
Aug	5	25	25	0	20
Sep	0	25	20	0	0
Oct	0	25	0	0	0
Nov	15	25	15	0	0
Dec	20	25	20	0	0
Jan	25	25	25	0	0
Feb	50	25	25	0	25
Mar	60	25	25	0	60
Apr	80	25	25	35	80
Mei	15	25	25	0	70
Juni	15	25	25	0	60
Juli	5	25	25	0	40
Aug	5	25	25	0	20
Sep	5	25	25	0	0

Bijvoorbeeld:

Tijdstap oktober:  $S_2 = 0 + 25 - 25 = 0$  Mm<sup>3</sup>

Tijdstap november:  $S_2 = 0 + 30 - 25 = 5$  Mm<sup>3</sup>

Tijdstap december:  $S_2 = 5 + 35 - 25 = 15$  Mm<sup>3</sup>

Tijdstap januari:  $S_2 = 15 + 50 - 25 = 40$  Mm<sup>3</sup>

Tijdstap februari:  $S_2 = 40 + 80 - 25 - 15 = 80$  Mm<sup>3</sup>

In deze tijdstap verlaat 15 Mm<sup>3</sup> de noodoverlaat omdat  $S_{max} = 80$  Mm<sup>3</sup>

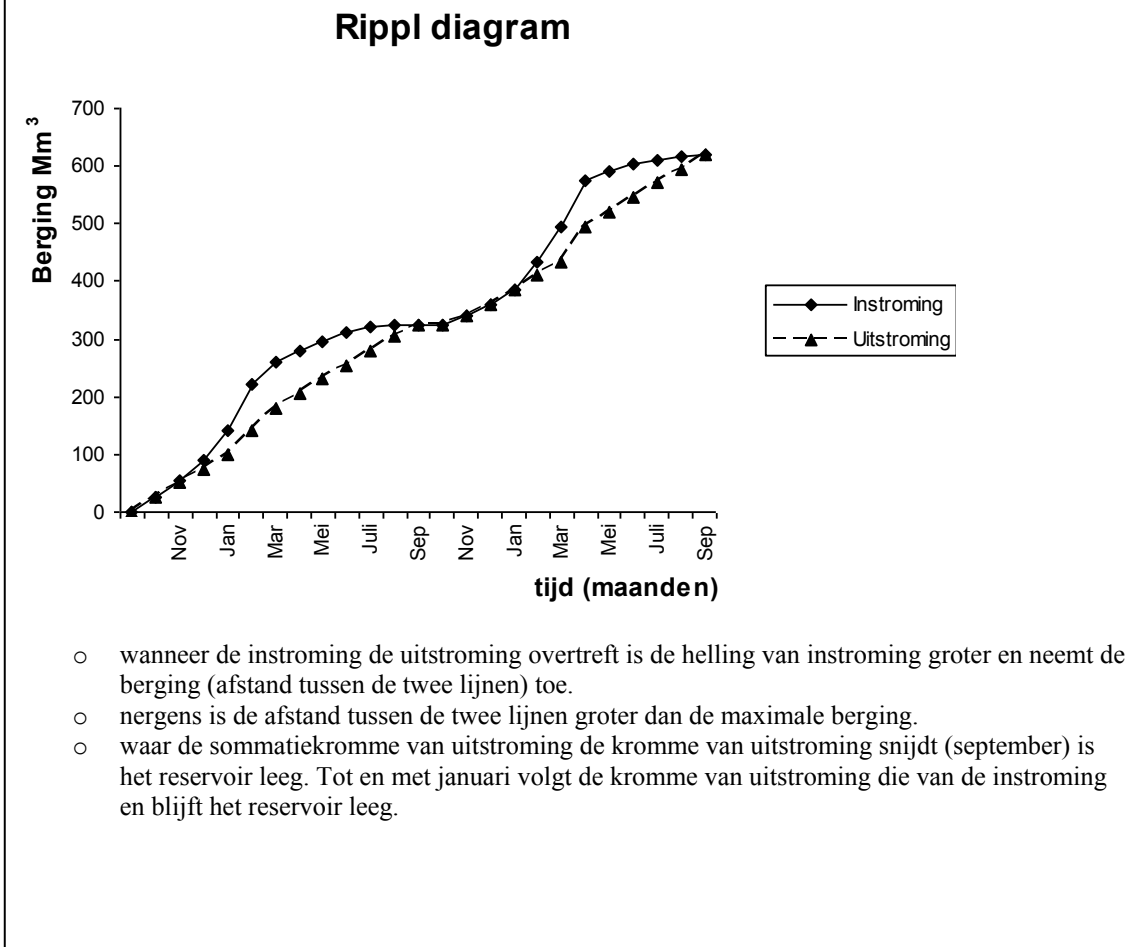
Tijdstap augustus:  $S_2 = 40 + 5 + 25 = 20$  Mm<sup>3</sup>

Tijdstap september:  $S_2 = 20 + 0 - 20 = 0$  Mm<sup>3</sup>

In deze tijdstap moet de gewenste onttrekking van 25 Mm<sup>3</sup> gereduceerd worden tot 20 Mm<sup>3</sup> omdat de berging aan het begin (20 Mm<sup>3</sup>) plus de instroming (0 Mm<sup>3</sup>) niet voldoende is voor de onttrekkingsvraag. De nuttige berging van reservoir is nu uitgeput.



Als we de sommatie van de instroming en uitstroming (onttrekking + noodoverlaat) uitzetten in een Rippl diagram zien we grafisch wat er in de tijd gebeurt:



### Overige factoren

Voordat een beslissing kan worden genomen betreffende de capaciteit van een reservoir wordt meestal een gedetailleerde studie verricht naar één of meer perioden waarover gegevens bekend zijn. Hierbij wordt onderzocht wat de lekverliezen bedragen als functie van het waterpeil, verder wordt de verdamping gerelateerd aan het wateroppervlak van het reservoir. Verder kunnen met behulp van computers operationele strategieën worden getest op hun bruikbaarheid.

### 11.5. Reservoirs voor hoogwaterbestrijding

Een reservoir kan ook dienen om hoge afvoeren gedeeltelijk op te vangen, zodat het gevaar voor overstromingen vermindert. Het principe hiervan is dat de afvoergolf over een langere periode wordt verdeeld, zodat het water met een vertraging en een lager maximaal debiet wordt afgevoerd. Om de reservoirinhoud vast te stellen is in dit geval niet het maximale debiet van belang maar de hoeveelheid water die in een bepaalde tijd instroomt. Een reservoir dat speciaal gebouwd is om hoge afvoerpieken af te vlakken heet een retentiereservoir; een reservoir dat voor een ander doel is aangelegd kan natuurlijk ook ingezet worden voor hoogwaterbestrijding. Een eenvoudige voorstelling van de werking van een retentiereservoir is als volgt: bij nadering van een hoogwatergolf worden de afvoeropeningen van het reservoir volledig geopend. Hierdoor neemt, voordat de hoogwatergolf het reservoir bereikt, de bergingsmogelijkheid zo veel mogelijk toe. Bij instroming van de hoogwatergolf zal op die manier het in werking treden van de noodoverlaat worden voorkomen of zo lang mogelijk worden uitgesteld. In geval van een vaste uitstroomopening is de relatie tussen de waterstand en de uitstroming van belang. Als deze relatie bekend is kan bij een gegeven instroming de uitstroming worden berekend, deze instroming geeft inzicht in het nut van een reservoir wat betreft de hoogwaterbestrijding.

### 11.6. Effecten van een reservoir

De aanleg en exploitatie van een reservoir brengt in de meeste gevallen ingrijpende veranderingen in de omgeving met zich mee. Een reservoir vereist veel ruimte, dat ten koste gaat van de oorspronkelijke functies van een gebied. Zo lang het daarbij om economische activiteiten gaat, kan het verlies aan ruimte in meer of mindere mate in geld worden uitgedrukt; maar natuurlijk spelen ook factoren als emotionele waarden en landschappelijke en natuurwaarden een rol. Zulke factoren zijn moeilijk in geld uit te drukken of op een andere manier te kwantificeren. Er moet daarom altijd een zeer zorgvuldige afweging worden gemaakt tussen de voor- en nadelen van de aanleg van een reservoir, hoe subjectief deze voor- en nadelen ook kunnen zijn. De beoogde functie van een reservoir kan bij zo'n afweging een belangrijke rol spelen. Stel dat in een bepaald gebied vaak overstromingen plaatsvinden ten gevolge van hoge afvoerpieken, dan ondervindt dat gebied daar schade van. Als de schade die toegebracht wordt door de aanleg van een retentiereservoir kleiner wordt gevonden dan de overstromingsschade, lijkt de beslissing voor de hand liggend. Toch blijft de afweging in zo'n geval zeer complex omdat nooit alle effecten van de aanleg van een reservoir zijn te voorspellen en ook de goede werking niet met 100% zekerheid kan worden gegarandeerd.

#### **Assouandam**

In de Nijl is de Assouandam gebouwd om een reservoir te creëren, waarmee de irrigatie langs de Nijl sterk kan toenemen. De bouw van de Assouandam heeft er echter ook voor gezorgd dat de Nijl minder slib naar de Middellandse Zee voert waardoor de Nijldelta sterk is veranderd; er moeten nu maatregelen worden genomen tegen kustafslag. Daarnaast heeft de extra irrigatie tot gevolg gehad dat de ziekte bilharzia zich met het irrigatiewater verspreid heeft over een groot gebied.

### 11.7. Wateropslag in Nederland

Zoals vermeld in paragraaf 11.1 hebben we in Nederland ook te maken met de opslag van water, maar wel in een wat andere vorm dan in bergachtige streken. In een vlak land als Nederland doen uitgestrekte relatief ondiepe wateren dienst als reservoir.

Door de bouw van de Afsluitdijk en de Deltawerken zijn grote reservoirs gecreëerd die bijdragen aan de sturing van de waterhuishouding in Nederland. Hierdoor kan het watersysteem zo goed mogelijk worden aangepast aan de verschillende functies die het water heeft. Omdat het hier gaat om reservoirs die ontstaan zijn als gevolg van maatregelen die in de eerste plaats veiligheid tot doel hadden, hebben ze niet slechts één enkele functie; het noordelijk deltabekken bijvoorbeeld heeft naast zoetwatervoorziening ook een functie als buffer tegen de verzilting. Daarnaast heeft dit bekken ervoor gezorgd dat een deel van het Rijnwater kon worden aangewend voor de stijgende waterbehoefte in de gebieden rond het IJsselmeer en het beter bevaarbaar maken van de IJssel. Eén van de reservoirfuncties van het IJsselmeer is bijvoorbeeld berging van het neerslagoverschot in de winterperiode om in de zomer aan de waterbehoefte voor de landbouw te kunnen voldoen; hiervoor worden in het IJsselmeer bepaalde waterpeilen nagestreefd, *streefpeilen*, die door afstemming van het beheer van de sluizen in de Afsluitdijk moeten worden gerealiseerd. Verder zijn er de vele polders in Nederland waarvan de boezemwateren ook een duidelijke reservoirfunctie hebben. Voor een polder wordt er ook een streefpeil wordt vastgesteld, het *polderpeil*; door water in te laten vanuit of juist te lozen op de boezemwateren, kan dit peil zo goed mogelijk worden vastgehouden.