



ALTERRA

WAGENINGEN UR



Verkenning van stromingsweerstanden

De hydraulische ruwheid van enkele natuurlijke uiterwaardvegetaties

Alterra-rapport 2355
ISSN 1566-7197

E.P. Querner en A. Makaske

Verkenning van stromingsweerstand

Dit onderzoek is uitgevoerd met financiering door het ministerie van Economische Zaken, Landbouw & Innovatie (EL&I). Dank aan Denie Augustijn (Universiteit Twente) voor het becommentariëren van de concept versies van dit rapport. Dit rapport is in concept vorm besproken met medewerkers van Rijkswaterstaat.

Helpdeskpraak: K-NLP-033 en K-NLP-040, Projectcode: BO-11-002-003-ALT

Project nummers: 5238312-01,5238812-01 en 5239859-0

Verkenning van stromingsweerstanden

De hydraulische ruwheid van enkele natuurlijke uiterwaardvegetaties

Erik Querner en Bart Makaske

Alterra-rapport 2355

Alterra Wageningen UR
Wageningen, 2012

Referaat

Querner, E.P. en B. Makaske, 2012. *Verkenning van stromingsweerstanden; de hydraulische ruwheid van enkele natuurlijke uiterwaardvegetaties*. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 2355. 38 blz.; 9 fig.; 8 tab.; 16 ref.; 3 bijl.

Om de veiligheid tegen overstromingen in het rivierengebied te waarborgen is een goede doorstroomcapaciteit van het zomer- en winterbed van belang. Rivierkundige maatregelen, zoals uiterwaardverlaging en het graven van een nevengeul, kunnen de doorstroomcapaciteit verbeteren. Bij natuurontwikkeling, daarentegen, kan de afvoercapaciteit van de rivier afnemen door opstuwing als gevolg van een grotere stromingsweerstand. In dit rapport zijn drie alternatieve berekeningsconcepten voor het bepalen van de ruwheid van dergelijke vegetaties toegepast. De berekende ruwheden zijn vergeleken met de ruwheidswaarden die door Rijkswaterstaat (RWS) gehanteerd worden en die zijn vastgelegd in het handboek 'Stromingsweerstand vegetatie in uiterwaarden'. Het blijkt dat bij de berekeningen voor een schematisch dwarsprofiel van de IJssel, de afvoercapaciteit berekend met het RWS-handboek voor de uiterwaarden tussen de 22 en 40% kleiner is dan ingeschat met de alternatieve berekeningsconcepten uit deze studie. In het handboek is voor relatief korte, natuurlijke uiterwaardvegetaties, zoals graslanden en ruigtes, de stromingsweerstand opmerkelijk hoog. Door kalibratie van de stromingsmodellen op het hoogwater van 1995 wordt het waterstandverlagende effect van lagere uiterwaardruwheden weer deels teniet gedaan, omdat de ruwheid van het zomerbed dan zodanig wordt aangepast dat de waterstand en de totale afvoer weer in overeenstemming zijn met de in 1995 bepaalde waarden. Deze handeling is ook uitgevoerd voor de drie alternatieve berekeningsconcepten. Er blijkt ook na kalibratie nog steeds een grotere afvoercapaciteit te zijn door een lagere inschatting van de ruwheid volgens de drie alternatieve berekeningsconcepten (tussen de 3 en 19%). Dit suggereert dat er meer natuurontwikkeling in de uiterwaarden toegestaan zou kunnen worden. Deze studie geeft geen aanleiding om andere concepten voor het berekenen van de afvoer te hanteren, maar geeft wel aan dat voor korte uiterwaardvegetaties, zoals graslanden en ruigtes, het handboek hogere weerstanden hanteert in vergelijking met de alternatieve berekeningsconcepten.

Trefwoorden: stromingsweerstanden, natuurontwikkeling, afvoercapaciteit, uiterwaarden, Nikuradse-wandruwheid

ISSN 1566-7197

Dit rapport is gratis te downloaden van www.wageningenUR.nl/alterra (ga naar 'Alterra-rapporten'). Alterra Wageningen UR verstrekt geen gedrukte exemplaren van rapporten. Gedrukte exemplaren zijn verkrijgbaar via een externe leverancier. Kijk hiervoor op www.rapportbestellen.nl.

© 2012 Alterra (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek)
Postbus 47; 6700 AA Wageningen; info.alterra@wur.nl

- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking van deze uitgave is toegestaan mits met duidelijke bronvermelding.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor commerciële doeleinden en/of geldelijk gewin.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor die gedeelten van deze uitgave waarvan duidelijk is dat de auteursrechten liggen bij derden en/of zijn voorbehouden.

Alterra aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Alterra-rapport 2355

Wageningen, december 2012

Inhoud

Samenvatting	7
1 Inleiding	9
1.1 Achtergrond en probleemstelling	9
1.2 Doelstelling	9
1.3 Opzet rapport	10
2 Stromingsweerstand van uiterwaarden	13
2.1 Stromingsformules	13
2.2 Coëfficiënt van Chézy	14
2.3 Stromingsweerstand vegetatie in uiterwaarden: het RWS-handboek	14
2.4 Alternatieve methoden voor bepaling van de stromingsweerstand van begroeide oppervlakken	16
2.5 Literatuuronderzoek stromingsweerstand	17
3 Analyse van de afvoercapaciteit bij verschillende methoden voor vegetatieruwheidsbepaling	21
3.1 Afvoer voor verschillende vegetaties en waterdiepten	21
3.2 Afvoercapaciteit in een schematisch dwarsprofiel van de IJssel	23
4 Discussie en conclusies	27
Literatuur	29
Bijlage 1 Vergelijking afvoercapaciteit bij verschillende methoden	31
Bijlage 2 Afvoercapaciteit voor schematisch dwarsprofiel IJssel	35
Bijlage 3 Afvoercapaciteit voor dwarsprofiel IJssel na herkalibratie	37

Samenvatting

Om de veiligheid tegen overstromingen in het rivierengebied te waarborgen is een goede doorstroomcapaciteit van het zomer- en winterbed van belang. Maatregelen, zoals uiterwaardverlaging en het graven van een nevengeul, kunnen de doorstroomcapaciteit verbeteren. Bij natuurontwikkeling, daarentegen, kan de afvoercapaciteit van de rivier afnemen door opstuwing als gevolg van een grotere stromingsweerstand van de begroeiing.

Rijkswaterstaat hanteert voor het berekenen van de afvoercapaciteit van de grote rivieren het handboek 'Stromingsweerstand in uiterwaarden' (Van Velzen et al., 2003a, 2003b), hier verder het 'RWS-handboek' genoemd. Hieruit volgen ook de ontwerp-hoogwaterstanden die gebruikt worden voor het ontwerp van veilige dijken. Bij natuurontwikkeling kan de afvoercapaciteit van de rivier afnemen door opstuwing als gevolg van grotere hydraulische ruwheid. Volgens het RWS-handboek gaat de verruiging van graslanden gepaard met een aanzienlijke toename van de hydraulische ruwheid. In deze studie hebben we nader gekeken naar de hydraulische ruwheid van graslanden en ruigtes. Deze vegetatiestructuurtypen spelen een rol in de eerste successiestadia, na herinrichting van uiterwaarden en bij de overgang van agrarisch naar natuurgericht beheer. Een aantal van deze vegetatiestructuurtypen is van groot belang in de Nederlandse bijdrage aan realisatie van Natura 2000, het Europese netwerk van natuurgebieden. Samen vertegenwoordigen ze grote oppervlakten van de uiterwaarden en hun invloed op de doorstroomcapaciteit bij hoogwater is zodoende groot.

Doel van de studie was om te verkennen of de door Rijkswaterstaat gehanteerde hydraulische ruwheden van graslanden en ruigtes realistisch zijn gezien de vegetatiehoogten in het veld en of, op wetenschappelijke gronden, bijstelling van deze ruwheidsnormen overwogen zou moeten worden.

De doorstroomcapaciteit is met behulp van vier concepten uitgewerkt. Allereerst met de ruwheden volgens het RWS-handboek en vervolgens met ruwheden berekend volgens drie alternatieve concepten. In het eerste alternatief wordt de ruwheid van de vegetatie gelijk gesteld aan de vegetatiehoogte. Met de formule van Chézy wordt dan de ruwheidscoëfficiënt C berekend. In het tweede alternatief wordt er verondersteld dat er geen stroming door de vegetatie plaatsvindt, maar alleen door het open deel. Het begroeide gedeelte heeft vooral voor korte vegetaties een geringe invloed op de totale afvoer. Het derde alternatief houdt toepassing van Manning-coëfficiënten uit de internationale literatuur op het gebied van vegetatieruwheid in.

In het RWS-handboek wordt een ruwheid aan de top van de vegetatie verondersteld, die veel groter is dan de vegetatiehoogte. Met name bij waterdiepten tot ca. 2,5 à 3,0 m. Het is de vraag of er hier een conceptueel verschil is tussen de ruwheid van bijvoorbeeld (rots)blokken en een korte vegetatie. Bij bijvoorbeeld rotsblokken veronderstel je de hoogte van de rotsblokken als ruwheid, maar bij vegetatie van bijvoorbeeld 0,4 m hoog wordt voor de ruwheid uitgegaan van ca. 0,84 m. Hierdoor wordt de stromingsweerstand een stuk groter. Als gevolg daarvan neemt de afvoercapaciteit aanmerkelijk af. Voor de in dit rapport gepresenteerde alternatieven liggen de ruwheidswaarden dicht bij de vegetatiehoogte, waardoor een grotere afvoercapaciteit wordt berekend.

Hoe groot zijn nu deze verschillen in doorstroomcapaciteit in de praktijk? Voor een representatief dwarsprofiel van de IJssel met verschillende vegetatietypes is dit uitgerekend. Het blijkt dat de afvoercapaciteit voor de uiterwaarden, berekend met het RWS-handboek, ca. 35% kleiner is dan wanneer ingeschat met de alternatieve concepten 1 en 2 (tabel 7). Bij een inschatting van de stromingsweerstand uit de literatuur en gebruikmakend van de Manning-formule (alternatief 3) is de afvoercapaciteit ca. 22% groter dan wanneer berekend met het

RWS-handboek. Voor het gehele dwarsprofiel (uiterwaarden en zomerbed) ligt het verschil tussen de 10 en 18%. De hydraulische ruimte die een lagere ruwheid van graslanden met zich meebrengt lijkt wel groter dan zij in feite is: door kalibratie van de stromingsmodellen op het hoogwater van 1995 wordt een deel van het waterstandverlagende effect van lagere uiterwaardruwheden weer teniet gedaan. Bij deze herkalibratie wordt de ruwheid van het zomerbed zodanig aangepast dat de waterstand en de totale afvoer weer in overeenstemming zijn met de in 1995 bepaalde waarden. Deze herkalibratieprocedure is ook uitgevoerd en het blijkt dat voor het gehele dwarsprofiel er een verschil is van 2 tot 10%, tussen de afvoercapaciteit berekend met het handboek en die berekend met de alternatieve concepten. Een grotere afvoercapaciteit door een lagere inschatting van de ruwheid zou de mogelijkheid bieden om meer natuurontwikkeling toe te staan in de uiterwaarden. Uitgaande van de ontwerp-afvoernorm voor de IJssel (2400 m³/s), leidt toepassing van berekeningsconcept 1 (ruwheid = vegetatiehoogte) tot een 0,20 m lagere waterstand dan toepassing van het RWS-handboek.

In deze studie zijn alternatieve berekeningsconcepten voor bepaling van de vegetatieruwheid in uiterwaarden gehanteerd om de hieruit volgende afvoeren bij hoogwater te vergelijken met die zoals berekend wanneer gebruik gemaakt wordt van het RWS-handboek. Deze studie geeft geen aanleiding om andere concepten voor het berekenen van de afvoer te hanteren, maar geeft wel aan dat voor korte uiterwaardvegetaties, zoals graslanden en ruigtes, het handboek hogere weerstanden hanteert in vergelijking met de alternatieve berekeningsconcepten.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond en probleemstelling

Om de veiligheid tegen overstromingen in het riviereengebied te waarborgen is een goede doorstroomcapaciteit van het zomer- en winterbed van belang. Maatregelen, zoals uiterwaardverlaging en het graven van een nevengeul, kunnen de doorstroomcapaciteit verbeteren. Bij natuurontwikkeling, daarentegen, kan de afvoercapaciteit van de rivier afnemen door opstuwing als gevolg van grotere hydraulische ruwheid.

Voorgaand onderzoek van Alterra (Makaske en Maas, 2007; Makaske et al., 2011) suggereert dat een verandering van vegetatiebeheer in uiterwaarden al binnen enkele jaren kan leiden tot een groot verlies van doorstroomcapaciteit van het winterbed bij hoogwater. Dit lijkt in belangrijke mate te wijten aan verruiging van productiegraslanden bij een natuurlijker beheer. Volgens het handboek voor vegetatieruwheid in uiterwaarden van Rijkswaterstaat (Van Velzen et al., 2003a, 2003b) gaat de verruiging van graslanden gepaard met een aanzienlijke toename van de hydraulische ruwheid. Omdat het bij graslanden om grote oppervlakten uiterwaardgebied gaat, zijn de effecten van verruiging op de doorstroomcapaciteit ook relatief groot.

In het kader van Ruimte voor de River en NURG (Nadere uitwerking riviereengebied) worden momenteel grote delen van de uiterwaarden van Rijn en Maas, die voorheen in agrarisch beheer waren, onder een meer natuurlijk beheer gebracht. Zodoende zijn de hydraulische effecten van deze verandering in beheer uiterst actueel. Realisatie van natuurdoelen in uiterwaarden mag de doorstroomcapaciteit bij hoogwater niet te zeer schaden; met andere woorden: de hydraulische ruimte voor natuur is beperkt. Voor het vaststellen van de op de korte termijn beschikbare ruimte is het cruciaal dat de ruwheid van diverse typen graslanden en ruigtes juist wordt ingeschat.

Wanneer uitgegaan wordt van de vegetatieruwheden zoals gegeven in het handboek van Rijkswaterstaat (hier verder het RWS-handboek genoemd) is er, ook na vergroting van de afvoercapaciteit bij hoogwater in het kader van Ruimte voor de Rivier, onvoldoende ruimte voor grootschalige ontwikkeling van riviernatuur met bijbehorende successie van vegetaties (Makaske et al., 2011). Met andere woorden: er is weinig overruimte. Extra rivierkundige maatregelen zouden meer ruimte voor riviernatuur kunnen creëren.

Als het RWS-handboek de ruwheden van bijvoorbeeld graslanden en ruigtes zou overschatten, is het mogelijk dat de feitelijke ruimte voor natuur groter is dan nu, op basis van modelberekeningen, wordt verondersteld. In dat geval zouden extra rivierkundige maatregelen voor riviernatuur niet nodig zijn. Hierbij hoort wel de kanttekening dat de hydraulische ruimte die een verlaging van de modelruwheden voor graslanden met zich mee brengt groter lijkt dan zij in feite is: door kalibratie van de stromingsmodellen op het hoogwater van 1995 wordt een deel van het waterstandverlagende effect van lagere uiterwaardruwheden weer teniet gedaan, omdat bij deze kalibratie de ruwheid van het zomerbed in het model zodanig wordt aangepast dat de waterstand en de totale afvoer in overeenstemming zijn met de in 1995 bepaalde waarden. In dit rapport wordt de omvang van deze kalibratie-effecten ook verkend.

1.2 Doelstelling

De doelstelling van deze studie is om te verkennen of de door Rijkswaterstaat gehanteerde hydraulische ruwheden van graslanden en ruigtes realistisch zijn gezien de vegetatiehoogten in het veld en of, op

wetenschappelijke gronden, bijstelling van deze ruweidnormen overwogen zou moeten worden. Deze studie omvat een evaluatie van alternatieve manieren van ruweidmodellering en een verkenning van internationale literatuur op het gebied van vegetatieruweid.

In deze studie wordt de hydraulische ruweid van de volgende vegetatiestructuurtypen (cf. Van Velzen et al., 2003a) geanalyseerd, te weten:

- productiegrasland;
- natuurlijk gras- en hooiland;
- verruigd grasland;
- droge ruigte;
- natte ruigte;
- riet.

Deze structuurtypen spelen een rol in de eerste successiestadia, na herinrichting van uiterwaarden en bij de overgang van agrarisch naar natuurgericht beheer. Een aantal van deze vegetatiestructuurtypen spelen bovendien een rol in de Nederlandse bijdrage aan realisatie van Natura 2000, het Europese netwerk van natuurgebieden. Samen vertegenwoordigen ze grote oppervlakten van de uiterwaarden en hun invloed op de doorstroomcapaciteit bij hoogwater is groot. De figuren 1.1 t/m 1.4 geven een beeld van enkele van deze vegetatiestructuurtypen in de wintersituatie, die maatgevend is voor de ruweidmodellering. De figuren 1.1 en 1.2 laten zien dat er aanzienlijke verschillen in ruweid kunnen bestaan binnen een vegetatiestructuurtype, onder andere als functie van beheer.

1.3 Opzet rapport

In hoofdstuk 2 wordt ingegaan op de stromingsweerstand die het water ondervindt bij begroeiing in de uiterwaarden. Allereerst wordt het concept van overstroomde vegetatie uit het RWS-handboek besproken. Daarnaast komen twee alternatieve methoden aan bod om de stromingsweerstand bij begroeiing te benaderen. Verder worden representatieve stromingsweerstand voor de onderzochte vegetatiestructuurtypen, zoals gegeven in de internationale literatuur, behandeld. In hoofdstuk 3 wordt met behulp van de verschillende concepten de afvoer over verschillende vegetaties voor verschillende waterdiepten berekend. Daarnaast is voor een schematisch dwarsprofiel, representatief voor de IJssel, de totale afvoercapaciteit berekend. Tot slot volgen in hoofdstuk 4 de discussie en conclusies.



Figuur 1.1
Verruigd grasland (niet/nauwelijks begraasd).



Figuur 1.2
Verruigd grasland (begraasd).



Figuur 1.3
Riet langs de oever van de Lek.



Figuur 1.4
Droge ruigte.

2 Stromingsweerstand van uiterwaarden

2.1 Stromingsformules

De afvoercapaciteit van een waterloop of uiterwaard hangt onder meer af van de weerstand die het water ondervindt van bijvoorbeeld waterplanten, oevervegetatie, struiken of bosschages. De stromingsweerstand bepaalt, samen met enkele andere factoren, het waterdoorvoerend vermogen.

In het algemeen wordt de waterafvoer in een waterloop/rivier met begroeiing berekend met behulp van de empirische stromingsformules van Chézy of Manning. Deze formules luiden:

Chézy:

$$v = C R^{1/2} S^{1/2} \quad (1)$$

Manning:

$$v = 1/n R^{2/3} S^{1/2} \quad (2)$$

waarin:

v = stroomsnelheid ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

C = coëfficiënt van Chézy ($\text{m}^{1/2}\cdot\text{s}^{-1}$)

R = hydraulische straal (natte oppervlakte A gedeeld door natte omtrek P) (m)

S = het verhang (-)

n = Manning-coëfficiënt ($\text{s}\cdot\text{m}^{-1/3}$)

In plaats van de weerstandscoefficiënt n wordt in Nederland ook wel de coëfficiënt $k_M (=1/n)$ genomen om de stromingsweerstand te definiëren.

De relatie tussen n , k_M en C is:

$$C = R^{1/6} / n = k_M R^{1/6} \quad (3)$$

waarin:

k_M = stromingsweerstand ($\text{m}^{1/3}\cdot\text{s}^{-1}$)

De coëfficiënten C of n worden bepaald door de zogenaamde Nikuradse wandruwheid (k_N) van het natte profiel te vertalen in een stromingsweerstand met behulp van een vergelijking of via tabellen waarin de waarden van C of n zijn gegeven voor verschillende Nikuradse ruwheden. Voor het berekenen van de C -waarde van een ruwe wand zijn vele vergelijkingen opgesteld. De meest gebruikte vergelijking in Nederland is de 'Delftse formule' (ook wel aangeduid als de formule van Colebrook-White). Deze formule luidt:

$$C = 18 \log (12 R / k_N) \quad (4)$$

waarin:

k_N = (Nikuradse) wandruwheid (m)

Het debiet in de waterloop is dan:

$$Q = A v \quad (5)$$

waarin:

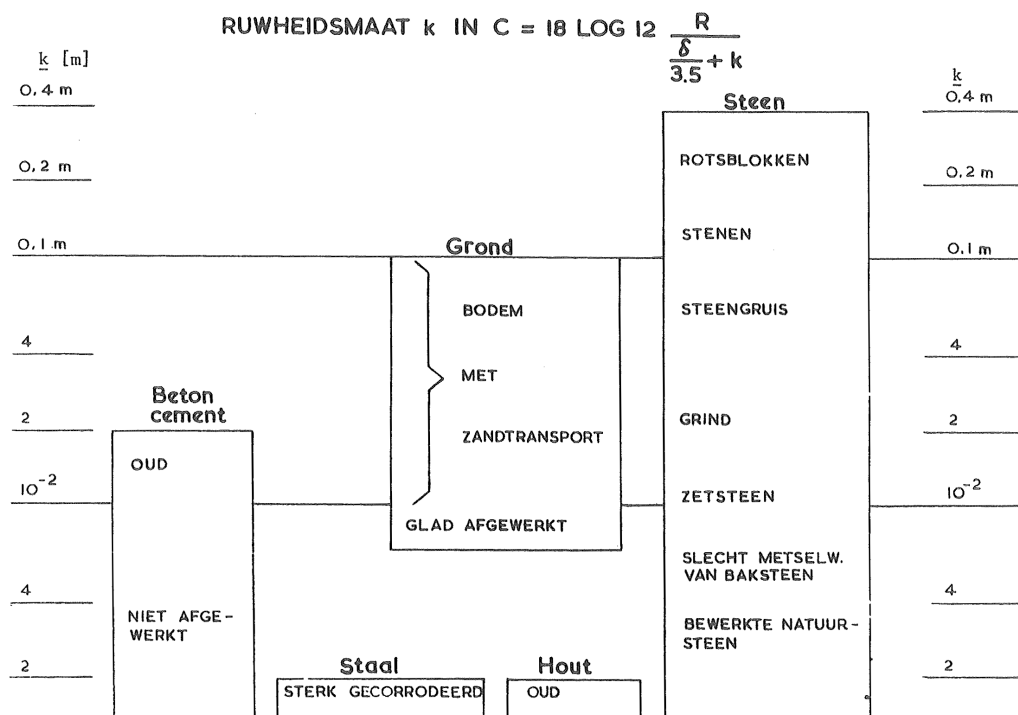
Q = debiet ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

A = natte oppervlakte (m^2)

De gevoeligheid van de stroomsnelheid voor de parameters k_N en n is verschillend. Bij verdubbeling van de k_N -waarde wordt de stroomsnelheid uitgerekend met behulp van de vergelijkingen 1 en 4 ca. 10-20% kleiner. Daarentegen wordt bij een verdubbeling van de n -waarde de stroomsnelheid gehalveerd (Querner, 1985).

2.2 Coëfficiënt van Chézy

In de formule van Chézy wordt de coëfficiënt C bepaald met Vergelijking 4. Hierbij wordt de ruwheidsmaat k_N (Nikuradse wandruwheid) gebruikt, een wandruwheid of oneffenheid (Kraijenhoff van de Leur en Stricker, 1984). In figuur 2.1 zijn voor diverse soorten materialen de benaderde waarden van k_N gegeven. Expliciet wordt aangegeven dat de formule geldt voor onbegroeide leidingen. Zo wordt bij rotsblokken een k_N -waarde gegeven van ca. 0,25 m. Analoog hieraan kun je voor korte vegetatie beredeneren dat een k_N -waarde van bijvoorbeeld 0,1 of 0,2 m realistisch zou om C voor gras- of hooilanden te berekenen.



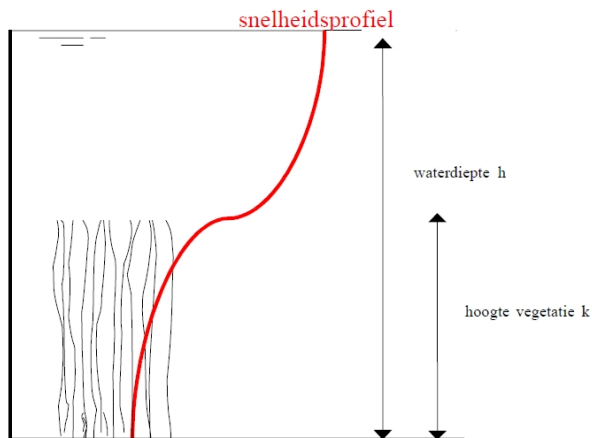
Figuur 2.1

De ruwheidsmaat (k_N) in de 'Delftse formule' voor de Chézy-coëfficiënt voor verschillende wandmaterialen (Kraijenhoff van de Leur en Stricker, 1984).

2.3 Stromingsweerstand vegetatie in uiterwaarden: het RWS-handboek

In opdracht van Rijkswaterstaat is het handboek 'Stromingsweerstand vegetatie in uiterwaarden' opgesteld (Van Velzen et al., 2003a, 2003b). Het handboek geeft de stromingsweerstand van een aantal onderscheiden vegetatiestructuurtypen, en een onderbouwing van de stromingsweerstand, de structureigenschappen van de vegetatie en de parameters die in de weerstandsformules zijn gebruikt.

In dit rapport, gericht op graslanden en ruigtes, analyseren we het concept van de overstroomde vegetatie zoals toegepast in het RWS-handboek. Daarin wordt de door vegetatie beïnvloede stroming opgedeeld in enerzijds de doorstroming door het begroeide deel en anderzijds de waterstroming daarboven (zie figuur 2.2). Door de vegetatie is er een stromingsweerstand tussen de vegetatielaag en de daarboven gelegen waterlaag als gevolg van de ruwheid aan de bovenkant van de vegetatie als gevolg van turbulentie en obstructie. Daarnaast kan de flexibiliteit van overstroomde vegetatie een rol spelen. Door ombuiging onder stromingsdruk reduceert de hoogte van de vegetatie en daarmee de ruwheid. Echter het ombuigen is voor de omstandigheden in de uiterwaarden te verwaarlozen (Klaassen et al., 1999).



Figuur 2.2

Stroomsnelheidsprofiel voor een overstroomde vegetatie (Van Velzen et al., 2003a).

Het snelheidsprofiel voor deze situaties wordt benaderd door een constante stroomsnelheid voor de vegetatielaag en een logaritmisch snelheidsprofiel in de waterlaag. In Van Velzen et al. (2003a) wordt op basis van metingen een analytische oplossing gegeven voor het stromingsprofiel en daaruit is een gemiddelde stromingsweerstand afgeleid. Daarbij wordt gebruik gemaakt van een zekere ruwheid die aan de top van de vegetatie aanwezig is. Voor de representatieve k_v -waarde van deze ruwheid aan de top van de vegetatie, k_v , wordt een gefitte machtsfunctie gebruikt die een maat is voor de turbulentie:

$$k_v = 1,6 k^{0,7} \quad (6)$$

waarin:

k_v = wandruwheid aan de top van de vegetatie (m)
 k = vegetatiehoogte (m)

Deze functie wordt over het gehele bereik van vegetatiehoogten en waterdiepten toegepast om het stroomsnelheidsprofiel te berekenen. Deze analytische oplossing geeft volgens Van Velzen et al. (2003b) voor overstroomde vegetatie een redelijk tot goede benadering van het stroomsnelheidsprofiel en dus de afvoer. De vraag hierbij is: onder welke omstandigheden is de benadering redelijk? Huthoff (2007) geeft aan dat vergelijking (6) vooral voor grotere waterdiepten realistische waarden geeft. In tabel 1 is als voorbeeld voor een aantal vegetatiehoogten de bijbehorende representatieve k_v -waarde voor de top van de vegetatie gegeven. Opmerkelijk is dat voor bijvoorbeeld een vegetatiehoogte van 0,2 m er een representatieve ruwheid aan de top van de vegetatie van 0,52 m wordt gehanteerd. Dus de ruwheid is meer dan twee keer zo groot als de vegetatiehoogte. De verhouding k_v/k is ook weergegeven in tabel 1. Uit Vergelijking 6 blijkt dat bij een

vegetatiehoogte kleiner dan 5 m de ruwheid k_v groter is dan de vegetatiehoogte. Dit is intuïtief slecht te rijmen met de k -waarden weergegeven in figuur 2.1. De ruwheid aan de top van de vegetatie, k_v , is een gefitte parameter. Bij het fitten kunnen mogelijk foute inschattingen van andere parameters in k_v zijn terecht gekomen.

Tabel 1

Representatieve ruwheidswaarden voor de top van de vegetatie (k_v) op basis van de vegetatiehoogte (k) uit Vergelijking 5. Ook de verhouding tussen ruwheid en vegetatiehoogte is gegeven.

k (m)	k_v (m)	k_v/k (-)
0,05	0,20	3,9
0,1	0,32	3,2
0,2	0,52	2,6
0,3	0,69	2,3
0,4	0,84	2,1
0,5	0,98	2,0
1,0	1,60	1,6
2,0	2,60	1,3
4,0	4,22	1,1
6,0	5,61	0,9
8,0	6,86	0,9

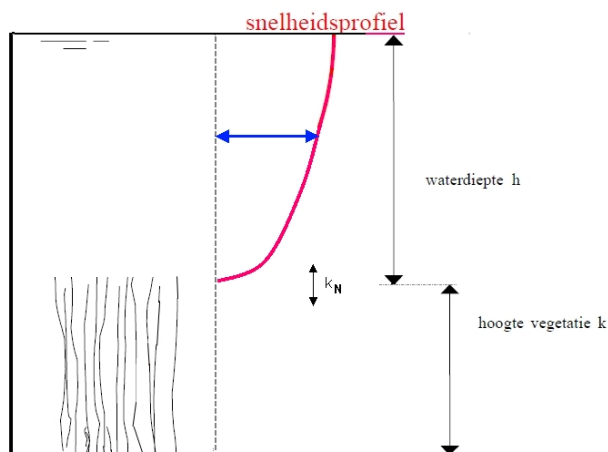
2.4 Alternatieve methoden voor bepaling van de stromingsweerstand van begroeide oppervlakken

Alternatief 1: Ruwheid is gelijk aan vegetatiehoogte

In het RWS-handboek (deel 2) wordt gebruikt gemaakt van Vergelijking 6 om de vegetatiehoogte te vertalen naar een ruwheid aan de top van de vegetatie. Indien voor de ruwheid (k_v) van de vegetatie de vegetatiehoogte wordt gebruikt is de coëfficiënt van Chézy met behulp van Vergelijking 4 uit te rekenen. De verandering in stromingsweerstand ten opzichte van die volgens het RWS-handboek is voor korte vegetaties (graslanden en ruigtes) uitgewerkt in hoofdstuk 3.

Alternatief 2: Geen stroming door de vegetatie

Voor graslanden en ruigtes kan men ook overwegen om de stroming door de vegetatie te verwaarlozen en alleen rekening te houden met een ruwheid aan de top van de vegetatie. Het begroeide gedeelte heeft met name voor korte vegetaties een geringe invloed op de totale afvoer ten opzichte van het open-watergedeelte. In de uiterwaarden is de breedte groot, dus zal de hydraulische straal nagenoeg gelijk zijn aan de waterdiepte, ofwel het waterdeel boven de begroeiing. Voor waterlopen is het verwaarlozen van de afvoer door het begroeide deel onderzocht (Querner, 1993; Querner, 1995). Er wordt alleen met het open-waterdeel gerekend en een constante stromingsweerstand die de ruwheid van de top van de vegetatie beschrijft, zoals weergegeven in figuur 2.3. Deze ruwheid (k_v) aan de top van de vegetatie is door ons ingeschat (zie verder hoofdstuk 3).



Figuur 2.3

Alternatief concept 2, waarin alleen met het open-waterdeel wordt gerekend.

2.5 Literatuuronderzoek stromingsweerstand

Het onderzoek naar de hydraulische ruwheid van vegetatie in Amerika in de periode 1935-1950 was vooral gericht op het bepalen van de stromingsweerstand van, meestal aangelegde, kanalen die begroeid waren met gras. Hierbij ging het er met name om een maximale stroomsnelheid waarbij geen erosie optreedt vast te stellen, en bovendien om de stromingsweerstand te bepalen. Door Palmer en Ree (1947) zijn op basis van uitgebreide metingen, grafieken opgesteld die de stromingsweerstand van vegetatie weergeven. De ruwheidscoëfficiënt van Manning is daarbij gerelateerd aan het product van stroomsnelheid en hydraulische straal. Deze methode is nooit onderbouwd en uit nader onderzoek is gebleken dat de methode alleen voor waterlopen met een groot verhang ($> 1\%$) gebruikt mag worden (Kouwen et al., 1981).

Door Chow (1959) zijn tabellen gegeven waarin voor representatieve begroeiingssituaties de stromingsweerstand is gegeven (zie tabel 2). Verder is in het rapport van het Britse 'Environment Agency, Flood and Coastal Defence Programme' veel onderzoek naar stromingsweerstand opgenomen (Fisher en Dawson, 2003). Hiervan geeft tabel 3 voor een aantal relevante begroeiingen de Manning-waarden. Deze stromingsweerstand zijn wat lager dan die door Chow worden gehanteerd.

Tabel 2

Representatieve stromingsweerstand (Manning-coëfficiënt) uit Chow (1959).

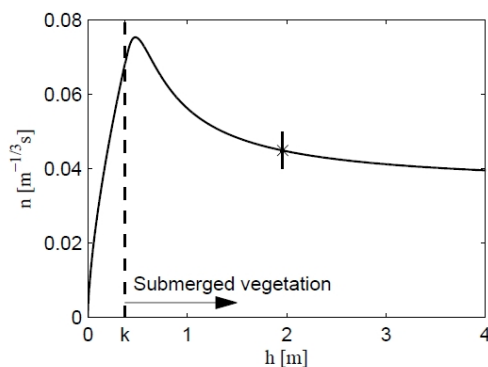
Omschrijving Chow (1959)	n-waarde ($\text{s} \cdot \text{m}^{1/3}$)		
	min	gem.	max.
Short grass	0,025	0,030	0,035
High grass	0,030	0,035	0,050
Brush (heavy weeds)	0,035	0,050	0,070
Medium to dense brush in winter	0,045	0,070	0,110

Tabel 3

Representatieve stromingsweerstand (Manning-coëfficiënt) bij een waterdiepte van ca. 2,5 m uit Fisher en Dawson (2003).

Omschrijving	Hoogte vegetatie (m)	n-waarde ($s \cdot m^{-1/3}$)		
		min.	gem.	max.
Zeer kort gras	0,03	0,018	0,021	0,024,
Kort gras	0,1-0,2	0,022	0,026	0,028
Lang gras	0,5	0,035	0,04	0,045

Door Huthoff (2007) is op basis van metingen in de Nederrijn bij Driel voor de uiterwaarden ook een stromingsweerstand afgeleid. De waterdiepte bedroeg ca. 2,0 m en de gemiddelde hoogte van de vegetatie was 0,37 m. Door Straatsma (2007) werd voor de situatie bij Driel een verhang vastgesteld van $S = 9,2 \cdot 10^{-5}$. Op basis van deze gegevens werd een stromingsweerstand berekend van $n = 0,045$. Figuur 2.4 geeft het verloop van n afhankelijk van de waterdiepte, zoals die met de vergelijking van Huthoff voor de situatie bij Driel is bepaald (Huthoff, 2007). Uit figuur 2.4 blijkt dat bij een toenemende waterdiepte (verhouding waterdiepte/vegetatiehoogte > 3) de Manning-waarde nagenoeg constant blijft.

**Figuur 2.4**

Verloop van Manning-waarde n voor variërende waterdiepten voor een grasland met een ruwheidshoogte van 0,375 m (Huthoff, 2007).

Alternatief 3: Gebruik van Manning-waarden uit de internationale literatuur

Het blijkt dat de stromingsweerstand die in de literatuur zijn gevonden niet veel van elkaar verschillen. Om per vegetatiestructuur in onze berekeningen (hoofdstuk 3) één stromingsweerstand te hanteren, hebben de door Chow (1959) gegeven n -waarden uit (tabel 2) als basis gediend. De omschrijvingen door Chow (tabel 2) zijn gekoppeld aan de vegetatiestructuren gebruikt in het handboek, zoals weergegeven in tabel 4. De Manning-waarden uit tabel 4 zijn in hoofdstuk 3 gebruikt om de afvoercapaciteit te berekenen.

Tabel 4

Representatieve stromingsweerstand (Manning-coëfficiënt n) uit Chow (1959) gekoppeld aan enkele vegetatiestructuurtypen uit Van Velzen et al. (2003a).

Vegetatiestructuurtype	Vegetatie hoogte (m)	Omschrijving Chow (1959)	Gehanteerde n -waarde ($s \cdot m^{-1/3}$)
Productiegrasland	0,06	Short grass (min.)	0,025
Natuurlijk grasland/hooiland	0,1	Short grass (gem.)	0,030
Verruigd grasland	0,2	High grass (gem.)	0,035
Natte ruigte	0,35	Brush (min./gem.)	0,040
Droge ruigte	0,56	Brush (gem.)	0,050
Riet	2,5	Dense Brush	0,100

3 Analyse van de afvoercapaciteit bij verschillende methoden voor vegetatieruwheidsbepaling

Met behulp van de verschillende concepten om de stromingsweerstand uit te drukken, zoals besproken in hoofdstuk 2, is hierna de afvoercapaciteit voor de uiterwaarden berekend. Daarnaast is er voor een dwarsprofiel, representatief voor de IJssel, de totale afvoer berekend.

3.1 Afvoer voor verschillende vegetaties en waterdiepten

Als voorbeeld is de verandering in de doorstroomcapaciteit bij verschillende waterdiepten en vegetatiestructuren uitgewerkt. De doorstroomcapaciteit is met behulp van de vier concepten uitgewerkt:

1. het RWS-handboek;
2. ruwheid vegetatie = vegetatiehoogte (alternatief 1);
3. geen stroming door de vegetatie (alternatief 2);
4. Manning-waarden (n) op basis van literatuurgegevens (alternatief 3).

De volgende vegetatiestructuurtypen zijn in de berekeningen betrokken:

productiegrasland;

- natuurlijk grasland/hooiland;
- verruigd grasland;
- droge ruigte;
- natte ruigte;
- riet.

De afvoercapaciteit (per strekkende meter uiterwaard) is berekend met de verschillende concepten en literatuurgegevens, zoals in de paragrafen 2.3 t/m 2.5 zijn besproken. Er is gebruik gemaakt van de structuurtypen en kenmerkende parameters voor de berekening van de stromingsweerstand van Van Velzen et al. (2003a) (tabel 5). Bij de berekeningen is uitgegaan van een verhang van 0,0001, representatief voor de rivier de IJssel (Makaske en Maas, 2007).

In bijlage 1 zijn de gegevens weergegeven per vegetatiestructuur en voor waterdiepten van 0,5 tot 8 m. In tabel 6 zijn voor twee waterdiepten de afvoeren gegeven. Voor alternatief 2 zijn de ruwheden aan de top van de vegetatie ingeschat als een fractie van de vegetatiehoogte. De hierbij gebruikte waarden zijn per vegetatiestructuur opgenomen in bijlage 1.

Opvallend is dat in het algemeen de afvoer berekend met de drie alternatieve concepten hoger is dan die berekend met het handboek, behalve voor alternatief 3 (Manning) bij droge en natte ruigte. De relatieve verschillen tussen de afvoer volgens het handboek en die volgens de alternatieve concepten worden kleiner met toenemende waterdiepte. De verschillen tussen de drie alternatieve concepten zijn niet zo groot. De verschillen in afvoercapaciteit zijn gerelateerd aan de afvoercapaciteit berekend op basis van het RWS-handboek (weergegeven in de laatste drie kolommen in bijlage 1). De verhouding is het grootst bij een waterdiepte van 0,5 m en neemt langzaam af met toenemende waterdiepte.

Tabel 5

Structuurtypen en kenmerkende parameters voor de berekening van de stromingsweerstand (Van Velzen et al., 2003a).

vegetatiestructuurtype	Vegetatie hoogte	Aangestroomd oppervlak	Weerstand coëfficiënt	Nikuradse zandruwheid bodem	opmerkingen
symbool	k m	A_r $m^2/m^2/m'$	C_d -	k_b m	
pioniervegetatie	0,15	0,15	1,8	0,1	
grassen					
productiegrasland	0,06	45	1,8	0,1	
natuurlijk grasland /hooiland	0,10	12	1,8	0,1	
verruigd grasland	0,20	15	1,8	0,1	
ruigten					
akkerdistel/ brandnetelruigte	0,30	3	1,8	0,1	
droge ruigte	0,56	0,23	1,8	0,1	
dauwbraamruigte	0,50	0,56	1,8	0,1	
harig wilgenroosje ruigte	0,95	0,13	1,8	0,1	
rietruigte	2,00	0,16	1,8	0,1	
moerasvegetatie					
natte ruigte	0,35	0,25	1,8	0,1	25% water; $k_r = 0,05$
zegge	0,30	1,2	1,8	0,1	25% strooisel; $k_r = 0,25$
rietgras	1,00	0,4	1,8	0,1	25% water; $k_r = 0,05$
biezen	0,50	1,2	1,8	0,1	50% water; $k_r = 0,05$
lisdodde	1,50	0,35	1,8	0,1	25% water; $k_r = 0,05$
riet	2,50	0,37	1,8	0,1	25% strooisel; $k_r = 0,25$

De Manning n-waarde is constant verondersteld, maar zoals ook figuur 2.4 aangeeft, zal bij waterdiepten tot ca. 1,0 m de weerstand aanmerkelijk hoger zijn dan de gegeven 'constante' waarden. De inschatting van de n-waarden is tot op zekere hoogte rudimentair. Zoals in paragraaf 2.1 is aangegeven is de n-waarde evenredig met de afvoer, dus een verandering in n-waarde geeft eenzelfde verandering in de afvoer. Bij natte en droge ruigte is de afvoer bij gebruik van de Manning-formule bij 4 m waterdiepte iets kleiner dan de afvoer berekend met het handboek (zie bijlage 1 en tabel 6).

De vraag is waardoor de grote verschillen verklaard worden tussen de afvoer berekend volgens het handboek en de afvoer berekend volgens de drie alternatieve concepten. Mogelijk speelt de manier waarop de in het handboek weergegeven ruwheid van grasland tot stand is gekomen een rol.

In het verleden (tot 1981) werd uitgegaan van een ruwheid (k_N) voor productiegrasland van 7 cm. Deze ruwheid is naar aanleiding van hoogwatermetingen in de jaren 1980 omhoog bijgesteld naar ca. 20 cm (Klaassen et al., 1999). Na kalibratie op metingen bij de Pannerdense Kop tijdens het hoogwater van 1995, is dit verder verhoogd tot ca. 25 cm. Hierbij werd ervan uitgegaan dat de hogere ruwheid nodig was omdat er ook hekjes en heggen in de uiterwaarden aanwezig zijn (Van Velzen, persoonlijke mededeling, april 2011). Deze waarde voor de ruwheid is als leidraad gebruikt bij het formuleren van de vergelijkingen in het handboek.

De eerste vraag hierbij is of bij de kalibratie op het hoogwater van 1995 de ruwheid voor productiegrasland omhoog gegaan is ten koste van de ruwheid voor het zomerbed. De onzekerheid in de ruwheid van het zomerbed en het grote effect daarvan op het totale debiet zou namelijk als resultaat kunnen hebben dat voor de uiterwaarden een hogere ruwheid wordt verondersteld dan hydraulisch aannemelijk is.

De tweede vraag is of de ruwheid van heggen en andere losse elementen niet dubbel wordt geteld in de modellering. In het handboek worden heggen onderscheiden en kunnen de weerstanden hiervan expliciet worden meegenomen. Het handboek geeft niet aan dat bijvoorbeeld bij productiegrasland het niet alleen gaat om de ruwheid van het grasland zelf, maar dat ook hekjes en heggen in de weerstandswaarden zijn verwerkt. Deze onduidelijke situatie zou dubbeltelling in de hand kunnen werken: heggen in de uiterwaarden kunnen expliciet meegenomen worden (via een vegetatiekaart), maar zijn mogelijk al in de weerstandswaarden voor graslanden (deels) in rekening gebracht.

Tabel 6

De afvoercapaciteit van uiterwaarden voor korte uiterwaardvegetaties bij een waterdiepte van 2 en 4 m voor de vier berekeningsconcepten (afvoer per strekkende meter). Bij Alt. 1 en 2 zijn vegetatiehoogten en een ruwheid voor de top van de vegetatie gebruikt (die gegevens zijn weergegeven in bijlage 1).

Vegetatietype	Waterdiepte (m)	Vegetatie- hoogte (m)	Q_{Handboek} (m ³ /s/m)	Alt. 1 $Q_{\text{Vegetatie}}$ (m ³ /s/m)	Alt. 2 $Q_{\text{Open water}}$ (m ³ /s/m)	Alt. 3 Q_{Manning} (m ³ /s/m)
Productiegrasland	2,0		0,99	1,32	1,34	1,27
	4,0	0,06	3,28	4,18	4,33	4,03
Natuurlijk grasland/hooiland	2,0	0,1	0,91	1,21	1,22	1,06
	4,0	0,1	2,96	3,86	4,01	3,36
Verruigd grasland	2,0	0,2	0,74	1,06	1,06	0,91
	4,0	0,2	2,64	3,43	3,67	2,88
Natte ruigte	2,0	0,35	0,71	0,93	0,81	0,79
	4,0	0,35	2,56	3,08	3,09	2,52
Droge ruigte	2,0	0,56	0,54	0,83	0,60	0,63
	4,0	0,56	2,16	2,78	2,66	2,02
Riet	4,0	2,5	0,48	1,85	0,46	1,01
	6,0	2,5	1,76	3,86	2,06	1,98

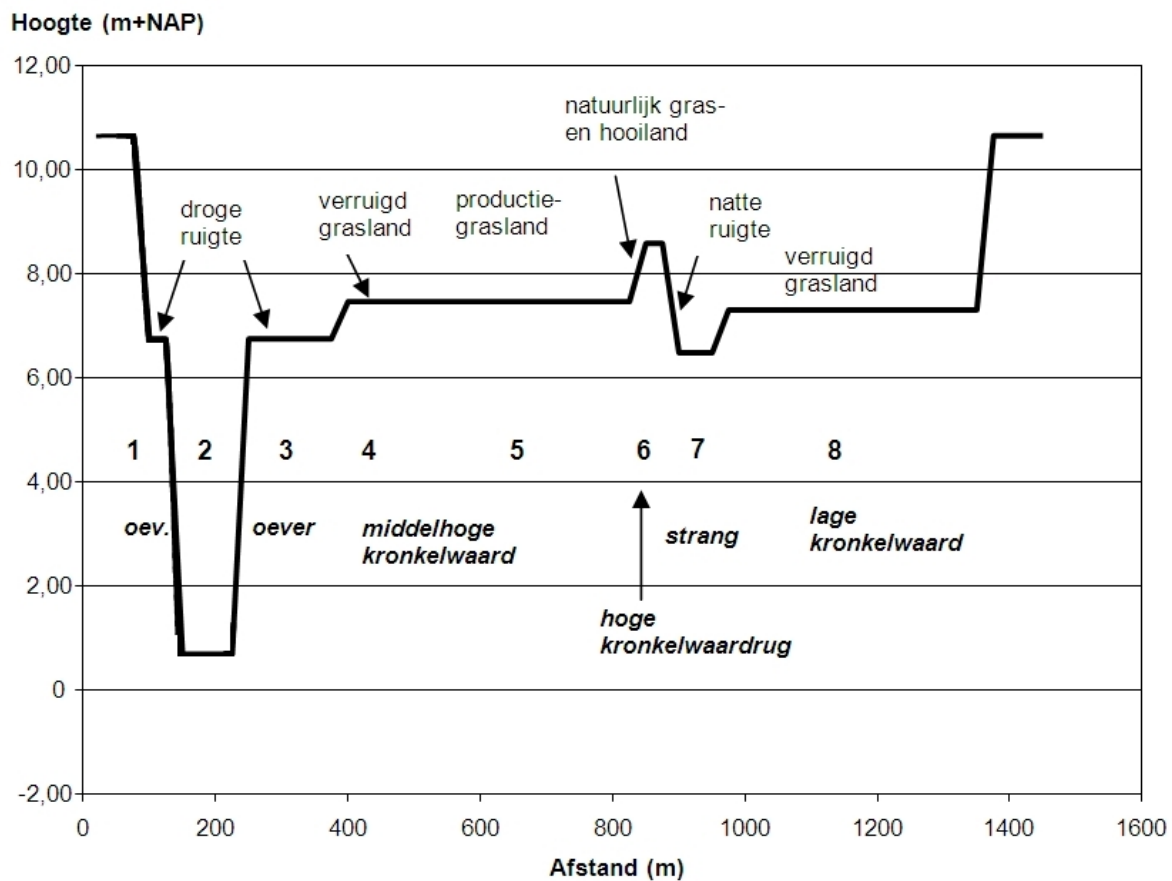
3.2 Afvoercapaciteit in een schematisch dwarsprofiel van de IJssel

In dit onderzoek is gewerkt met een schematische dwarsdoorsnede voor de IJssel, zoals ook bestudeerd door Makaske en Maas (2007). Het dwarsprofiel is opgedeeld in acht zones, weergegeven in figuur 3.1. Per zone is de vegetatiestructuur, de breedte en de waterdiepte weergegeven in bijlage 2. Met behulp van het handboek is de afvoercapaciteit van het dwarsprofiel berekend op 2401 m³/s. Vervolgens is, terwijl de afvoer door het zomerbed gelijk werd gehouden (zone 2 in bijlage 2), met behulp van de drie alternatieve concepten de afvoercapaciteit voor het winterbed berekend. Omdat de afvoercapaciteit bij ieder van de drie alternatieve concepten hoger uitvalt dan wanneer berekend met behulp van het handboek, is de totale afvoercapaciteit

volgens de drie alternatieven ook hoger (tabel 7). Voor de stromingsweerstand is een C-waarde van $51 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ genomen. Deze waarde geldt voor een maatgevende hoogwaterafvoer voor de IJssel tussen Zutphen en Zwolle (WAQUA-invoer IJssel, persoonlijke mededeling C. van den Brink, juni 2012).

Voor het winterbed is de afvoercapaciteit berekend volgens de alternatieve concepten tussen de 22 en 40% hoger dan wanneer berekend volgens het handboek (tabel 7). Met name de alternatieven 1 en 2 (ruwheid vegetatie = vegetatiehoogte en open-waterconcept) geven een verschil van meer dan 35%. De totale afvoercapaciteit (winter- en zomerbed samen) is tussen de 10 en 18% hoger volgens de alternatieve concepten (tabel 7).

In tabel 7 is aangegeven dat bij alternatief 1 (ruwheid = vegetatiehoogte) de afvoercapaciteit van de IJssel $2832 \text{ m}^3/\text{s}$ bedraagt. De daarbij behorende waterdiepten voor het dwarsprofiel in figuur 3.1 staan in bijlage 2. Als je bij dit berekeningsconcept uitgaat van een afvoer van $2400 \text{ m}^3/\text{s}$, dan blijkt dat de waterstand ca. 0,30 m lager uitkomt, zoals weergegeven in bijlage 2.



Figuur 3.1

Schematische dwarsdoorsnede door de uiterwaarden van de IJssel met daarin acht morfologische zones met verschillende vegetatiestructuren (naar Makaske en Maas, 2007).

Tabel 7

Afvoercapaciteit voor het schematisch dwarsprofiel in figuur 3.1 voor de drie alternatieve concepten.

Totale afvoer dwarsprofiel (m ³ /s) per berekeningsconcept				
	Handboek	Alt. 1 Vegetatiehoogte	Alt. 2 Open water	Alt. 3 Manning
	2401	2832	2794	2633
Verhouding ten opzichte van totale afvoer	1,0	1,18	1,16	1,10
Verhouding ten opzichte van afvoer winterbed	1,0	1,40	1,36	1,22

Herkalibratie weerstand zomerbed

De hydraulische ruimte die een eventuele verlaging van de ruwheden voor graslanden met zich mee brengt lijkt groter dan zij in feite is: door herkalibratie van de stromingsmodellen op het hoogwater van 1995 wordt een deel van het waterstandverlagende effect van lagere uiterwaardruwheden weer teniet gedaan. Hieronder wordt verkend wat het effect van deze herkalibratie is op de bovenstaande berekeningen van de afvoercapaciteit voor het schematische dwarsprofiel. Bij herkalibratie wordt de ruwheid van het zomerbed in het model zodanig aangepast dat de waterstand en de totale afvoer weer in overeenstemming zijn met de in 1995 bepaalde waarden. In het rapport van Mosselman en Van Velzen (2011), waarin de uitgangspunten en conclusies van deze studie worden besproken, is dit geïllustreerd met behulp van voorbeeldberekeningen. Echter in dat rapport is met een oorspronkelijke C-waarde voor het zomerbed gerekend van 42 m^{1/2}·s⁻¹ (dus vóór de herkalibratie). Zo'n C-waarde voor het zomerbed lijkt op basis van diverse praktijkervaringen te ruw. In overleg met Rijkswaterstaat en Deltares is daarom besloten om een C-waarde van 51 m^{1/2}·s⁻¹ te hanteren (persoonlijke mededeling Schropp en Mosselman, juni 2012) die eerder voor kalibratie van de IJsselafvoer op het hoogwater van 1995 is afgeleid. Als de berekening van Mosselman en Van Velzen (2011, bijlage A) wordt herhaald met 51 m^{1/2}·s⁻¹ als uitgangswaarde voor de weerstand van het zomerbed, dan levert de kalibratie een C-waarde van 43,5 in plaats van 33,7 m^{1/2}·s⁻¹ op. Deze weerstand van 43,5 m^{1/2}·s⁻¹ voor het zomerbed is gebruikt voor de afvoerberekening van het schematisch dwarsprofiel uit figuur 3.1, waarbij de waterdiepten uit bijlage 2 niet zijn veranderd om het effect van de herkalibratie op de afvoercapaciteit in beeld te kunnen brengen. Wij hebben de gevolgde kalibratieprocedure eenmalig uitgevoerd om een inschatting te maken van de gevolgen van zo'n kalibratie. Om deze kalibratie uit te voeren voor elk berekeningsconcept lijkt ons conceptueel niet juist, omdat de ruwheid van het zomerbed veronderstelt wordt vrij constant te zijn en dus niet zou moeten variëren met geringe verschillen in winterbedruwheid.

In tabel 8 is aangegeven wat de afvoercapaciteiten na deze herkalibratie zijn bij de verschillende berekeningsconcepten (voor details zie bijlage 3). Door het ruwere zomerbed is de totale afvoercapaciteit voor de verschillende berekeningsconcepten iets verminderd. De afvoer van het zomerbed bedraagt nu 1128 m³/s (bijlage 3); voor de herkalibratie was dit nog 1322 m³/s (bijlage 2, zone 2). Voor de drie alternatieve berekeningsmethoden is de verhouding van de berekende afvoer ten opzichte van de ontwerpafvoer van 2400 m³/s ook aangegeven in tabel 8. Deze verhouding is lager dan vóór de herkalibratie (zie tabel 7). De totale afvoercapaciteit berekend volgens de alternatieve concepten is tussen de 2 en 10% hoger dan die berekend volgens het handboek (tabel 8). Met name de alternatieven 1 en 2 (ruwheid vegetatie = vegetatiehoogte en open-waterconcept) geven een verschil van ca. 8 tot 10%. De afvoercapaciteit van het winterbed is tussen de 3 en 19% hoger volgens de alternatieve concepten (tabel 8).

Het blijkt dus dat door de herkalibratieprocedure de verschillen in afvoercapaciteit zoals berekend volgens de alternatieve concepten enerzijds, en zoals berekend volgens het handboek anderzijds, kleiner worden. Omdat

bij de herkalibratie een grotere weerstand van het zomerbed aangenomen wordt, moet er meer water door het winterbed. Doordat de alternatieve berekeningsconcepten daar een lagere weerstand opleveren wordt de totale afvoer toch nog aanzienlijk groter dan 2400 m³/s.

Als bij het alternatief berekeningsconcept 1 (ruwheid = vegetatiehoogte) wordt uitgegaan van een afvoer van ca. 2400 m³/s, dan blijkt dat de waterstand 0,20 m lager uitkomt dan in de oorspronkelijke berekening (zie ook bijlage 3). Vóór de herkalibratie was deze verlaging nog 0,30 m (bijlage 2). Dit voorbeeld geeft aan dat ook bij toepassing van herkalibratie de hier gepresenteerde alternatieve berekeningsconcepten voor de weerstand van uiterwaardvegetatie leiden tot een significante verlaging van de gemodelleerde maatgevende hoogwaterstanden.

Tabel 8

Afvoercapaciteit voor het schematisch dwarsprofiel in figuur 3.1 na herkalibratie van de zomerbedruwheid.

	Totale afvoer dwarsprofiel (m ³ /s) per berekeningsconcept			
	Handboek	Alt. 1 Vegetatiehoogte	Alt. 2 Open water	Alt. 3 Manning
	2206	2638	2600	2439
Verhouding t.o.v. totale afvoer van 2400 m ³ /s	-	1,10	1,08	1,02
Verhouding t.o.v. afvoer winterbed (1272 m ³ /s)	-	1,19	1,16	1,03

4 Discussie en conclusies

In dit onderzoek zijn drie alternatieve berekeningsconcepten gebruikt om de doorstroomcapaciteit te berekenen. Deze berekeningen geven verschillen die hieronder worden toegelicht. De alternatieve berekeningen uit deze studie zijn (op verzoek van de opdrachtgever) besproken met de auteurs van het RWS-handboek (momenteel werkzaam bij de Waterdienst van Rijkswaterstaat en bij Deltares). Hun reacties zijn betrokken in onderstaande discussie van de resultaten van deze studie.

Het RWS-handboek werd aanvankelijk gezien als een voorlopig product (persoonlijke mededeling Van Velzen, april 2011), vooral met betrekking tot de graslanden, maar wordt momenteel in de praktijk van Ruimte voor de Rivier als een vrij definitief wetenschappelijk product beschouwd.

In het RWS-handboek wordt een vegetatieruwheidswaarde verondersteld, die veel groter is dan de vegetatiehoogte, met name bij waterdiepten tot ca. 2,5-3,0 m. Het is de vraag of er een conceptueel verschil is tussen de ruwheid van bijvoorbeeld (rots)blokken en een korte vegetatie. Dit is intuïtief moeilijk te begrijpen. Het blijkt bij berekeningen voor een schematisch dwarsprofiel van de IJssel, zoals uitgevoerd in deze studie, dat de afvoercapaciteit berekend met het RWS-handboek voor alleen de uiterwaarden ca. 35-40% kleiner is dan ingeschat met de in deze studie gepresenteerde alternatieve concepten 1 en 2 (ruwheid vegetatie = vegetatiehoogte en open-waterconcept). Bij een inschatting van de stromingsweerstand op basis van literatuurgegevens en gebruikmakend van de Manning-formule is de afvoercapaciteit voor de uiterwaarden in het schematisch dwarsprofiel ca. 22% groter dan wanneer berekend met het RWS-handboek. Wordt het gehele dwarsprofiel in beschouwing genomen, dan zijn de verschillen in afvoercapaciteit tussen de 10 en 18% in het voordeel van de gepresenteerde alternatieven. Na een (voorlopige) herkalibratie op de afvoer van 1995, een standaardprocedure bij modellering van maatgevende hoogwaterstanden (zie paragraaf 3.2), blijken de alternatieve concepten 1 en 2 nog steeds 8 tot 10% hogere afvoercapaciteiten voor het schematische dwarsprofiel op te leveren. Dit vertaalt zich voor berekeningsconcept 1 in een 0,20 m lagere waterstand bij maatgevend hoogwater. Een grotere afvoercapaciteit door een lagere inschatting van de ruwheid zou de mogelijkheid bieden om meer natuurontwikkeling toe te staan in de uiterwaarden.

De vraag is waardoor de grote verschillen verklaard worden tussen de afvoercapaciteit berekend volgens het handboek en de afvoercapaciteit berekend volgens de drie alternatieve concepten. Mogelijk speelt de manier waarop de in het handboek aangegeven ruwheid van grasland tot stand is gekomen een rol. In het verleden (tot 1981) werd uitgegaan van een ruwheid (k_N) voor productiegasland van 7 cm. Deze ruwheid is na hoogwatermetingen in de jaren 1980 omhoog bijgesteld naar ca. 20 cm. Na kalibratie op metingen bij de Pannerdense Kop tijdens het hoogwater van 1995, is dit verder verhoogd tot ca. 25 cm. Hierbij werd ervan uitgegaan dat de hogere ruwheid nodig was omdat er ook ruwheidselementen als hekjes, heggen en sloten in de uiterwaarden aanwezig zijn die niet afzonderlijk hydraulisch gemodelleerd konden worden (Van Velzen persoonlijke mededeling, april 2011). De waarde van 25 cm voor de ruwheid van grasland is als leidraad gebruikt bij het formuleren van de vergelijkingen in het handboek.

De eerste vraag hierbij is of bij de kalibratie op het hoogwater van 1995, waarbij de ruwheden van uiterwaard en zomerbed in overeenstemming werden gebracht met de gemeten waterstanden, de gemodelleerde ruwheid voor productiegasland omhoog is gegaan ten koste van de gemodelleerde ruwheid voor het zomerbed. De onzekerheid in de ruwheid van het zomerbed kan geleid hebben tot een onderschatting van de zomerbedruwheid. Een relatief kleine onderschatting van de ruwheid van het zomerbed leidt tot een relatief grote toename van de doorstroomcapaciteit van het zomerbed. Op basis hiervan zou de uiterwaardruwheid

relatief hoog worden ingeschat, om de totale doorstroming door zomer- en winterbed in overeenstemming te houden met de meetwaarden. De vraag is of de kalibratie niet geleid heeft tot een hogere uiterwaardruwheid dan hydraulisch aannemelijk is.

De tweede vraag is of de ruwheid van heggen, afrasteringen, sloten en andere losse elementen niet dubbel wordt geteld in de huidige hoogwatermodellering. In het RWS-handboek worden bijvoorbeeld heggen apart onderscheiden en hun stromingsweerstand kan expliciet worden gemodelleerd. Het handboek geeft niet aan dat bijvoorbeeld bij productiegrasland het niet alleen gaat om de ruwheid van het grasland zelf, maar dat ook andere ruwheidselementen in de ruwheidswaarden zijn verwerkt. Deze onduidelijke situatie zou dubbeltelling in de hand kunnen werken, zeker wanneer hydraulische modellen steeds verfijnder worden en losse ruwheidselementen steeds beter in de modellering kunnen worden betrokken.

Er wordt momenteel overwogen om de vegetatie-indeling voor ruwheidsbepaling grover van opzet te maken. Dit zou betekenen dat de 30 klassen in het handboek teruggebracht zouden worden naar vier tot zeven geaggregeerde ruwheidsklassen. Dit zou, wanneer wordt uitgegaan een relatief hoge vegetatieruwheid, voor de mogelijkheden van natuurontwikkeling in de uiterwaarden verstreckende gevolgen kunnen hebben. Gezien de onzekerheden rond de ruwheden van korte vegetaties en gezien de relatief grote onderlinge verschillen in ruwheid lijkt het niet verantwoord om productiegraslanden, natuurlijke graslanden en ruigtes in één klasse op te nemen. Hun onderlinge verhoudingen in het veld zijn immers wisselend, zowel in tijd als ruimte. Daarom kunnen ze niet worden vertegenwoordigd door één gemiddelde ruwheidswaarde.

In deze studie zijn alternatieve berekeningsconcepten voor bepaling van de vegetatieruwheid in uiterwaarden gehanteerd om de hieruit volgende afvoeren bij hoogwater te vergelijken met die zoals berekend wanneer gebruik gemaakt wordt van het RWS-handboek. Uit dit onderzoek kunnen onderstaande conclusies worden getrokken.

1. Drie alternatieve berekeningsconcepten die in deze studie verkend zijn suggereren een lagere hydraulische ruwheid van korte vegetaties dan de nu gehanteerde waarden volgens het RWS-handboek.
2. Omdat er op dit moment nog onvoldoende wetenschappelijke zekerheid over de werkelijke hydraulische ruwheid van uiterwaardvegetaties is, kan er nog geen keuze gemaakt worden tussen de verschillende ruwheidsmodellen/berekeningsconcepten. Daarom is er geen aanleiding om het RWS-handboek los te laten, ondanks tekortkomingen.
3. Veldmetingen tijdens hoogwater zijn dringend nodig om de werkelijke ruwheid van korte vegetaties beter te kunnen inschatten. Omdat korte vegetaties grote oppervlakten in de uiterwaarden innemen is hun hydraulische ruwheid van grote invloed op de hoogwaterstanden. De huidige onzekerheid in de werkelijke ruwheid van de korte vegetaties leidt tot belangrijke onzekerheid in de gemodelleerde maatgevende hoogwaterstanden die de basis vormen voor beslissingen over rivierkundige maatregelen, waarmee hoge kosten gemoeid zijn. Meetprotocollen voor veldmetingen tijdens hoogwater liggen klaar (Mol, 2005). Totdat dit hoogwater zich voordoet, blijft er onzekerheid over de ruwheidswaarden voor korte uiterwaardvegetaties (graslanden en ruigtes).
4. In de momenteel gehanteerde hydraulische ruwheden van korte vegetaties is impliciet de ruwheid van andere losse elementen in de uiterwaard (zoals sloten, afrasteringen en heggen) opgenomen. Om 'dubbeltelling' in de hydraulische modellering te voorkomen zou het goed zijn dit expliciet in het handboek te vermelden en de extra ruwheid uit de 'handboekruwheid' van korte vegetaties te verwijderen wanneer deze afzonderlijk in de modellen kan worden opgenomen.
5. Het uiteindelijke effect van een veranderde ruwheid van graslanden vertaalt zich deels door in andere waterstanden bij maatgevend hoogwater, maar wordt 'gedempt' door een herkalibratie op hydraulische gegevens van het hoogwater van 1995, met de ruwheid van het zomerbed als kalibratieparameter. Echter, een herkalibratie zou kunnen leiden tot onrealistische waarden voor de stromingsweerstand van het zomerbed. Deze verkenning geeft aan dat ondanks de dempende effecten van deze herkalibratie de hier gepresenteerde alternatieve inschattingen van de ruwheden van korte vegetaties kunnen leiden tot significant lagere berekende waterstanden voor maatgevend hoogwater.

Literatuur

- Chow, V.T., 1959. Open Channel Hydraulics. Mc Graw-Hill Book Co. Inc., New York, 680 p.
- Fisher, K. en H. Dawson, 2003. Reducing Uncertainty in River Flood Conveyance: Roughness Review. Environment Agency, Flood and Coastal Defence Programme, Engeland. Project W5A-057. 209 p.
- Huthoff, F., 2007. Modeling Hydraulic Resistance of Floodplain Vegetation. Universiteit Twente, Proefschrift, 162 p.
- Klaassen, G.J., C. Stolker, E. van Velzen en H. Verhey, 1999. Naar een ruwheidsvoorspeller voor moerasvegetatie op basis van riet en gras. WL/Delft Hydraulics en RWS/RIZA, RIZA werkdokument: 2000.166X.
- Kouwen, N., Li, R.M. en D.B. Simons, 1981. Flow resistance in vegetated water waterways. Trans ASAE 24(3), pp. 684-690,698.
- Kraaijenhoff van de Leur, D.A. en J.N.M. Stricker, 1984. Hydraulica I. Vakgroep Hydraulica en Afvoerhydrologie, Landbouwniversiteit Wageningen, collegedictaat (onder vermelding: 'Overgenomen van Technische Hogeschool, Afd. Weg en Waterbouw').
- Makaske, B. en G.J. Maas, 2007. Veiligheid en beheer van natuurgebieden in Ruimte voor de Rivier. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1624, 39 p.
- Makaske, B., Maas, G.J., Brink, C. van den en H.P. Wolfert, 2011. The influence of floodplain vegetation succession on hydraulic roughness: Is ecosystem rehabilitation in Dutch embanked floodplains compatible with flood safety standards? AMBIO 40 (4), pp. 370-376.
- Mol, J.W., 2005. Draaiboek ten behoeve van het uitvoeren van ADCP metingen op de Waal bij hoge afvoer. Aqua Vison BV, Utrecht, 12 p.
- Mosselman, E. en E. van Velzen, 2011. Hydraulische ruwheid van gras in uiterwaarden; Reactie op Alterra-rapport. Delft, Deltares, rapport nr. 1205585-000,
- Ree, W. O., and Palmer, V. J., 1949. Flow of water in channels protected by vegetative linings, U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service Technical Bulletin No. 967.
- Querner, E.P., 1985. De invloed van vegetatie op het waterdoorvoerend vermogen van een waterloop. Wageningen, ICW Nota 1600, 58 p.
- Querner E.P., 1993. Aquatic weed control within an integrated water management framework. Landbouwniversiteit Wageningen, Proefschrift. Ook verschenen als Report 67. Wageningen, DLO-Staring Centrum (SC-DLO), 203 p.
- Querner E.P., 1995. De stromingsweerstand en de berekening van de afvoer in begroeide waterlopen. Het Waterschap 80(9), pp. 350-355.
- Straatsma, M. 2007. Hydrodynamic roughness of floodplain vegetation - Air-borne parameterization and field validation. Proefschrift, Universiteit van Utrecht, 174 p.
- Velzen, E.H. van, P. Jesse, P. Cornelissen en H. Coops, 2003a. Stromingsweerstand in uiterwaarden; deel 1 handboek versie 1-2003 RIZA rapport 2003.028 RIZA, Arnhem, 134 p.
- Velzen, E.H. van, P. Jesse, P. Cornelissen en H. Coops, 2003b. Stromingsweerstand in uiterwaarden; deel 2 achtergronddocument versie 1-2003. RIZA rapport 2003.029 RIZA, Arnhem, 124 p.

Bijlage 1 Vergelijking afvoercapaciteit bij verschillende methoden

Productie- grasland	Water- diepte	RWS-handboek					Alt. 1: ruwheid = vegetatiehoogte			Alt. 2: alleen open-waterdeel				Alt. 3: Manning m.b.v. literatuur			Afvoer t.o.v. RWS- handboek		
		Vegetatie- hoogte	C _r	k _N	V _c	Q _{ch}	C _{veg}	V _{veg}	Q _{veg}	Ruwheid top	C _{open}	V _{open}	Q _{open}	n	V _m	Q _m	Alt. 1 Q _{veg} /Q _{ch}	Alt. 2 Q _{open} /Q _{ch}	Alt. 3 Q _m /Q _{ch}
Productie- grasland	0.5	0.06	22	0.38	0.16	0.08	36.0	0.25	0.13	0.04	38.2	0.25	0.11	0.025	0.25	0.13	1.64	1.43	1.62
	1.0	0.06	28	0.31	0.28	0.28	41.4	0.41	0.41	0.04	44.1	0.43	0.40	0.025	0.40	0.40	1.48	1.44	1.43
	1.5	0.06	33	0.29	0.40	0.61	44.6	0.55	0.82	0.04	47.4	0.57	0.82	0.025	0.52	0.79	1.35	1.35	1.30
	2.0	0.06	35	0.28	0.49	0.99	46.8	0.66	1.32	0.04	49.8	0.69	1.34	0.025	0.63	1.27	1.34	1.36	1.28
	3.0	0.06	38	0.27	0.66	1.97	50.0	0.87	2.60	0.04	53.0	0.91	2.67	0.025	0.83	2.50	1.32	1.35	1.26
	4.0	0.06	41	0.26	0.82	3.28	52.3	1.05	4.18	0.04	55.3	1.10	4.33	0.025	1.01	4.03	1.27	1.32	1.23
	5.0	0.06	43	0.25	0.96	4.81	54.0	1.21	6.04	0.04	57.1	1.27	6.27	0.025	1.17	5.85	1.26	1.30	1.22
	6.0	0.06	44	0.25	1.08	6.47	55.4	1.36	8.15	0.04	58.5	1.43	8.47	0.025	1.32	7.93	1.26	1.31	1.23
	7.0	0.06	46	0.24	1.22	8.52	56.6	1.50	10.49	0.04	59.7	1.57	10.92	0.025	1.46	10.25	1.23	1.28	1.20
	8.0	0.06	47	0.24	1.33	10.63	57.7	1.63	13.05	0.04	60.8	1.71	13.60	0.025	1.60	12.80	1.23	1.28	1.20
Natuurlijk grasland /hooiland	Water- diepte	Vegetatie- hoogte	C _r	k _N	V _c	Q _{ch}	C _{veg}	V _{veg}	Q _{veg}	Ruwheid top	C _{open}	V _{open}	Q _{open}	n	V _m	Q _m	Q _{veg} /Q _{ch}	Q _{open} /Q _{ch}	Q _m /Q _{ch}
	0.5	0.1	18	0.7	0.13	0.06	32.0	0.23	0.11	0.06	34.3	0.22	0.09	0.030	0.21	0.10	1.78	1.36	1.65
	1.0	0.1	25	0.52	0.25	0.25	37.4	0.37	0.37	0.06	40.6	0.39	0.35	0.030	0.33	0.33	1.50	1.39	1.33
	1.5	0.1	28	0.48	0.34	0.51	40.6	0.50	0.75	0.06	44.0	0.52	0.73	0.030	0.44	0.66	1.45	1.42	1.27
	2.0	0.1	32	0.44	0.45	0.91	42.8	0.61	1.21	0.06	46.4	0.64	1.22	0.030	0.53	1.06	1.34	1.34	1.17
	3.0	0.1	35	0.41	0.61	1.82	46.0	0.80	2.39	0.06	49.7	0.85	2.46	0.030	0.69	2.08	1.31	1.35	1.14
	4.0	0.1	37	0.39	0.74	2.96	48.3	0.97	3.86	0.06	52.1	1.03	4.01	0.030	0.84	3.36	1.30	1.35	1.14
	5.0	0.1	40	0.39	0.89	4.47	50.0	1.12	5.59	0.06	53.8	1.19	5.84	0.030	0.97	4.87	1.25	1.31	1.09
	6.0	0.1	41	0.38	1.00	6.03	51.4	1.26	7.56	0.06	55.3	1.34	7.92	0.030	1.10	6.60	1.25	1.32	1.10
	7.0	0.1	42	0.38	1.11	7.78	52.6	1.39	9.75	0.06	56.5	1.48	10.24	0.030	1.22	8.54	1.25	1.32	1.10
	8.0	0.1	43	0.375	1.22	9.73	53.7	1.52	12.15	0.06	57.6	1.62	12.78	0.030	1.33	10.67	1.25	1.31	1.10

Productie- grasland	Water- diepte	RWS-handboek					Alt. 1: ruwheid = vegetatiehoogte			Alt. 2: alleen open-waterdeel				Alt. 3: Manning m.b.v. literatuur			Afvoer t.o.v. RWS- handboek		
		Vegetatie- hoogte	C _r	k _N	V _c	Q _{ch}	C _{veg}	V _{veg}	Q _{veg}	Ruwheid top	C _{open}	V _{open}	Q _{open}	n	V _m	Q _m	Alt. 1 Q _{veg} /Q _{ch}	Alt. 2 Q _{open} /Q _{ch}	Alt. 3 Q _m /Q _{ch}
	0.5	0.2	10	1.8	0.07	0.04	26.6	0.19	0.09	0.08	29.8	0.16	0.05	0.035	0.18	0.09	2.66	1.38	2.55
	1.0	0.2	18	1.2	0.18	0.18	32.0	0.32	0.32	0.08	37.4	0.33	0.27	0.035	0.29	0.29	1.78	1.49	1.59
	1.5	0.2	23	1	0.28	0.42	35.2	0.43	0.65	0.08	41.2	0.47	0.61	0.035	0.37	0.56	1.53	1.45	1.33
	2.0	0.2	26	0.9	0.37	0.74	37.4	0.53	1.06	0.08	43.8	0.59	1.06	0.035	0.45	0.91	1.44	1.44	1.23
	3.0	0.2	30	0.8	0.52	1.56	40.6	0.70	2.11	0.08	47.2	0.79	2.21	0.035	0.59	1.78	1.35	1.42	1.14
	4.0	0.2	33	0.75	0.66	2.64	42.8	0.86	3.43	0.08	49.6	0.97	3.67	0.035	0.72	2.88	1.30	1.39	1.09
	5.0	0.2	35	0.7	0.78	3.91	44.6	1.00	4.99	0.08	51.4	1.13	5.41	0.035	0.84	4.18	1.27	1.38	1.07
	6.0	0.2	37	0.7	0.91	5.44	46.0	1.13	6.76	0.08	52.9	1.27	7.39	0.035	0.94	5.66	1.24	1.36	1.04
	7.0	0.2	38	0.7	1.01	7.04	47.2	1.25	8.74	0.08	54.2	1.41	9.60	0.035	1.05	7.32	1.24	1.36	1.04
	8.0	0.2	39	0.7	1.10	8.82	48.3	1.37	10.92	0.08	55.2	1.54	12.03	0.035	1.14	9.14	1.24	1.36	1.04
Natte ruigte	Water- diepte	Vegetatie- hoogte	C _r	k _N	V _c	Q _{ch}	C _{veg}	V _{veg}	Q _{veg}	Ruwheid top	C _{open}	V _{open}	Q _{open}	n	V _m	Q _m	Q _{veg} /Q _{ch}	Q _{open} /Q _{ch}	Q _m /Q _{ch}
	0.5	0.35	11	1.3	0.08	0.04	22.2	0.16	0.08	0.15	30.9	0.25	0.16	0.040	0.25	0.25	1.54	0.90	1.39
	1.0	0.35	18	1.25	0.18	0.18	27.6	0.28	0.28										
	1.5	0.35	22	1.08	0.27	0.40	30.8	0.38	0.57										
	2.0	0.35	25	0.98	0.35	0.71	33.1	0.47	0.93										
	3.0	0.35	29	0.87	0.50	1.51	36.2	0.63	1.88										
	4.0	0.35	32	0.79	0.64	2.56	38.5	0.77	3.08										
	5.0	0.35	34	0.75	0.76	3.80	40.2	0.90	4.50										
	6.0	0.35	36	0.72	0.88	5.29	41.6	1.02	6.12										
	7.0	0.35	37	0.7	0.98	6.85	42.8	1.13	7.93										
	8.0	0.35	38	0.69	1.07	8.60	43.9	1.24	9.93										
	0.5	0.56	9	2	0.06	0.03	18.5	0.13	0.07	0.20	25.6	0.17	0.07	0.050	0.20	0.20	2.00	0.62	1.67
	1.0	0.56	12	2.7	0.12	0.12	24.0	0.24	0.24										
	1.5	0.56	17	2.2	0.21	0.31	27.1	0.33	0.50										
	2.0	0.56	19	2	0.27	0.54	29.4	0.42	0.83										
	3.0	0.56	24	1.7	0.42	1.25	32.5	0.56	1.69										

Productie- grasland	Water- diepte	RWS-handboek					Alt. 1: ruwheid = vegetatiehoogte			Alt. 2: alleen open-waterdeel				Alt. 3: Manning m.b.v. literatuur			Afvoer t.o.v. RWS- handboek		
		Vegetatie- hoogte	C _r	k _N	V _c	Q _{ch}	C _{veg}	V _{veg}	Q _{veg}	Ruwheid top	C _{open}	V _{open}	Q _{open}	n	V _m	Q _m	Alt. 1 Q _{veg} /Q _{ch}	Alt. 2 Q _{open} /Q _{ch}	Alt. 3 Q _m /Q _{ch}
	4.0	0.56	27	1.4	0.54	2.16	34.8	0.70	2.78	0.20	41.7	0.77	2.66	0.050	0.50	2.02	1.29	1.23	0.93
	5.0	0.56	30	1.25	0.67	3.35	36.5	0.82	4.09	0.20	43.7	0.92	4.08	0.050	0.58	2.92	1.22	1.22	0.87
	6.0	0.56	32	1.2	0.78	4.70	38.0	0.93	5.58	0.20	45.2	1.06	5.74	0.050	0.66	3.96	1.19	1.22	0.84
	7.0	0.56	33	1.15	0.87	6.11	39.2	1.04	7.25	0.20	46.6	1.18	7.61	0.050	0.73	5.12	1.19	1.25	0.84
	8.0	0.56	34	1.1	0.96	7.69	40.2	1.14	9.10	0.20	47.7	1.30	9.68	0.050	0.80	6.40	1.18	1.26	0.83
Riet	Water- diepte	Vegetatie- hoogte	C _r	k _N	V _c	Q _{ch}	C _{veg}	V _{veg}	Q _{veg}	Ruwheid top	C _{open}	V _{open}	Q _{open}	n	V _m	Q _m	Q _{veg} /Q _{ch}	Q _{open} /Q _{ch}	Q _m /Q _{ch}
	0.5	2.5	7	2	0.05	0.02	6.8	0.05	0.02										
	1.0	2.5	5	6	0.05	0.05	12.3	0.12	0.12										
	1.5	2.5	4	10	0.05	0.07	15.4	0.19	0.28										
	2.0	2.5	4	15	0.06	0.11	17.7	0.25	0.50										
	3.0	2.5	4	22	0.07	0.21	20.9	0.36	1.08	0.75	16.3	0.11	0.06	0.100	0.13	0.20	3.86	0.00	2.67
	4.0	2.5	6	21	0.12	0.48	23.1	0.46	1.85	0.75	24.8	0.30	0.46	0.100	0.25	1.01	4.42	0.00	2.81
	5.0	2.5	9	18	0.20	1.01	24.8	0.56	2.78	0.75	28.8	0.46	1.14	0.100	0.29	1.46	5.21	0.28	3.00
	6.0	2.5	12	16	0.29	1.76	26.3	0.64	3.86	0.75	31.5	0.59	2.06	0.100	0.33	1.98	3.85	0.95	2.10
	7.0	2.5	14	14	0.37	2.59	27.5	0.73	5.09	0.75	33.4	0.71	3.19	0.100	0.37	2.56	2.76	1.13	1.45
	8.0	2.5	16	12	0.45	3.62	28.5	0.81	6.45	0.75	35.0	0.82	4.51	0.100	0.40	3.20	2.19	1.17	1.12
																	1.96	1.23	0.99
																	1.78	1.25	0.88

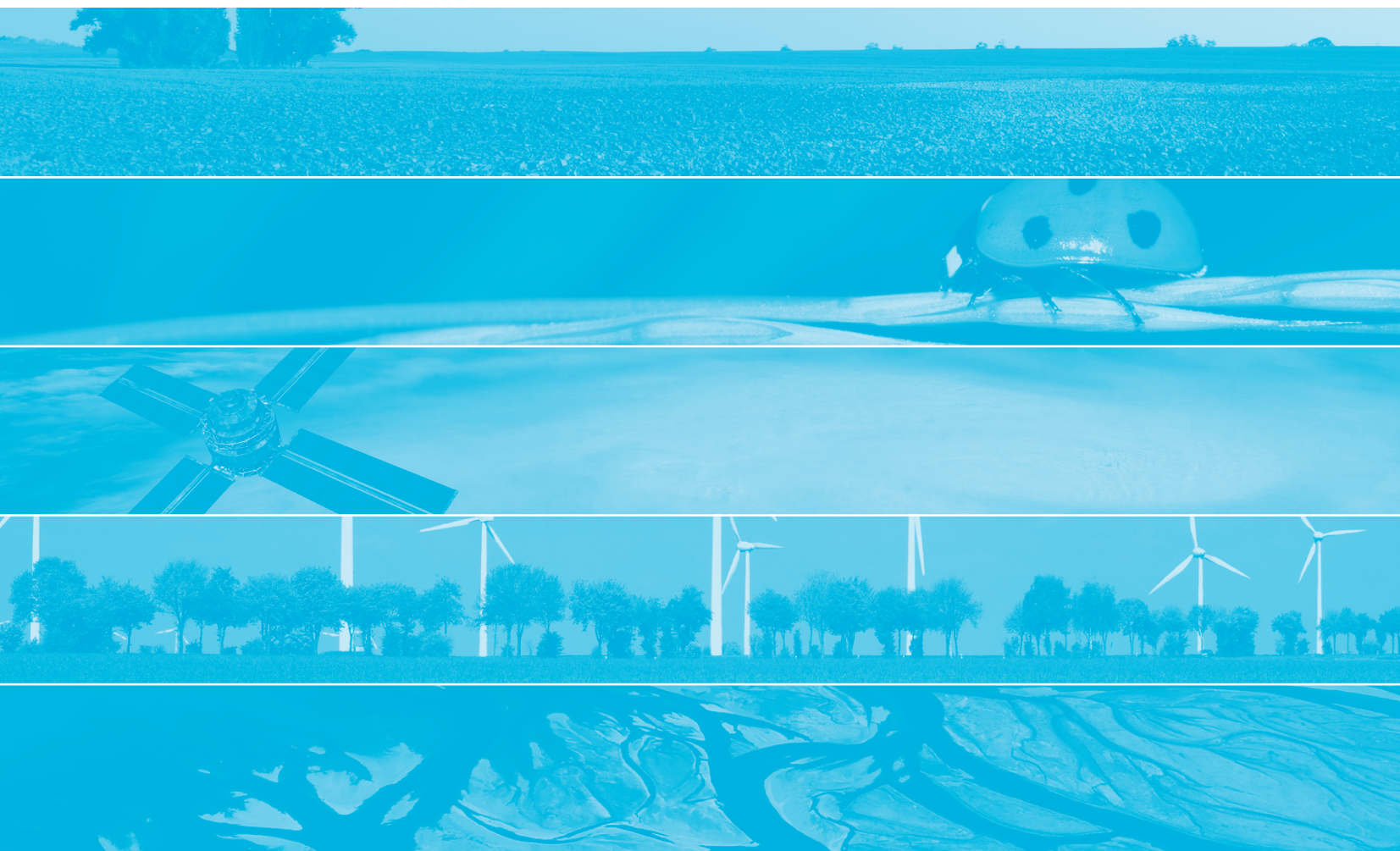
Eenheden: 'waterdiepte', 'vegetatiehoogte', k_N en 'ruwheid top' in m; C_r, C_{veg} en C_{open} in m^{0.5}/s; V_c, V_{veg}, V_{open} en V_m in m/s; Q_{ch}, Q_{veg}, Q_{open} en Q_m in m³/s; n in s·m^{-1/3}; Q_{veg}/Q_{ch}, Q_{open}/Q_{ch} en Q_m/Q_{ch} dimensieloos. Punt als decimaalteken.

Bijlage 2 Afvoercapaciteit voor schematisch dwarsprofiel IJssel

Zone	Vegetatie-structuur	Breedte (m)	Waterdiepte (m)	Chézy-waarde (m ^{0,5} /s)	V _{ch} (m/s)	Q _{handboek} (m ³ /s)	Q _{vegetatie} (m ³ /s)	Q _{open water} (m ³ /s)	Q _{Manning} (m ³ /s)
1	Droge ruigte	50	2,70	23	0,38	50,9	71,1	60,2	52,9
2	Open water	100	8,76	51	1,51	1322,1	1322,1	1322,1	1322,1
3	Droge ruigte	150	2,70	23	0,38	152,8	213,4	180,6	158,7
4	Verruigd grasland	50	1,99	26	0,37	36,4	53,2	53,1	45,6
5	Prod. grasland	400	1,99	35	0,49	391,8	532,6	540,7	510,5
6	Natuurlijk gras en hooiland	50	0,87	23	0,21	9,3	15,3	13,8	13,7
7	Natte ruigte (homogeen)	75	2,96	29	0,50	111,0	139,9	134,1	116,0
8	Verruigd grasland	400	2,14	26	0,38	326,5	484,4	489,3	413,8
Totale breedte									
Totale afvoer						2401	2832	2794	2633
Waterspiegel verlaagd met:			0,30 m	Afvoer	capaciteit:	2066	2412	2354	2262
			0,20 m			2153	2540	2488	2376

Bijlage 3 Afvoercapaciteit voor dwarsprofiel IJssel na herkalibratie

Zone	Vegetatie- structuur	Breedte (m)	Waterdiepte (m)	Chézy- Waarde (m ^{0,5} /s)	V _{ch} (m/s)	Q _{handboek} (m ³ /s)	Q _{vegetatie} (m ³ /s)	Q _{open water} (m ³ /s)	Q _{Manning} (m ³ /s)	
1	Droge ruigte	50	2,70	23	0,38	50,9	71,1	60,2	52,9	
2	Open water	100	8,76	43,5	1,29	1127,6	1127,6	1127,6	1127,6	
3	Droge ruigte	150	2,70	23	0,38	152,8	213,4	180,6	158,7	
4	Verruigd grasland	50	1,99	26	0,37	36,4	53,2	53,1	45,6	
5	Prod. grasland	400	1,99	35	0,49	391,8	532,6	540,7	510,5	
6	Natuurlijk gras en hooiland	50	0,87	23	0,21	9,3	15,3	13,8	13,7	
7	Natte ruigte (homogeen)	75	2,96	29	0,50	111,0	139,9	134,1	116,0	
8	Verruigd grasland	400	2,14	26	0,38	326,5	484,4	489,3	413,8	
Totale breedte										
Totale afvoer		1275					2206	2638	2600	2439
Waterspiegel verlaagd met:			0,20 m	Afvoer	capaciteit:	2042	2400	2350	2229	



Alterra is onderdeel van de internationale kennisorganisatie Wageningen UR (University & Research centre). De missie is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen UR bundelen negen gespecialiseerde en meer toegepaste onderzoeksinstituten, Wageningen University en hogeschool Van Hall Larenstein hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 40 vestigingen (in Nederland, Brazilië en China), 6.500 medewerkers en 10.000 studenten behoort Wageningen UR wereldwijd tot de vooraanstaande kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen natuurwetenschappelijke, technologische en maatschappijwetenschappelijke disciplines vormen het hart van de Wageningen Aanpak.

Alterra Wageningen UR is het kennisinstituut voor de groene leefomgeving en bundelt een grote hoeveelheid expertise op het gebied van de groene ruimte en het duurzaam maatschappelijk gebruik ervan: kennis van water, natuur, bos, milieu, bodem, landschap, klimaat, landgebruik, recreatie etc.

Meer informatie: www.alterra.wur.nl