

$$C = 18 \cdot 10 \log \left( \frac{12R}{k_N} \right) \quad (2)$$

Voor oppervlaktewaterhydrologen is vegetatie soms meer een last dan een zegen. Begroeiing van sloten, kanalen, beken en uiterwaarden is namelijk hydraulisch ruw: het houdt het water tegen. En dat kunnen we niet gebruiken in deze tijden van toenemende afvoeren. Als vasthouden en bergen niet meer werkt, willen we ons overtollige water zo snel mogelijk kwijt en dan helpt het als het gladjes naar beneden stroomt.

Het is dus zaak om een idee te krijgen van de grootte van de weerstand van vegetatie tegen stroming. Deze weerstand wordt van oudsher weergegeven in de beroemde Chézy-factor, genoemd naar de Franse ingenieur Antoine de Chézy die hierover in 1776 publiceerde. Empirisch vond hij de volgende relatie tussen de dieptegemiddelde stroomsnelheid  $u$  (m/s), de helling van de waterloop  $i$  (-), en de hydraulische straal van de waterloop  $R$  (m):

$$u = C\sqrt{Ri} \quad (1)$$

De weerstand van vegetatie is verdisconteerd in de waarde van  $C$ . Let op, bij een grotere weerstand wordt de waarde voor  $C$  ( $m^{1/2}/s$ ) kleiner. Om compleet te zijn, er bestaan nog meer weerstandsformules, zoals die van Manning, Strickler of Darcy-Weisbach en die zijn allemaal in elkaar om te rekenen.

Pas in het begin van de 20ste eeuw werden er handzame relaties gevonden om de grootte van  $C$  te bepalen. Johann Nikuradse voerde tussen 1920 en 1930 elegante experimenten uit met glaskorreltjes van uniforme grootte die tegen de wand van een pijp waren geplakt (Nikuradse, 1930). Hiermee bepaalde hij de relatie tussen de korreldiameter en de weerstand. De heren Colebrook en White (Colebrook en White, 1937) completeerden deze experimenten eind jaren dertig en poneerden een relatie:

waarin  $k_N$  de Nikuradse equivalente korreldiameter (m) is. Dit is reuze handig in het gebruik. Het blijkt dat wanneer je de korrelgrootte van het sediment op de bodem kent, je dit kan omrekenen naar een  $k_N$  en daarmee naar een  $C$ -waarde. Deze truc wordt ook toegepast voor vegetatie. Gras heeft dan een kleine  $k_N$ -waarde (zo rond de 0,2–0,5 m), riet heeft een flink grotere waarde (2–5 m) en voor bossen neem je een metertje of 10. Wat je feitelijk doet is dat je aanneemt dat vegetatie bestaat uit gigantische korrels op de bodem waar het water overheen stroomt. Bij toenemende waterdiepte neemt de weerstand af volgens vergelijking (2), maar zolang de vegetatie doorstroomd is (dus langer dan de waterdiepte), klopt dit helemaal niet.

Een gangbare methode om de vegetatieweerstand te berekenen is om vegetatie te schematiseren alsof het cilinders betreft met een bepaalde diameter, dichtheid, hoogte en weerstandscoefficiënt. Uit het krachtenevenwicht tussen de stroming van water over een bodem waarop vegetatie groeit en de weerstandskracht van de cilinders is de volgende formule af te leiden voor doorstroomde vegetatie:

$$C = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{C_b^2} + \frac{C_D m D h}{2g}}} \quad (3)$$

hierin is  $C_b$  de weerstand van de bodem ( $m^{1/2}/s$ ),  $C_D$  is de weerstandscoefficiënt van de vegetatie (-),  $m$  de vegetatiedichtheid (aantal cilinders per  $m^{-2}$ ),  $D$  de vegetatiediameter (m),  $h$  de waterdiepte (m) en  $g$  de zwaartekrachtsversnelling ( $m/s^2$ ). In vergelijking (3) neemt de weerstand toe met toenemende waterdiepte.

Het grote probleem is het vinden van een vergelijking voor de berekening van de weerstand van overstroomde vegetatie. We

kunnen weliswaar tegenwoordig de vegetatieweerstand simuleren met een tamelijk geavanceerd numeriek turbulentiemodel voor de waterbeweging tussen de cilinders, maar wij zochten een geschikte analytische vergelijking.

Wat we hebben gedaan is gebruik gemaakt van een 'data-driven' techniek: die van Genetisch Programmeren (GP). Bij GP gebruik je een algoritme dat zoekt naar formules die de relatie tussen invoergegevens en gewenste uitvoer beschrijven. Het gebruikt hiervoor 'genetische' technieken als overerving en mutatie. Wanneer je het kaf van het koren weet te scheiden hou je een op fysische principes gebaseerde beschrijving over. Zo vind je moeiteloos de wetten van Kepler wanneer je de planeetbanen invoert. En zoals we weten vond Newton daar later de natuurkundige verklaring pas voor.

In ons geval gebruikten we de uitvoer van een numeriek model voor vegetatieweerstand (dus geen metingen, maar rekenresultaten), gegenereerd voor veel verschillende vegetatietypen (lees cilinders), waterdieptes, enz., als invoer in het model en we gebruikten de numeriek berekende weerstand als uitvoer. We kregen een verrassend eenvoudige vergelijking terug. Deze formule hebben we iets bewerkt met onze fysische kennis en dit resulteerde in de volgende vergelijking voor de weerstand van een begroeide waterloop met overstroomde vegetatie:

$$C = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{C_b^2} + \frac{C_D m D k}{2g}}} + \frac{\sqrt{g}}{\kappa} \ln\left(\frac{h}{k}\right) \quad (4)$$

Hierin is  $\kappa$  de constante van Von Kármán (0,4) en  $k$  de vegetatiehoogte (m). Vergelijking (4) bestaat duidelijk uit een doorstroomd gedeelte plus een overstroomd gedeelte.

We hebben natuurlijk getest of deze vergelijking wel klopt met metingen. Daartoe

hebben we uit 10 studies 177 verschillende situaties gevalideerd aan deze vergelijking. Deze experimenten bevatten ook flexibele vegetatie. Het bleek dat bovenstaande vergelijking de experimenten goed kan reproduceren.

Wat we hebben gevonden is een elegante vergelijking die voor veel verschillende situaties toepasbaar is. Een echte ingenieursvergelijking, die nog niet eerder was gevonden, een mooi resultaat dus. Bovendien heeft het ons geleerd wat een krachtige methode genetisch programmeren is.

**Baptist, M.J., V. Babovic, J. Rodríguez Uthurburu, M. Keijzer, R. Uittenboogaard, A. Verweij en A. Mynett (inge-zonden)** On inducing equations for vegetation resistance; in: *Journal of Hydraulic Research*.

**Colebrook, C. F. en C.M. White (1937)** Experiments with fluid-friction in roughened pipes; in: *Proc. Royal Soc. London*, vol 161, pag 367–381.

**Nikuradse, J. (1930)** Turbulente Strömung in nichtkreisförmigen Rohren; in: *Ing-Arch.*, 1(306).

*M.J. Baptist  
Technische Universiteit Delft, Faculteit  
Civiele Techniek en Geowetenschappen,  
Sectie Waterhuishouding  
Leerstoelgroep Hydrologie*