

Hatsi-kD

De vorige Hatsi-kD was grensverleggend: zo kort was er niet één, afgezien van die ene keer dat er helemaal geen Hatsi-kD verscheen. Prof. Savenije deed een geslaagde poging om ook de tegenovergestelde grens verder weg te duwen: u treft vandaag een welhaast complete inleiding aan in de hydrologie van estuaria. En dat is nog slechts een begin: in dit gedeelte van ons vak bestaan nog veel meer vuistregels. Maar eerst een aanvulling op vuistregel 45, Stromingen 6/4, door prof. J.H. Kop:

“De winning van grondwater in Nederland ten behoeve van de openbare watervoorziening vindt hoofdzakelijk plaats door middel van oppompen (bemaling). Landelijk gezien, leidt Kees Maas af dat al die afzuigkegels een gemiddelde daling van 2 cm van het freatisch peil veroorzaken. Dat dat freatisch peil niet 2 cm per jaar door de grondwaterwinning blijft dalen, maar dat het jaarlijks gemiddelde van dat peil praktisch constant is en dat we dat peil als referentiepeil (mogen) gebruiken, danken we aan Moeder Natuur die ons jaarlijks een gemiddeld neerslagoverschot schenkt van circa 25 cm, ruim 12 maal die 2 cm. Om onze mede-Nederlanders droge voeten te laten houden voeren we een groot gedeelte van de resterende 23 cm op onnatuurlijke wijze af naar de grote rivieren en de zee, namelijk ook door oppomping (bemaling). Helaas geven de correcte vuistregels met betrekking tot grondwaterstands daling in de praktijk somtijds eerder aanleiding tot ‘op-de-vuist-regels’ dan tot correcte interpretatie, c.q. begrip”, aldus prof. Kop, en ik heb er weinig aan toe te voegen. Mijn vuistregel was bedoeld om te laten zien dat het weinig zegt als je dit soort zaken op landelijke schaal beschouwt, maar er waren meer lezers die dachten dat ik - als medewerker van Kiwa - de waterleidingbedrijven de hand boven het

hoofd wilde houden. Dat zij verre van mij; tenslotte nemen de waterleidingbedrijven Kiwa ook niet in bescherming.

Het navolgende verhaal heb ik integraal overgenomen. Vanaf deze regel is de ik-persoon dus niet meer Kees Maas, maar Huub Savenije.

De getijdebeweging in estuaria

Vanaf het moment dat ik met een bootje ben gaan meten op estuaria - en dat heb ik vaak en op vele plaatsen in de wereld gedaan - viel het mij op dat de fysische processen waar ik mee te maken kreeg een stuk minder ingewikkeld waren dan ik had verwacht. De meeste processen bleken regelmatig en zelfs voorspelbaar te zijn.

Zoals u ongetwijfeld weet, worden waterstanden en stroming van water in estuaria geregeerd door de Saint Venant-vergelijkingen: één vergelijking voor het behoud van massa en één vergelijking voor het behoud van impulsie ($F = ma$). In alluviale estuaria zijn er bovendien twee vergelijkingen voor het sedimenttransport: een bewegingsvergelijking en een vergelijking voor het behoud van massa. Deze vier vergelijkingen zijn er in drie dimensies. Nu weet eenieder die ooit met deze vergelijkingen gestoeid heeft, dat dit een stelsel is van niet-lineaire partiële differentiaalvergelijkingen dat potentieel instabiel gedrag vertoont.

Met name in een getijgebied, waar waterstanden en stromingen sterk fluctueren, had ik een meer chaotische wereld verwacht. Als wij in detail naar driedimensionale stroming kijken, zien wij ook chaotisch gedrag. Dit gedrag wordt alleen maar chaotischer naarmate we het proces meer uitvergrooten. Als we daarentegen over de ruimte en de tijd integreren, verdwijnt het chaotische gedrag en worden er patronen

zichtbaar. Nu is dat niets bijzonders. Er is een heleboel chaos in de natuur die op hogere aggregatieniveaus verdwijnt. Zo is er op de schaal van een waterdeeltje: turbulentie, zoutdispersie, chaotische grondwaterstroming en onvoorspelbaar regenvalafvoergedrag. Maar als we uitzoomen, dan vertonen deze processen steeds meer regelmatigheid en worden zij zelfs voorspelbaar. De genoemde processen kunnen dan beschreven worden door mathematische 'wetten' zoals respectievelijk: Manning's (of Chezy's) wrijvingsterm in de bewegingsvergelijking van water, de dispersieterm in de zoutindringingsvergelijking, de vergelijking van Darcy, en de lineaire reservoirs in regenval-afvoermodellen. Iets soortgelijks zien we in de wet van Ohm, de gaswet, of in economische 'wetten' die het menselijk handelen (trachten te) beschrijven.

Tijdens metingen in alluviale estuaria (en daar beperk ik mij toe, want in estuaria met een vaste oever of vaste bodem gaat het verhaal soms niet op) viel het mij op dat de geometrie van estuaria simpel is. Er is vrijwel geen bodemverhang en de breedte varieert als een exponentiele functie. De maximale stroomsnelheid van het getij (gemiddeld over het dwarsprofiel) bleek nauwelijks langs de as van het estuarium te variëren. Bovendien verschilt deze snelheid, overal in de wereld, weinig van 1m/s. Als gevolg is de getijweg (of getij-exkursie) nagenoeg constant langs de estuarium-as. En tenslotte bleek er langs de as van het estuarium weinig of geen opslinging of demping van het getij te zijn. Als er sprake was van opslinging, dan was die lineair met de afstand en niet, zoals je zou verwachten, exponentieel.

Genoeg stof voor een paar Hatsi-kD's en een aantal vuistregels voor de hydrologie van estuaria. In Nederland hebben we nog twee open estuaria: de Eems en de Schelde. Hopen maar dat ze nog lang open en allu-

viaal mogen blijven, dan zijn deze vuistregels ook voor ons land nog lang bruikbaar.

Vuistregel 46:

De breedte B en de dwarsoppervlakte A van een alluviaal estuarium kunnen beschreven worden door een exponentiële functie,

$$B = B_0 e^{-x/b}$$

$$A = A_0 e^{-x/a}$$

Hierin is de oorsprong aan de monding gekozen en wijst de x -as in bovenstroomse richting. De vergelijkingen pas ik over het algemeen toe bij gemiddelde waterstand, maar ze kunnen ook voor hoogwater gebruikt worden. Er zijn twee constante schaalfactoren in deze vergelijkingen: a en b . Dit zijn de convergentielengtes, of de lengteschalen waarover de breedte en het dwarsoppervlak afnemen. Bij de Schelde is b redelijk klein (28 km), maar in de Chao Phya in Thailand bedraagt hij 109 km. In dat estuarium lijkt de breedte bijna constant. Deze twee schaalfactoren zijn cruciaal in de hydrologie van estuaria en spelen een sleutelrol in het bepalen van de zoutintrusielengte, de demping van het getij en de voortplanting van de getijdegolf. De vraag is: verschillen a en b veel van elkaar? Dit brengt mij op de tweede vuistregel voor alluviale estuaria.

Vuistregel 47:

In een alluviaal estuarium is er nauwelijks bodemverhang en als gevolg is de diepte h (gemiddeld over het getij) vrijwel constant. Dit betekent dat $a = b$ en dus dat

$$h = h_0$$

waarbij het onderschrift 0 verwijst naar de situatie aan de monding. Dit is een vuist-

regel die veel meer weerstand ontmoet dan de eerste. Intuïtief blijken mensen te denken dat er een verhang in de richting van de zee is. Dit is echter niet zo. Omdat er (in de afwezigheid van een meetbare bovenafvoer) geen resulterende stromingsrichting is, is er ook geen verhang. We moeten ons wel realiseren dat de vuistregel alleen geldt in het deel van het estuarium waar de invloed van de zee overheerst en het effect van de bovenafvoer op de getijdeafvoeren verwaarloosbaar is. Als we in bovenstroomse richting bewegen krijgt het estuarium geleidelijk meer het karakter van een rivier (zoet water, weinig getij). We zien dan geleidelijk een bodemverhang ontstaan en de oevers worden geleidelijk parallel. In de Schelde moet je een flink stuk bovenstrooms van Antwerpen zijn voordat de Schelde een rivierkarakter krijgt. In het zoute deel van een estuarium gaan de vuistregels onverminderd op.

De fysische onderbouwing van deze drie vergelijkingen is complex, maar wie het wil nalezen moet mijn proefschrift uit de bibliotheek opvissen (Savenije, 1992). Analyse van de behoudswetten voor water en sediment levert inderdaad op dat de drie bovenstaande vergelijkingen correcte oplossingen zijn mits de ruwheid, en de voortplantingsnelheid van de golf constant zijn, en als de demping van het getij klein is. Al deze dingen, zoals we in volgende vuistregels zullen zien, zijn waar in alluviale estuaria.

Vuistregel 48:

De maximale snelheid van het getij, gemiddeld over de dwarsdoorsnede, is constant langs het estuarium. Bij springtij (de maatgevende situatie) is deze maximale snelheid (snelheidsamplitude) gelijk aan 1 m/s. Dit geldt voor alle alluviale estuaria:

$$v = v_0 = 1 \text{ m/s}$$

Dit is een verbluffende vuistregel, die wellicht tegen ons gevoel ingaat. Je zou verwachten dat er vertraging optreedt als je dichterbij de zee komt, omdat het estuarium sterk verbreedt, of je zou verwachten dat de snelheid toeneemt om dat het getijvolume dat per getijperiode door de dwarsdoorsnede gaat steeds groter wordt naarmate je dichterbij zee komt. In feite compenseren deze effecten elkaar precies door het exponentiële verloop van de dwarsdoorsnede, en is de maximale snelheid constant.

Dit is al eens aangetoond door Bruun en Gerritsen (1960) die metingen analyseerden in de openingen tussen de eilanden van de Waddenzee. Toen zij de piekafvoer Q van het getij uitzetten tegen de dwarsdoorsnede A , resulteerde dat in een lijn onder 45° met $Q = A$. Soortgelijke conclusies waren al eens eerder getrokken door O'Brien (1931) en Bretting (1958).

Dat alle alluviale estuaria overal in de wereld eenzelfde gedrag vertonen is nog verbazingwekkender. Het heeft er waarschijnlijk mee te maken dat alluviale estuaria een vergelijkbare morfologie hebben. Het sediment dat de bodem van alluviale estuaria vormt is primair van zee afkomstig. De zee en niet de rivier bepaalt de morfologie van het estuarium. Hierop zit waarschijnlijk minder variatie dan op het sediment van de individuele rivieren. Bovendien is het sediment dat vanuit zee in het estuarium wordt afgezet afhankelijk van het transportproces (dichtheid-gedreven stroming over de bodem) en niet afhankelijk van het aanbod aan sediment. Dit resulteert in een slibrijke bodem die waarschijnlijk in alle alluviale estuaria wordt aangetroffen.

Overigens is ook in benedenrivieren de maximale stroomsnelheid (gemiddeld over het dwarsprofiel) in de orde van 1 m/s. Hierop zal ik in een volgende Hatsi-kD verder ingaan.

Vuistregel 49:

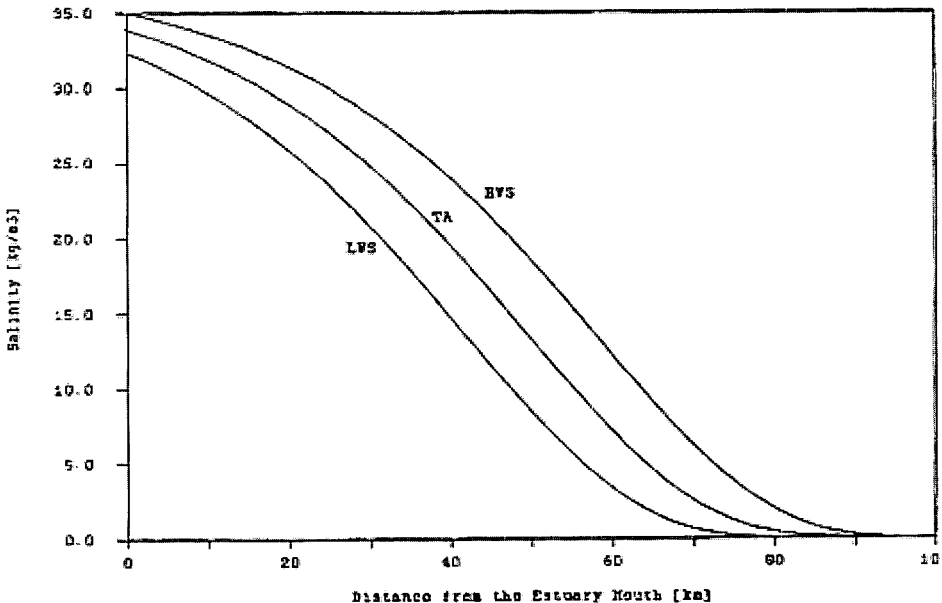
De getijweg, dat is de weg die een waterdeeltje aflegt tussen laagwaterkentering (LWK) en hoogwaterkentering (HWK), is constant langs het estuarium en is rechtvevenredig met de (constante) snelheidsamplitude:

$$E = \frac{vT}{\pi}$$

Integratie van de snelheid van een waterdeeltje dat volgens een zuivere sinus beweegt levert deze betrekking voor de getijweg op. Metingen tonen aan dat deze betrekking inderdaad opgaat. Computersimulaties geven aan dat E gemiddeld 8% hoger is dan de vergelijking aangeeft. Dit betekent dat bij een dubbeldaags getij ($T = 44400$ s) de getijexcursie bij springtij ongeveer 15 km bedraagt. Nu zijn de duur van de vloedstroom en de maximale vloedstroomsnelheid niet langs het hele estuarium constant. Naarmate wij verder bovenstrooms kijken vervormt de getijgolf, waarbij de duur van de vloedstroom afneemt en de duur van de ebstroom toeneemt. Dit gaat

gepaard met een afname van de maximale ebsnelheid en een toename van de maximale vloedstroomsnelheid. Deze twee effecten compenseren elkaar enigszins in de bovenstaande vergelijking. Niettemin moet E ergens uitdempen, en dus kan E in het bovenstroomse deel van het estuarium niet constant blijven. In het benedenstroomse deel echter, waar het getij en de zoutindringing dominant zijn over het rivierkarakter, is de vergelijking geldig.

De getijweg is een belangrijke parameter in estuaria. Hij is bepalend voor het menggedrag van het estuarium. In feite is het de mengweglengte van het getij. Daarom is het een sleutelparameter voor zoutindringing en ook voor waterkwaliteitsberekeningen. Omdat de getijweg constant is zijn de zoutindringingslijnen voor hoogwaterkentering en laagwaterkentering (de omhullenden van de zoutindringing) over een afstand E van elkaar verschoven (zie figuur).



Vuistregel 50:

Het vloedvolume, ook wel getijprisma genoemd, is gelijk aan het product van de getijweg en de dwarsdoorsnede:

$$P_t = EA$$

Dit volgt direct uit een Lagrange-benadering waarbij we gedurende een getijbeweging tussen LWK en HWK het water volgen. Het volume dat het estuarium binnenkomt is dan gelijk aan het product van de getijweg en de dwarsdoorsnede.

Het getijprisma kan echter ook op een andere manier bepaald worden, als de hoeveelheid water die tussen HWK en LWK geborgen wordt in het estuarium.

Om dat af te leiden moeten we eerst de betrekking weten tussen, aan de ene kant, het waterstandsverschil tussen hoogwater (HW) en laagwater (LW), dat ik aanduid met H , en, aan de andere kant, het waterstandsverschil tussen HWK en LWK, dat ik aanduid met H' . Als het faseverschil tussen HW en HWK gedefinieerd wordt als ε ($0 < \varepsilon < \pi/2$), geldt dat $H' = H \cos \varepsilon$. Als we verder aannemen dat getijopslingering (of demping) gedefinieerd kan worden als $\delta = (dH/dx)/H$, dan is het getijprisma tussen de omhullenden van HWK en LWK gelijk aan:

$$P_t = \frac{HBb \cos \varepsilon}{1 - \delta b}$$

Bb is het oppervlak van het estuarium (dit volgt direct uit integratie van de eerste vergelijking onder vuistregel 46) en δb compenseert voor opslingingering of demping. Als er geen demping of opslingingering is, dan is $\delta b = 0$. Gelijkstelling van vergelijking de twee uitdrukkingen voor P_t leidt tot de volgende vuistregel:

Vuistregel 51:

Getijverschil en getijweg staan in vaste verhouding tot elkaar volgens de volgende betrekking:

$$\frac{H}{E} = \frac{h(1 - \delta b)}{b \cos \varepsilon}$$

Dit is in wezen een bijzondere vorm van de continuïteitsvergelijking, die volgt uit het gelijkstellen van twee getijvolumes. In een ideaal estuarium waar geen of weinig demping is, zien we dat alle parameters in deze vergelijking constant zijn langs de x -as. Cruciaal in dit verband is of en hoe δ en ε variëren langs de estuarium-as. Daar vertel ik een volgende keer graag wat meer over.

Referenties

- Bruun, P. & F. Gerritsen** (1960) Stability of Coastal Inlets; North Holland Publ., Amsterdam.
- Bretting, A. E.** (1958) Stable Channels; in: *Acta Polytechnica Scandinavia* **245**, Copenhagen.
- O'Brien, M.P.** (1931) Estuary tidal prisms related to entrance areas; in: *Civil Engineering*, May 1931.
- Savenije H.H.G.** (1992) Rapid Assessment Technique for Salt Intrusion in Alluvial Estuaries; proefschrift, IHE report series, No. 27, IHE, Delft.

Huub Savenije,
TU Delft, hsa@ihe.nl