



Memo

Aan
de heer ir. D. ten Hove

Datum	Ons kenmerk	Aantal pagina's
15 oktober 2019	11202700-003-ZWS-0002	11
Contactpersoon	Doorkiesnummer	E-mail
Kees Sloff	+31(0)88 335 8152	Kees.Sloff@deltares.nl

Onderwerp
Ondieptes op bochtovergangen en bij havens, spiraalstroming

1 Inleiding

Ten behoeve van Richtlijnen Rivieren zijn vragen gesteld ten aanzien van bevaarbaarheid bij overgangen en aansluitingen havens en kanalen, en ten aanzien van de stroming in rivierbochten.

- 1 Zijn er problemen te verwachten ten aanzien van het optreden van ondieptes bij rivierhavens en aansluiting met kanalen, en in de bochtovergangen. Leidt tot scheepvaartproblemen?
- 2 Wat is het effect van spiraalstroming op de waterbeweging, en hoe ver werkt dat door.

2 Ondieptes op overgangen en aansluitingen

2.1 Geforceerde morfologie

De vraag heeft betrekking op de 'geforceerde' morfologie, dat wil zeggen de ondieptes die worden geforceerd door de geometrie. De meeste ondieptes in het zomerbed zijn toe te schrijven aan dergelijke forcering, onder andere de binnenbochten en bochtovergangen zelf, maar ook de fluctuaties die samenhangen met de kribben, onderbroken oeverbelijning en andere constructies die daarop zijn gesuperponeerd. Daarnaast zijn er ook tijdelijke forceringen door riviergeometrie (vooral tijdens hoogwater) die leiden tot ondieptes bij uittredende stroming naar het winterbed en bij de aantakking van (neven-)geulen en kanalen.

De meeste lokale ondieptes worden over het algemeen versterkt tijdens hoogwater door een toename van sedimenttransportgradiënten. Immers, het transport is dan (door hogere stroomsnelheden) groter en daarmee ook deze gradiënten. Ondieptes treden ook op naast (geforceerde) erosiekuilen onder andere direct benedenstrooms van de vaste lagen bij Nijmegen en St Andries, bodemkribben bij Haalderen (en in de Rijn-Maasmonding door aansnijden van sterk erodeerbare lagen). Een analytische (simpele) methode voor kwantitatieve voorspelling van de omvang van deze ondieptes is niet beschikbaar.

Figuur 1 toont een voorbeeld van bodemligging ten opzichte van het baggerreferentievlak bij de bochtovergang bij Haalderen (Boven-Waal). De rode en oranje kleuren geven locaties weer waar

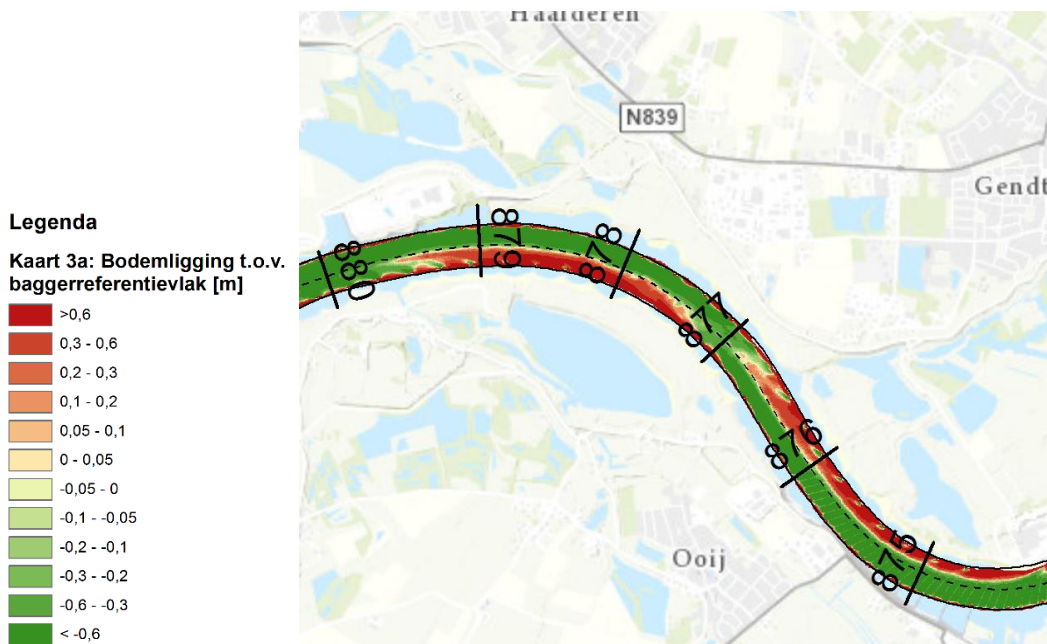


Datum
15 oktober 2019

Ons kenmerk
11202700-003-ZWS-0002

Pagina
2 van 11

de vaardiepte wordt beperkt door een hoge bodemligging. In de overgang bij km 977 is zichtbaar hoe op de overgang tussen de 2 bochten een geringe ondiepte optreedt tot in het midden van de rivier. Dit wordt enigszins versterkt door de aanwezigheid van een erosiekuil aan de linkerzijde tussen km 876 en 877 direct achter de bodemkribben die zich op de bodem van de buitenbocht bevinden. De kuil aan de linkerzijde leidt namelijk tot een verondieping aan de rechterzijde na km 876.



Figuur 1 Bochtovergang km 877 in Boven-Waal ter hoogte van Haalderen

In Figuur 2 is een voorbeeld getoond van ondieptes ter hoogte van de sluizen bij de stuw Grave in de Maas. Hier blijkt dat benedenstrooms van het complex sprake is van een forse ondiepte, zowel vanaf de sluis als vanaf de stuw. De aansluiting van het toeleidingskanaal/voorhaven aan de rivier leidt tot een verbreding en daarmee een plaatselijke afname van stroomsnelheid en sedimentatie.

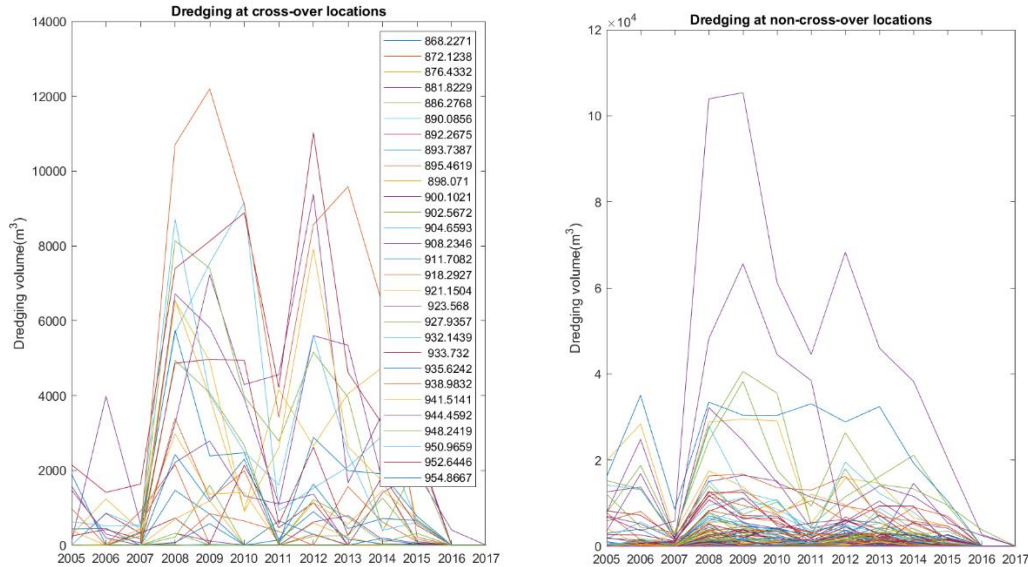


Figuur 2 Voorbeeld ondiepte bij de sluizen bij stuw Grave in de Maas, km 176 (rode zones zijn te ondiep volgens de vaarwegeisen)

2.2 Ondieptes bij bochtovergangen

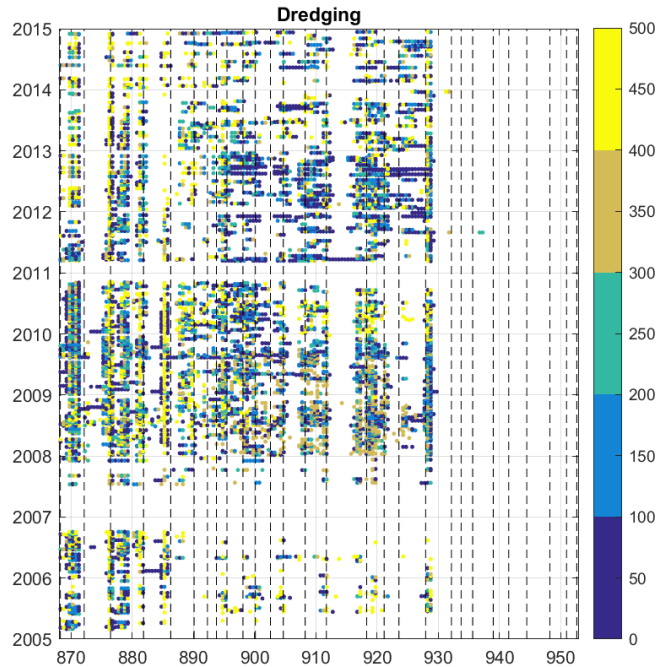
Over het algemeen geldt in de bochten dat sprake is van voldoende vaardiepte in de buitenbochten, maar dat juist in de overgangen tussen twee bochten de diepte geringer is. Hierdoor vormen lokale ondieptes door oeverbelijning of verplaatsende beddingvormen op deze locaties meer belemmering op voor de scheepvaart dan in diepe buitenbochten. De ondieptes in bochtovergangen kunnen in principe midden in de rivier liggen, terwijl in bochten deze ondiepten vaak alleen aan 1 zijde beperkingen opleveren (d.w.z. de binnenbocht).

Om inzicht te krijgen in de omvang van het probleem is een analyse gemaakt van de baggergegevens voor de Waal voor de periode 2005 – 2017. Het onderhoudsbaggeren is namelijk bedoeld voor het onderhoud van de vaarweg, en dus geeft een indicatie van de gesignaleerde vaardieptebeperkingen. Onderstaande figuren geven het totale baggervolume aan op verschillende locaties als functie van het jaartal. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen baggerwerk in bochten en in bochtovergangen. De figuren tonen dat ook op bochtovergangen regelmatig wordt gebaggerd, maar dat het volume daarvan minder is dan het baggerwerk in de (binnen-)bochten.



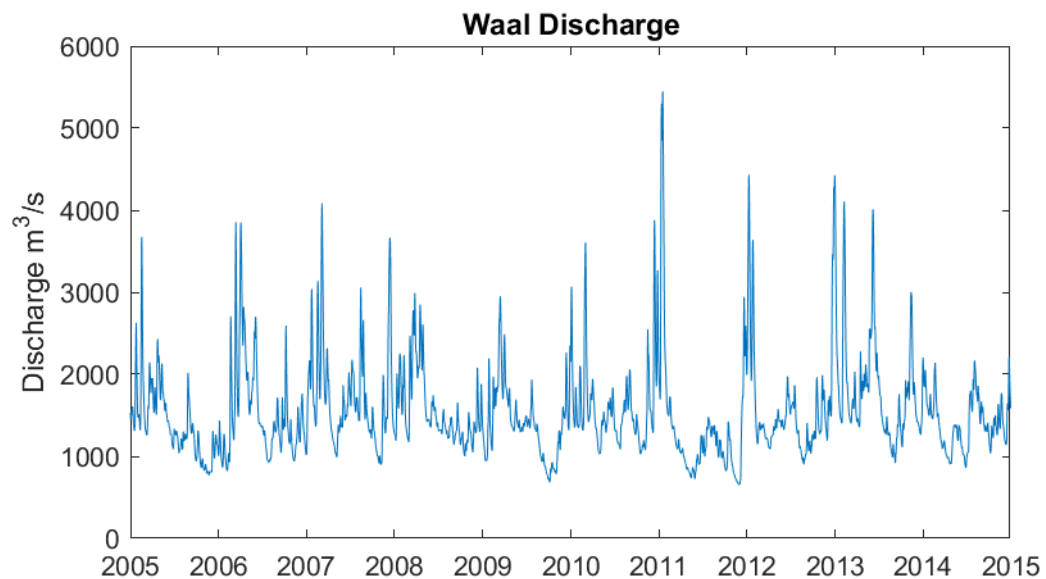
Figuur 3 Baggervolume (per traject) voor de Waal als functie van jaartal voor bochtovergangen (links) en bochten (rechts)

Vervolgens is in Figuur 4 een overzicht van het gerapporteerde baggerwerk voor de gehele Waal weergegeven (dus alle locaties). Daarbij valt op dat op een aantal locaties structureel wordt gebaggerd, met name het Waalbochten traject tussen Pannerdensche Kop (km 867) en Nijmegen (km 886). De kleuren geven een beeld van de volumes die zijn verplaatst (al het baggerwerk wordt gedaan met terugstorten). Opvallend is dat na 2008 aanzienlijk meer baggerwerk is gerapporteerd op de Midden-Waal (is nog punt van discussie met RWS). De gestreepte lijnen in Figuur 4 geven de bochtovergangen aan. Duidelijk is dat de belangrijkste baggeracties op bochtovergangen zijn opgetreden in de bochten bij Haalderen (km 877), en Sint Andries (km 928). Daar geldt dat door de erosiekuilen na de vaste laag en bodemkribben een ondiepte wordt opgewekt die doorloopt tot aan de bochtovergang. Op de Midden-Waal zijn de rivierbochten flauw, en is het baggerwerk meer gelijkmatig verdeel over bochten en overgangen.



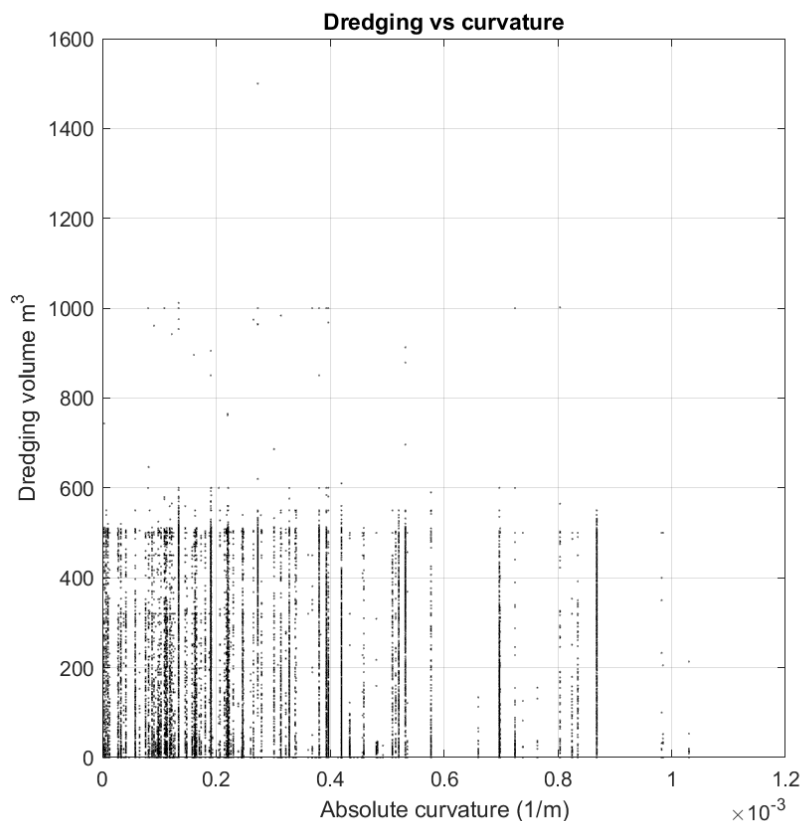
Figuur 4 Totaal baggerwerk langs de Waal 2005-2015. Verticale gestreepte lijnen geven de locaties van de bochtvergangen weer.

Uit het afvoerverloop van de genoemde periode tussen 2005 en 2015 kan worden afgelezen dat er geen grote hoogwaters zijn opgetreden. De hoogste Waalafvoer (>5000 m³/s) is opgetreden in 2011, maar in de overige jaren is de piekafvoer rond de 4000 m³/s of minder. De hier gepresenteerde baggerhoeveelheden en locaties hoeven daarom nog geen indicatie te zijn voor de bevaarbaarheid na een extreem hoogwater.



Figuur 3 Verloop van de Waal afvoeren in de periode 2005-2015

In onderstaande figuur zijn tenslotte de baggerhoeveelheden als functie van de rivierkromming weergegeven. De bochtovergangen (en rechtstanden) hebben een kromming gelijk aan nul. De grotere waarden voor kromming zijn de scherpe bochten (oftewel $1/R = 1/\text{kromtestraal}$). Het figuur bevestigt dat er redelijk wat baggerwerk plaatsvindt bij de bochtovergangen en rechtstanden, maar toont niet of dit het gevolg is van bochteffecten of andere forceringen (zoals de vaste lagen en bodemkribben).



Figuur 5 Baggerwerk als functie van de kromming (waarde 0 = bochtovergangen), voor de periode 2005-2015

Zoals hierboven aangegeven zijn de vaardieptebeperkingen op de bochtovergangen meestal het gevolg van ondieptes geforceerd door de lokale geometrie die op de gemiddelde bodem zijn gesuperponeerd. Een geforceerde ondiepte in het zomerbed zal na het dalen van de afvoer langzaam weer terugkeren naar de situatie voor het hoogwater. Bij een snelle daling van de afvoer en waterstand is dit proces van erosie mogelijk te langzaam, en kan de resterende ondiepte leiden tot scheepvaartbeperkingen. In dit geval moet dus een schatting worden gemaakt van de snelheid van het 'herstel'.

Voor het morfologische herstel van de opgedrongen 2D bodem ter plaatse van een sedimentatie of erosie (of een gebaggerde geul) kan een snelle benaderingsmethode worden gebruikt zoals is toegepast voor het BOS Baggeren. De methode is gepresenteerd in het rapport "Morfologische module BOS Baggeren Fase 1", C.J. Sloff, WL | Delft Hydraulics, Dec. 2001, Rapport Q3162. Voor het verdwijnen van de ondiepte (herstel van de oorspronkelijke laagwaterbedding) na een hoogwater wordt in deze methode uitgegaan van een benaderende herstelrelatie in de volgende vorm:

Datum
15 oktober 2019

Ons kenmerk
11202700-003-ZWS-0002

Pagina
7 van 11

$$\frac{\partial(\Delta z_b(t) / \Delta z_{b0})}{\partial t} = \frac{1}{T} \left(1 - \frac{\Delta z_b(t)}{\Delta z_{b0}} \right) \quad \text{of} \quad \frac{\partial \Delta z'}{\partial t} = \frac{1}{T} (1 - \Delta z') \quad (2.1)$$

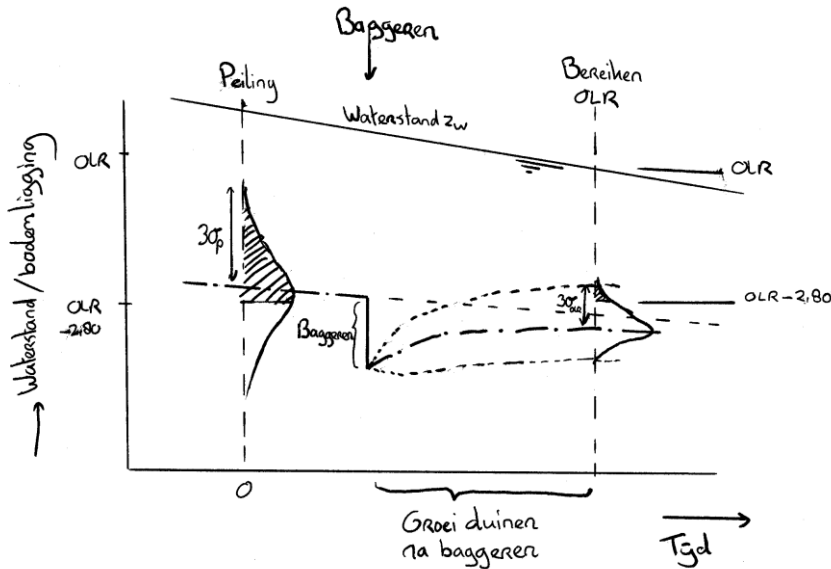
waarin:

- T = tijdschaal (functie van afvoer, locatie, etc.)
- Δz_{b0} = door erosie of sedimentatie opgelegde beginafwijking ten opzichte van de evenwichtsbodemligging (d.w.z. de bodemligging die volgt uit het gemiddelde van de jaarlijkse dwarspeilingen van de afgelopen 10 jaar, of uit een langjarige modelberekening met een representatieve afvoer van 1600 m³/s)
- Δz_b = tijdsafhankelijke afwijking ten opzichte van de evenwichtsbodemligging ter plaatse van de ondiepte
- $\Delta z'$ = tijdsafhankelijke dimensieloze bodemafwijking (relatief ten opzichte van de initiële afwijking Δz_{b0})

De oplossing van bovengenoemde vergelijking (2.1) kan worden geschreven als een exponentiële functie als volgt:

$$\Delta z'(t) = 1 - \exp\left(\frac{-t}{T}\right) \quad (2.2)$$

Door het benaderende karakter van deze functie is gekozen om de toepassing ervan te richten op aanpassing van een bodemafwijking gemiddeld over een morfologische eenheid. Een morfologische eenheid is in dit geval een gebiedje dat ongeveer de gehele bochtovergang beschouwt (gemiddeld over een lengte van enkele honderden meters tot een kilometer, en over de gehele breedte). In Figuur 6 is geschetst hoe deze formule leidt tot een geleidelijke aanpassing, waarbij de snelheid van herstel geleidelijk afneemt als verschil met evenwichtsbodem kleiner wordt. Ook is aangegeven hoe bovenop de “bochtovergang-gemiddelde” bodem een duinenveld kan groeien (of dempen).



Figuur 6 Schets van herstel van bodemligging na baggeren tijdens de val van het hoogwater. De streep-punt lijn geeft het exponentiële herstel van de gemiddelde bodemligging weer. De gestippelde lijnen geven de bandbreedte van duinen weer die weer ontstaan op de gebaggerde sleuf.

In het rapport voor BOS Baggeren zijn hersteltijden T uitgerekend voor diverse locaties op de Waal. Over het algemeen volgt dat de aanpassingstijd van “gemiddelde” herstel van een gebaggerde geul $T = 0,8$ à $0,9$ jaar bedraagt bij een afvoer van $1600 \text{ m}^3/\text{s}$ en ongeveer $T = 0,5$ jaar bij een afvoer van $2400 \text{ m}^3/\text{s}$ (uitgaande van een lange termijn berekening). Wanneer de korte termijn wordt beschouwd, orde 2 maanden, bedraagt het “gemiddelde” herstel van een gebaggerde geul $T = 0,4$ à $0,6$ jaar bedraagt bij een afvoer van $1600 \text{ m}^3/\text{s}$ en ongeveer $T = 0,2$ à $0,3$ jaar bij een afvoer van $2400 \text{ m}^3/\text{s}$. Als wordt gekeken naar maximale waarden (dus afzonderlijke punten in de overgang) kan echter een forse variatie worden gezien. De hersteltijden aanpak is daarom vooral indicatief en behulpzaam bij het maken van een Quickscan. Voor een betere inschatting is een 2D-morfologisch model noodzakelijk.

2.3 Ondieptes bij ingangen naar haven, kanalen en sluisen

Ook voor het ontstaan van vaardieptebeperkingen bij de ingangen en voorhavens van scheepvaartkanalen en werken, is het belangrijk de sedimentatieprocessen te begrijpen. Wanneer een ingang vanuit een rivier te wijd is, mist de stroming daar voldoende ondersteuning en zal dit als een verbreding functioneren. De verbreding zorgt voor een vertraging van de stroming waardoor sedimentatie optreedt in het zomerbed voor de ingang. In het verleden zijn daarvoor bijvoorbeeld de zogenaamde eieren (van Thijsse) toegepast.



Figuur 7 Kruising van Amsterdam-Rijnkanaal en Nederrijn met behulp van de 'eieren', die zorgen voor ondersteuning van de stroming in het zomerbed van de Nederrijn en sedimentuitwisseling met de rivier beperken

Dergelijke ondieptes zijn lastig te voorspellen en erg plaatsafhankelijk (afhankelijk van stroombeeld bij verschillende afvoercondities). Vaak geldt dat de aanslibbing of aanzanding van deze ingangen en achterliggende (voor-)havens en kanalen een combinatie is van geleidelijk aanbod van sediment over langere tijd, en van events (hoogwaters) met een hoog sedimentaanbod en een veranderende stroming (bijvoorbeeld overstroming van geleidedammen naast de eieren zoals in Figuur 7, of overstroming van kribben ter plaatse van de ingang). De geleidelijke aanzanding van de ingangen zijn overigens ook soms het gevolg van sedimentuitwisseling door stromingen en golven opgewekt door passerende schepen (waterspiegeldaling leidt vaak tot in- en uitstroom van de voorhavens).

Het minimaliseren van sedimentuitwisseling bij de ingangen vraagt een uitgekiend ontwerp van stroomgeleiding en grootte van de ingang. Dit vraagt minimaal inzet van geschikte numerieke modellen (2D of 3D stroming en morfologie) en een goede monitoringstrategie (voor beheer). Een exacte voorspelling van de aanzanding en aanslibbing is niet mogelijk. De modellen geven echter wel een redelijke (kwantitatieve) ondersteuning aan de inzichten die nodig zijn voor het ontwerpen.

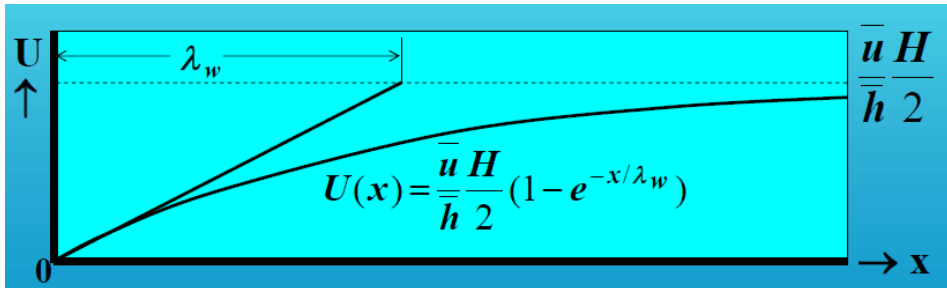
3 Spiraalstroming

Door spiraalstroming wordt de stroming aan de oppervlakte iets naar de buitenbocht gericht, en langs de bodem iets naar binnen. Het effect is zeer klein. Voor de hoek tussen stroomrichting en stroomvector bij oppervlakte of bodem geldt: $\tan(\alpha) = A \cdot h/R$. Als we aannemen dat de bochtstraal R circa 1000 m bedraagt (Waalbochten), en de waterdiepte h circa 5 m, en A is circa 10, dan geldt dat $\tan(\alpha) = 0.05$, en dan geldt voor de hoek dat deze ongeveer 2 à 3 graden betreft (ten opzichte van de gekromde rivieras). Op een vaarafstand van 100 m zal er dus een afwijking van orde 5 m optreden.

Voor de ontwikkeling van de bochtstroming, van rechtstand naar volledig ontwikkelde spiraalstroom, kan worden uitgegaan van de lengteschaal $\lambda_w = (C^2 h)/(2g)$ met C =Chézy



ruwheidswaarde (ongeveer $45 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$), en $g = \text{zwaartekrachtsversnelling}$ (9.81 m/s^2). Voor de bovengenoemde situatie bedraagt deze lengteschaal ongeveer 500 m. In Figuur 8 is getoond hoe het stroombeeld zich geleidelijk aanpast aan een veranderende geometrie: de ontwikkeling gedraagt zich als een exponentiële functie met λ_w . Het figuur toont ook hoe λ_w dus een benadering is voor de ontwikkeling in het eerste deel van de aanpassing.



Figuur 8 De ontwikkeling van stroombeeld (langssnelheden, spiraalstroming, etc.) in 3D stroming in een langspriefiel

De aanpassing van de 2D/3D stroombeelden treden zowel voor als na een bocht op. De locatie van de bochtovergangen wordt daarom niet alleen bepaald door de oevers en de geometrie, maar vooral ook waar de spiraalstroming omkeert, en hoe de morfologie daar op reageert (sedimenttransport heeft ook een eigen aanpassingslengte).

4 Conclusies

Onderzoeksvraag 1:

Zijn er problemen te verwachten ten aanzien van het optreden van ondieptes bij rivierhavens en aansluiting met kanalen, en in de bochtovergangen. Leidt tot scheepvaartproblemen?

Bij bochtovergangen leiden ondieptes opgewekt door onregelmatige oevers, kribben, vaste lagen, etc. tot vaarwegbeperkingen, omdat bochtovergangen ondieper zijn dan de diepe buitenbochten voor en achter de overgang. Uit analyse van onderhoudsbaggerwerk op de Waal blijkt dat regelmatig ondieptes moeten worden verwijderd op bochtovergangen om vaardiepte te garanderen. De ondieptes die ontstaan tijdens hoogwater herstellen zich na afloop van hoogwater, maar dat herstel verloopt langzaam. Met vuistregels uit het project BOS Baggeren (2001) is een grove schatting te maken van hersteltijd, maar een goede inschatting vraagt een meer gedegen numerieke modellering.

Bij ingangen naar havens, kanalen, sluizen, etc. is sprake van aanzanding door uitwisseling met de hoofdstroming in het zomerbed. Dit kan leiden tot ondieptes in zowel het zomerbed, als in de betreffende ingangen en achterliggende havens. Bij het ontwerp van de ingang moet met dimensionering en stroomgeleiding de uitwisseling worden geminimaliseerd. Daarbij moet ook rekening worden gehouden met stroming (waterspiegeldaling) en golven van passerende schepen. Numerieke modellen (2D en 3D) zijn belangrijke instrumenten.



Datum

15 oktober 2019

Ons kenmerk

11202700-003-ZWS-0002

Pagina

11 van 11

Onderzoeksvraag 2:

Wat is het effect van spiraalstroming op de waterbeweging, en hoe ver werkt dat door.

De spiraalstroming is een zwakke rotatie van de 3D stroming, maar heeft slechts een geringe invloed. Op basis van een hele grove schatting kan worden gesteld dat aan de wateroppervlakte en langs de bodem de stroming een afwijking ondervindt van circa 2 à 3 graden ten opzichte van de rivieras (circa 5 m afwijking in dwarsrichting per 100 m lengte). De spiraalstroming ontwikkelt zich over een afstand van orde 500 m tot 1 km vanaf het begin van de kromming van de rivier, en vanaf het eind van de kromming van de rivier.

Kopie aan

mevrouw dr. M. Zagonjoli