Hatsi-kD

Dit is de derde aflevering over de hydrologie van estuaria, weer van de hand van Huub Savenije. De vorige twee verschenen in Stromingen 7/1 en 7/2. Vooraf een

Erratum

In de vorige Hatsi-kD zijn helaas een paar kleine, maar hinderlijke typefoutjes geslopen, waarvoor onze excuses. In vuistregel 53, en de daaropvolgende bespreking ervan, is een aantal malen e geschreven voor epsilon (ε). Dat zal de meesten wel al zijn opgevallen. Lastiger is het dat in vuistregel 55 een aantal malen b geschreven is voor beta (β), daar waar b ook voorkomt als de convergentielengte. Alleen de rechtgedrukte b moet dus een beta zijn; de schuingedrukte b is correct weergegeven.

Zoutindringing in estuaria

In de vorige twee Hatsi-kD's heb ik vuistregels gepresenteerd voor de voortplanting van getijdegolven in alluviale estuaria. In dit nummer wil ik graag mijn vuistregels presenteren voor de zoutindringing. Zoutindringing heeft een grote invloed op het ecosysteem, maar ook op het potentieel gebruik van zoetwater voor drinkwater of landbouw. De vraag hoe ver het zout binnendringt onder verschillende afvoerregimes of na een ingreep in het systeem is van groot belang, vooral in landen die geteisterd worden door periodes van droogte.

In het onderzoek naar zoutindringing in estuaria zijn er twee problemen waar ik mee te maken heb gehad, en die ik maar meteen uit de weg wil ruimen. Ten eerste is er het wijdverbreide geloof in de zoute tong. Telkens als je iets wilt vertellen over zoutindringing zeggen mensen "o ja, de zoute tong". Mijn stelling is dat in alluviale estuaria de zoute tong niet voorkomt wanneer het er toe doet. Problemen met zoutindringing doen zich voor bij lage afvoeren. Echter, bij lage afvoeren komt de zoute tong niet voor. Om de schuifspanning te leveren die nodig is om een zoute tong (gelaagde stroming) in stand te houden, heb je een hoge afvoer nodig. De zoute tong die dan optreedt ligt dicht bij de monding. Als de afvoer afneemt verdwijnt de gelaagde stroming en dringt het zout via menging steeds verder naar binnen. In de kritieke situatie treedt gemengde of gedeeltelijk gemengde stroming op. Dus laten we die zoute tong maar gauw vergeten.

Het tweede probleem was, dat vrijwel alle onderzoekers die voor mij aan zoutindringing hadden gestudeerd, in hun berekeningen en hun modelstudies uitgingen van een estuarium met een constante breedte. Wij weten inmiddels dat in alluviale estuaria de breedte exponentieel verloopt (vuistregel 46). Maar stroomgoten met een exponentieel verlopende breedte zijn natuurlijk niet zo makkelijk te maken, en bovendien hadden we in Nederland een kunstmatig estuarium van constante breedte waar zich zoutproblemen voordeden: de Nieuwe Waterweg. Dat heeft er toe geleid, dat zowel in Nederland als in de Verenigde Staten, die op dit terrein toonaangevend waren, vrijwel alle theoretische afleidingen gebaseerd waren op een constante breedte. Daardoor werd in de vergelijkingen een belangrijke parameter gemist: de convergentielengte b, die in mijn vuistregels zo'n prominente rol speelt. Dit werd helemaal een probleem toen men via dimensieanalyse probeerde om empirische betrekkingen te vinden. Immers de meest belangrijke lengteschaal ontbrak in deze analyse. De oude vergelijkingen voor de totale zoutindringingslengte voldoen dan ook alleen voor estuaria met een vrijwel constante breedte.

Vuistregel 57

In alluviale estuaria is tijdens het droge seizoen de zoutindringing gedeeltelijk of volledig gemengd. Een zoute tong treedt alléen op bij een hoge afvoer, wanneer er dus geen zoutprobleem is.

In gemengde estuaria kan de zoutindringing beschreven worden door een diffusievergelijking van het volgende type:

$$A\frac{\partial S}{\partial t}+Q\frac{\partial S}{\partial x}-\frac{\partial}{\partial x}\left(AD\frac{\partial S}{\partial x}\right)=0$$

waar x is gekozen in bovenstroomse richting. A is de dwarsdoorsnede, S is het zoutgehalte, Q is de afvoer (positief in bovenstroomse richting) en D de dispersiecoëfficiënt. Aangetoond kan worden dat voor hoogwaterkentering (HWK), geldt:

$$Q_f S = AD\frac{\partial S}{\partial x} \qquad (1)$$

waar AD betrekking heeft op HWK en Q_f de rivierafvoer is (deze is negatief). Voor LWK en voor gemiddeld getij geldt dezelfde vergelijking, maar met andere randvoorwaarden.

Om deze vergelijking op te lossen hebben we (naast de bovenafvoer en de randvoorwaarde) twee dingen nodig: een betrekking voor A en een betrekking voor D. De betrekking voor A hebben we natuurlijk al: het exponentiele verloop van vuistregel 46.

$$A = A_0\exp(-x/a) \qquad (2)$$

Wat veel onderzoekers heeft beziggehouden is een betrekking voor D. Hier doet zich het fenomeen voor dat wij al eerder hebben besproken. Naarmate je de processen op een hoger aggregatieniveau bestudeert, treden er regelmatigheden op, die niet optreden op kleinere schaal. Als je op kleinere schaal kijkt zijn er allerlei deelprocessen die menging veroorzaken. Op de kleinste schaal zorgt turbulentie voor menging. De longitudinale dichtheidsgradiënt genereert menging over de verticaal. Het snelheidverschil over de breedte genereert menging over de breedte. Dan is er zoiets als 'trapping' waarbij er tijdens de getij-excursie uitwisseling is met aanliggende bergingsgebieden (bekkens, kwelders, kribvakken, grienden, etc.). Tenslotte is er het scharen van de stroom in het brede deel van het estuarium (nabij de monding). Bij al deze deelprocessen zijn er verschillende betrekkingen tussen D, de geometrie, het getij en dS/dx af te leiden. Voor de totale, resulterende dispersie is helaas niets af te leiden. De meeste onderzoekers gingen ervan uit dat ook de resulterende dispersie een functie zou zijn van de zoutgradiënt. Maar wat bleek? De dispersie bleek niet een functie van de zoutgradiënt, maar van het zoutgehalte.

Vuistregel 58

In alluviale estuaria is de dispersie (voor HWK, LWK of gemiddeld tij) een functie van het zoutgehalte, volgens:

$$D = D_0(S/S_0)^K$$

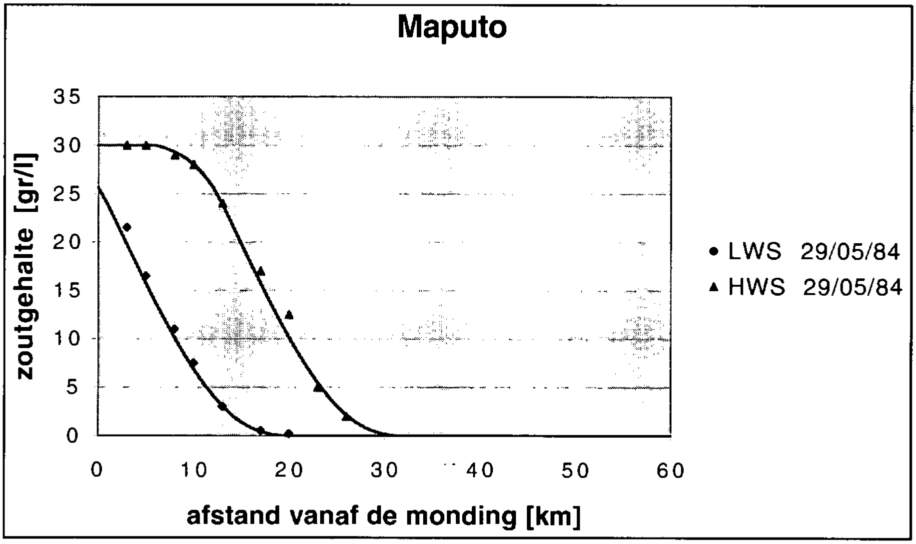
waarin K bekend staat als Van den Burgh's constante. Het is een getal tussen nul en één dat voor elk estuarium constant is. Het suffix 0 geeft de randvoorwaarde aan de monding aan. D_0 is afhankelijk van de geometrie, het getij en de bovenafvoer. Voor meer details verwijs ik naar Savenije (1993a). De vergelijking van Van den Burgh is:

$$\frac{\partial D}{\partial x} = K\frac{Q_f}{A} \qquad (3)$$

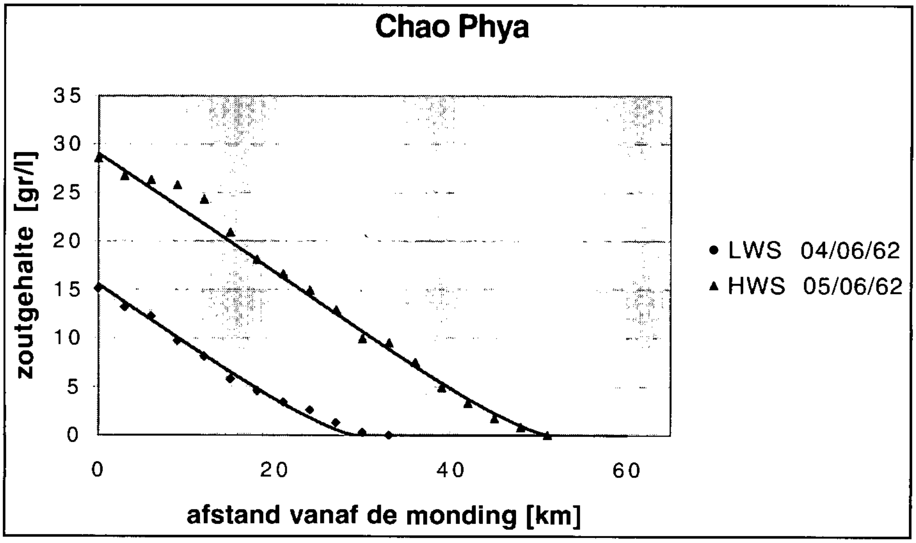
Combinatie van vergelijkingen (1), (2), en (3) leidt tot de volgende analytische oplossing voor de zoutindringing op HWK:

$$S = S_0\left[1+\frac{KaQ_f}{D_0A_0}\left(\exp\left(\frac{x}{a}\right)-1\right)\right]^{1/K} \quad (4)$$

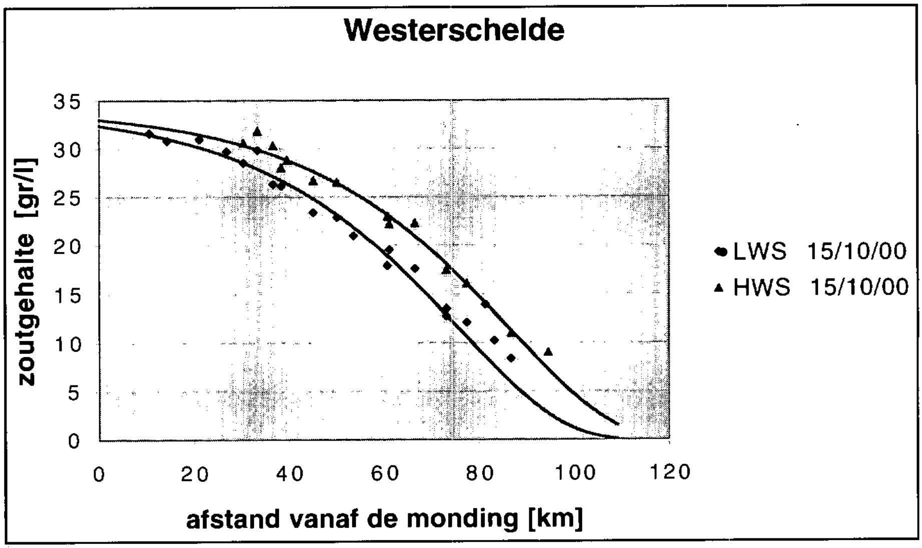
De betrekkingen voor LWK en gemiddeld tij worden gevonden door de functie over respectievelijk E en $E/2$ horizontaal te verschuiven. Deze betrekking is op vele estuaria succesvol getest. Het bleek dat voor alle bestudeerde estuaria, zo'n 16 verspreid over de wereld, waarden voor K en D_0 gevonden konden worden zodanig dat de metingen goed werden gesimuleerd (zie bijvoorbeeld figuur 1 in de Maputo, figuur 2 in de Chao Phya, en figuur 3 in de Schelde).



Figuur 1: Gemeten en berekende variatie van het zoutgehalte (mg/l) langs de estuarium-as voor HWK en LWK in de Maputo (Mozambique).



Figuur 2: Gemeten en berekende variatie van het zoutgehalte (mg/l) langs de estuarium-as voor HWK en LWK in de Chao Phya (Thailand).



Figuur 3: Gemeten en berekende variatie van het zoutgehalte (mg/l) langs de estuarium-as voor HWK en LWK in de Westerschelde.

De bijbehorende metingen zijn zowel eenvoudig als spectaculair (zoals mijn studenten regelmatig kunnen meemaken). Met een snelle boot vaar je op HWK vanaf de monding in bovenstroomse richting, met de snelheid van de getijdegolf. Een langzame boot houdt de getijdegolf niet bij. Op een flink aantal geïdentificeerde punten meet je het zoutgehalte bij kentering. Omdat er geen stroming is zijn dat eenvoudige metingen. Je bepaalt zo de maximale zoutindringing langs het estuarium. Als het einde van de zoutindringingscurve is bereikt vaar je snel terug naar de monding om de meting op LWK te herhalen. Op deze manier kan je binnen een dag met een klein team een zeer uitgebreide meting doen. Vervolgens wordt vergelijking (4) aan de meting gefit. Dat levert een K en een D_0 op. K is een vast getal voor een estuarium (tussen 0 en 1), maar D_0 is afhankelijk van de bovenafvoer en het getij.

Om de methode voorspellend te maken (waarna je dus niet meer een meting hoeft te fitten), is er een empirische betrekking nodig voor D_0. De dispersie wordt dimensieloos gemaakt door hem te delen door ($E\upsilon$). De getijweg E is hierin de typische mengweglengte van het getij, υ de maximale snelheid van het getij. Beide zijn constant langs de estuarium-as (vuistregels 48 en 49). Dit leidt tot de volgende vuistregel.

Vuistregel 59

De dimensieloze dispersie aan de monding wordt bepaald door een geometrisch getal (de verhouding van de diepte tot de convergentielengte) en een hydraulisch getal (het estuarium Richardson getal) volgens:

$$\frac{D_0}{\upsilon E} = 1390\frac{h}{a}\sqrt{N_R}$$

Hierin is h de gemiddelde diepte (constant langs het estuarium volgens vuistregel 47) en N_R het estuarium Richardson-getal, volgens:

$$N_R = \frac{-Q_f T g h}{E A_0 \upsilon^2}\frac{\Delta\rho}{\rho}$$

waar $\Delta\rho$ het dichtheidsverschil is over de lengte van de zoutindringing.

Nieuw in deze vergelijking (ten opzichte van eerder onderzoek) is de aanwezigheid van E en a; twee cruciale parameters om het proces te beschrijven. De vergelijking voor de totale indringingslengte wordt verkregen uit $S(L) = 0$. Hij wordt dimensieloos gemaakt door hem te delen door a. Dit leidt tot de laatste vuistregel van dit stuk:

Vuistregel 60

De dimensieloze indringingslengte op HWK is een logaritmische functie van geometrische en hydraulische getallen volgens:

$$\frac{L}{a} = \ln\left[1 - 1390\frac{\upsilon A_0}{KQ_f}\frac{E}{a}\frac{h}{a}\sqrt{N_R}\right]$$

Het minteken staat er omdat het rivierdebiet negatief is. Het argument is dus altijd groter dan 1 (en L dus altijd positief). De logaritmische functie is het gevolg van het exponentiële verloop van de dwarsdoorsnede (de breedte dus). Deze vergelijking is relatief simpel en bijzonder nauwkeurig.

Wat deze betrekking vooral van eerdere empirische studies onderscheidt is de logaritmische functie en de term E/a. Als $L/a \ll 1$ (vrijwel constante breedte) wordt de betrekking lineair. Behalve de term E/a lijkt hij dan sprekend op eerdere formules die in Nederland en de USA in gebruik waren (Savenije, 1993b).

Hiermee sluit ik het onderwerp van getijden en zoutindringing af. Een volgende keer wil ik graag iets presenteren over vuistregels in de rivierwaterloopkunde.

Referenties

Savenije, H.H.G. (1993a) Composition and driving mechanisms of longitudinal tidal average salinity dispersion in estuaries; in: *Journal of Hydrology*, vol 144, pag 127–141.

Savenije, H.H.G. (1993b) Predictive model for salt intrusion in estuaries, in: *Journal of Hydrology*, vol 148, pag 203–218.

Huub Savenije
TU Delft, hsa@ihe.nl