
Hatsi-kD

Deze aflevering is een vervolg op die in *Stromingen 7/1*. De ik-persoon is dus nog steeds Huub Savenije.

De getijdebeweging in estuaria (deel twee: demping en opslingering van het getij)

In het vorige nummer van *STROMINGEN* (jaargang 7, nummer 1) heb ik mijn verbazing uitgesproken over de klaarblijkelijke regelmaat en voorspelbaarheid die stroming in waterlopen vertoont, terwijl de fysische wetten instabiel en zelfs onvoorspelbaar gedrag aan de dag kunnen leggen. Op het gevaar af te filosofisch gevonden te worden, wil ik u toch niet de volgende gedachten-gang onthouden. Toen ik laatst met Keith Beven sprak, naar aanleiding van zijn Dalton-lezing (de lezing die hij in Nice uitsprak na het ontvangen van de Dalton medal), zei hij dat in de hydrologie de randvoorwaarden een allesoverheersende invloed

hebben op de procesbeschrijvingen. Water stroomt door poriën volgens hydraulische wetten die behoren bij de fijne schaal van die processen, maar wat wij waarnemen in de wet van Darcy is opgelegd door de geologische structuur van het poreuze medium. Kortom, de randvoorwaarden van de geologische structuur bepalen het stromingsgedrag. Iets soortgelijks zien we in bodems en waterlopen. Ook hier bepaalt de vorm van het medium het hydraulische gedrag in hoge mate, en (en dat is het mooie) het water, door zijn eroderende kracht, bepaalt tevens de vorm van het medium. In dit gegeven schuilt de sleutel tot de voorspelbaarheid van stroming in alluviale waterlopen, waar ik het eerder over had. Instabiel gedrag leidt tot snelle fluctuaties en een relatief hoge mate van energiedissipatie, wat gepaard gaat met een sterke eroderende werking. Als de randvoorwaarden (het medium) instabiel gedrag veroorzaken (e.g. ten gevolge van een obstructie) dan concentreert de energie zich op dat punt, waardoor de onregelmatigheid van het medium via erosie zal afnemen. De eroderende kracht van het water maakt dat er op grotere

schaalniveaus regelmaat heerst. Al naar gelang we naar kleinere schaalniveaus gaan (zowel in tijd als in ruimte) verdwijnt die regelmaat.

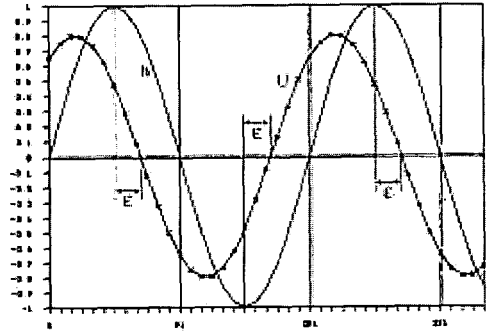
In estuaria, gevormd uit een licht erodeerbaar medium, leidt dit tot de regelmatige structuur die ik in het vorige nummer beschreven heb. Maar ook in rivieren is er een sterke interactie met de vorm die leidt tot geometrische vuistregels, waar ik later in deze serie op in zal gaan.

In dit nummer wil ik ingaan op de demping en opslinging van de getijdegolf. Dit staat in sterke relatie tot de geometrische betrekkingen die we in het vorige nummer hebben besproken (vuistregels 46–51).

Vuistregel 52

De getijdegolf in een estuarium is niet een lopende golf en ook niet een staande golf; het is een golf met een gemengd karakter waarbij de kentering ongeveer 45 tot 50 minuten (bij een dubbeldaags getij) na hoogwater en laagwater optreedt.

In figuur a zien we een typische getijdegolf in een estuarium: de waterstandsvariatie rondom de gemiddelde waterstand wordt aangegeven door h (m), de snelheidsvariatie door U (m/s). De snelheid is positief in bovenstroomse richting (vloed) en negatief gedurende eb. Het punt waarop de stroomsnelheid van teken wisselt (omkeert) heet kentering. Er zijn twee kenteringen: een kentering na hoogwater (HWK) en een kentering na laagwater (LWK). Bij een lopende golf volgt het punt van kentering precies $\pi/2$ na hoog- of laagwater. Bij een staande golf vallen de kenteringen precies samen met de punten van hoog- en laagwater. In een alluviaal estuarium is het faseverschil tussen hoogwater of laagwater en de respectievelijke kenteringen gelijk aan ε , waarbij geldt:



Figuur a

$0 < \varepsilon < \pi/2$. Dit faseverschil komt in gebieden met een dominant dubbeldaags ($T = 12$ uur) getij, zoals in Nederland, overeen met ongeveer 45 tot 50 minuten. Voor ε betekent dat $\varepsilon = 45/(12 \cdot 60) \cdot 2\pi = 0,4$. Bij een enkel-daags getij (zoals bijvoorbeeld in Thailand) komt dit faseverschil overeen met 90 minuten.

Vuistregel 53

Het faseverschil ε tussen HW en HWK (en tussen LW en LWK) is constant langs de estuarium-as, mits de breedte exponentieel verloopt en de gemiddelde diepte constant is (vuistregels 46 en 47). In het benedenstroomse deel van alluviaal estuaria, waar de getijbeweging prevaleert over het rivierkarakter, is dat het geval.

Een schipper weet die dingen natuurlijk allang. In het verleden was het voor een zeilschip, vooral als het schip zo diep steekt dat het met hoogwater over een zandbank moet laveren, essentieel om rekening te houden met de stroming. Als de stroming tegen zit, kom je daar maar moeizaam tegenop. Dat de kentering 45 minuten na hoogwater valt en dat dat zo blijft ook verder naar bovenstrooms, was dus wel bekend. In mijn proefschrift (Savenije, 1992, pag 55–56) laat ik zien (dankzij hulp van dr C. Kranenburg) dat een vrijwel ongedempte harmonische getijdgolf alleen optreedt als de breedte exponentieel verloopt, de diepte

constant is en de voortplantingssnelheid van de golf constant is. Ook kan er na substitutie van het faseverschil ϵ worden geconcludeerd dat deze conclusie alleen standhoudt als ϵ constant is langs de estuarium-as. Mijn studenten zijn momenteel aan het uitzoeken tot hoever bovenstrooms deze vuistregel nog opgaat en wat de factoren zijn die eventuele afwijkingen veroorzaken.

Vuistregel 54

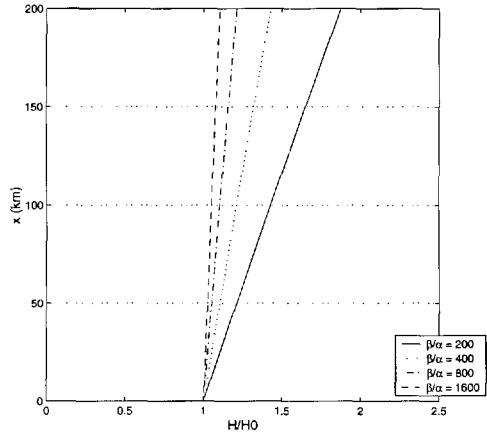
Opslingering en demping van het getij kunnen worden beschreven door een combinatie van een lineaire en exponentiële term, waarbij de lineaire term dominant is:

$$x = \beta \ln\left(\frac{H}{H_0}\right) + \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{H}{H_0} - 1\right)$$

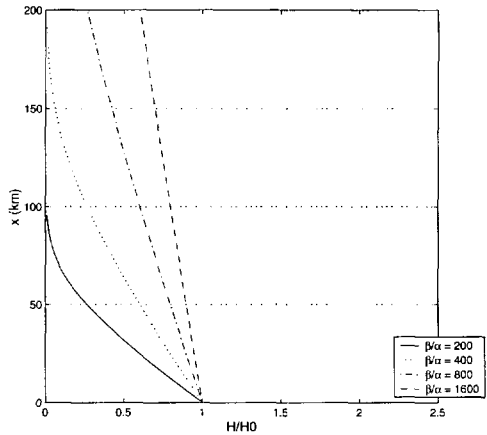
In het benedenstroomse deel van een estuarium is de longitudinale opslinging of demping lineair.

Hierin is x de afstand vanaf de monding, H het verticale getijverschil, H_0 het getijverschil aan de monding, α het Getijde-Froudegetal en β de lengteschaal van het opslingeringsproces. Deze betrekking kan niet eenvoudig worden geïnverteerd. Het is lastig om H te schrijven als functie van x , maar het kan wel middels zgn. W-functies (persoonlijke communicatie van Ed Veling).

Zolang H/H_0 groter is dan 0,5 is de tweede term veel belangrijker dan de eerste; ook omdat algemeen geldt dat $\alpha < 1$ (zie vuistregel 56). Zodra H/H_0 nul nadert, echter, wordt de eerste term dominant en krijgen we exponentiële demping van het getij. Logisch, want anders zou het getijverschil negatief kunnen worden. In de volgende twee figuren zien we de grafieken van deze relatie voor verschillende waarden van β/α . Bij positieve waarden van β is er opslinging, bij een negatieve waarde is er



Figuur b: Getij-opslinging als functie van verschillende (positieve) waarden van β/α



Figuur c: Getijdemping als functie van verschillende (negatieve) waarden van β/α

demping.

De afleiding is vrij veel werk en staat volledig beschreven in Savenije (2001). De betrekking is gebaseerd op de volledige St.-Venant-vergelijkingen, waarbij de breedte exponentieel verloopt conform vuistregel 46. Er is aangenomen dat het getijverschil kleiner is dan de gemiddelde diepte ($H < h$; dit is in alluviale estuaria nooit een beperking, waarschijnlijk om de reden die ik in de introductie aangaf). De enige verdere aanname is dat de snelheidsamplitude v en de getijamplitude H dezelfde relatieve demping hebben:

$$\delta_U = \frac{1}{v} \frac{\partial v}{\partial x} \approx \delta_H = \frac{1}{H} \frac{\partial H}{\partial x}$$

Dit laatste volgt direct uit de combinatie van vuistregels 51 en 49:

$$\frac{H}{v} = \frac{\pi}{T} \frac{h}{b} \frac{1 - \delta b}{\cos \epsilon}$$

Onder de aanname dat $|\delta b| \ll 1$ bestaat het rechterlid alleen uit parameters die constant zijn met x (volgens vuistregels 46, 47 en 53) en leidt het nemen van de afgeleide naar x van deze betrekking tot het gelijk zijn van de δ_U en δ_H , die we dan beide aanduiden met δ . De lengteschaal van het opslingeringsproces is dan gelijk aan $1/\delta$ (bij demping is δ negatief). In feite is dit de beperking van deze vuistregel: de opslingeringsschaal (of de absolute waarde van de dempingsschaal) moet groot zijn ten opzichte van de lengteschaal van het exponentiële verloop β ($|\delta b| \ll 1$). Maar dit is in alle alluviale estuaria het geval, om de reden die ik in mijn introductie schetste.

Rest mij nog de betrekkingen voor α en β te geven. Beide verhef ik tot vuistregels.

Vuistregel 55

De karakteristieke lengteschaal voor de opslingering van het getij b wordt gegeven door de volgende betrekking:

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{b} - \frac{fg}{C^2} \frac{v \sin \epsilon}{ch}$$

Hierin is C de Chézy-coëfficiënt ($m^{0.5}/s$), c de voortplantingssnelheid van de getijdeweg (m), en f een coëfficiënt die rekening houdt met het feit dat gedurende de eb-stroming de waterstand gemiddeld lager is dan bij vloed.

$$f = \frac{1}{1 - \left(\frac{H}{2h}\right)^2}$$

De eerder genoemde lengteschaal $1/\delta$ is slechts een beschrijvende lengteschaal, die niet constant hoeft te zijn langs het estuarium. De in vuistregel 55 gepresenteerde karakteristieke lengteschaal is een volledig theoretische afgeleide lengteschaal, gebaseerd op fysisch meetbare parameters, waarvan de parameters in een alluviaal estuarium constant zijn (in het door het getij bepaalde deel van het estuarium). Deze lengteschaal bestaat uit twee elkaar tegenwerkende termen. De eerste term komt uit de continuïteitsvergelijking en is verantwoordelijk voor de waterstandsverhoging die het gevolg is van het vernauwen van het estuarium als we meebewegen met de vloedstroom. De tweede term komt uit de wrijvingsterm van de bewegingsvergelijking. Als de wrijvingsterm sterker is dan de opslingeringsterm, dan is β negatief en vindt er demping plaats. Is de convergentie van de oevers zo sterk (b is klein) dat de eerste term groter is dan de wrijvingsterm, dan is b positief en vindt er opslingering plaats. In sommige estuaria heffen deze twee termen elkaar volledig op. Dit zijn ongedempte estuaria die overeenstemmen met de zogenaamde 'ideale estuaria' waarvoor vuistregels 46 en 47 (exponentieel verloop van de breedte en horizontale bodem) onverminderd gelden en theoretisch zijn af te leiden. Voorbeelden hiervan zijn de Maputo en Limpopo in Mozambique, en de Gambia in Gambia. Een mooi voorbeeld van een opslingerend estuarium is de Schelde, met zijn duidelijk herkenbare trechtervorm. Dempende estuaria zijn bijvoorbeeld de Chao Phya en de Tha Chin in Thailand. In deze estuaria lijken de oevers wel parallel te zijn, zo groot is b .

Vuistregel 56

Voor demping en opslingering van getijdewolven is een aangepast Froudegetal bepalend. Dit getal wordt gegeven door:

$$\alpha = \frac{2c\nu \sin \varepsilon}{gH_0}$$

Als dit Getijde-Froudegetal groot is bevordert dit sterke demping, of relatief sterke opslingering. Over het algemeen, echter, is dit getal kleiner dan 1. Een hoge waarde van α is 0,28, zoals in de Chao Phya die sterk gedempt is, of 0,22 in de Schelde die sterk opslingert. In wezen is dit Getijde-Froudegetal de vermenigvuldiging van het gewone Froudegetal ($u/(gh)^{0,5}$) met h/H_0 en $2 \sin \varepsilon$ (na substitutie van $c = (gh)^{0,5}$). De laatste twee dimensieloze getallen zijn karakteristiek voor getijdegolven. Het is niet meteen duidelijk waarom $\alpha < 1$. Het Froudegetal is in open waterlopen normaliter een orde kleiner dan 1. En met een ε van 0,4 is $2 \sin \varepsilon = 0,78$ en ook kleiner dan 1. Maar h/H_0 is dat juist niet (dat is zelfs een conditie voor al mijn vuistregels). Het is dus met name het Froudegetal dat ervoor zorgt dat $\alpha < 1$. Omdat $\alpha < 1$ is in estuaria de lineaire term van vuistregel 54 overheersend zolang H/H_0 niet te klein wordt.

De volgende keer wil ik graag ingaan op de zoutindringing in estuaria en hoe dit samenhangt met de geometrische en hydraulische vuistregels die we tot nu toe hebben behandeld.

Referenties

- Savenije, H.H.G. (1992)** Rapid Assessment Technique for Salt Intrusion in Alluvial Estuaries; Proefschrift, IHE report series, No. 27. IHE, Delft.
- Savenije, H.H.G. (2001)** A simple analytical expression to describe tidal damping or amplification; in: *Journal of Hydrology*, vol 243, nrs 3-4, pag 205–215.

Huub Savenije,
TU Delft, hsa@ihe.nl

Blijkbaar heeft Huub nog veel meer in petto, maar laat u daardoor niet weerhouden om uw eigen vuistregels of wetenswaardigheden op te sturen naar de redacteur van deze rubriek: kees.maas@kiwa.nl.