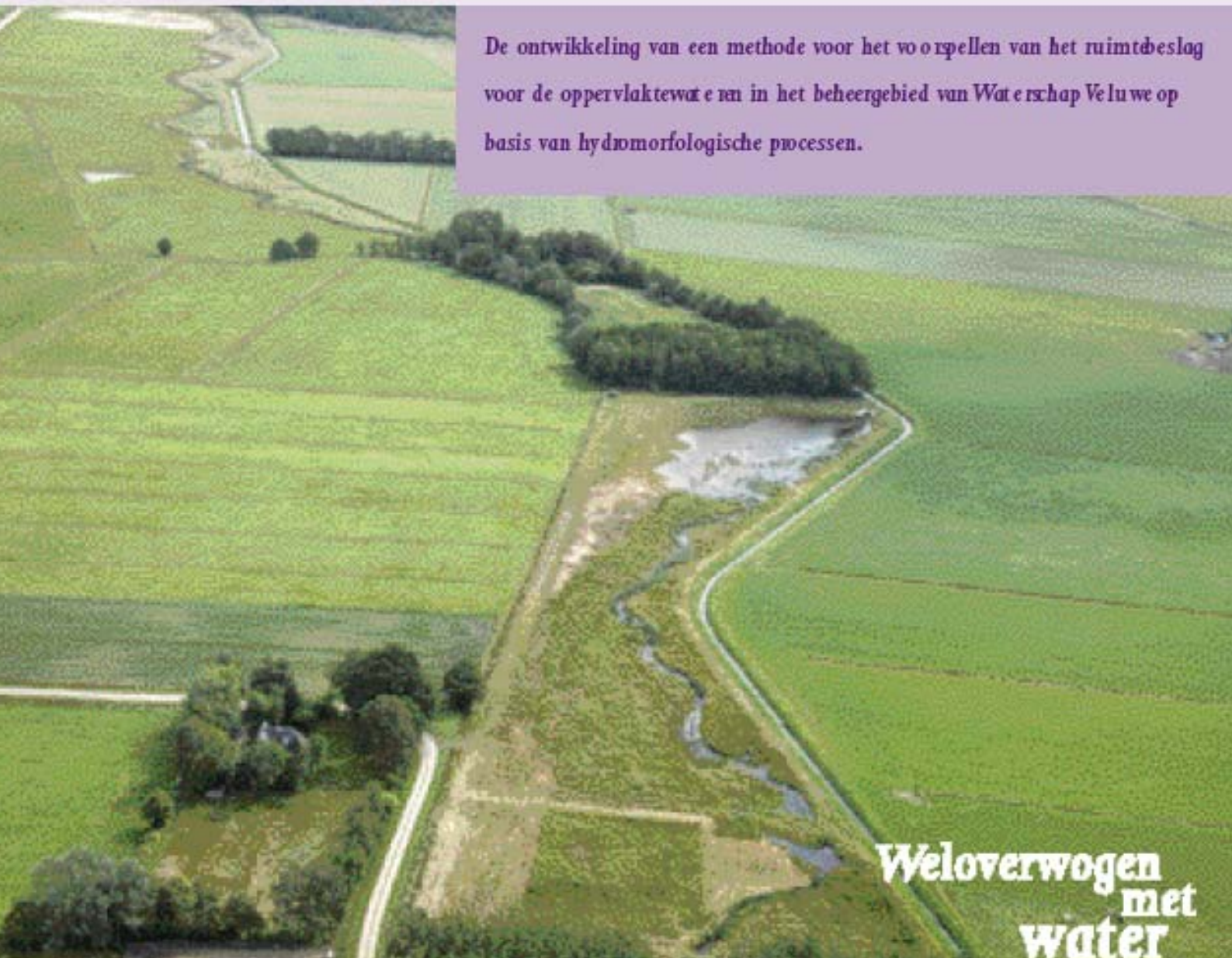




Waterschap Veluwe

# Ruimte voor veerkrachtige oppervlaktewater systemen



De ontwikkeling van een methode voor het voorspellen van het ruimtebeslag voor de oppervlaktewateren in het beheergebied van Waterschap Veluwe op basis van hydromorfologische processen.

Weloverwogen  
met  
water



## MSC-THESIS

Projectnaam: **Ruimte voor veerkrachtige oppervlaktewatersystemen**  
*De ontwikkeling van een methode voor het voorspellen van het ruimtebeslag voor de oppervlaktewateren in het beheergebied van Waterschap Veluwe op basis van hydromorfologische processen.*

Auteur: R.M.C.L. Neuteboom Spijker  
Datum: November 2004  
Status: Definitief

Opdrachtgever: Waterschap Veluwe  
P.R. Massink, Hoofd afdeling Planvorming  
Steenbokstraat 10  
Postbus 4142  
7320 AC Apeldoorn



## **Ruimte voor veerkrachtige oppervlaktewatersystemen**

*De ontwikkeling van een methode voor het voorspellen van het ruimtebeslag voor de oppervlaktewateren in het beheergebied van Waterschap Veluwe op basis van hydromorfologische processen.*

Thesis voorgelegd aan  
Larenstein University of Professional Education  
Ter gedeeltelijke beantwoording van de eisen voor de graad van

Master in Project & Process Management  
(in Land & Water)

Door  
ing. R.M.C.L. Neuteboom Spijker

November, 2004  
Apeldoorn, Nederland

© Waterschap Veluwe 2004. Alle rechten voorbehouden



## VOORWOORD

Met dit rapport neem ik u mee op mijn ontdekkingsreis in de fascinerende wereld van de hydromorfologische processen en patroonvormen. Dit is de wereld waarin slingerende en kolkende beken en rivieren, de afvoer van water en stoffen met zo min mogelijk moeite tot hun hoogste doel hebben verheven. Het wetenschappelijk onderzoek naar deze hydromorfologische processen en patroonvormen, heeft vanaf de jaren zestig van de vorige eeuw een vlucht genomen. Desondanks zijn deze natuurlijke fenomenen, vanuit een wetenschappelijk perspectief, nog steeds gehuld in een schijnbaar ondoordringbare nevel van geheimzinnigheid. Het blijkt dat de ruimtelijke hydromorfologische patronen vrijwel met geen enkele zekerheid nauwkeurig zijn te voorspellen. Dit houdt vooral verband met de (te) grote complexiteit aan ruimtelijke en temporele factoren, relaties (chaos) en terugkoppelmechanismen. De vlindertheorie van Lorenz is hiervan een bekend voorbeeld.

Stromende wateren kunnen hierdoor waarschijnlijk het best gezien worden als dynamische verschijnselen waarbij allerlei fysiologische reguleringsprocessen een evenwicht in structuur en functioneren in stand houden (zelforganisatie), ondanks veranderingen in in- en externe omstandigheden. Deze holistische benadering ligt ten grondslag aan vrijwel alle hydromorfologische concepten waarin verondersteld wordt dat stromende wateren een dynamisch evenwicht handhaven/nastreven vanuit spontane zelforganisatie. Er is echter nog geen brede algemene overeenstemming over de bestaande hydromorfologische concepten die het “hoe en waarom vraagstuk” kunnen verklaren van de morfologie van waterlopen.

Met dit onderzoek is op basis van bestaande concepten een nieuwe methode ontwikkeld door de combinatie van bestaande vergelijkingen uit hydromorfologische en cultuurtechnische ontwerprichtlijnen. Ik hoop dat u als lezer dit op een aangename wijze duidelijk wordt en u inziet dat de weg die ik hiervoor met veel plezier heb afgelegd een meanderende is geweest. Echter met het grote verschil tot mijn studieobject, dat het mij niet is gelukt dit te doen met zo min mogelijk moeite. Voor de begeleiding en inspiratie tijdens al mijn meanderingen in het labyrint van draaikolken, stroomversnellingen, aanzandingen, en verdiepingen, wil ik in het bijzonder bedanken Jan Palte, Pieter Massink en Johan Kabout.

Gefascineerd over dit onderwerp hoop ik hierover in de toekomst nog veel te kunnen ontdekken. Ik nodig u uit hiervoor met mij contact op te nemen.

Romeo Neuteboom Spijker  
*Waterschap Veluwe*







## INHOUDSOPGAVE

	<i>pag.</i>
<b>VOORWOORD .....</b>	<b>7</b>
<b>SAMENVATTING .....</b>	<b>13</b>
<b>1 INLEIDING.....</b>	<b>1</b>
1.1 AANLEIDING EN ACHTERGROND.....	1
1.2 DOELSTELLING.....	2
1.3 CONCEPTUEEL KADER .....	4
1.4 VRAAGSTELLING.....	8
1.5 AANPAK .....	9
1.6 LEESWIJZER .....	10
<b>2 CONCEPTUEEL MODEL .....</b>	<b>13</b>
2.1 VEERKRACHTMODEL.....	13
2.2 MORFOLOGIE .....	14
2.2.1 <i>Patroon</i> .....	16
2.2.2 <i>Dwarsprofiel</i> .....	17
2.3 HYDROMORFOLOGISCHE PROCESSEN EN FACTOREN.....	18
2.3.1 <i>Erosie, sedimenttransport en sedimentatie</i> .....	18
2.3.2 <i>Concept van schuifspanning</i> .....	18
2.3.3 <i>Concept van gelijkmatig energieverbruik en stromingsenergie</i> .....	19
2.3.4 <i>Concept van dynamisch evenwicht</i> .....	21
2.3.5 <i>Concept van dominante afvoer</i> .....	23
2.4 DISCUSSIE .....	23
2.5 CONCLUSIE .....	26
<b>3 HYDROMORFOLOGISCHE KARAKTERISTIEKEN BEHEERGEBIED WATERSCHAP VELUWE .....</b>	<b>29</b>
3.1 MAAIVELDVERHANG.....	29
3.2 BODEMSAMENSTELLING.....	30
3.3 HYDROLOGIE .....	30
3.4 DISCUSSIE .....	32
3.5 CONCLUSIE .....	34

<b>4</b>	<b>METHODIEK VOOR DE BEPALING VAN DE BOVENBREEDTE EN DE MEANDERBREEDTE.....</b>	<b>37</b>
4.1	KEUZE VAN EEN ONTWERPMETHODIEK .....	37
4.1.1	<i>Drie ontwerpmethodieken.....</i>	37
4.1.2	<i>Discussie.....</i>	39
4.1.3	<i>Conclusie .....</i>	40
4.2	NADERE UITWERKING VAN EMPIRISCHE METHODES.....	41
4.2.1	<i>Bepaling bovenbreedte .....</i>	41
4.2.2	<i>Bepaling meanderbreedte .....</i>	42
4.2.3	<i>Discussie.....</i>	42
4.2.4	<i>Conclusie .....</i>	42
<b>5</b>	<b>TOEPASSING METHODIEK: 2 PRAKTIJKVOORBEELDEN.....</b>	<b>49</b>
5.1	STROOMGEBIED VELDBEEK .....	49
5.1.1	<i>Invoergegevens .....</i>	49
5.1.2	<i>Resultaten .....</i>	50
5.2	STROOMGEBIED VOORSTERBEEK.....	50
5.2.1	<i>Invoergegevens .....</i>	50
5.2.2	<i>Resultaten .....</i>	50
5.3	DISCUSSIE.....	51
5.4	CONCLUSIE .....	54
<b>6</b>	<b>RELEVANTIE VOOR WATERSCHAP VELUWE .....</b>	<b>57</b>
	<b>LITERATUUR.....</b>	<b>59</b>
	<b>BIJLAGE A: STROOMGEBIEDEN.....</b>	<b>65</b>
	<b>BIJLAGE B: KENNISTABEL EMPIRISCHE VERGELIJKINGEN.....</b>	<b>69</b>

**LIJST VAN FIGUREN:**

FIGUUR 1.1: POSITIONERING VAN DE VEERKRACHTSTRATEGIE EN DE THESIS IN BELEIDSMATIGE CONTEXT .....	5
FIGUUR 1.2: VEERKRACHTSTRATEGIE. GERICHT OP HET HERSTEL VAN HET ZELFREGULEREND VERMOGEN VAN OPPERVLAKTEWATERSYSTEMEN TOT MORFOLOGISCHE VERANDERING. ....	7
FIGUUR 1.3: DE RUIMTELIJK RELEVANTE CRITERIA: BOVENBREEDTE (B) EN MEANDERBREEDTE (M). ....	8
FIGUUR 1.4: LEESWIJZER .....	11
FIGUUR 2.1: VEERKRACHTMODEL .....	14
FIGUUR 2.2: HYDROMORFOLOGISCH RANGORDEMODEL (BEWERKT NAAR KNIGHTON (1998), VERDONSCHOT ET AL (1995), WOLFERT (2001) EN FISRWG (2001)). ....	15
FIGUUR 2.3: RELATIES TUSSEN DE VIER HOOFDPATROONTYPEN EN DE STURENDE FACTOREN. BEWERKT NAAR VOORBEELD VAN KNIGHTON (1998) EN MAIDMENT (1992). ....	17
FIGUUR 2.4: BELANGRIJKSTE STURENDE FACTOREN VAN HET DYNAMISCH EVENWICHT (LANE ALLUVIAL CHANNEL EQUILIBRIUM). ....	22
FIGUUR 2.5: KWALITATIEVE RELATIES EN VERANDERINGSRICHTING TUSSEN DE MORFOLOGISCHE KENMERKEN (GEARCEERD) EN DE STURENDE FACTOREN ( $Q_w$ EN $Q_s$ ). ....	22
FIGUUR 2.6: MEANDERPARAMETERS [NAAR: LEOPOLD ET AL, 1964; FISRWG, 2001]. ....	26
FIGUUR 2.7: HET HYDROMORFOLOGISCHE SYSTEEM VAN DE BOVEN- EN MEANDERBREEDTE. ....	27
FIGUUR 3.1: RELATIE TUSSEN DE GEMIDDELD JAARLIJKS HOOGSTE AFVOER EN HET AANTAL STROOMGEBIEDEN. ....	31
FIGUUR 4.1: MODEL VOOR DE BEPALING VAN DE BOVENBREEDTE EN DE MEANDERBREEDTE. ....	43

**LIJST VAN TABELLEN:**

TABEL 5.1: KRITISCHE MAATGEVENDE AFVOER VOOR SPECIFIEKE STROMINGSENERGIE VAN $10 \text{ W m}^{-2}$ . ....	51
TABEL 5.2: GEVOELIGHEIDSANALYSE BOVENBREEDTE. ....	52
TABEL 5.3: GEVOELIGHEIDSANALYSE MEANDERBREEDTE. ....	53



## SAMENVATTING

Voorliggend onderzoeksrapport gaat over de ruimtelijke vertaling van een waterhuishoudkundige beleidsstrategie. Het is opgesteld in het kader van de versterking van de relatie tussen de beleidsvelden water en ruimtelijke ordening. Dit onderzoeksrapport is uitgevoerd voor de opleiding Master in Project & Process Management, in opdracht van Waterschap Veluwe.

### **Aanleiding & context**

Aanleiding voor Waterschap Veluwe tot opdrachtverlening voor dit onderzoek is het ontbreken van een instrumentarium waarmee het ruimtebeslag kan worden bepaald, dat noodzakelijk is voor het instandhouden en herstellen van veerkrachtige oppervlaktewatersystemen.

- Het instandhouden en herstellen van veerkrachtige watersystemen is in de vierde Nota waterhuishouding [Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1998], een belangrijke beleidsstrategie om het functioneren van watersystemen verder te verbeteren en een duurzaam gebruik daarvan te kunnen blijven garanderen. Bij Waterschap Veluwe neemt deze veerkrachtstrategie ook een centrale plaats in binnen het waterbeleidsveld, door de opname in het waterbeheerplan en in de strategische stroomgebiedvisie (Waterschap Veluwe, 2001& 2002).
- Het voorspellen van het ruimtebeslag voor de veerkrachtstrategie is voor Waterschap Veluwe van belang om in het Watertoetsproces een goed onderbouwd wateradvies te kunnen geven aan gemeentes. Een goede onderbouwing van dat wateradvies is voor de waterschappen van groot belang, omdat zij verantwoordelijk zijn voor de kwaliteit van het advies en voor vergoeding van de daaruit voortkomende schades, als later blijkt dat het advies niet juist is geweest.

### **Doelstelling & vraagstelling**

Dit onderzoek heeft tot doel een methode te ontwikkelen waarmee Waterschap Veluwe het (planimetrische) ruimtebeslag kan voorspellen, dat noodzakelijk is voor het instandhouden en herstellen van veerkrachtige oppervlaktewatersystemen. Op basis van een beleidsmatige verkenning van het concept veerkracht, wordt hier gesteld dat dit ruimtebeslag voor Waterschap Veluwe kan worden weergegeven via de bovenbreedte en meanderbreedte.

*Bovenbreedte* wordt hier gedefinieerd als de horizontale afstand in een dwarsprofiel tussen de insteek van de oevers. Onder *meanderbreedte* wordt de afstand verstaan tussen de twee parallelle lijnen waarbinnen een oppervlaktewater stroomt of meandert. De hoofdonderzoeksvraag luidt: Hoe kunnen de boven- en meanderbreedte worden voorspeld voor de oppervlaktewateren in het beheergebied van Waterschap Veluwe?

Die voorspelling, zo blijkt uit dit onderzoek, dient vanuit het veerkrachtconcept gericht te zijn op het zelfregulerende vermogen van oppervlaktewatersystemen tot aanpassing van de boven- en meanderbreedte. In dit verband is geconcludeerd dat, rekening houdend met de kenmerken van het beheergebied van Waterschap Veluwe, de boven- en meanderbreedte in

dit onderzoek worden voorspeld op basis van hydromorfologische processen (i.c. erosie, sedimentatie, water- en sedimenttransport).

### **Aanpak**

In het Watertoetsproces worden hoge eisen gesteld aan de onderbouwing van het wateradvies. Daarom is bij de aanpak van dit onderzoek gekozen voor het gebruik van beproefde algemeen geaccepteerde hydromorfologische concepten in samenhang met de kenmerken van het beheergebied van Waterschap Veluwe. De vraagstelling is uitgewerkt aan de hand van literatuuronderzoek, gegevensinventarisatie, raadpleging van deskundigen op het gebied van hydromorfologische processen en raadpleging van betrokkenen bij de watertoets. Voor het literatuuronderzoek zijn binnen- en buitenlandse literatuur, handleidingen en tijdschriften geraadpleegd over wetenschappelijk geaccepteerde concepten over hydromorfologische processen. Uit diverse overwegend buitenlandse bronnen, is alleen de informatie verwerkt met vergelijkbare omstandigheden met het beheergebied van Waterschap Veluwe. Deskundigen en betrokkenen bij de watertoets zijn geraadpleegd via gesprekken, waarin tussencconcepten van dit onderzoeksrapport zijn besproken. Deze gesprekken vormden een belangrijke kwaliteitswaarborg binnen het onderzoek.

### **Resultaten & conclusies**

Het onderzoek heeft geresulteerd in een methode waarmee de boven- en meanderbreedte voorspeld kan worden. Hiermee kan het ruimtebeslag (en zo blijkt, ook het ruimteverlies) worden voorspeld dat noodzakelijk is voor het instandhouden en herstellen van veerkrachtige oppervlaktewatersystemen. De in dit onderzoek ontwikkelde methode is opgebouwd uit een stelsel van onderling samenhangende empirische vergelijkingen. Het betreft een nieuwe combinatie van bestaande vergelijkingen uit hydromorfologische en cultuurtechnische ontwerprijlijnen. Deze onderling sterk samenhangende vergelijkingen zijn vanwege de complexiteit verwerkt tot een rekenprogramma. Dit ter waarborging van een juiste en gebruikersvriendelijke toepassing van de methode. Het rekenprogramma voorspelt de boven- en meanderbreedte (met zekerheidsmarges) aan de hand van gegevens die bij Waterschap Veluwe beschikbaar zijn over waterafvoer, maaiveldverhang en bodemtype.

Op basis van de analyse van de kenmerken van het beheergebied van Waterschap Veluwe, is het rekenprogramma gebaseerd op de voorspelling van de boven- en meanderbreedte voor rechte of meanderende waterlopen, en hun tussenvormen. Dit betekent dat vlechtende en verbindende waterlopen hier dus buiten beschouwing worden gelaten. Hiernaast is het rekenprogramma alleen gebaseerd op waterlopen in veen, klei of zandbodems met een mediane korreldiameter van kleiner dan 2 mm (alle bodemtypes fijner dan grind). Vanwege de relatief geringe afmetingen van de waterlopen in het beheergebied, is het rekenprogramma gebaseerd op een relatief grote invloed van (water)vegetatie. Rekening is gehouden met een sterk menselijk beïnvloed oppervlaktewatersysteem.

Op basis van de huidige inzichten wordt voorlopig geconcludeerd, dat de kwaliteit en betrouwbaarheid van de voorspelde uitkomsten voldoende zijn voor het gebruik van de

methode als ondersteunend instrumentarium bij ruimtelijke inrichtingsvraagstukken (zoals bij de Watertoets). Hierbij ook overwegende de beperkingen van de bestaande hydromorfologische concepten en de gebruikte empirische vergelijkingen. Nader veldonderzoek is wenselijk voor de verdere verbetering van de betrouwbaarheid van de methode voor Waterschap Veluwe.

Met de in dit onderzoek ontwikkelde methode beschikt Waterschap Veluwe dus over een ondersteunend instrumentarium voor onderbouwing van het wateradvies. Het belang hiervan is in het bovenstaande beschreven. Door de wateradviezen mede te baseren op het ruimtebeslag vanuit de veerkrachtstrategie, kan bij de besluitvorming over de ruimtelijke inrichting ook het belang van een verdere verbetering van het watersysteem en een duurzamer gebruik van watersystemen zorgvuldiger worden afgewogen. Hiermee kan met dit onderzoek een bijdrage worden geleverd aan de versterking van de afstemming tussen de beleidsvelden van water en ruimtelijke inrichting.

Voor de voorspelling van de boven- en meanderbreedte, heeft het onderzoek ook vergelijkingen opgeleverd voor de voorspelling van andere morfologische oppervlaktewaterkenmerken. Voorbeelden hiervan zijn waterdiepte, meandergolfenlengte, stroomsnelheid en meandergetal. Dit betekent dat met de inzichten uit dit onderzoek het instrumentarium niet alleen voor ruimtelijke inrichtingsvraagstukken bruikbaar is. Maar ook voor bijvoorbeeld de ontwikkeling van beleidsstrategieën en dimensioneringsvraagstukken bij beekherstelprogramma's of andere inrichtingsplannen gebruikt kan worden .

Toepassing van het rekenprogramma toont aan dat de consequenties van toepassing van de veerkrachtstrategie voor het beheergebied van Waterschap Veluwe groot zijn. In slechts enkele benedenstroomse trajecten van circa 5% van het aantal stroomgebieden, zal de stromingsenergie waarschijnlijk voldoende zijn voor handhaving van een waterloopvorm (recht tot meanderend). In de andere gevallen verdwijnen alle waterlopen. Dit zal gepaard gaan met een afname van de huidige waterafvoercapaciteit en daarmee tot een toename van de duur, de frequentie en de omvang van inundaties. Voor Waterschap Veluwe kan daarom geconcludeerd worden dat de veerkrachtstrategie doorgaans zal leiden tot een afname van het ruimtebeslag van de waterlopen en tot een toename van het ruimtebeslag van waterbergingsgebieden. In de enkele situaties waar meandering wordt voorspeld zal de veerkrachtstrategie ook leiden tot een toename (meanderbreedte) van het huidige ruimtebeslag. Dit onderzoek laat zien dat de ernst en de omvang van de gevolgen van de veerkrachtstrategie voor het huidige gebruik en beheer van de oppervlaktewatersystemen groot zijn. Dit benadrukt de noodzaak tot afstemming tussen de beleidsvelden van water en ruimtelijke ordening om een verdere verbetering van het functioneren van watersystemen mogelijk te maken.





# 1 INLEIDING

Centraal in deze thesis staat het ontwikkelen van een methode waarmee Waterschap Veluwe het (planimetrische) ruimtebeslag kan voorspellen dat noodzakelijk is voor het instandhouden en herstellen van veerkrachtige oppervlaktewatersystemen. Het benodigde ruimtebeslag voor die veerkrachtige oppervlaktewatersystemen, zo blijkt uit dit onderzoek, is voor waterschapsvraagstukken weer te geven via de grootte van de bovenbreedte en de meanderbreedte van waterlopen (zie figuur 1.3). Het bepalen van deze twee ruimtelijke criteria vormt hiermee de focus van deze thesis.

De aanleiding en achtergronden voor Waterschap Veluwe om deze methode te laten ontwikkelen zijn toegelicht in de eerste paragraaf. Op basis hiervan is in de tweede paragraaf de doelstelling van dit onderzoek beschreven. Voorafgaand aan de beschrijving van de onderzoeksvragen wordt in de derde paragraaf ingegaan op de onderbouwing hiervan, door het concept “veerkrachtige oppervlaktewatersystemen” nader uit te werken. Tenslotte volgt achtereenvolgens een paragraaf over de gevolgde werkwijze en een paragraaf over de verdere opbouw van deze thesis.

## 1.1 AANLEIDING EN ACHTERGROND

Aanleiding voor Waterschap Veluwe tot opdrachtverlening voor deze thesis, is het ontbreken van een instrumentarium waarmee op basis van gebiedsspecifieke kenmerken, het ruimtebeslag kan worden bepaald dat noodzakelijk is voor het instandhouden en herstellen van veerkrachtige watersystemen. In het onderstaande is ingegaan op de achtergrond hiervan.

### **Versterking van de relatie tussen ruimtelijke ordening en waterbeleid**

Het instandhouden en herstellen van veerkrachtige watersystemen is in de vierde Nota waterhuishouding [Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1998] een belangrijke beleidsstrategie om het functioneren van watersystemen verder te verbeteren en een duurzaam gebruik daarvan te kunnen blijven garanderen. Bij Waterschap Veluwe neemt deze veerkrachtstrategie een centrale plaats in binnen het waterbeleidsveld door de opname in het waterbeheerplan en in de strategische stroomgebiedvisie (Waterschap Veluwe, 2001& 2002). De veerkrachtstrategie moet aldus de vierde Nota waterhuishouding (NW4), gestalte krijgen door hydrologische ordeningsprincipes, naast economische, ecologische en sociaalbestuurlijke factoren, een rol te laten spelen in de besluitvorming over de bestemming en inrichting van gebieden (“water als mede ordenend principe”). De hiermee beoogde versterking van de relatie tussen ruimtelijke ordening en het waterbeleid is nader uitgewerkt in de Watertoets (zie kader).

## **Watertoets**

Binnen het Watertoetsproces hebben de waterschappen een adviserende taak om de afstemming te waarborgen tussen ruimtelijke ordening en het waterbeleid. Voor een goede taakinvolving dient vertaling plaats te vinden van waterhuishoudkundige doelstellingen naar hydrologische ordeningsprincipes en ruimtelijk relevante toetsingscriteria (ook aangeduid als ruimtelijke ontwerprichtlijnen).

### **Watertoets**

*De Watertoets is het hele proces van vroegtijdig informeren, adviseren, afwegen en uiteindelijk beoordelen van waterhuishoudkundige aspecten in ruimtelijke plannen en besluiten [Van der Vlist, et al, 2001]. De Watertoets fungeert daarmee als procesinstrument. Het doel van de Watertoets is het waarborgen dat waterhuishoudkundige doelstellingen expliciet en op evenwichtige wijze in beschouwing worden meegenomen bij alle waterhuishoudkundig relevante ruimtelijke plannen en besluiten van zowel provincies als gemeenten. De waterschappen geven hierbij aan het bevoegd gezag advies over welke concrete hydrologische ordeningsprincipes en ruimtelijk toetsingscriteria van belang zijn. Deze worden verwerkt in een waterparagraaf van een ruimtelijk plan.*

*De Watertoets komt voort uit de "Startovereenkomst Waterbeleid 21<sup>e</sup> eeuw" en het "Nationaal bestuursakkoord water" [Vereniging van Nederlandse Gemeenten, Unie van waterschappen, Interprovinciaal Overleg, Rijkswaterstaat, 2001 & 2003]. De Watertoets is formeel op 1 november 2003 in werking getreden.*

Volgens de beleidsstrategie uit de NW4 dienen deze ruimtelijke ontwerprichtlijnen ook gebaseerd te zijn op het instandhouden en herstellen van veerkrachtige watersystemen. Het is in dit verband van belang dat de waterschappen het ruimtebeslag hiervoor goed onderbouwd in beeld brengen. Bij Waterschap Veluwe (en landelijk), ontbreekt het aan een instrumentarium waarmee die onderbouwing kan plaatsvinden. Dit hangt samen met het ontbreken van de operationalisering van het waterbeleidsconcept "veerkracht", waardoor eenduidige vertaling naar concrete ruimtelijke ontwerprichtlijnen uitblijft. Dergelijke vertalingen vanuit waterhuishoudkundige doelstellingen, zo blijkt uit een landelijke evaluatie van twee jaar implementatie van de Watertoets [Wagemaker et. al., 2003], vormen een duidelijk algemeen knelpunt voor de waterschappen.

## **1.2 DOELSTELLING**

In het Watertoetsproces dienen de waterschappen bij het opstellen van ruimtelijke ontwerprichtlijnen, ook rekening te houden met het instandhouden en herstellen van veerkrachtige watersystemen, zo blijkt uit het bovenstaande. Gelet op de zorgplicht van de waterschappen als regionale oppervlaktewaterbeheerders, ligt het accent hierbij echter alleen op het oppervlaktewatersysteem (dus niet op het gehele watersysteem). Het is daarom voor Waterschap Veluwe van belang inzicht te hebben in de ruimtelijke ontwerprichtlijnen voor het instandhouden en herstellen van veerkrachtige oppervlaktewatersystemen. Gelet op het

bovenstaande is daarom met dit onderzoek beoogd:

*Een methode te ontwikkelen waarmee Waterschap Veluwe het (planimetrische) ruimtebeslag kan voorspellen dat noodzakelijk is voor het instandhouden en herstellen van veerkrachtige oppervlaktewatersystemen.*

### **Randvoorwaarden**

Het instandhouden en herstellen van veerkrachtige oppervlaktewatersystemen kan in veel gevallen leiden tot een extra ruimteclaim op de beschikbare schaarse ruimte. Het realiseren van “ruimte voor water” is gezien de geringe grondmobiliteit en de hoge kosten van grondaankoop in ons volle land één van de grootste en meest complexe opgaven van dit moment [Bolkestein et al, 2004; Raad voor het landelijk gebied, 2001]. Vandaar dat het voor de toepassing en acceptatie van de voorspellingen van de boven- en meanderbreedte bij ruimtelijke inrichtingsvraagstukken, het belangrijk is dat de onderbouwing van de methode gebaseerd moet zijn op beproefde algemeen geaccepteerde concepten. Daarom zijn zekerheidsmarges aangegeven bij de uitkomsten van de voorspellingen van het ruimtebeslag. Tevens is expliciet aangegeven welke bronnen en basisinformatie is gebruikt. Ter bevordering van de toepassing is de methode zoveel mogelijk gebaseerd op de beschikbare informatie bij Waterschap Veluwe. Tevens staan in het rapport twee voorbeelden uitgewerkt van de te volgen procedure voor bepaling van de boven- en meanderbreedte. Voorwaarde voor toepassing buiten het beheergebied van Waterschap Veluwe, is het voorhanden zijn van vergelijkbare informatie en kenmerken ten aanzien van bodemopbouw en oppervlaktewateren (zie hoofdstuk drie).

### **Relevantie**

In het Watertoetsproces is de waterbeheerder verantwoordelijk voor de kwaliteit van het wateradvies. Een goede onderbouwing van dat wateradvies is voor de waterbeheerders van groot belang omdat zij verantwoordelijk zijn voor vergoeding van schades, als later blijkt dat het advies niet juist is geweest. Met de in dit onderzoek ontwikkelde methode, beschikt Waterschap Veluwe over een instrumentarium waarmee een onderbouwd wateradvies kan worden gegeven over het ruimtebeslag voor het instandhouden en versterken van veerkrachtige oppervlaktewatersystemen. Het instrumentarium levert hiermee een bijdrage aan de verbetering van de kwaliteit van het wateradvies van Waterschap Veluwe en aan een vermindering van de kans op het ontstaan van onvoorziene schades. Via deze wijze kan dit onderzoek een bijdrage leveren aan een completer en zorgvuldiger afweging tussen waterbelangen en andere belangen bij de besluitvorming over de ruimtelijke inrichting. Hierdoor kunnen verkeerde locatie- en inrichtingskeuzes worden voorkomen (v.b. verhoogde kans op wateroverlast) en kan het functioneren van watersystemen, met het duurzame gebruik daarvan, verder worden verbeterd.

### 1.3 CONCEPTUEEL KADER

Centraal in deze thesis staat de ruimtelijke operationalisering van het concept veerkrachtige oppervlaktewatersystemen. Vanwege het ontbreken van sluitende definities hiervoor (zie § 1.1), is deze paragraaf gewijd aan een beleidsmatige en inhoudelijke verkenning van dit concept en de vertaling hiervan naar ruimtelijke relevante processen. Deze processen vormen namelijk de onderbouwing voor de uitwerking van de vraagstelling in de volgende paragraaf.

#### **Veerkracht: de beleidsmatige context**

Binnen het waterbeleid is het concept veerkracht voor het eerst in de NW4 gebruikt als metafoor voor een langetermijnstrategie om een “duurzaam gebruik van watersystemen te kunnen blijven garanderen” (onderdeel hoofddoelstelling NW4). Centraal bij de veerkrachtstrategie staat het aansluiten van het waterbeheer bij natuurlijke processen van watersystemen. Aanleiding voor deze nieuwe strategie, is het inzicht dat met het feodale waterbeheer het duurzame gebruik van watersystemen op de lange termijn niet gegarandeerd kan worden door de grotere invloed van extreme situaties. Ten grondslag hieraan liggen de recente wateroverlastsituaties, de gebruiksbependingen door vervuiling en de invloed van de toenemende intensiteit van het gebruik (beheersparadox). Dit in combinatie met de verwachte effecten door klimaatverandering (meer wateroverlast en droogte) en bodemdaling [Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1998]. Ook bleek dat met de bestaande weerstandstrategie, die gericht is op de volledige beheersing van water, niet alleen intrinsieke waarden en kwaliteiten van de watersystemen (waartoe ook ecologie behoort) aantast. Ook blijkt dat het daarnaast veel inspanning vergt en uiteindelijk hoge kosten met zich mee brengt om het watersysteem af te stemmen op de extreme situaties [Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1998].

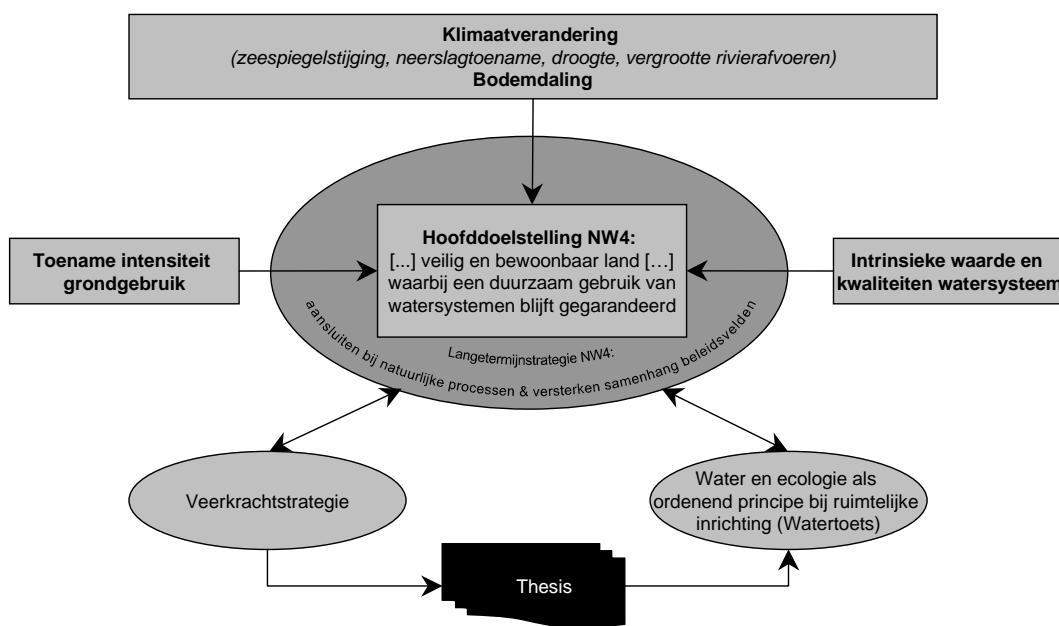
#### ***Beheersparadox***

*Voor het verschijnen van de metafoor veerkracht in de NW4, was het waterbeleid gericht op de volledige beheersing van het water. Dit ging gepaard met een inperking van de natuurlijke dynamiek van het water en wordt daarom ook wel de “weerstandstrategie” genoemd [Rommelzwaal & Vroon (a & b), 2000]. Het volgen van de weerstandstrategie leidde tot een vicieuze cirkel (de zogenaamde beheersparadox), waarin steeds aanvullende maatregelen nodig waren voor de verdere technische beheersing van het water. Door de maatregelen kon immers een intensiever landgebruik plaatsvinden. Door het intensiever wordende landgebruik was eerder sprake van wateroverlast en vervuiling doordat er meer en sneller schade optrad. Meer schade leidde vervolgens weer tot aanvullende maatregelen. Bodemdaling en de effecten van de klimaatveranderingen (meer neerslag en droogte) versterken de beheersparadox.*

Om vanuit de geschetste problematiek te kunnen anticiperen op de genoemde ontwikkelingen, is de veerkrachtstrategie, naast de weerstandstrategie, binnen het waterbeleid een belangrijke langetermijnstrategie geworden. Deze keuze voor versterking van de natuurlijke processen van watersystemen, betekent dat naast technische maatregelen extra

ruimte nodig is. De noodzaak tot versterking van de relatie tussen het waterbeleid en de ruimtelijke ordening is evident. De Watertoets is hiervan een goed voorbeeld. Andere uitwerkingen hiervan zijn bijvoorbeeld het beleidsadvies “Waterbeleid voor de 21<sup>e</sup> eeuw” [Commissie Waterbeheer 21<sup>e</sup> eeuw, 2000] en het kabinetsstandpunt “Anders omgaan met water” [Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2000]. Centraal hierbij staat het zoeken naar vooral ruimtelijke oplossingen voor bovenstaande problematiek. Dit gebeurt via de *drietrapsstrategie vasthouden-bergen-afvoeren* en het zoeken van oplossingen binnen stroomgebieden, in samenhang met andere beleidsvelden (*niet afventelen*). Ook in de Vijfde Nota over de Ruimtelijke Ordening [Ministerie VROM & RPD, 2000] en de nota Ruimte [Ministerie VROM, 2004], is aandacht voor wijziging van het ruimtegebruik naar de best passende locaties (*water en ecologie als ordenend beginsel bij ruimtelijke ordening*).

In figuur 1.1 is de bovenstaande waterbeheerproblematiek samengevat en is deze thesis in de NW4-beleidcontext gepositioneerd. De figuur toont dat met de resultaten uit deze thesis de verbinding ontstaat tussen de veerkrachtstrategie en de ruimtelijke inrichting. De directe ruimtelijke doorwerking van de veerkrachtstrategie is met deze thesis mogelijk geworden.



**Figuur 1.1:** Positionering van de veerkrachtstrategie en de thesis in beleidsmatige context

### Definitie van veerkrachtstrategie

Een theoretische verkenning van het begrip veerkracht in relatie tot de waterbeheerstrategie is beschreven door Klijn en Marchand [2000] en Rimmelzwaal & Vroon [2000 a, b].

In deze thesis is de definitie van Rimmelzwaal & Vroon (pag. 8) gebruikt: “*Veerkracht is het vermogen van systemen, of onderdelen daarvan, om zodanig te reageren op veranderende omstandigheden of*

*verstoringen dat de essentiële kenmerken hersteld worden*". Ten grondslag aan deze keuze ligt het verschil in definitie van de herstelde situatie na een verstoring. De op ecologie en fysica gebaseerde definitie van Klijn en Marchand betreft het herstel van de "oorspronkelijke toestand". De op systeemecologie gebaseerde definitie van het Rimmelzwaal & Vroon betreft het herstel van de "essentiële kenmerken". Deze laatste definitie sluit beter aan op de algemeen geaccepteerde concepten over de wijze waarop oppervlaktewateren als open systemen reageren op veranderingen (zie kader: *concept of equilibrium*).

### **Concept of equilibrium**

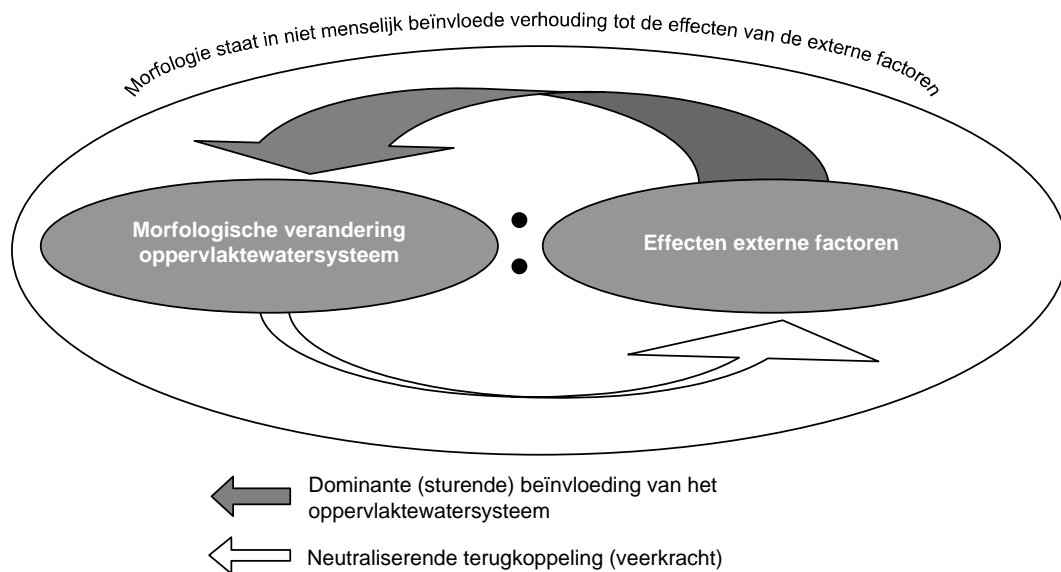
*Het concept of equilibrium [Knighton, 1998] veronderstelt een systeemeigen neutraliserend terugkoppelingsmechanisme van wateren om effecten van externe factoren (verstoringen) te matigen, zodat het watersysteem weer terug kan keren naar een staat van evenwicht waarin enige mate van stabiliteit is bereikt. Hierbij is sprake van een zelfregulerend dynamisch evenwicht, omdat oppervlaktewateren open systemen zijn en voortdurend zijn blootgesteld aan, en reageren op, invloeden vanuit hun omgeving (in het tweede hoofdstuk wordt hier nader op ingegaan).*

*Het neutraliserende terugkoppelingsmechanisme, (wat feitelijk **veerkracht** is volgens Rimmelzwaal en Vroon), vindt plaats door verandering van de morfologie (vorm) van oppervlaktewateren [v.b. Knighton, 1998, Leopold et al., 1962, Wolfert, 2001]. Deze veranderingen vinden plaats tot de morfologie van het oppervlaktewater in karakteristieke verhouding staat met de effecten van externe factoren (dynamisch evenwicht).*

Door het dynamische evenwicht kan veerkracht namelijk geen betrekking hebben op herstel van een *oorspronkelijke (stabiele) toestand* (volgens Klijn en Marchand) vanwege de sterke (natuurlijke) veranderlijkheid van open systemen. Het herstel van *essentiële kenmerken* past beter bij dit concept. Die essentiële kenmerken, zo blijkt uit het *concept of equilibrium*, houden verband met de karakteristieke verhouding tussen de morfologie van oppervlaktewateren en de effecten van externe factoren (extern: van buiten het oppervlaktewatersysteem). De externe factoren en effecten staan nader toegelicht in het **veerkrachtmodel**, afgebeeld in figuur 2.1.

Die karakteristieke verhouding dient volgens de hoofddoelstelling van de NW4 verband te houden met natuurlijke processen en met een duurzaam gebruik van watersystemen. Deze benadering sluit aan op de beleidsuitgangspunten van de Europese kaderrichtlijn water [Europees Parlement en de Raad van de Europese Unie, 2000]. Daarin is aangegeven dat het menselijk gebruik van watersystemen kan blijven plaatsvinden, mits de effecten daarvan op het watersysteem en ecologie niet merkbaar zijn (definitie van duurzaam gebruik). Vanuit dit perspectief is daarom hier gesteld dat de genoemde *karakteristieke verhouding*, betrekking heeft op de (milieu)situatie zonder de effecten van menselijke beïnvloeding. Dit leidt tot de conclusie dat een oppervlaktewatersysteem veerkrachtig is, als de morfologie in een niet menselijk beïnvloede verhouding staat tot de effecten van externe factoren.

Die conclusie over veerkracht betekent dat de beleidsstrategie uit de NW4 over het instandhouden en herstellen van de veerkracht van oppervlaktewatersystemen (**hier: veerkrachtstrategie**), gericht moet zijn op het herstellen van het zelfregulerende vermogen van oppervlaktewatersystemen tot morfologische verandering. Dit is schematisch weergegeven in figuur 1.2. Deze definitie volstaat om hier de ruimtelijke ontwerprichtlijnen uit te herleiden. Een nadere uitwerking van de relaties tussen de eerder genoemde externe factoren, de effecten daarvan en de morfologie, staat beschreven in het tweede hoofdstuk.



**Figuur 1.2:** *Veerkrachtstrategie: zelfregulering van de morfologie van oppervlaktewatersystemen*

### **Van veerkrachtstrategie naar ruimtelijke relevante processen**

Ten grondslag aan de morfologische veranderingen van oppervlaktewateren die door zelfregulering kunnen ontstaan, liggen soms één of meerdere processen. In een overzicht van landschapstructuurvormende natuurlijke processen onderscheidt Londo (1997) de volgende processen die van betekenis kunnen zijn voor de morfologie van oppervlaktewateren: overstroming, erosie, sedimentatie, water- en sedimenttransport, verlanding en vermoerassing. De ruimtelijke relevantie van deze processen verschilt. Overstroming heeft hoofdzakelijk betrekking op de verandering van de overstromingsvlakte van oppervlaktewateren. De andere processen hebben hoofdzakelijk betrekking op de vorm en de locatie van de oppervlaktewateren zelf. Hiervan worden verlanding en vermoerassing (vermorsing) doorgaans in verband gebracht met vegetatieprocessen (veenvorming). Deze processen kunnen leiden tot het geleidelijk verdwijnen van oppervlaktewater [Londo, 1997].

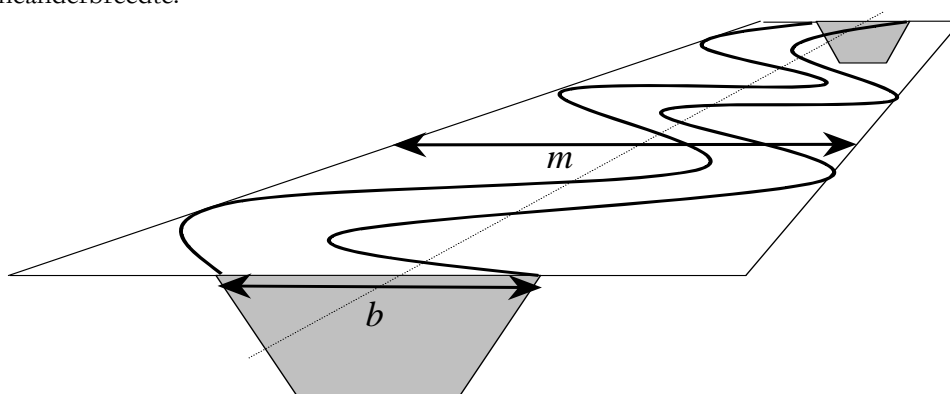
Gelet op de doelstelling van dit onderzoek, is er vanuit Waterschap Veluwe geen aanleiding om een methode te ontwikkelen om het ruimtebeslag voor overstromingsvlaktes of voor verlanding en vermoerassing in beeld te brengen. Voor het bepalen van overstromingsvlaktes

zijn namelijk al methoden beschikbaar. Hiernaast is verlanding en vermoerassing een proces dat binnen oppervlaktewateren plaatsvindt zodat hier geen extra (planologische) ruimte mee gemoeid is. Het is in het kader van dit onderzoek *wel* relevant voor Waterschap Veluwe een methode te ontwikkelen om het ruimtebeslag te bepalen voor de effecten van de erosie-, sedimentatie-, water- en sedimenttransportprocessen. Dit houdt in de eerste plaats verband met het van nature voorkomen van deze hydromorfologische processen in het beheergebied van Waterschap Veluwe (volgens de fysisch-geografische regio's [Londo, 1997]). In de tweede plaats zijn de ruimtelijke effecten van de deze processen thans te sterk ingeperkt door de gevolgde weerstandstrategie, hetgeen volgens de huidige beleidsinzichten onwenselijk is. Tenslotte beschikt Waterschap Veluwe niet over een methode waarmee het ruimtebeslag van de effecten van deze processen kan worden voorspeld.

#### 1.4 VRAAGSTELLING

In de vorige paragraaf is de veerkrachtstrategie vanuit een beleidsmatige context uitgewerkt tot een concrete definitie voor toepassing bij het oppervlaktewaterbeheer. Hieruit blijkt dat het onderzoek naar het ruimtebeslag voor toepassing van de veerkrachtstrategie, voor Waterschap Veluwe beperkt kan worden tot de ruimtelijk relevante criteria voor de effecten van de hydromorfologische processen: erosie, sedimentatie, water- en sedimenttransport. Op basis van deze bouwstenen beschrijft deze paragraaf de keuze voor twee ruimtelijk relevante criteria en de onderzoeksvragen om een methode te ontwikkelen waarmee die criteria voorspeld kunnen worden.

Uit diverse bronnen blijkt dat het ruimtebeslag voor de hier relevante hydromorfologische processen is weer te geven via de ruimtelijk relevante criteria: **bovenbreedte** en **meanderbreedte** [v.b. Bouwknecht & Gelok, 1992; FISRWG, 2001; Knighton, 1998; Leopold et al., 1962]. In figuur 1.3 is een schematische weergave opgenomen van de boven- en meanderbreedte.



**Figuur 1.3:** De ruimtelijk relevante criteria: bovenbreedte (*b*) en meanderbreedte (*m*).



*Bovenbreedte* is hier gedefinieerd als de horizontale afstand in een dwarsprofiel tussen de insteek van de oevers ( $b$  in figuur 1.3). Onder *meanderbreedte* wordt de afstand verstaan tussen de twee parallelle lijnen waarbinnen een oppervlaktewater stroomt of meandert ( $m$  in figuur 1.3). Dit betekent dat als een waterloop een rechte patroonvorm heeft de meanderbreedte gelijk is aan de bovenbreedte. In het tweede hoofdstuk is hier nader op ingegaan.

Voor het in beeld brengen van beide criteria, is het rekening houdend met de beleidsmatige context uit de vorige paragraaf, van belang dat dit is gebaseerd op de *karacteristieke verhouding* (i.c. niet menselijk beïnvloede) tussen de morfologie en de effecten van externe factoren. Op basis hiervan is het mogelijk de grootte van de boven- en meanderbreedte te herleiden uit die effecten [v.b. Maidment, 1992; FISRWG, 2001; Knighton, 1998; Leopold et al., 1962]. Dit betekent dat de nadruk voor de vraagstelling ligt op het bepalen van die karakteristieke verhouding en de daarmee samenhangende oorspronkelijke hydromorfologische processen en factoren. Voor het in beeld brengen van de boven- en meanderbreedte is de volgende onderzoeksvraag geformuleerd, die is onderverdeeld in drie deelvragen (A, B, C) met vijf subvragen:

**Hoe kan de “bovenbreedte” en “meanderbreedte” worden voorspeld voor de oppervlaktewateren in het beheergebied van Waterschap Veluwe?**

- A. Wat is de karakteristieke verhouding tussen de grootte van de boven- en meanderbreedte en de effecten van externe factoren?
  - 1. Welke oorspronkelijke hydromorfologische processen en factoren spelen een rol bij de vorming van de boven- en meanderbreedte?
  - 2. Welke formules beschrijven het verband tussen de boven- en meanderbreedte en de effecten van externe factoren?
  
- B. Op welke wijze kunnen die karakteristieke verhoudingen worden bepaald met de gegevens die digitaal en gebiedsdekkend beschikbaar zijn bij Waterschap Veluwe?
  - 1. Welke (invoer)gegevens zijn nodig?
  - 2. Welke gegevens zijn digitaal en gebiedsdekkend beschikbaar?
  - 3. Via welke methode zijn (ontbrekende) invoergegevens te bepalen of te verkrijgen?
  
- C. Wat is de betekenis van de toepassing van de uitkomsten voor Waterschap Veluwe (i.c. bovenbreedte en meanderbreedte) bij het Watertoetsproces?

## **1.5 AANPAK**

Voor de toepassing van de hier ontwikkelde methode worden in het Watertoetsproces hoge eisen gesteld aan de onderbouwing omwille van de acceptatie van de uitkomsten. Hierdoor is de onderzoeksvraag (in algemene zin) uitgewerkt aan de hand van literatuuronderzoek,

gegevensinventarisatie, raadpleging van deskundigen op het gebied van hydromorfologische processen en raadpleging van betrokkenen bij de watertoets. Hoewel veldonderzoek een gangbare methode kan zijn om hydromorfologische vraagstukken te onderzoeken (vb Kleinhans et al. [2000]), is er hier geen gebruik van gemaakt. Dit vanwege de onzekerheden over de kwaliteit van mogelijke onderzoekslocaties en de beperkte beschikbaarheid aan tijd en middelen.

Op basis van literatuuronderzoek en raadpleging van deskundigen zijn de subvragen **A1**, **A2**, **B1** en **B3** beantwoord. Hiervoor zijn binnen- en buitenlandse literatuur, handleidingen en tijdschriften geraadpleegd over wetenschappelijke geaccepteerde concepten over hydromorfologische processen en de genoemde karakteristieke verhoudingen voor oppervlaktewatersystemen zonder effecten van menselijke beïnvloeding. Uit diverse overwegend buitenlandse bronnen, is alleen de informatie verwerkt met vergelijkbare omstandigheden met het beheergebied van Waterschap Veluwe.

Aan de hand van een gegeveninventarisatie is beschikbaarheid van de benodigde invoergegevens bepaald (beantwoording subvraag **B2**). Deze inventarisatie is beperkt tot de digitale gegevens van Waterschap Veluwe in Arc-view (GIS). Dit om de toepassing van de hier te ontwikkelen methode later te vergemakkelijken. De bestaande werkwijze bij Waterschap Veluwe is namelijk sterk gericht op informatieontsluiting via het GIS. Voor de invoergegevens die niet rechtstreeks in het GIS voorhanden zijn, is een literatuuronderzoek uitgevoerd naar methoden om ze indirect uit de GIS-informatie te kunnen bepalen (subvraag **B3**).

Deskundigen en betrokkenen bij de watertoets zijn geraadpleegd via gesprekken waarin tussenconcepten zijn besproken. Deze discussies hieruit vormen een belangrijke kwaliteitswaarborg binnen het onderzoek. Tenslotte is deelvraag **C** beantwoord door een beschouwing van bruikbaarheid en relevantie van de resultaten uit dit onderzoek voor Waterschap Veluwe. Gelet op de aanleiding staat hierbij de afstemming tussen het waterbeheer en de ruimtelijke inrichting centraal.

## 1.6 LEESWIJZER

Deze thesis is inclusief dit inleidende hoofdstuk, opgebouwd uit zes hoofdstukken. Vanwege de grote verscheidenheid aan onderwerpen, zijn ter bevordering van de leesbaarheid de hoofdstukken opgebouwd volgens het fuikprincipe: de conclusies uit het ene hoofdstuk vormen een inkadering voor het daarop volgende hoofdstuk. Elk hoofdstuk, behoudens het eerste en het laatste, is daarom afgesloten met een discussie en conclusie. In figuur 1.4 zijn de relaties tussen de verschillende hoofdstukken weergegeven. Daaraan is te zien dat de hoofdstukken zijn onderverdeeld in drie clusters (kader, ontwikkeling & toepassing en relevantie). Per hoofdstuk staat de relatie met de vraagstelling vermeld.

### Kader

De eerste drie hoofdstukken hebben betrekking op het van toepassing zijnde kader ten aanzien van beleid, theoretische concepten en gebiedskarakteristieken. Na dit inleidende

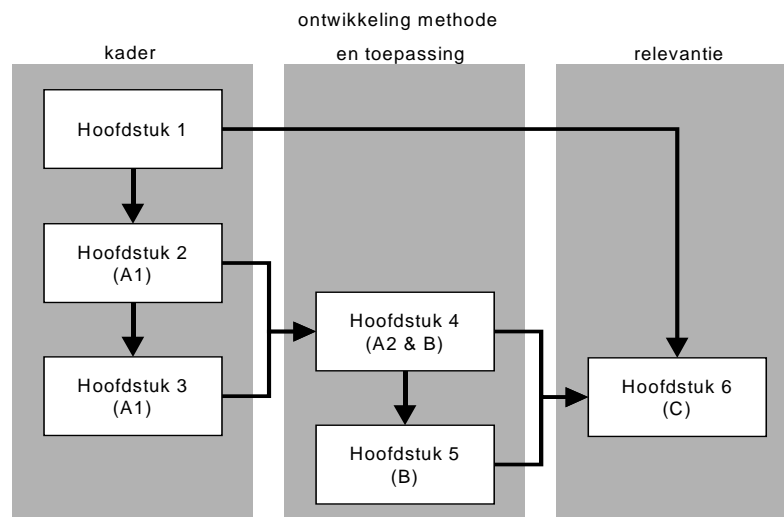
hoofdstuk waarin het beleidskader staat aangegeven, is het tweede hoofdstuk gewijd aan het theoretisch kader. Hierin is aandacht besteed aan de wetenschappelijk algemeen geaccepteerde concepten die ten grondslag liggen aan de karakteristieke verhouding tussen boven- en meanderbreedte en de effecten hierop van de externe factoren. Op basis hiervan zijn conclusies getrokken over de algemene functionele relaties tussen boven- en meanderbreedte en andere factoren (subvraag A1). Op basis van die factoren is in het derde hoofdstuk het beheergebied van Waterschap Veluwe nader gekarakteriseerd. De conclusies hieruit geven gebiedspecifieke informatie over welke hydromorfologische processen en factoren van invloed zijn op de bepaling van de boven- en meanderbreedte in het beheergebied van Waterschap Veluwe (nadere inkadering subvraag A1).

### Ontwikkeling en toepassing

Op basis van de conclusies uit het derde hoofdstuk, is in het vierde hoofdstuk een gebiedspecifieke methode ontwikkeld voor de bepaling van de boven- en meanderbreedte. Het vierde hoofdstuk geeft hiermee invulling aan de doelstelling en geeft antwoord op de daaruit afgeleide subvraag A2 en deelvraag B. Ter verduidelijking en ter bevordering van de toepassing van de methode, staat in hoofdstuk vijf de te volgen procedure nader toegelicht aan de hand van een uitwerking voor twee oppervlaktewateren (beantwoording deelvraag B). Hierbij is aandacht geschonken aan de onzekerheidsmarges van de uitkomsten en aan de gebruikte bronnen en basisinformatie.

### Relevantie

Tenslotte is op basis van de conclusies uit de hoofdstukken vier en vijf, in het zesde hoofdstuk als algehele conclusie de relevantie van de methode en de uitkomsten daarvan voor Waterschap Veluwe beschreven (beantwoording deelvraag C).



Figuur 1.4: Leeswijzer



## 2 CONCEPTUEEL MODEL

Het ruimtebeslag voor de uitwerking van de veerkrachtstrategie, zo blijkt uit het eerste hoofdstuk, krijgt in dit onderzoek gestalte door bepaling van de boven- en meanderbreedte. Centraal bij die bepaling staan de oorspronkelijke (i.c. niet menselijk beïnvloede) hydromorfologische processen en factoren. Dit hoofdstuk beschouwt de relevante theoretische concepten over de hydromorfologische processen en factoren. Deze beschouwing dient als bouwsteen voor de gebiedspecifieke processen en factoren die in het derde hoofdstuk staan beschreven.

De hydromorfologische processen en factoren zijn in de eerste paragraaf op hoofdlijnen beschouwd aan de hand van het voor dit onderzoek opgestelde veerkrachtmodel. Op basis hiervan zijn in de volgende twee paragrafen de boven- en meanderbreedte (morfologie) en de hydromorfologische processen en factoren nader uitgewerkt. Na de discussieparagraaf staat tenslotte in de conclusie onderbouwd welke processen en factoren hier relevant zijn voor het bepalen (voorspellen) van de grootte van de bovenbreedte en de meanderbreedte.

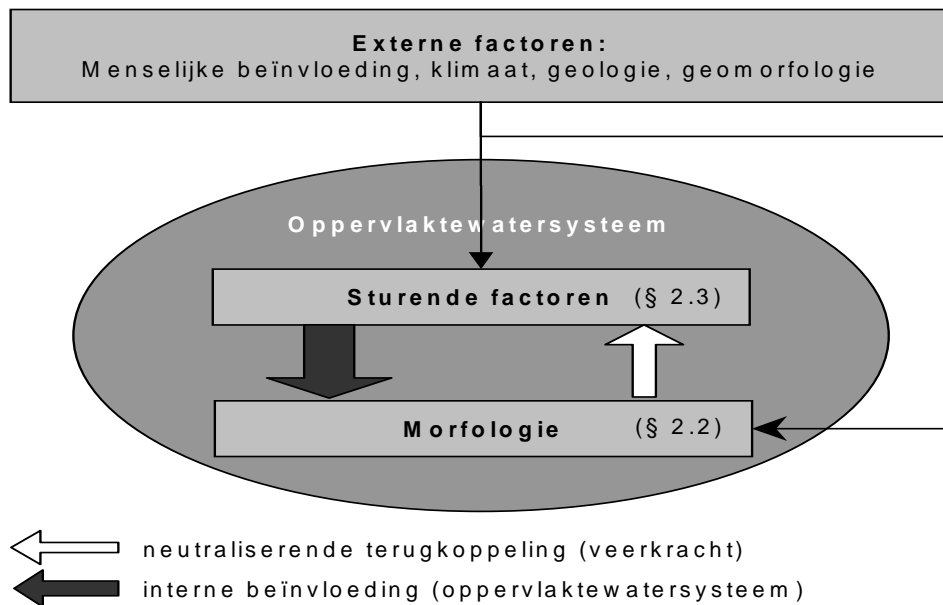
Uit dit hoofdstuk blijkt dat erosie, sedimentatie, sedimenttransport en de groei/sterfte van vegetatie, de belangrijkste zelfregulerende processen zijn bij de vorming van de boven- en meanderbreedte. De belangrijkste factoren die hierop van invloed zijn, zijn waterafvoer, vegetatie en geomorfologie.

### 2.1 VEERKRACHTMODEL

Uit de verkenning van het begrip veerkracht (§ 1.3) blijkt volgens het *concept of equilibrium* dat oppervlaktewatersystemen door zelfregulering in staat zijn tot morfologische verandering. Dit vindt plaats totdat de morfologie van het oppervlaktewater in karakteristieke verhouding staat met de effecten van externe factoren (zie figuur 1.2). Op basis van figuur 1.2 zijn de functionele relaties tussen de morfologie en de effecten van de externe factoren nader uitgewerkt volgens het voor dit onderzoek opgestelde veerkrachtmodel (figuur 2.1). Ten grondslag aan het veerkrachtmodel liggen de concepten van het hiërarchisch rangordemodel van relaties tussen watersysteem en landschapscomponenten volgens Wolfert (2001), Montgomery et al. (z. jr.), Londo (1997), Verdonchot et al (1995) en het morfodynamisch systeem volgens Kleinhans (2002). Beide concepten zijn gebaseerd op het dominantieprincipe, waarbij de onderlinge rangorde tussen systeemcomponenten wordt bepaald door de dominantie van de beïnvloeding (hoge rangorde bij hogere dominantie).

Op basis van deze concepten is in het veerkrachtmodel onderscheid gemaakt in externe en interne factoren (respectievelijk binnen en buiten het oppervlaktewatersysteem). Tot de externe factoren behoren de componenten die een dominante invloed uitoefenen op (de interne factoren van) de morfologie van het oppervlaktewatersysteem. Gelet op het kader van dit onderzoek is de schematisatie van de interne factoren van het oppervlaktewatersysteem beperkt tot de sturende factoren en morfologie. In het

veerkrachtmodel zijn de sturende factoren, de sterk veranderlijke effecten van de externe beïnvloeding en oefenen een dominante invloed uit op de morfologie. De morfologie beïnvloedt (neutraliserende terugkoppeling) de sturende factoren waardoor het effect van de externe beïnvloeding wordt gematigd (herstel van het dynamisch evenwicht). Deze terugkoppeling vanuit de morfologie naar de externe factoren is zeer gering en vindt plaats op een zeer lange tijdschaal. Daarom is deze beïnvloeding in het veerkrachtmodel buiten beschouwing gelaten.



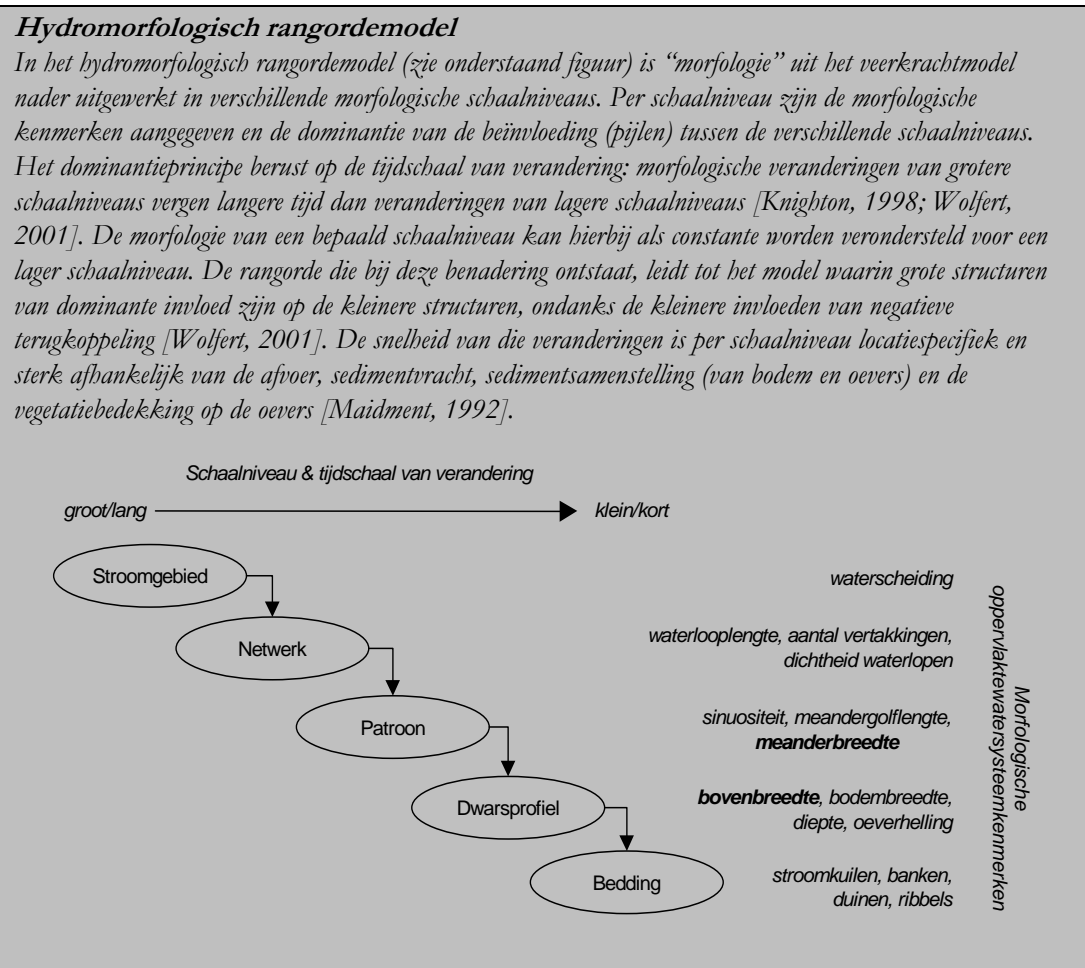
**Figuur 2.1:** *Veerkrachtmodel*

Het veerkrachtmodel toont dat genoemde morfologische beïnvloeding op directe en indirecte wijze plaatsvindt. De directe beïnvloeding vindt plaats door de temporeel weinig veranderlijke factoren zoals de geomorfologie (korte termijn constante). De indirecte beïnvloeding vindt, via de sturende factoren plaats door temporeel sterker veranderlijke factoren zoals weersveranderingen (bij een bepaald klimaat). Op basis van het veerkrachtmodel is in de volgende twee paragrafen nader ingegaan op het morfologische systeem (§ 2.2) en de hydromorfologische processen en factoren die daaraan ten grondslag liggen (§ 2.3).

## 2.2 MORFOLOGIE

Onder (hydro)morfologie wordt hier verstaan: de vormen van wateren die zijn ontstaan ten gevolge van de interactie tussen stromend water en erodeerbare oevers en waterbodems. In het veerkrachtmodel zijn omwille van de duidelijkheid, alle morfologische kenmerken (waaronder boven- en meanderbreedte) van een oppervlaktewatersysteem vereenvoudigd tot

de component “morfologie” waarop de verschillende invloeden zijn aangegeven. De aard van die invloeden kan echter afhankelijk van het schaalniveau (zie hydromorfologisch rangordemodel) waarop een bepaald morfologisch kenmerk zich manifesteert in het hydromorfologische systeem (het systeem van relaties tussen morfologie en de hydromorfologische processen) [Knighton 1998; Wolfert, 2001].



**Figuur 2.2:** Hydromorfologisch rangordemodel (bewerkt naar Knighton (1998), Verdonschot et al (1995), Wolfert (2001) en FISRWG (2001)).

Elk morfologisch kenmerk heeft dus zijn eigen set aan karakteristieke hydromorfologische processen en factoren. Om in de volgende paragraaf alleen concepten te beschrijven die relevant zijn voor de vorming van de boven- en meanderbreedte, staat hier beschreven op welk schaalniveau de boven- en meanderbreedte betrekking heeft. Hiervoor is een

hydromorfologisch rangordemodell samengesteld (figuur 2.2) naar voorbeeld van Knighton (1998), Verdonschot et al (1995), Wolfert (2001), en FISRWG (2001).

In het hydromorfologisch rangordemodell staat aangegeven dat de boven- en meanderbreedte tot het schaalniveau van respectievelijk het **patroon** en het **dwarsprofiel** behoren. In het onderstaande is ingegaan op de definitie van beide schaalniveaus, alvorens in de volgende paragraaf in wordt gegaan op de theoretische concepten over de belangrijkste bepalende processen en factoren. De inkadering van processen en factoren die met dit onderscheid naar schaalniveau ontstaat, betekent dat hier bijvoorbeeld niet wordt ingegaan op processen over het ontstaan van waterlopen (netwerk) of op processen die verschillende waterbodenvormen (bedding) verklaren.

### 2.2.1 PATROON

Het patroon ofwel de planimetrische geometrie betreft de vorm (ter plaatse van de bovenbreedte) van een waterlooptraject gezien vanuit vogelvluchtperspectief. In figuur 2.3 zijn de verschillende patroonvormen weergegeven in relatie tot enkele belangrijke processen. Karakterisering van de patroonvormen vindt doorgaans plaats aan de hand van onderscheid naar het aantal stroomgeulen (enkelvoudig of meervoudig) [Knighton;1998; Leopold et al, 1964; Maidment, 1992] en de mate van sinuositeit (figuur 2.6). Deze laatste geeft de mate van kronkeling van een waterloop weer, veelal uitgedrukt als het quotiënt (meandergetal) van de waterlooplengte en een rechte lijn. Een hogere sinuositeit gaat gepaard met een grotere meanderbreedte (figuur 1.3). Meervoudige waterlopen hebben doorgaans een grotere meanderbreedte dan enkelvoudige waterlopen, vanwege de geringere diepte en de daardoor grotere breedte (als gevolg van de processen in figuur 2.3).

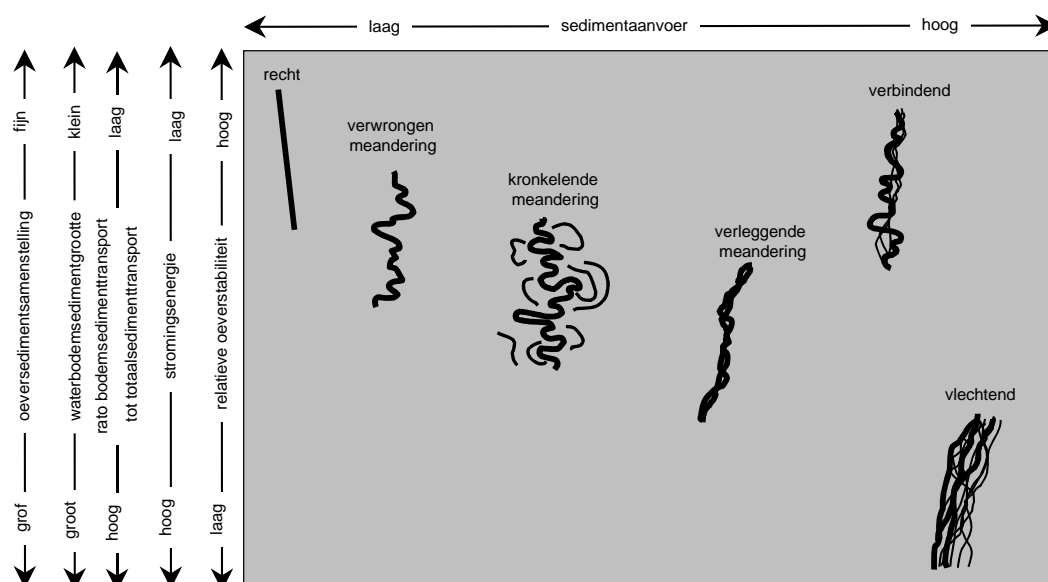
In het onderstaande is een korte beschrijving gegeven van de vier hoofdpatroontypen. Deze zijn vanuit verschillende perspectieven verder onder te verdelen in subtypen en er bestaan tussen de hoofdtypen vele tussenvormen. Een uitgebreider overzicht hiervan staat in Knighton (1998) en Schoor & Stouthamer (2003).

- **Rechte (*straight*) waterlopen** (enkelvoudig) komen onder natuurlijke omstandigheden nauwelijks voor [Leopold et al, 1964]. Om pragmatische redenen is in navolging van Schoor & Stouthamer (2003) een rechte waterloop hier gedefinieerd als de sinuositeit (ter plaatse van de bovenbreedte) de waarde 1 bedraagt.
- **Meanderende (*meandering*) waterlopen** (enkelvoudig) hebben een sinuositeit van 1,5 [v.b Knighton, 1998; Leopold et al, 1964]. Voor een overzicht in sinuositeitsklassen tussen rechte en meanderende waterlopen verwijs ik naar Schoor & Stouthamer (2003). De maximale waarde (benadering) van de sinuositeit zou circa 5,5 bedragen [Bouwknegt & Gelok, 1992], hierboven snijden de aanliggende bochten elkaar aan en vormen een rechte lijn.
- **Vlechtende (*braided*) waterlopen** (meervoudig) hebben verhoudingsgewijs een brede bedding en vaak in een min of meer recht patroon. Hierbinnen komen meerdere sinusoïde waterlopen voor tussen de beddingen of kleine eilanden die lager zijn dan het maaiveld (insteek) en bij grotere afvoeren onder de waterspiegel verdwijnen [Leopold et



al, 1964; Knighton, 1998]. De banken bestaan doorgaans uit onsaamenhangend sediment en de inliggende waterlopen kenmerken zich door een snelle (< 1jr) en continue laterale migratie.

- **Verbindende (*anabranching, anastomosing*) waterlopen** (meervoudig) lijken op vlechtende waterlopen. Het verschil is dat bij verbindende waterlopen de (veelal grotere en stabiele) banken of eilanden op *gelijke* hoogte liggen met het omliggende maaiveld en dat de ligging van de waterlopen min of meer stabiel is (mede door grotere oeverstabiliteit). De verschillende waterlopen functioneren hierdoor minder afhankelijk van elkaar dan bij vlechtende systemen. Verbindende systemen zijn net als vlechtende systemen convergerend. Dit in tegenstelling tot divergerende waterlopen in bijvoorbeeld delta's [Knighton, 1998].



**Figuur 2.3:** Relaties tussen de vier hoofdpatroontypen en de sturende factoren. Bewerkt naar voorbeeld van Knighton (1998) en Maidment (1992).

### 2.2.2 DWARSPROFIEL

Het dwarsprofiel is hier gedefinieerd als de afmeting van de vorm van een waterloop in dwarsdoorsnede, loodrecht op de stromingsrichting, tussen de *insteek* van beide oevers. De insteek is het knikpunt tussen het doorgaans horizontale maaiveldniveau en de schuine oever. Het vormt de overgang tussen de waterloop en zijn onder natuurlijke omstandigheden veelal aangrenzende overstromingsvlakte. De overstromingsvlakte heeft betrekking op de ruimte buiten de insteek en wordt hier dus niet tot het dwarsprofiel gerekend.

Dwarsprofielvormen en afmetingen variëren doorgaans sterk over korte afstanden in natuurlijke stromende waterlopen. De regelmaat waarmee die variatie voorkomt, houdt

doorgaans verband met de locatie van het dwarsprofiel binnen een traject van een bepaald patroon (vb. voor, in of na een bocht) [Maidment, 1992; FISRWG, 2001].

## 2.3 HYDROMORFOLOGISCHE PROCESSEN EN FACTOREN

De morfologie van stromende wateren is in het algemeen afhankelijk van de interactie tussen waterstroming, het sediment dat in beweging is en het materiaal van het dwarsprofiel (waaronder ook vegetatie). Hierbij zijn erosie, sedimentatie en sedimenttransport de belangrijkste zelfregulerende processen bij de vorming van het patroon en het dwarsprofiel van een waterloop [v.b. Knighton, 1998; Leopold et al, 1964]. Deze paragraaf start daarom met een korte beschrijving van erosie, sedimentatie en sedimenttransport. Vervolgens zijn enkele belangrijke morfodynamische concepten toegelicht. Hierbij zijn de factoren die van invloed zijn op de vorm en afmetingen de boven- en meanderbreedte **vet afgedrukt**.

### 2.3.1 EROSIE, SEDIMENTTRANSPORT EN SEDIMENTATIE

Erosie is het losraken van bodemdeeltjes van het landoppervlak of van de waterbodem of oevers van waterlopen. Onder sedimenttransport wordt hier de beweging van het sediment verstaan. Afhankelijk van de stroomsnelheid, sedimentsamenstelling en sedimentgrootte vindt al dan niet beweging plaats over de waterbodem (rollen, salteren, schuiven) of in de waterkolom (suspensie). De hoeveelheid getransporteerd sediment wordt na gelang het type transport uitgedrukt in afvoer (per tijdinterval) of vracht (per periode). Sedimentatie (is het afzetten van geërodeerde deeltjes (sediment)). Deze processen kunnen optreden onder invloed van water, zwaartekracht, wind of ijs. Hier wordt enkel ingegaan op invloeden als gevolg van (zwaartekracht en) stromend water.

### 2.3.2 CONCEPT VAN SCHUIFSPANNING

Uit verschillende literatuurbronnen blijkt dat erosie, sedimenttransport en sedimentatie complexe en onvoldoende onderzochte processen zijn om volledig te kunnen doorgronden. Deze processen worden daarom hier algemeen verklaard op basis van het concept van verschil in schuifspanning tussen het stromende water en het sediment [vb. Kleinhans, 2002, Knighton, 1998, Maidment, 1992]. Deze benadering gaat ervan uit dat erosie en sedimenttransport plaatsvinden als de schuifspanning (*shear stress*) van het water groter is dan de weerstand daartegen (de kritieke schuifspanning) van de sedimentdeeltjes (*critical shear stress*). De schuifspanning is de sleepkracht van het water op het waterbodem en oever per eenheid van oppervlak, en is gerelateerd aan de **waterdiepte** en het **verhang** of de **stroomsnelheid/afvoer**. De kritieke schuifspanning is hoofdzakelijk gerelateerd aan de **korrel diameter**. De kritieke schuifspanning is een onzekere parameter omdat deze gevoelig is voor bijvoorbeeld turbulentie, de mate van **cohesie tussen sedimentdeeltjes** en de mate van het afschermings-/blootstellingsfenomeen (*hiding exposure*) [Kleinhans, 2002; Knighton, 1998]. Dit laatste fenomeen speelt een rol als sprake is van een heterogene **sedimentsamenstelling**: sediment van kleinere afmeting (vb zand) is afgeschermd (i.c.

pleisterlaag; *armour layer*) door sediment van grotere afmeting (vb grind) waardoor het minder mobiel is.

Tenslotte wordt sedimentatie verondersteld als de turbulentie van het water kleiner is dan de valsnelheid van een sedimentdeeltje. Deze laatste is, evenals de kritieke schuifspanning, hoofdzakelijk gerelateerd aan de **korreldiameter** [Maidment, 1992; Knighton, 1998].

### 2.3.3 CONCEPT VAN GELIJKMATIG ENERGIEVERBRUIK EN STROMINGSENERGIE

Het concept van gelijkmatig energieverbruik is een benadering waarmee verschillen in waterlooppatronen kunnen worden verklaard. Uitgangspunt bij deze benadering is dat stromende wateren door zelfregulering het waterbodemplang aanpassen aan veranderende stromingsenergieniveaus. In het onderstaande is dit toegelicht.

Stromende wateren zijn open systemen en, vanuit een morfodynamisch perspectief, te bezien als medium dat water, stoffen en sediment transporteert. De veronderstelling hierbij is dat aanpassing van de morfologie blijft plaatsvinden tot een bepaald dynamisch evenwicht (zie volgende paragraaf) is bereikt. Hierbij is het stromingsenergieverbruik voor die transportfunctie per lengte-eenheid waterloop overal gelijk [Knighton, 1998; Leopold et al, 1964]. Die stromingsenergie (*stream power*;  $\Omega$ ) is gedefinieerd als een functie van het product van het soortelijke massa van water, zwaarteveldsterkte, de **waterafvoer** en het **waterspiegelplang** [FISRWG, 2001; Knighton, 1998, Leopold et al, 1964]:

$$\Omega = \rho \cdot g \cdot Q \cdot S \quad (2.1)$$

[Toelichting van de symbolen:  $\Omega$  stromingsenergie ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{sec}^{-3}$  of  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$ );  $\rho$  soortelijke massa ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )  $g$  zwaarteveldsterkte ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ );  $Q$  waterafvoer ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ );  $S$  waterspiegelplang ( $\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$ )

Dit concept (Yang) is ontwikkeld als algemeen principe om bijvoorbeeld de morfologie van stromende wateren te kunnen verklaren. Dit concept geeft immers aan dat uitgaande van een constante waarde voor het energieverbruik (en soortelijk gewicht van water), het waterbodemplang door zelfregulering zal afnemen naarmate de afvoer toeneemt totdat het energieverbruik per lengte-eenheid gelijk is. Dit wordt daarom ook door diverse auteurs aangeduid als het *concept of minimum streampower* of *continuum concept*. Bettess en White (1983) stellen dat het patroon wat hierbij ontstaat, afhankelijk is van de verhouding tussen het maaiveldplang (sturende constante factor) en het benodigde waterbodemplang (herstelfactor) behorende bij een bepaald constant energieverbruik [Knighton, 1998]:

- Als het waterbodemplang gelijk is aan het maaiveldplang, zal bij een dynamisch evenwicht een rechte waterloop ontstaan. Dit type komt doorgaans voor in systemen met een relatief lage stromingsenergie.
- Als het waterbodemplang kleiner is dan het maaiveldplang, zal bij een dynamisch evenwicht een meanderende waterloop ontstaan. Dit type komt doorgaans voor in systemen met een relatief gemiddelde stromingsenergie. Een vlechtende waterloop ontstaat als het verschil tussen beide veel groter is (verdere plangverkleining door meerder waterlopen). Dit type komt doorgaans voor in systemen met een relatief hoge stromingsenergie.
- Als het waterbodemplang groter is dan het maaiveldplang, kan er geen dynamisch evenwicht ontstaan. Echter kan door verandering van het maaiveldplang (erosie

bovenstrooms/sedimentatie benedenstrooms) na verloop van tijd wel een dynamisch evenwicht ontstaan. De verbindende waterlopen komen het meest overeen met de eigenschappen van deze categorie doordat overwegend sedimentatie plaatsvindt en er doorgaans sprake is van een relatief lage stromingsenergie.

### Stromingsenergie en patroonontwikkeling

In de bovenstaande patroontyperingen is ook de stromingsenergie (alleen via ordinale schaalverdeling) weergegeven omdat het aangeeft in welke mate erosie, sedimentatie en sedimenttransport kunnen plaatsvinden. Deze hydromorfologische processen zijn namelijk direct gerelateerd aan stromingsenergie [FISRWG, 2001]. Hiernaast is de interactie tussen water en bodem sterk afhankelijk van bijvoorbeeld de korrelgrootte en cohesie van het sediment. Oevererosie of -instorting vormt het belangrijkste mechanisme bij het ontstaan van de vorm van patroon en het dwarsprofiel. Oeverinstorting ontstaat als gevolg van het overschrijden van een kritieke bodemspecifieke waarde van de hoogte en/of de helling van de oevers [FISRWG, 2001]. Karakteristiek hierbij is de bovenbreedte/diepte verhouding (*width-depth ratio*) die sterk afhankelijk is van de **sediment/bodemeigenschappen** en de afvoer. Hiernaast kunnen ook andere niet morfodynamische processen een belangrijke rol spelen, waarbij de ontworteling van **bomen** en drijfhout als één van de belangrijkste “*triggers*” wordt geacht [De Kramer et al, 2000; Kleinhans et al, 2000; Peters et al, 1999, 2001]. Ook is **vegetatie** zowel bij hoge als bij lage afvoeren van invloed op de morfologie [Miller, 1999; Wolfert, 2001].

In het algemeen worden rechte waterlopen in verband gebracht met de relatief laagste waarden aan stromingsenergie. Hierdoor wordt oevererosie niet of nauwelijks geïnitieerd en vindt nauwelijks sedimenttransport plaats. Verbindende waterlopen lijken hier sterk op (ook lateraal stabiel), maar kennen een hogere sedimentaanvoer. Vlechtende waterlopen vormen het andere uiterste met een relatief hoge stromingsenergie waar door oevererosie en sedimenttransport actieve laterale migratie plaatsvindt waarbij bochten verdwijnen. Meanderende waterlopen behoren ook tot de actieve systemen en vormen een tussenklasse tussen rechte en vlechtende waterlopen [v.b. Knighton, 1998].

Vooralsnog is onbekend wat de drempelwaarden van de stromingsenergieën tussen de vier hoofdpatroontypen zijn. Er zijn daarom alleen kwalitatieve relaties voorhanden. Nanson en Coke (1992) hebben voor de verschillende patroonvormen empirische relaties gelegd met de stromingsenergie per bodembreedte (*specific stream power:  $\Omega/b$* ; vergelijking 2.2).

$$\Omega/b = \rho \cdot g \cdot Q \cdot S \cdot B^{-1} \quad (2.2)$$

[Toelichting van de symbolen:  $\Omega/b$  specifieke stromingsenergie ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-3}$  of  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ );  $\rho$  soortelijke massa ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $g$  zwaarteveldsterkte ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ );  $Q$  waterafvoer ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ );  $S$  waterspiegelverhang ( $\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$ );  $B$  bovenbreedte ( $\text{m}$ )]

Zij stellen dat de waarde  $<10$ ,  $10 - 60$  en  $50 - 300 \text{ W m}^{-2}$  verband houdt met respectievelijk lateraal stabiele (rechte en verbindende systemen), actief meanderende en vlechtende

systemen [Knighton, 1998]. Hoewel deze harde grenzen ter discussie staan geven ze wel een orde grootte aan.

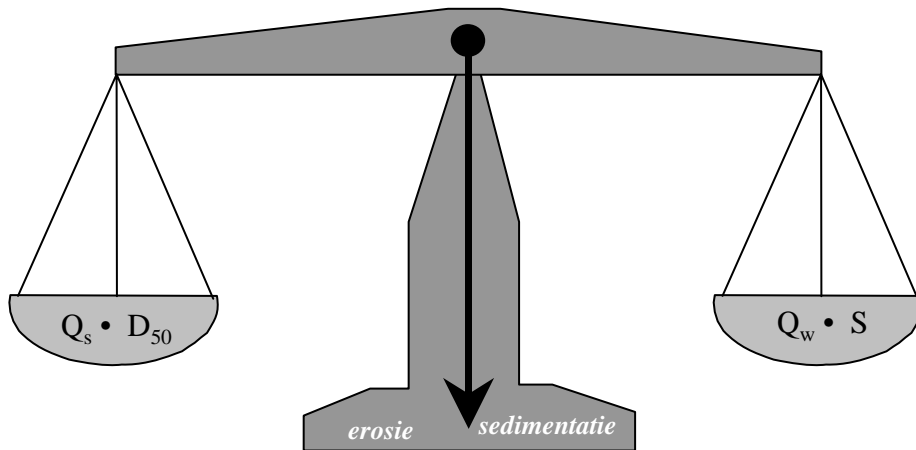
#### 2.3.4 CONCEPT VAN DYNAMISCH EVENWICHT

In de voorafgaande paragraaf is het concept dynamisch evenwicht (*concept of equilibrium*) genoemd in relatie tot de aanpassing van de morfologie op de energie van het stromende water. Hierbij is aangegeven dat de vorm van patroon en het dwarsprofiel sterk afhankelijk is van de interactie tussen het stromende water en de bodem/sediment.

Het concept van het dynamisch evenwicht gaat uit van het zelfregulerend morfologisch terugkoppelmechanisme van wateren. Dit mechanisme zorgt voor aanpassingen van de morfologie totdat evenwicht is bereikt tussen de schuifspanning van het water (*shear stress*) en de weerstand daartegen van de bodem/sediment (*shear resistance of soil surface*). Bezien vanuit het veerkrachtmodel geldt hierbij dat de evenwichtssituatie tussen morfologie en de sturende factoren (vb afvoer en verhang) hersteld is. Hierbij is sprake van een dynamisch evenwicht omdat open systemen zoals watersystemen voortdurend zijn blootgesteld aan, en reageren op invloeden van hun omgeving [Knighton, 1998; Leopold et al, 1964]. In een dynamische evenwichtssituatie zijn de vorm en afmetingen van het patroon en het dwarsprofiel te bezien als “constante”, maar niet de ligging hiervan [Leopold et al, 1964, Shields et al, 2003]. Die verandert namelijk continue als reactie op de invloeden van de sturende factoren (i.c. afvoer en bodemsedimentvrucht volgens Lane).

De theorie van Lane (*Lane alluvial channel equilibrium*) veronderstelt dat het dynamische evenwicht (figuur 2.4) wordt bepaald door de balans van de waterafvoer ( $Q_w$ ) en het verhang ( $S$ ) met de bodemsedimentvrucht (*bed load*;  $Q_s$ ) en de mediane korrelgrootte van het waterbodemsediment ( $D_{50}$ ) [FISRWG, 2001]. Een verandering van één van deze factoren veroorzaakt via erosie of sedimentatie veranderingen van morfologie (bijvoorbeeld de boven- en meanderbreedte).

In figuur 2.4 staat geïllustreerd dat een toename in waterafvoer bij een gelijk verhang zal leiden tot erosie en gecompenseerd wordt door een toename in bodemsedimentvrucht en/of toename van de mediane korrelgrootte van het waterbodemsediment. Uitgaande van de plaats van het patroon en het dwarsprofiel in het hydromorfologisch rangordemodel, is het verhang volgens dit model (*Lane*) de belangrijkste factor voor het verklaren van verandering van patroon en het dwarsprofiel. Ervan uitgaande dat de sedimentvrucht direct gerelateerd is aan de waterafvoer (zie bovenstaand) en de mediane korrelgrootte min of meer constant is.



**Figuur 2.4:** Belangrijkste sturende factoren van het dynamisch evenwicht (Lane alluvial channel equilibrium).

Schumm (1977) stelt dat bovenbreedte ( $b$ ), diepte ( $d$ ) en meandergolflengte ( $L$ ) evenredig zijn en dat het verhang ( $S$ ) omgekeerd evenredig is met de afvoer ( $Q_w$ ). Verder stelt Schumm dat bovenbreedte, meandergolflengte en verhang evenredig zijn en dat diepte en sinuositeit ( $P$ ) omgekeerd evenredig zijn met de sedimentvracht ( $Q_s$ ) [FISRWG, 2001]. In figuur 2.7 zijn deze meanderparameters weergegeven.

Uit het bovenstaande blijkt dat op basis van de relaties van Schumm en het model van Lane's alluvial channel equilibrium, de voorspelling van verandering van herstelfactoren verfijnd kan worden. Die relaties zijn weergegeven in figuur 2.5.

$$\begin{aligned}
 Q_w^+ Q_s^+ &\sim b^+, d^{+/-}, L^+, S^{+/-}, P^- \\
 Q_w^- Q_s^- &\sim b^-, d^{+/-}, L^-, S^{+/-}, P^+ \\
 Q_w^+ Q_s^- &\sim b^{+/-}, d^+, L^{+/-}, S^-, P^+ \\
 Q_w^- Q_s^+ &\sim b^{+/-}, d^-, L^{+/-}, S^+, P^-
 \end{aligned}$$

**Figuur 2.5:** Kwalitatieve relaties en veranderingsrichting tussen de morfologische kenmerken (gearceerd) en de sturende factoren ( $Q_w$  en  $Q_s$ ).

Naar Schumm (1977) [FISRWG, 2001]: + is toename; – is afname.

### 2.3.5 CONCEPT VAN DOMINANTE AFVOER

Afvoer is de belangrijkste en meest veranderlijke factor bij morfodynamische processen. Het is in dit verband van belang te definiëren welke afvoergrootte relevant is voor de vorming van het patroon en het dwarsprofiel. In het algemeen wordt hiervoor de dominante afvoer (*bankfull discharge*) gebruikt [FISRWG, 2001; Knighton, 1998, Leopold et al, 1964, Berg, van den, 1995]. Dit is een theoretisch afgeleide afvoergrootte die het gehele dwarsprofiel vult van insteek tot insteek, uitgaande van een waterloopstelsel dat in dynamisch evenwicht verkeert. Onder die omstandigheden wordt de dominante afvoer gelijk gesteld aan de effectieve of beekvormende afvoer (*effective discharge*). Deze laatste is de afvoer waarbij de grootste sedimentfractie getransporteerd wordt. De dominante afvoer wordt uitgedrukt in een bepaalde herhalingsperiode. Alhoewel er grote spreidingen zijn van de herhalingsperiode wordt algemeen verondersteld dat de dominante afvoer een herhalingsperiode heeft van 1 tot 2 jaar [FISRWG, 2001; Knighton, 1998, Leopold et al, 1964].

Het concept van spiraal- of bochtstroming (zie kader) wordt beschouwd als belangrijk verklarend mechanisme bij het ontstaan van morfologische veranderingen door waterafvoer [Wolfert, 2001; FISRWG, 2001; Knighton, 1998; Leopold et al, 1964]. Wolfert (2001) benadrukt de sturende seizoensinvloed van de **vegetatie** op de spiraal- of bochtstroming.

#### **Spiraal- of bochtstroming**

De periodieke uitschuring van buitenbochten en ophoging van binnenbochten en de rechte delen wordt verklaard vanuit het concept van spiraal- of bochtstroming (*helical flow*). Deze wordt groter naarmate de afvoer toeneemt [vb. Bouwknecht & Gelok, 1992]. Spiraal- of bochtstroming ontstaat door energieverliezen als gevolg van vormverandering van het doorstroomprofiel. Hierdoor treedt met name in bochten een dwarsstroming op (naast een doorgaande lengtestroming) waardoor een spiraalstroming ontstaat. Deze stroming verloopt over de waterbodem van de buitenbocht naar de binnenbocht en transporteert hiermee sediment uit de buitenbocht (verdieping) naar de binnenbocht (ophoging).

## 2.4 DISCUSSIE

### **Inkadering van de vraagstelling**

In het eerste inleidende hoofdstuk is aangegeven dat het ruimtebeslag voor toepassing van de veerkrachtstrategie hier wordt bepaald op basis van de boven- en meanderbreedte. Het hydromorfologisch rangordemodel in de tweede paragraaf van dit hoofdstuk laat zien dat er naast de boven- en meanderbreedte ook andere morfologische kenmerken zijn met een ruimtelijke relevantie. Die kenmerken zijn waterlooplengte, aantal vertakkingen, dichtheid van waterlopen en waterscheiding en behoren bij de grotere morfologische schaalniveaus (netwerk & stroomgebied).

Het is vanuit het vigerende beleidskader gewenst dat alle ruimtelijk relevante oppervlaktewaterkenmerken onderwerp zijn van dit onderzoek om daarmee het ruimtebeslag in beeld te brengen voor het instandhouden en herstellen van veerkrachtige oppervlaktewatersystemen. Uitgaande van de concepten over de natuurlijke ontstaanswijze van waterloopnetwerken en stroomgebiedgrenzen [Knighton, 1998; Leopold et al, 1964], kan gesteld worden dat oorspronkelijke hydromorfologische processen binnen het beheergebied van Waterschap Veluwe niet leiden tot een uitbreiding (extra ruimtebeslag) van waterloopnetwerken of stroomgebieden. Uit het volgende hoofdstuk blijkt namelijk dat de menselijke beïnvloeding op netwerk- en stroomgebiedniveau, heeft geleid tot uitbreiding van het ruimtebeslag (in plaats van inperking bij de kleinere schaalniveaus) ten opzichte van de niet menselijk beïnvloede situatie. Daarmee vervalt de noodzaak om de morfologische kenmerken van het netwerk- en stroomgebiedschaalniveau bij dit onderzoek te betrekken.

### **Hydromorfologische concepten**

Uit de beschreven concepten blijkt dat er geen enkel concept is waarmee de morfologische veranderingen van de boven- en meanderbreedte volledig kunnen worden beschreven en verklaard. Dit houdt verband met de complexe interacties qua fysiologische reguleringsprocessen en doorwerking in verschillende tijdschalen, tussen de onderlinge oppervlaktewatersysteemcomponenten en hun omgeving. Knighton (1998) stelt hierover dat de willekeur waarmee die complexe interacties kunnen verlopen een onafscheidelijk verbonden fundamentele eigenschap is van het hydromorfologische systeem. Die willekeur betekent dat de voorspelbaarheid van morfologische kenmerken vanuit de gangbare lineaire systeemtheoretische benaderingen allerminst zeker is (“een enkel effect is zelden het resultaat van één oorzaak”).

In dat verband stelt Phillips (1992) dat voor hydromorfologische vraagstukken, enkel niet-lineaire concepten bruikbaar zijn [Knighton, 1998]. Ook Schouten [2000] wijst op de toenemende ontwikkeling van niet-lineaire concepten (chaos theorie) en op de ontwikkeling van concepten over het “collectief geheugen van vormeenheden in de natuur”. Beide zijn ontstaan door inzichten van onderzoekers over de onvoorspelbaarheid en de spontane zelforganisatie waarmee natuurlijke systemen zich lijken te ordenen vanuit een schijnbare chaos. Het blijkt echter dat de toepassingen van de recent in ontwikkeling gekomen niet-lineaire concepten, thans beperkt bruikbaar zijn en dat de systeemtheoretische benadering vooralsnog de meest (ook in dit onderzoek) toegepaste is [Knighton, 1998].

### **Invloed van extremen**

Waterafvoer is samen met de vegetatie de meeste veranderlijke factor die van dominante invloed is op de morfologie van oppervlaktewateren. De hydromorfologische concepten geven aan dat de jaarlijks of tweejaarlijks voorkomende “dominante afvoer” wordt beschouwd als maatgevend voor de morfologie. Dit berust op de veronderstelling dat de morfologie die bij die afvoer ontstaat, een soort lange termijn gemiddelde is waarbij de invloeden van extreme hoge en lage waterafvoeren zijn uitgemiddeld (dynamisch evenwicht). Alhoewel het concept van dominante afvoer een algemeen toegepaste techniek is bij



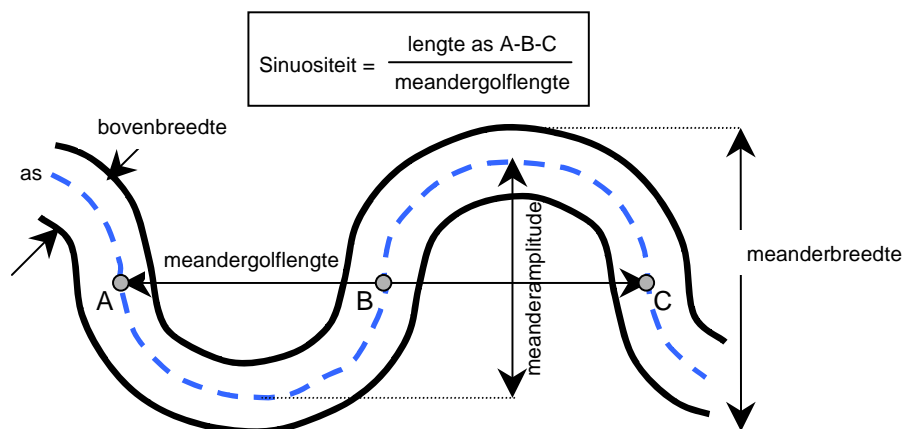
hydromorfologische vraagstukken, zijn er veel reserveringen bij het gebruik hiervan [FISRWG, 2001; Knighton, 1998]. Deze houden vooral verband met het feit dat uitgaande van die gemiddelde situatie, de effecten van laag frequente extreem grote waterafvoeren niet worden beschouwd. Het zijn juist die extreem grote afvoeren die effect hebben op de oppervlaktewatermorfologie op landschapschaalniveau (i.c. de schaalniveaus “patroon”, “netwerk” en “stroomgebied” uit het hydromorfologisch rangordemodel) [Sear et al., 2002; Knighton, 1998; Peters, 2001; Leopold et al, 1964]. De relevantie hiervan voor dit onderzoek is dat de vorming van de meanderbreedte dus vooral bepaald wordt door afvoeren die laag frequenter en groter zijn dan de dominante afvoer. Kochel [1988] stelt hierover dat de beïnvloeding van hydromorfologische patronen, verband houdt met waterafvoeren met een herhalingsperiode van vijftig jaar of meer [Knighton, 1998]. De effecten hiervan zijn echter sterk afhankelijk van de gebiedspecifieke omstandigheden en de kenmerken van de afvoer (v.b. tijdsduur, intensiteit). Sear et al (2002) concluderen dat waterafvoeren (uitgedrukt in  $m^3 \cdot s^{-1}$ ) die effectief zijn in verandering van de oppervlaktewatermorfologie op landschapschaalniveau. Deze zijn doorgaans groter dan circa twee maal de grootte van het stroomgebied (uitgedrukt in  $km^2$ ).

De extreme hoge afvoeren hebben vanzelfsprekend ook effect op de grootte van het dwarsprofiel (v.b verdieping). Deze effecten worden echter door de frequentere en kleinere afvoeren geminimaliseerd (effect van veerkracht) tot sprake is van een dynamisch evenwicht. Vandaar dat de bestaande concepten de dominante afvoer hiermee in verband brengen. Deze kleinere afvoeren komen vaker voor en zijn verantwoordelijk voor het grootste sedimenttransport [Knighton, 1998; Leopold et al, 1964]. De morfologische effecten van de terugkoppeling vanuit kleine afvoeren zijn te zwak om de morfologie op landschapschaal te beïnvloeden. Dit verklaart waarom deze structuren gehandhaafd blijven bij de dominante afvoer.

Het blijkt dat het concept van dominante afvoer bruikbaar is voor bepaling van de bovenbreedte, maar niet bruikbaar is om de meanderbreedte te bepalen. Hiervoor zijn grotere waterafvoeren verantwoordelijk. In het vierde hoofdstuk is uitgewerkt hoe dit in de methode voor de bepaling van de boven- en meanderbreedte is opgenomen.

### **Processen en factoren voor boven- en meanderbreedte**

Uit de hydromorfologische concepten blijkt dat er veel bekend is over de processen en factoren die ten grondslag liggen aan de vorming van de bovenbreedte. Dit is niet het geval voor de meanderbreedte. Het blijkt namelijk dat meanderbreedte niet of nauwelijks in relatie staat tot de sturende factoren [FISRWG, 2001; Leopold et al, 1964; Knighton, 1998]. Wel blijken er betrouwbare relaties te zijn bepaald voor andere meanderparameters waarmee de meanderbreedte samenhangt. Deze zijn in figuur 2.6 weergegeven.

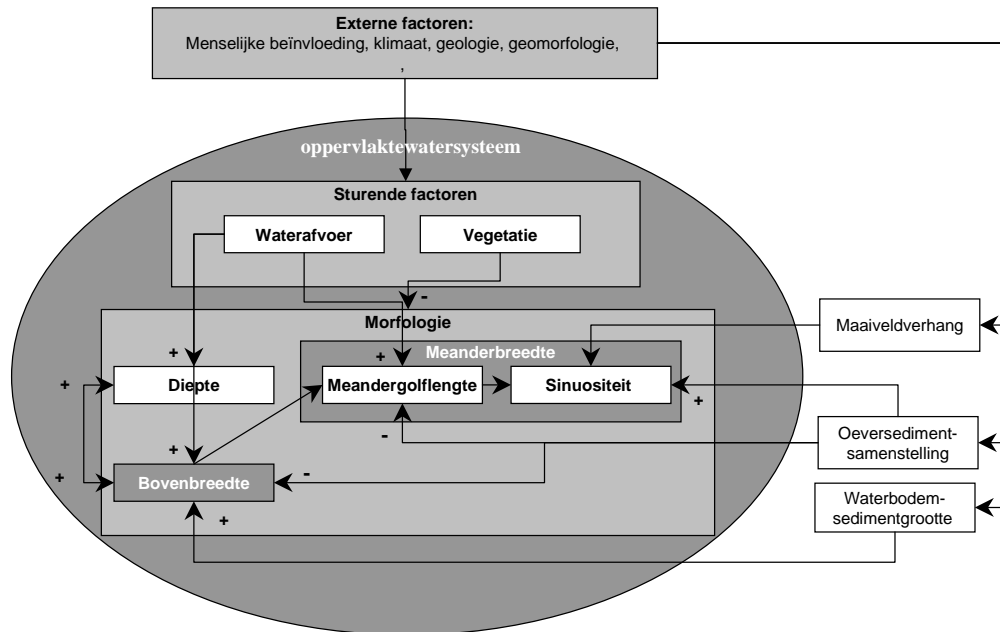


**Figuur 2.6:** Meanderparameters [naar: Leopold et al, 1964; FISRWG, 2001].

Het niet voorhanden zijn van betrouwbare empirische relaties kan logischerwijs verklaard worden vanuit het concept van gelijkmatig energieverbruik (§ 2.3.3). Daarin veronderstellen Bettess en White (1983), dat de patroonvorm afhankelijk is van de verhouding tussen het maaiveldverhang (sturende constante factor) en het benodigde waterspiegelverhang [Knighton, 1998]. Het maaiveldverhang is vrijwel geen enkele relatie expliciet opgenomen. De verhouding tussen maaiveld- en waterspiegelverhang kan worden weergegeven door middel van de sinuositeit. Op basis van het concept van Bettess en White (1983) kan verondersteld worden dat de meanderbreedte herleid kan worden uit de sinuositeit (ook meandergetal genoemd) en de meandergolf lengte. In hoofdstuk vier is hier nader op ingegaan.

## 2.5 CONCLUSIE

Uit de beschreven concepten kan geconcludeerd worden dat erosie, sedimentatie, sedimenttransport en de groei/sterfte van vegetatie, de belangrijkste zelfregulerende processen zijn bij de vorming van de boven- en meanderbreedte. De factoren waar deze processen van afhankelijk zijn, staan weergegeven in figuur 2.7. Dit figuur is een nadere uitwerking is van het veerkrachtmodel in figuur 2.1. Omwille van het overzicht zijn in figuur 2.7 alleen de dominante directe relaties van de bovenbreedte en de meanderbreedte aangegeven. Met een + of – teken is het effect van de relatie aangegeven (voorbeeld: een hogere waterafvoer resulteert in een toename (+) van de bovenbreedte). De sedimentvracht en het waterbodempluig zijn niet expliciet in het stroomdiagram opgenomen omdat beide geen *directe* relatie hebben met de boven- en meanderbreedte.



**Figuur 2.7:** Het hydromorfologische systeem van de boven- en meanderbreedte.

Bewerkt naar "Interrelationships in the fluvial system" [Knighton, 1998, pag. 2].

### Sturende factoren

Ten aanzien van de nadere uitwerking van de sturende factoren kan geconcludeerd worden dat deze bestaan uit waterafvoer en vegetatie. Gelet op de discussie over de invloed van hydrologische extremen op de morfologie, blijkt dat de bovenbreedte verband houdt met de dominante afvoer (herhalingstijd van één à twee jaar). Gelet op de discussie over de bepaling van de meanderbreedte, is hier om pragmatische redenen gesteld dat de meanderbreedte verband houdt met de waterafvoer met een herhalingstijd van vijftig jaar. In het vierde hoofdstuk staat toegelicht dat deze afvoer voor Nederlandse situaties circa 1,8 maal groter is dan de dominante afvoer. Ten aanzien van de invloed van vegetatie, kan geconcludeerd worden dat het effect hiervan op alle morfologische componenten onderling vergelijkbaar is: meer vegetatie leidt tot kleinere morfologische afmetingen. De invloed van vegetatie neemt echter af naarmate de waterdiepte toeneemt [Wolfert, 2001; WHC, 1992; Bloemendaal & Roelofs, 1998].

### Externe factoren

De externe factoren die rechtstreeks invloed uitoefenen op de boven- en meanderbreedte, zo blijkt uit de beschouwde concepten, zijn het maaiveldverhang en de oever- en waterbodemsedimentsamenstelling. De menselijke beïnvloeding en het klimaat zijn hierbij vanzelfsprekend ook van invloed, maar zijn niet locatiespecifiek en daarom hier niet nader gespecificeerd.

### **Bovenbreedte**

De bovenbreedte, zo is hier geconcludeerd, staat onder directe invloed van de sturende factoren: waterafvoer, vegetatie, oeversedimentsamenstelling en waterbodemsedimentgrootte. De relatie met de waterdiepte is hierbij ook aangegeven, omdat afhankelijk van de oeversedimentsamenstelling sprake kan zijn van een karakteristieke breedte-diepte verhouding. Door Knighton (1998) wordt gesteld dat de bovenbreedte een belangrijke schalingsvariabele is voor de geometrie van waterlopen omdat deze in nauw verband staat met de dominante afvoer (als sturende factor). Het blijkt namelijk dat er via empirische relaties vaste verhoudingen bestaan tussen de grootte van de bovenbreedte en de meandergolfenlengte. Daarom is hier ook het verband aangegeven tussen de bovenbreedte en de meandergolfenlengte. Ter illustratie: waterlopen in cohesieve gronden zijn doorgaans smaller, dieper, hebben een kleinere meandergolfenlengte en hebben een grotere meanderbreedte dan in zandige niet samenhangende gronden [Knighton, 1998].

### **Meanderbreedte**

Een belangrijke conclusie uit de beschouwde concepten, is dat de meanderbreedte niet rechtstreeks te herleiden is uit relaties met sturende en externe factoren. Gesteld is dat op basis van het concept van gelijkmatig energieverbruik, de meanderbreedte herleid kan worden uit de sinusoïde en de meandergolfenlengte. Uit figuur 2.7 blijkt dat de meanderbreedte onder invloed staat van de bovenbreedte en de sturende factoren: waterafvoer, vegetatie, oeversedimentsamenstelling (mate van cohesie) en maaiveldverhang.

### **3 HYDROMORFOLOGISCHE KARAKTERISTIEKEN BEHEERGEBIED WATERSCHAP VELUWE**

Uit de beschrijving van de morfodynamische concepten in het voorafgaande hoofdstuk, blijkt dat de bovenbreedte en de meanderbreedte onder directe dominante invloed staan van de maaiveldverhang, bodemsamenstelling en (oppervlaktewater)hydrologie. Dit hoofdstuk karakteriseert aan de hand van deze drie sturende factoren het beheergebied van Waterschap Veluwe. De inkadering die hiermee ontstaat, maakt duidelijk welke specifieke hydromorfologische processen en factoren relevant zijn in het beheergebied van Waterschap Veluwe. Dit is van belang bij het ontwerp van de methodiek voor de bepaling van de bovenbreedte en de meanderbreedte in het volgende hoofdstuk.

In de eerste drie paragrafen is het beheergebied van Waterschap Veluwe gekarakteriseerd, door in te gaan op maaiveldverhang, bodemsamenstelling en (oppervlaktewater)hydrologie. Daarbij is ook de betekenis aangegeven van de water- en oevervegetatie en de menselijke beïnvloeding. Na de discussieparagraaf is tenslotte in de conclusie onderbouwd welke processen en factoren relevant zijn in het beheergebied van Waterschap Veluwe. Uit dit gebiedspecifieke hoofdstuk blijkt dat de methodiek alleen gebaseerd hoeft te zijn op het voorspellen van de boven- en meanderbreedte voor rechte en meanderende waterlopen (vlechtende en verbindende waterlopen worden hier dus buiten beschouwing gelaten). Hierbij dient alleen onderscheid gemaakt te worden in cohesieve en niet-cohesieve bodems met een mediane korreldiameter van kleiner dan 2 mm (alles kleiner dan grind). Ook blijkt dat de invloed van vegetatie op de hydromorfologische processen relatief groot is vanwege de relatief geringe afmetingen van de wateren in het beheergebied van Waterschap Veluwe. Tenslotte blijkt dat bij het voorspellen van de boven- en meanderbreedte rekening gehouden moet worden met een sterk menselijk beïnvloed oppervlaktewatersysteem.

#### **3.1 MAAIVELDVERHANG**

Het maaiveldverhang (quotient van het hoogteverschil en de horizontale afstand tussen twee punten), is een belangrijke factor om een indruk te krijgen van de hoeveelheid stromingsenergie (§ 2.3.3). Om een indruk te krijgen van de orde grootte van de stromingsenergie, is hier gesteld dat in het beheergebied van Waterschap Veluwe het maaiveldverhang gelijk is aan het waterbodemverhang, vanwege de normalisatie en kanalisatie van waterlopen (enkele uitzonderingen daargelaten). Dit betekent dat aan de hand van het maaiveldverhang een beeld wordt verkregen van het waterbodemverhang. Van het waterbodemverhang zijn namelijk geen gebiedsdekkende gegevens voorhanden.

Het maaiveldverhang is bepaald via een GIS-analyse (Arcview) van maaiveldhoogtelijnen (1 m interval) en de hoofdwateren. De hoofdwateren zijn de voor de waterhuishouding

belangrijkste waterlopen, ook A-wateren genoemd. Door per kilometer hoofdwater het aantal hoogtelijnen te sommeren, is een beeld verkregen van de orde grootte van het maaiveldverhang en daarmee ook het waterbodenvhang. Het blijkt dat ter plaatse van hoofdwateren het maximale maaiveldverhang circa  $4 \text{ m} \cdot \text{km}^{-1}$  bedraagt (Veluwemassief) en het minimale maaiveldverhang kleiner is dan  $1 \text{ m} \cdot \text{km}^{-1}$  (poldergebieden). De meeste hoofdwateren hebben een maaiveldverhang tussen de  $1$  à  $2 \text{ m} \cdot \text{km}^{-1}$ .

### 3.2 BODEMSAMENSTELLING

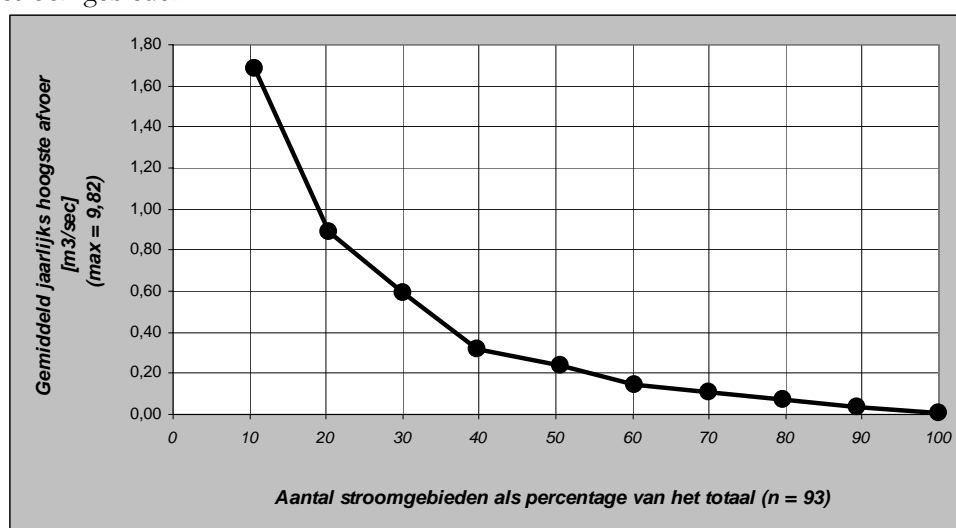
Het belang van het bodemtype bij hydromorfologische processen is hoofdzakelijk relevant in relatie tot de weerstand tegen erosie en de waterbodemsedimentsamenstelling. Voor het eerste wordt veelal onderscheid gemaakt in cohesieve en niet cohesieve bodems [v.b. Knighton, 1998]. Over het algemeen worden bodems met een mediane korreldiameter van kleiner dan  $50$  à  $60 \mu\text{m}$  als cohesief verondersteld [v.b. Knighton, 1998]. Bodems zijn zwaarder (moeilijker bewerkbaar) en dus cohesiever, naarmate het lutumgehalte (fractie  $< 2 \mu\text{m}$ ) toeneemt [Locher & De Bakker, 1990]. Mede rekening houdend met de textuurindeling van de Bodemkaart van Nederland, is hier gesteld dat cohesieve bodems bestaan uit meer dan  $8\%$  lutum (fractie  $< 2 \mu\text{m}$ ) en minder dan  $82,5\%$  zand (fractie  $50 - 2000 \mu\text{m}$ ). Veen en moerige gronden worden hierbij ook als cohesief verondersteld omdat deze een hogere mate van oeverstabiliteit kennen dan niet lemig zand [WHC, 1992].

Gelet op de voorkomende bodemtypen in het beheergebied van Waterschap Veluwe betekent het bovenstaande dat de twee klassen “grove leemarme zanden” en “fijne leemarme tot zwak lemige zanden”, hier tot de niet-cohesieve bodems worden gerekend. Hierbij uitgaande van het classificatiesysteem volgens de Bodemkaart van Nederland. Dit betekent dat tot de cohesieve bodemtypen alle klei-, veen-, en lemige zandgronden behoren. Opgemerkt dient te worden dat de classificatie hier is gebaseerd op het “hoofdbodemtype”; deze kan voorkomen in combinatie met een kleiner aandeel aan grind, zand, veen, klei, en/of leem. Vooral de grovere delen (i.c. grindfractie  $> 2000 \mu\text{m}$ ) zijn relevant voor de waterbodemsedimentsamenstelling vanwege de mogelijke vorming van een pleisterlaag. Deze kan ontstaan als het grind niet of nauwelijks wordt getransporteerd (te zwaar in verhouding tot de sleepkracht van het water), waardoor een dunne afsluitende (grind)laag op de waterbodem achterblijft. Dit kan leiden tot verhoudingsgewijs grotere erosie van de oevers (bovenbreedte) dan van de waterbodem (diepte).

### 3.3 HYDROLOGIE

Belangrijke hydrologische variabelen voor de bepaling van de bovenbreedte en de meanderbreedte zijn de afvoer en de geometrie van de waterlopen. Hiernaast is ook de vegetatie en de menselijke beïnvloeding van betekenis. De onderstaande beschrijving is daarom beperkt tot deze vier aspecten.

Karakteristiek voor het beheergebied van Waterschap Veluwe is de relatief smalle vorm van de stroomgebieden. Dit komt doordat de afstand tussen de regionaal hoogste en laagste delen (regionale drainagebasis) relatief kort is. Hierdoor is doorgaans sprake van korte en smalle stroomgebieden met daarin waterlopen met een weinig vertakte netwerkstructuur die direct uitmonden op de regionale drainagebasis (i.c. IJssel of randmeerkust). Dit betekent dat het beheergebied wordt gedomineerd door relatief veel kleine stroomgebieden met een relatief geringe afvoer. Dit blijkt ook uit figuur 3.1 waar de relatie is weergegeven tussen de gemiddeld jaarlijks hoogste afvoer (als maat voor de dominante afvoer) en het aantal stroomgebieden.



**Figuur 3.1:** Relatie tussen de gemiddeld jaarlijks hoogste afvoer en het aantal stroomgebieden.

*Ter verduidelijking: 10 procent van het aantal stroomgebieden heeft een gemiddeld jaarlijks hoogste afvoer van meer dan 1,7 m³/sec. Een overzicht van de gemiddeld jaarlijks hoogste afvoer ( $Q_{hm}$ ) is per stroomgebied weergegeven in bijlage A.*

Het huidige operationele waterkwantiteitbeheer en -onderhoud is gezien vanuit een morfodynamisch perspectief, hoofdzakelijk gericht op het zoveel mogelijk instandhouden van een bepaalde morfologische en hydrologische situatie (stabiliteit & capaciteit). Daarbij zijn vrijwel alle waterlopen ver- of gegraven (normalisatie en kanalisatie), met als uitgangspunt de minimalisatie van grondverzet en ruimtebeslag (zgn “economisch ontwerp”). Dit concept leidde tot de huidige trapeziumvormige, diepere en bredere geometrie van waterlopen met een groter waterbodemverhang dan onder natuurlijke omstandigheden het geval zou zijn. De meeste hoofdwateren hebben een diepte die varieert tussen de 0,8 m en 1,5 m. De bovenbreedte van de meeste hoofdwateren varieert tussen de 1 m en 4 m. Centrale peilbeheerthema’s zijn het tegengaan van te grote of te snelle waterpeilfluctuaties, erosie, sedimenttransport en sedimentatie (i.c. de natuurlijke dynamische processen). Dit wordt gedaan door de geometrie van de waterlopen (normalisatie) en de waterstaatkundige kunstwerken (kanalisatie), af te stemmen op het voorkomen van te hoge

stroomsnelheden (d.w.z.  $> 0,3$  m/sec). Omwille van de handhaving van de geometrie van de waterlopen, is het noodzakelijk dat periodieke maai- en baggerwerkzaamheden plaatsvinden (respectievelijk  $\leq 3$ /jaar en  $>1/10$  jaar). Alle niet beschaduwde waterlopen (circa 95 % van de totale lengte) worden namelijk gekenmerkt door een sterke begroeiing van kruidachtige water- en oevervegetatie. Door het maaien van de vegetatie wordt ook voorkomen dat er binnen enkele jaren een afvoerbelemmerende dichte houtachtige begroeiing ontstaat. Dit betreft hoofdzakelijk zwarte els en/of wilg. Naast deze beschouwing over de menselijke beïnvloeding op de geometrie van waterlopen, is ook de beïnvloeding via het grondgebruik van belang [Knighton, 1998]. Londo (1997) stelt dat ten opzichte van de natuurlijke omstandigheden de huidige afvoer minder gelijkmatig en aanzienlijk hoger is (nu meer afvoerpieken en -dalen). Ten grondslag hieraan ligt ondermeer de intensievere ont- en afwatering. De intensievere ont- en afwatering heeft in sommige gevallen ook geleid tot wijziging van stroomgebiedgrenzen door aanpassing (kortsluiting) van het waterloppennetwerk dat is ontstaan vanuit het “economisch ontwerp”.

### 3.4 DISCUSSIE

#### **Karakterisering maaiveldverhang**

Het maaiveldverhang is om pragmatische redenen vanuit een kwalitatief perspectief beschreven aan de hand van de ruimtelijke verdeling van een aantal klassengroottes. Gesteld kan worden dat voor dit onderzoek de resultaten van de maaiveldverhanganalyse een voldoende betrouwbaar en representatief beeld geven. Dit vanwege de grote punt dichtheid van het bronbestand (AHN) en omdat eventuele systematische fouten in het bronbestand geen effect hebben op de verhangberekening. Dit laatste komt doordat het verhang een relatieve maat is die uitgaat van een verschil in hoogte en lengte (uitgedrukt in de eenheid  $m \cdot km^{-1}$ ).

#### **Karakterisering bodemsamenstelling**

De bodemsamenstelling is beschreven op basis van het kaartbeeld van de digitale versie van de Bodemkaart van Nederland [Stiboka, 1960-1980]. De zuiverheid van dat kaartbeeld (1:50.000) kan afwijken van de werkelijkheid, door bijvoorbeeld vereenvoudiging van bodemgrenzen, verwaarlozing van kleine oppervlakten en een te geringe meetdichtheid (minimaal circa 6 boringen per hectare). Voor gedetailleerder informatie over de zuiverheid van de bodemkaart verwijs ik naar Bakker, de & Locher (1992). De verwachting is dat met de gebruikte bodemkaart in voldoende mate de cohesieve van de niet cohesieve gronden te onderscheiden zijn en dat daarmee de resultaten uit de bodemkaart bruikbaar zijn.

#### **Karakterisering hydrologie**

De hydrologische situatie is gekarakteriseerd aan de hand van gegevens over de gemiddeld jaarlijks hoogste afvoer ( $Q_{hw}$ ) en bovenbreedte van de hoofdwaters. De afvoer ( $Q_{hw}$ ) is per stroomgebied bepaald op basis van een algemeen geaccepteerde methode die uitgaat van grondwaterstand afhankelijke afvoerintensiteiten (zgn “maatgevende afvoer” [WHC, 1992]).



Er moet rekening mee worden gehouden dat deze afvoerwaarden betrekking hebben op een gemiddeld jaarlijks hoogste situatie, waarbij onbekend is wat de over- en onderschrijdingen kunnen zijn. Hiernaast is van belang dat de afvoergrootte betrekking heeft op het meest stroomafwaartse (lozings)punt en daar dus zijn maximum waarde bereikt. Aangenomen is dat de gebruikte grondwaterstanden (bron: grondwatertrappen uit de Bodemkaart van Nederland) voldoende representatief (actueel) zijn. De bovenbreedte van de hoofdwaters is benaderd op basis van een kennistabel, waarbij relaties zijn gelegd tussen geometrische kenmerken van waterlopen en bodemtypen. Gelet op de gebruikte methode en de onzekere kwaliteit van de basisgegevens, geven de hier bepaalde afvoer en bovenbreedte een orde van grootte aan en hebben beide een indicatief karakter. Dit wordt echter voldoende geacht voor een algemene gebiedsbrede conclusie over de relevante patroonvormen en factoren.

### **Sturende invloed van vegetatie bij relatief kleinere waterlopen**

In het vorige hoofdstuk is het effect van vegetatie als sturende factor aangegeven, mede in relatie tot de waterdiepte. Uit de karakterisering van het oppervlaktewatersysteem blijkt dat het merendeel van de waterlopen vrij ondiep is (< 1,5 m), waardoor deze relatief sterk beïnvloed worden door de effecten van vegetatie. [WHC, 1992]. De bestudeerde riviersystemen (stroomgebieden c.a. > 50 km<sup>2</sup>) die ten grondslag liggen aan de beschouwde concepten zijn doorgaans vele malen groter dan de wateren in het beheergebied van Waterschap Veluwe. Dit betekent dat de hydromorfologische concepten nauwelijks gebaseerd zullen zijn op invloeden van vegetatie. Gelet op het bovenstaande kan gesteld worden dat door de grotere invloed van watervegetatie de bovenbreedte en de meanderbreedte van wateren in het beheergebied van Waterschap Veluwe op basis van morfodynamische concepten waarschijnlijk worden overschat. De mate waarin dit gebeurd is sterk locatieafhankelijk.

### **Sturende invloed van menselijke beïnvloeding**

De effecten van menselijke beïnvloeding in het beheergebied van Waterschap Veluwe zijn naar verwachting vele malen groter ten opzichte van de (referentie) studielocaties voor de hydromorfologische processen. De klimaatverandering hierbij buiten beschouwing gelaten. In het beheergebied van Waterschap Veluwe zou zonder menselijke beïnvloeding volgens Londo (1997) sprake zijn van slechts *enkele* rechte tot meanderende beken. Andere vormen van permanent open water blijken namelijk te verdwijnen door verlanding, veenvorming of rivier- of zeeleiafzettingen.

De belangrijkste effecten van de menselijke beïnvloeding op de sturende factoren voor de bovenbreedte en de meanderbreedte, zijn de toename van waterafvoerpieken en –dalen (zelfs droogval) en de minimalisatie van sedimenttransport. De afvoerdynamiek zal echter verder vergroten door de verwachte klimaatveranderingen [Commissie Waterbeheer 21<sup>e</sup> eeuw, 2000]. Deze toename in het verschil tussen de hoge en lage afvoeren kan leiden tot lokale sedimentophoping of het ontstaan van pleisterlagen. De extra sedimentinput (door oever- en bodemerrosie) die door hoge afvoeren is ontstaan kan namelijk niet meer door de lagere afvoeren worden getransporteerd (energie-gelimiteerd). Gesteld kan worden dat op die locaties voornamelijk de bovenbreedte wordt onderschat op basis van de gangbare

morfodynamische beschouwingen die uitgaan van minder grote afvoerverschillen.

### 3.5 CONCLUSIE

#### **Sterke menselijke beïnvloeding**

Uit de beschrijving van de hydromorfologische karakteristieken, blijkt dat alle wateren in het beheergebied van Waterschap Veluwe qua morfologie en hydrologie onder sterke menselijke beïnvloeding staan. Dit heeft effect op de dominantie van bepaalde hydromorfologische processen die in het tweede hoofdstuk zijn beschreven. Geconcludeerd kan worden dat kenmerkende hydromorfologische processen zoals overstroming, erosie, sedimenttransport en sedimentatie, in de huidige situatie vrijwel gebiedsdekkend zoveel mogelijk zijn geminimaliseerd door een gericht beheer en onderhoud van de waterhuishoudkundige infrastructuur. Ten opzichte van niet menselijk beïnvloede oppervlaktewatersysteem is de dominante waterafvoer hoger (pieken) en de sedimentvracht lager (beide sturende factoren). De consequentie hiervan voor de bepaling van de boven- en meanderbreedte is verschillend. Op basis van figuur 2.5 mag namelijk verwacht worden dat de bovenbreedte niet gevoelig is voor deze combinatie van verstoring. Voor de meanderbreedte mag een vergroting verwacht worden ten opzichte van de beschreven hydromorfologische concepten over de niet menselijk beïnvloede situatie.

#### **Alleen rechte of meanderende waterlopen relevant voor Waterschap Veluwe**

De wijze van bepaling van de boven- en meanderbreedte verschilt per patroonvorm van de waterloop [Knighton;1998; Leopold et al, 1964; Maidment, 1992]. Dit houdt verband met het verschil in dominantie van de karakteristieke hydromorfologische processen tussen de patroonvormen (figuur 2.3).

Geconcludeerd kan worden dat, op basis van de beschreven gebiedskenmerken van het beheergebied van Waterschap Veluwe, onder zelfregulerende omstandigheden alleen rechte of meanderende patroonvormen kunnen ontstaan (en al hun tussenvormen). In de volgende hoofdstukken wordt daarom alleen van deze patroonvormen uitgegaan. Vlechtende en verbindende waterlopen vallen hiermee buiten het kader van dit onderzoek. Aan de conclusie over de beperking tot rechte of meanderende patroonvormen liggen argumenten ten grondslag.

In de eerste plaats blijkt volgens vergelijking 3.1 dat de waarden op basis van de voorkomende dominante waterafvoeren ( $Q_{\text{dom}}$ ) aanzienlijk lager zijn dan het voorkomende waterbodemverhang ( $S$ ). Dit betekent volgens deze veel toegepaste vergelijking, dat het onwaarschijnlijk is dat vlechtende patroonvormen ontstaan [Knighton, 1998; Leopold et al, 1964; Berg, van den, 1995].

$$S = 0,012 \cdot Q_{\text{dom}}^{-0,44} \quad (3.1)$$

[[Toelichting van de symbolen:  $S$ : waterbodemverhang ( $m \cdot m^{-1}$ );  $Q$ : dominante afvoer ( $m^3 \cdot sec^{-1}$ )]]

Op basis van vergelijking 3.1 blijkt dus dat in het beheergebied van Waterschap Veluwe alleen rechte, meanderende of verbindende patroonvormen kunnen voorkomen onder zelfregulerende omstandigheden.

In de tweede plaats is onderscheid in patroonvormen te maken op basis van de specifieke stromingsenergie (vergelijking 2.2) [Knighton, 1998; Van den Berg, 1995]. De specifieke stromingsenergie van de oppervlaktewatersystemen in het beheergebied van Waterschap Veluwe bedraagt tussen circa 0 en  $15 \text{ W m}^{-2}$  (orde grootte). Dit betekent volgens de indeling van Nanson en Croke (1992), dat alleen rechte, meanderende of verbindende patroonvormen kunnen voorkomen [Knighton, 1998]. Volgens de indeling van Nanson en Croke houden namelijk de klassen van specifieke stromingsenergie van  $<10$ ,  $10-60$ ,  $50-300 \text{ W m}^{-2}$  verband met respectievelijk rechte of verbindende waterlopen, meanderende en vlechtende waterlopen. Hierover stelt Sear et al. (2002) dat waterlopen met een specifieke stromingsenergie van kleiner dan  $35 \text{ W m}^{-2}$  worden gekarakteriseerd door geen actieve meandering en overwegend sedimentatie. Volgens Brookes houdt de specifieke stromingsenergie van  $35 \text{ W m}^{-2}$  verband met de grenswaarde tussen stabiele en niet stabiele (dynamisch evenwichtige) systemen [FISRWG, 2001]. Beneden die grenswaarde vindt overwegend sedimentatie plaats, daarboven overwegend erosie. Bij een specifieke stromingsenergie van  $<15 \text{ W m}^{-2}$  treedt aanzanding op, terwijl een specifieke stromingsenergie van  $>50 \text{ W m}^{-2}$  leidt tot sterke erosie (overgang naar vlechtend). Uit een overzicht van relaties tussen patroonvormen, stromingsenergie en waterbodemsamenstelling (Van den Berg, 1995) blijkt de waarde van  $50 \text{ W m}^{-2}$  tevens de kritische grens te zijn tussen meanderende of vlechtende patroonvormen bij een mediane korrelgrootte van de waterbodem van circa 1 mm (hier relevant ivm heersende bodemtype) [Berg, van den, et al., 2000].

Tot slot kan hierover geconcludeerd worden dat het, ondanks de onzekerheden over de beschreven “scherpe” klassengrenzen [Church, 2002; Knighton, 1998], op basis van de beschreven benaderingen onwaarschijnlijk is dat vlechtende patroonvormen ontstaan. Hier is gesteld dat verbindende patroonvormen ook niet tot ontwikkeling zullen komen door de geringe sedimentaanvoer (§ 2.2.1). Dit houdt verband met de beschreven effecten van menselijke beïnvloeding van het watersysteem. Dit leidt tot de eindconclusie hierover dat op basis van de beschreven gebiedskenmerken de bepaling van de boven- en meanderbreedte beperkt kan worden tot rechte of meanderende patroonvormen.

### **Onderscheid noodzakelijk in cohesieve en niet-cohesieve bodems**

Over de bodemsamenstelling in het beheergebied van Waterschap Veluwe kan geconcludeerd worden, dat voor de bepaling van de boven- en meanderbreedte onderscheid moet worden gemaakt in cohesieve en niet-cohesieve bodems. In het tweede hoofdstuk is het belang hiervan beschreven. De niet-cohesieve bodems bestaan uit een zandfractie met een mediane korreldiameter kleiner dan 2 mm. Dit sluit grindbodems en nog grovere bodems dus uit. De relevantie hiervan blijkt bij de keuze van empirische vergelijkingen.

**Grote invloed van vegetatie op hydromorfologische processen**

Gezien de relatief geringe afmetingen van de waterlopen, kan gelet op de discussie gesteld worden dat de invloed van water- en oevervegetatie op de hydromorfologische processen in het beheergebied van Waterschap Veluwe relatief groot is. Die invloed is vrijwel zeker groter dan in de onderzochte veel grotere oppervlaktewatersystemen. Met de ontwikkeling van de methode voor bepaling van de boven- en meanderbreedte dient hier rekening mee gehouden te worden.

## **4 METHODIEK VOOR DE BEPALING VAN DE BOVENBREEDTE EN DE MEANDERBREEDTE**

Een belangrijk uitgangspunt bij de uitwerking van dit hoofdstuk zijn de algemene concepten uit het tweede hoofdstuk en de gebiedspecifieke kenmerken en conclusies uit het derde hoofdstuk. Deze aspecten worden in dit hoofdstuk als bouwsteen meegenomen bij het ontwerp van de methodiek voor de bepaling van boven- en meanderbreedte. Hiermee wordt duidelijk op welke wijze het ruimtebeslag wordt bepaald voor het instandhouden en herstellen van veerkrachtige oppervlaktewatersystemen.

Het ontwerp van de methode is onderbouwd door in de eerste paragraaf kort in te gaan op de verschillende methoden uit de literatuur. Op basis hiervan volgt in de tweede paragraaf een nadere beschrijving en onderbouwing van de empirische methoden voor de bepaling van de bovenbreedte en de meanderbreedte. Dit is gedaan aan de hand van literatuurstudie naar vergelijkingen en methoden van reeds uitgevoerde onderzoeken. Gelet op de volgorde waarin de informatie uit de twee paragrafen met elkaar in verband staan, zijn beide afzonderlijk besloten met een discussie en conclusie.

In dit hoofdstuk komt naar voren dat de hier ontwikkelde methode voor de bepaling van de bovenbreedte en de meanderbreedte, is opgebouwd uit een complex aan onderling samenhangende empirische vergelijkingen. Het betreft een nieuwe methode door de combinatie van bestaande vergelijkingen uit hydromorfologische en cultuurtechnische ontwerprichtlijnen. De methode voorspelt de boven- en meanderbreedte aan de hand van gegevens over waterafvoer, maaiveldverhang en bodemtype. Om een juiste en gebruikersvriendelijke toepassing van de methode te waarborgen, zijn gelet op de complexiteit van de gebruikte vergelijkingen, deze in een rekenprogramma verwerkt.

### **4.1 KEUZE VAN EEN ONTWERPMETHODIEK**

De methoden die worden toegepast bij hydromorfologische ontwerpvoorbeeldstukken voor vorm, patronen en afmetingen zijn onder te verdelen in analoog, empirisch en analytisch [v.b. Skidmore et al, z.jr.]. In het onderstaande zijn de voordelen en beperkingen van de drie methoden toegelicht en is onderbouwd welke methode in dit onderzoek gebruikt wordt.

#### **4.1.1 DRIE ONTWERPMETHODIEKEN**

##### **Analoog**

Analoge methodes gaan uit van voorbeelden op basis van historische of actuele hydromorfologische karakteristieken (kopiëring van voorbeeldlocaties). Met deze methode kunnen, in tegenstelling tot de andere twee, de geometrische parameters (breedte, vorm, patroon) op eenvoudiger wijze worden bepaald, zonder gebruik te maken van berekeningen. Skidmore et al (z.jr.) stelt hierover echter dat als de sturende factoren van de

voorbeeldlocatie niet identiek zijn aan die van het doelobject, de rechtvaardiging voor het gebruik van deze methode hiermee vermindert. Dit geldt ook als de sturende factoren van de voorbeeldlocaties niet in dynamisch evenwicht zijn met de morfologie (§ 2.3.4). Voor beide voorwaarden geldt dat zij nauwelijks met grote zekerheid zijn vast te stellen voor historische voorbeeldsituaties. Over het gebruik van historische gegevens (beeldmateriaal en literatuur) stelt Verdonschot et al. (1995) dat deze bruikbaar zijn als basisinformatie bij de visievorming bij beekherstelprojecten en voor het opstellen van ecologische referenties (situatie zonder de effecten van menselijke beïnvloeding).

### **Empirisch**

Vanuit een morfodynamisch perspectief zijn empirische methoden gestoeld op statistisch onderbouwde vergelijkingen die veelal zijn gebaseerd op vaste relaties tussen geometrische parameters met één of meer bekende (of bekend veronderstelde) variabelen. Centraal bij die hydromorfologische empirische vergelijkingen staat de machtsfunctie:

$$Y = a \cdot X^b \quad 4.1$$

waarin Y de variabele voorstelt die afhankelijk is van X, de coëfficiënt a en de exponent b. De waarde van de coëfficiënt en de exponent varieert sterk met het stelsel van de gebruikte eenheden (v.b. Engels↔SI). Die vaste relaties geven veelal alleen een voorspeld gemiddelde weer. Deze zijn veelal vermeld zonder betrouwbaarheid en zijn gebaseerd op statistische analyse (regressie) van veldgegevens. Om hierbij een zo hoog mogelijke betrouwbaarheid te geven, zijn de vergelijkingen gebaseerd op zo groot mogelijke datasets van oppervlaktewatersystemen die doorgaans in dynamisch evenwicht verkeren [Farias et al, 1998; Knighton, 1998, Leopold et al, 1964].

De generalisatie die door de statistische analyse ontstaat, leidt ertoe dat aan een empirische vergelijking (met een variabele) meerdere hydromorfologische processen (relaties) en mogelijk ook meer variabelen ten grondslag kunnen liggen. Er zijn daarom altijd onzekerheden verbonden aan de betrouwbaarheid en daarmee ook aan de toepassing van empirische vergelijkingen buiten de brongegevens en de hydromorfologische processen waarvan zij zijn afgeleid [v.b. Skidmore et al (z.jr); Knighton, 1998]. Cruciaal blijft de voorwaarde van vergelijkbare hydromorfologische condities van de veldgegevens op stroomgebiedniveau. Ondanks deze scepsis blijken empirische vergelijkingen zeer waardevol te zijn om een orde grootte aan te geven en worden veel toegepast bij hydromorfologische vraagstukken [Skidmore et al, z.jr. ]. Dit houdt verband met de eenvoud van de methode, maar ook met het inzicht dat hydromorfologische processen zo complex zijn dat een exacte voorspelling vooralsnog niet mogelijk is [Knighton, 1998].

### **Analytisch**

Analytische methoden gaan uit van de veronderstelling dat natuurkundige wetmatigheden ten grondslag liggen aan het gedrag van natuurlijke systemen. Op basis hiervan kan, uitgaande van een set uitgangsgegevens over sturende factoren, het gedrag en de geometrische parameters worden voorspeld. Die uitgangsgegevens over sturende factoren berusten vaak

op vele aannames, zodat de betrouwbaarheid van deze methode net als de andere twee onzeker kan zijn. Het voorspellen vindt tegenwoordig plaats met behulp van computerprogramma's die doorgaans gebaseerd zijn op hydraulische- en sedimenttransportfuncties. Analytische methoden zijn vooral geschikt voor het inschatten van effecten van de sturende factoren. Tevens zijn deze geschikt voor sterk menselijk beïnvloede situaties waar geen sprake is van een dynamisch evenwicht tussen sturende factoren en de herstelfactoren. Dus waar de betrouwbaarheid van de ander twee methoden onzeker is [Skidmore, et al z.jr]. Het werken met analytische methoden is gespecialiseerd werk omdat een zeer zorgvuldige werkwijze vereist is, waarbij veel kennis nodig is over de rekenprocessen en de beoordeling van de in- en outputgegevens.

#### 4.1.2 DISCUSSIE

De methoden die worden toegepast bij hydromorfologische ontwerpvoorbeeldstukken zijn hier beschreven aan de hand van de indeling volgens Skidmore et al (z.jr.). Deze indeling geeft namelijk een goed beeld van het ontwerpspectrum van eenvoudige analoge, via empirische tot complexe analytische methoden. Binnen alle drie methoden is een nadere classificatie mogelijk, bijvoorbeeld op basis van de gebruikte informatie, analyse en rekentechnieken. Omwille van het overzicht is hier niet dieper op ingegaan. Skidmore (z.jr.) en Farias et al (1998) geven aan dat bij hydromorfologische ontwerpvoorbeeldstukken veelal gebruik wordt gemaakt van een combinatie van methoden. Bij alle methoden benadrukken zij de noodzakelijke scepsis bij de beoordeling van de resultaten, vanwege de beperkingen ten aanzien van aannames en vereenvoudigingen. Uit diverse bronnen blijkt dat het ontbreken van een standaardmethode voor hydromorfologische ontwerpvoorbeeldstukken, vooral verband houdt met de mate van betrouwbaarheid waarmee bepaalde (invoer)waarden kunnen worden gemeten of worden ingeschat. Ook is de betrouwbaarheid waarmee uitkomsten kunnen worden gegenereerd en beoordeeld (kennisaspect) hierop van invloed.

Uit de literatuur blijkt verder dat vrijwel alle methoden voor hydromorfologische ontwerpvoorbeeldstukken benaderd zijn vanuit een integraal systeemherstel van hydromorfologie en ecologie. Hiermee wordt een hydromorfologisch ontwerp verondersteld (concept van dynamisch evenwicht: § 2.3.4) dat na realisatie leidt tot zo min mogelijk wijzigingen van patroon, vorm of afmetingen [FISRWG, 2001]. Als uit wordt gegaan van een benadering die niet is gebaseerd op het voorspellen van de effecten van dynamische processen, zijn ook andere methoden bruikbaar. Naast "niets doen", waarbij geen ingrepen worden gedaan, kan de in Nederland veel gebruikte "quasi analoge methode" worden onderscheiden. Hierbij worden veranderingen gemaakt in patroon, vorm of afmetingen van een waterloop (v.b. aanleg van een meander) die niet in relatie staan tot de huidige of oorspronkelijke dynamische processen. Deze methode wordt toegepast voor het creëren van milieugradiënten voor de ontwikkeling van flora en fauna of verfraaiing van het landschap. Met andere woorden: de morfologie is hierbij niet in overeenstemming met de onderliggende processen. Deze methoden zijn daarom hier niet behandeld, omdat de relatie tussen morfologie en de dynamische processen het uitgangspunt vormt voor dit onderzoek.

#### 4.1.3 CONCLUSIE

Over de keuze van een methode voor hydromorfologische ontwerpvoorstellen stelt Skidmore et al. (z.jr.) dat deze gebaseerd moet zijn op ondermeer:

- De mate van hydromorfologische stabiliteit (dynamisch evenwicht) van het stroomgebied en de waterloop;
- De beschikbaarheid van relevante analoge of empirische vergelijkingen;
- De mate waarin de sturende factoren kwantificeerbaar zijn.

Gelet op het bovenstaande is hier gesteld dat bij de huidige stand van zaken alleen de *empirische* methodes geschikt zijn voor het bepalen van de bovenbreedte en de meanderbreedte. Hieraan liggen een aantal redenen ten grondslag, die hoofdzakelijk verband houden met de verminderde geschiktheid voor Waterschap Veluwe van de analytische en de analoge methode. Op de eerste plaats is voor het werken met analytische methoden specialistische kennis benodigd die vooralsnog niet beschikbaar is bij Waterschap Veluwe. Op de tweede plaats blijkt dat voor de analytische methode meer verschillende invoervariabelen benodigd zijn (v.b. sedimentvrachten), waarover nu geen gegevens beschikbaar zijn bij Waterschap Veluwe. Tevens is er bij Waterschap Veluwe nu te weinig kennis om de waarden van die ontbrekende invoervariabelen voldoende betrouwbaar in te schatten. Als echter blijkt dat de gesignaleerde kennis- en informatiehiaten zijn opgelost, is de analytische methode te verkiezen boven de ander twee methoden. Dit heeft vooral te maken met het feit dat in het beheergebied van Waterschap Veluwe geen dynamisch evenwicht is. Ook kan met een analytische methode de dominante rol van de vegetatie beter worden ingeschat. Dit is namelijk onzekerder bij de empirische of analoge methode.

De analoge methode wordt hier ongeschikt geacht vanwege het ontbreken van goede voorbeeldlocaties waar sprake is van een dynamisch evenwicht. Tevens blijken voorbeelden van patroonvormen uit historische kaartbeelden niet bruikbaar door de inmiddels fors toegenomen menselijke beïnvloeding van de sturende factoren (zie hoofdstuk 3).

De keuze voor de empirische methode is om redenen van de mindere geschiktheid van de andere twee methoden, gebaseerd op de veronderstelling dat er voldoende relevante vergelijkingen beschikbaar zijn (§ 4.2.4). Ten aanzien van de toepassing binnen Waterschap Veluwe is aangenomen dat de empirische methode en de resultaten voldoende navolgbaar zullen zijn. Hiernaast is van betekenis dat de empirische vergelijkingen doorgaans direct dan wel indirect zijn gerelateerd aan waterafvoer. Deze variabele wordt op een aantal plaatsen gemeten door Waterschap Veluwe en kan gebiedsdekkend worden bepaald. Tenslotte is de zwakte van de toepassing van deze methode voor het beheergebied van Waterschap Veluwe, dat er geen sprake is van de veronderstelde hydromorfologische stabiliteit (dynamisch evenwicht). Gezien de conclusies uit de gebiedskarakteristieken mag verwacht worden dat de resultaten uit de empirische vergelijkingen een onderschatting kunnen geven van de afmetingen van de meanderbreedte (bovenbreedte wordt goed voorspeld).



## 4.2 NADERE UITWERKING VAN EMPIRISCHE METHODES

Gelet op de keuze in de vorige paragraaf voor empirische methoden en het kader van dit onderzoek, betekent dat het gebruik van vergelijkingen en methodes uit reeds uitgevoerde onderzoeken hier centraal staan. Deze behoeven gezien de conclusies over de gebiedskarakteristieken, hier alleen betrekking te hebben op rechte en meanderende patroonvormen. Vanwege de beperkte geldigheid van empirische vergelijkingen buiten de gebruikte brongegevens worden vergelijkingen gebruikt die zoveel mogelijk gebaseerd zijn op de gebiedskarakteristieken (bodemtype-afvoergrootte-geometrie) van het beheergebied van Waterschap Veluwe. In het onderstaande staan de resultaten van een literatuurstudie naar vergelijkingen en methoden voor de bepaling van bovenbreedte en de meanderbreedte weergegeven.

### 4.2.1 BEPALING BOVENBREEDTE

Uit de conclusies van het tweede hoofdstuk blijkt het bodemtype-specifieke verband van de bovenbreedte met de dominante afvoer (herhalingsstijd van één á twee jaar). Uit de literatuur blijkt dat er relatief veel vergelijkingen (volgens vergelijking 4.1) voorhanden zijn om de bovenbreedte te voorspellen op basis van de dominante afvoer. Dit vanwege de betrouwbaarheid hiervan en omdat de bovenbreedte een belangrijke variabele is bij tal van ontwerpvragestukken. Een overzicht van de relevante vergelijkingen is opgenomen in bijlage B. In de meeste onderzoeken is de bovenbreedte gerelateerd aan de afvoer vanwege de hoge mate van correlatie (vb Farias et al, 1998; Rosgen, z.jr.). Hierbij worden soms verschillende afvoergroottes gebruikt (v.b. gemiddelde afvoer, dominante afvoer, afvoer met de hoogste sedimentlast). Gelet op de sturende invloed van het bodemtype is het bij alle afvoer gerelateerde vergelijkingen van belang te weten voor welk bodemtype die vergelijking is opgesteld. Zo worden sterk cohesieve bodems doorgaans gekenmerkt door relatief smallere bovenbreedtes, kleinere meandergolf lengtes en een kleinere meanderbreedtes [Knighton, 1998; Leopold et al, 1962]. Schumm (1971) en Ferguson (1973) relateren daarom de bovenbreedte naast de afvoer, ook aan het klei-silt gehalte van respectievelijk de oevers en waterbodem of alleen de oevers [Knighton, 1998]. Knighton (1998) stelt dat de dominante afvoer hierbij de grootste sturende factor is en de bovenbreedte als schalingsfactor voor de afvoer kan worden beschouwd. In dat verband stellen Knighton (1998) en Leopold et al (1962) dat de hier ook relevante meandergolf lengte, in direct verband staat met de bovenbreedte. Naast deze directe oorzaak-effect relaties zijn ook puur empirische vergelijkingen bekend van bovenbreedte en andere geometrische kenmerken [FISRWG, 2001] of tussen de bovenbreedte en het afwaterend oppervlak [v.b. Ward et al, 2002]. Naast de empirische vergelijkingen volgens vergelijking 4.1, wordt bij het ontwerpen van de morfologisch stabiele bovenbreedtes, veelal gebruik gemaakt van de (empirische) formule van Manning [WHC, 1992]:

$$Q = A \cdot R^{2/3} \cdot K_m \cdot S^{1/2} \quad (4.2)$$

[Toelichting van de symbolen:  $Q$  dominante afvoer ( $m^3 \cdot sec^{-1}$ );  $A$  natte oppervlakte ( $m^2$ );  $R$  hydraulische straal ( $m$ );  $K_m$  wandruwheidsfactor ( $m^{1/3} \cdot sec^{-1}$ );  $S$  waterspiegelverhang ( $m \cdot m^{-1}$ )

De bovenbreedte is in vergelijking 4.2 verdisconteerd in het natte oppervlakte en de hydraulische straal via vergelijking 4.11 en 4.12.

#### 4.2.2 *BEPALING MEANDERBREEDTE*

Over de bepaling van de meanderbreedte is in het tweede hoofdstuk geconcludeerd dat deze voor dit onderzoek niet rechtstreeks uit empirische afvoerrelaties te herleiden is. In paragraaf 2.5 is geconcludeerd dat uitgaande van het concept van gelijkmatig energieverbruik, de meanderbreedte te bepalen is uit de meandergolfenlengte en het meandergetal. Verder blijkt uit die paragraaf dat de berekening van de meanderbreedte gebaseerd moet zijn op de waterafvoer met een herhalingsstijd van vijftig jaar ( $T=50$ ).

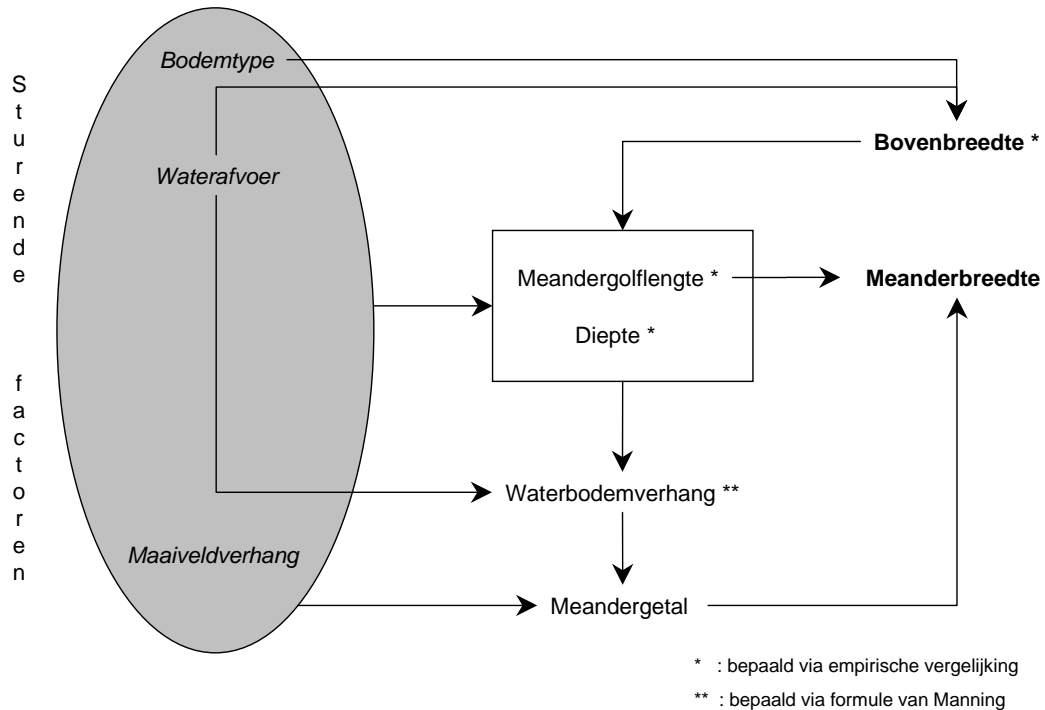
Voor de bepaling van de meandergolfenlengte zijn betrouwbare vergelijkingen beschikbaar die zijn gebaseerd op waterafvoer of bovenbreedte [FISRWG, 2001]. Voor de bepaling van het meandergetal zijn geen betrouwbare vergelijkingen beschikbaar die rechtstreeks verband houden met andere variabelen. Het meandergetal echter kan berekend worden door het maaiveldverhang te delen door het waterspiegelverhang (de verantwoording hiervoor ligt in het concept van gelijkmatig energieverbruik).

#### 4.2.3 *DISCUSSIE*

Uit de literatuur blijkt dat er van de empirische vergelijkingen vaak onvoldoende bekend is over de noodzakelijke brongegevens, de nauwkeurigheden en het geldigheidsgebied [Skidmore et al. (z.jr.); Knighton, 1998]. Het belang hiervan is in de vorige paragraaf toegelicht. Uit de toelichting op de vergelijkingen van bijlage B blijkt dat deze gebaseerd zijn op buitenlandse locaties met waarschijnlijk andere klimatologische omstandigheden. Dit betekent voor de toepassing in het beheergebied van Waterschap Veluwe, dat verschillen in hydrologisch regime hierbij ook een rol spelen, naast bijvoorbeeld bodemtypeverschillen. Waterloopafmetingen staan volgens Yu en Wolman (1987) immers naast afvoergrootte, ook onder invloed van het afvoerregime: afvoerpieken leiden doorgaans tot grotere bovenbreedtes (Osterkamp, 1980) [Knighton, 1998]. Het is omwille van de vele onzekerheden in de informatie uit de verschillende onderzoeksgebieden en de kenmerken van het beheergebied van Waterschap Veluwe, hier nu niet mogelijk een inschatting te maken van de effecten van het verschil in afvoerregime. Calibratie voor de Veluwse omstandigheden is vooralsnog uitgesloten vanwege het ontbreken van goede voorbeeldlocaties. Geconstateerd kan worden dat deze onzekerheden bijdragen aan de scepsis over de uitkomsten van de vergelijkingen.

#### 4.2.4 *CONCLUSIE*

In de voorafgaande conclusies over de hydromorfologische concepten, de gebiedskarakteristieken en de geschikte methoden, is een kader ontstaan voor het ontwerp van een procedure voor de bepaling van de bovenbreedte en de meanderbreedte. De architectuur van die procedure staat afgebeeld in figuur 4.1. De onderbouwing en toelichting hiervan staat onder de figuur beschreven.



**Figuur 4.1:** Model voor de bepaling van de bovenbreedte en de meanderbreedte.

#### Voorwaarde van minimale specifieke stromingsenergie

Een belangrijke voorwaarde voor een juiste interpretatie van de hier voorspelde waarden is dat er sprake moet zijn van voldoende hoge specifieke stromingsenergie (zie conclusies § 3.5). Op basis van de specifieke stromingsenergie, zo constateren Knighton (1998), FISRWG (2001) en Sear et al (2002), is onderscheid te maken in de mate waarin zelfregulerende processen kunnen optreden en morfologische veranderingen kunnen optreden (i.c. erosie een dominant proces is). Geconcludeerd kan worden dat de specifieke stromingsenergie dus ook bepalend is voor de vorming van de boven- en meanderbreedte. **In navolging van Nanson en Coke (1992) [Knighton, 1998] is hier gesteld, dat boven- en meanderbreedte door zelfregulerende processen kunnen ontstaan als de specifieke stromingsenergie groter is dan  $10 \text{ W m}^{-2}$ .** De waarde van  $10 \text{ W m}^{-2}$  is de laagste die in de literatuur staat aangegeven (zie § 3.5) en wordt hier als representatief geacht. Dit omdat verwacht wordt dat gelet op de gebiedskarakteristieken, bij een lagere specifieke stromingsenergie relatief snel erosie optreedt door de relatief geringe sedimentaanvoer. Uit vergelijking 2.2 blijkt dat de specifieke stromingsenergie bepaald kan worden op basis van de onderstaande vergelijkingen.

### **Methode voor de voorspelling van de bovenbreedte**

Uit de beschrijving van de empirische methoden blijkt dat de bepaling van de bovenbreedte kan plaatsvinden via twee verschillende benaderingen: via vergelijkingen of via de formule van Manning. Gekozen is voor de empirische vergelijkingen, omdat de formule van Manning in het kader van dit onderzoek minder geschikt is. Hieraan liggen twee redenen ten grondslag. Ten eerste kan de bovenbreedte niet rechtstreeks worden herleid uit de afvoer zonder vooraf aannames te maken over de andere variabelen in de formule. Belangrijk hierbij is de aanname over het waterbodem(en waterspiegel-)verhang. Uit de hydromorfologische concepten blijkt namelijk dat deze hier een belangrijke herstelfactor is die afhankelijk is van het maaiveldverhang en de specifieke stromingsenergie waarop ook de bovenbreedte van weer invloed is. Dus omdat het waterbodemverhang voor dit vraagstuk een afhankelijke variabele is (in tegenstelling tot de meeste cultuurtechnische ontwerpen) kan de bovenbreedte hier niet worden bepaald met de formule van Manning.

Ten tweede blijkt uit het voorafgaande de directe relatie en de sterke statistische verbanden tussen de dominante afvoer en de bovenbreedte. Gesteld is dat daarom het gebruik van empirische vergelijkingen op basis van de dominante afvoer hier geschikt zijn voor de bepaling van de bovenbreedte. Hierdoor is geen gebruik gemaakt van vergelijkingen gebaseerd op ander geometrische variabelen. Vergelijkingen waarbij ook het silt-klei gehalte een rol speelt worden niet in beschouwing genomen vanwege het extra veldonderzoek dat hiervoor noodzakelijk is terwijl het onduidelijk is welke nauwkeurigheidsverbetering hier tegenover staat.

Met de sturende invloed van het bodemtype op de bovenbreedte is rekening gehouden, door voor cohesieve en niet-cohesieve bodems aparte vergelijkingen te gebruiken op basis van de dominante afvoer. Uitgaande van de conclusies uit paragraaf 2.5, dienen deze vergelijkingen gebaseerd te zijn op de dominante afvoer. Bij de vergelijkingen zijn ook betrouwbaarheidsmarges (bandbreedtes) aangegeven in verband met de discussie over de algemene onzekerheden over toepassingen van empirische vergelijkingen en de onzekerheden van de invloeden van vegetatie en menselijke beïnvloeding. Onderstaand is toegelicht hoe de dominante afvoer en de daaruit afgeleide bovenbreedtes worden bepaald. In het volgende hoofdstuk staat de rekenwijze toegelicht.

- **Bepaling dominante afvoer:** dit is de waterafvoer met een herhalingsstijd van 1 à 2 jaar (§ 2.5). Bij de methoden voor bepaling van de waterafvoer kan onderscheid gemaakt worden in veldmetingen en herleiding van de waterafvoer uit gebiedskenmerken [v.b. Leopold et al, 1962; Maidment, 1992]. Veldmetingen vinden binnen het beheergebied van Waterschap Veluwe slechts op een beperkt aantal locaties plaats. Dit betekent dat een gebiedsdekkend beeld van de waterafvoer volgens deze methode niet mogelijk is. Methodes voor herleiding van de waterafvoer uit gebiedskenmerken, zijn hoofdzakelijk gebaseerd op vergelijkingen met de grootte van het stroomgebied [v.b. Leopold et al ,1962; Maidment, 1992] of op grondwaterstand gerelateerde afvoerfactoren [WHC, 1992]. Waterschap Veluwe maakt veel gebruik van deze laatste methode. Uit vergelijking van veldgegevens blijkt dat de “maatgevende afvoer” op basis van de

afvoerfactorenmethode, overeenkomt met de langjarig gemiddelde jaarlijks hoogste afvoer (herhalingsstijd circa 1 jaar). Gelet op het bovenstaande is daarom hier gesteld dat de dominante afvoer bepaald wordt op basis van de maatgevende afvoer volgens de afvoerfactorenmethode. Rekening houdend met de beleidsopgave uit het Nationaal bestuursakkoord water [Vereniging van Nederlandse Gemeenten, Unie van waterschappen, Interprovinciaal Overleg, Rijkswaterstaat, 2003], wordt de maatgevende afvoer hier met 10% verhoogd om rekening te houden met de effecten van de verwachte klimaatveranderingen (middenscenario 2050).

- **Bepaling bovenbreedte voor niet-cohesieve gronden:** gekozen is voor vergelijking 4.3 [CECW-EH-D, 1994]. Uit de toelichting bij deze vergelijking blijkt namelijk het corresponderende geldigheidsbereik voor de gebiedskenmerken van Waterschap Veluwe. Tevens blijkt dat deze vergelijking wat lagere en realistischere waarden berekend dan de andere vergelijkingen (zie ook § 3.4). De betrouwbaarheidsmarge is bepaald door verdubbeling van het verschil tussen vergelijking 4.3 en 4.4 [Lacey, 1929; Knighton, 1998]. Ten grondslag aan de keuze voor vergelijking 4.4 ligt het onderzoeksresultaat van Farias et al (1998), waaruit blijkt dat deze formule goede resultaten geeft voor het voorspellen van de bovenbreedte voor zandgronden in het algemeen.

$$B = 3,83 \cdot Q^{0,50} \quad (4.3)$$

$$\text{Betrouwbaarheidsmarge} = 4,84 \cdot Q^{0,50} \quad (4.3)$$

[Toelichting van de symbolen:  $Q$  dominante afvoer ( $m^3 \cdot sec^{-1}$ );  $B$  bovenbreedte ( $m$ )]

- **Bepaling bovenbreedte voor cohesieve gronden:** gekozen is voor vergelijking 4.5 [CECW-EH-D, 1994] vanwege dezelfde argumentatie als voor vergelijking 4.3 voor dit bodemtype. De betrouwbaarheidsmarge is bepaald door verdubbeling van het verschil tussen vergelijking 4.5 en 4.6 [Simons & Albertson, 1963; Knighton, 1998]. Ten grondslag aan de keuze voor vergelijking 4.6 ligt het geldigheidsbereik voor cohesieve oevers van waterlopen met zandige bodem en een kleine sedimentvracht. De keuze voor de kleine sedimentvracht is hier het meest relevant, gelet op de hydrologische gebiedskarakteristieken (§ 3.3).

$$B = 2,91 \cdot Q^{0,50} \quad (4.5)$$

$$\text{Betrouwbaarheidsmarge} = 3,93 \cdot Q^{0,50} \quad (4.6)$$

[Toelichting van de symbolen:  $Q$  dominante afvoer ( $m^3 \cdot sec^{-1}$ );  $B$  bovenbreedte ( $m$ )]

**Methode voor de voorspelling van de meanderbreedte:** mede gelet op de conclusies uit de voorafgaande paragrafen, wordt de meanderbreedte hier bepaald op basis van de meandergolflengte en het meandergetal. Ook blijkt (§ 2.5) dat de berekening van de meanderbreedte gebaseerd moet zijn op de waterafvoer met een herhalingsstijd van vijftig jaar ( $T=50$ ). Bij de bepaling van de meanderbreedte moeten ook effecten van bodemtype worden opgenomen vanwege de aangetoonde relatie tussen beiden [Knighton, 1998].

Het meandergetal wordt hier bepaald door het maaiveldverhang te delen door het waterspiegelverhang. Informatie over het maaiveldverhang is beschikbaar via het GIS van Waterschap Veluwe. Onderstaand is toegelicht hoe de waterafvoer T=50, de meandergolfenlengte, het waterspiegelverhang en de hieruit afgeleide meanderbreedte wordt bepaald. In het volgende hoofdstuk staat de rekenwijze toegelicht.

- **Bepaling waterafvoer T= 50:** dit is de waterafvoer met een herhalingsstijd van 50 jaar (§ 2.5). Uit afvoeroverschrijdingsfrequenties blijkt dat de waterafvoer met een herhalingsstijd van eens per vijftig jaar, overeenkomt met circa 1,65 maal de maatgevende afvoer [WHC, 1992]. Uitgaande van de conclusies over de bepaling van de dominante afvoer, is hier gesteld dat de waterafvoer T=50 overeenkomt met 1,65 maal de dominante afvoer.
- **Bepaling meandergolfenlengte:** gekozen is voor vergelijking 4.7 [FISRWG, 2001]. Dit vanwege het corresponderende geldigheidsbereik met de gebiedskenmerken van Waterschap Veluwe. Voor het bepalen van de betrouwbaarheidsmarge rond vergelijking 4.7, zijn om pragmatische redenen vergelijkingen gebruikt die een lagere (4.8) en een hogere waarde (4.9) berekenen [resp. CECW-EH-D, 1994 & Watts, 1980]. De vergelijkingen 4.7 tot en met 4.9 zijn gebaseerd op de bovenbreedte, omdat hiermee verrekening van de invloeden van het bodemtype plaatsvindt.

$$G = 7,50 \cdot B^{1,12} \quad (4.7)$$

$$\text{Betrouwbaarheidsmarge} = 2 \cdot \pi \cdot B \quad (4.8)$$

$$\text{Betrouwbaarheidsmarge} = 11,03 \cdot B^{1,01} \quad (4.9)$$

[Toelichting van de symbolen: G meandergolfenlengte (m); B bovenbreedte (m)]

- **Bepaling waterspiegelverhang:** uitgangspunt is vergelijking 4.2. Deze is herschreven voor bepaling van het waterspiegelverhang tot vergelijking 4.10. Het geldigheidsgebied van vergelijking 4.10 is feitelijk beperkt tot eenparige (niet tijdafhankelijke) stromingssituaties met een gelijk waterbodem- en waterspiegelverhang. De vergelijking is hier gebruikt, omdat vanuit het concept van dynamisch evenwicht ook een constante stromingssituatie wordt verondersteld [FISRWG, 2001].

$$S = (Q / (A \cdot R^{2/3} \cdot K_m))^2 \quad (4.10)$$

[Toelichting van de symbolen: S Waterspiegelverhang (m m<sup>-1</sup>) (=waterbodemverhang bij eenparige stroming); Q waterafvoer T=50 (m<sup>3</sup> sec<sup>-1</sup>); A natte oppervlakte (m<sup>2</sup>); R hydraulische straal (m); K<sub>m</sub> wandruweheidsfactor (m<sup>1/3</sup> sec<sup>-1</sup>)]

Conform voorafgaande conclusies is het uitgangspunt bij vergelijking 4.10, dat de waterafvoer wordt gebruikt met een herhalingsstijd van vijftig jaar (T=50). Ter verduidelijking van de symbolen in vergelijking 4.10 is in het onderstaande kort ingegaan op de bepaling van het natte oppervlak, de hydraulische straal en de wandruweheidsfactor.

1. Het “natte oppervlak” en de “hydraulische straal” zijn bepaald op basis van de bovenbreedte en de waterdiepte volgens respectievelijk vergelijking 4.11 en 4.12 [WHC, 1992].

$$A = B \cdot D \quad (4.11)$$

$$R = A \cdot (2D + B)^{-1} \quad (4.12)$$

[Toelichting van de symbolen:  $A$  natte oppervlakte ( $m^2$ );  $B$  bovenbreedte ( $m$ );  
 $D$  waterdiepte ( $m$ );  $R$  hydraulische straal ( $m$ )]

De waterdiepte uit vergelijking 4.11 en 4.12 is voor niet-cohesieve en cohesieve bodemtypen bepaald op basis van respectievelijk vergelijking 4.13 en 4.14 [CECW-EH-D, 1994]. De betrouwbaarheidsmarge is bepaald volgens vergelijking 4.15 [FISRWG, 2001]. De vergelijkingen zijn gekozen vanwege het corresponderende geldigheidsbereik met de gebiedskenmerken van Waterschap Veluwe.

$$D = 0,55 \cdot Q^{0,3357} \quad (4.13)$$

$$D = 0,68 \cdot Q^{0,3372} \quad (4.14)$$

$$\text{Betrouwbaarheidsmarge} = 0,15 \cdot B^{0,89} \quad (4.15)$$

[Toelichting van de symbolen:  $Q$  waterafvoer  $T=50$  ( $m^3 \cdot sec^{-1}$ );  $D$  waterdiepte ( $m$ );  $B$  bovenbreedte ( $m$ )]

2. De waarde van de wandruweheidsfactor is empirisch vastgesteld [FISRWG, 2001] op een waarde van  $15 m^{1/3} \cdot sec^{-1}$ . Deze waarde is gebaseerd op de relatie tussen specifieke stromingsenergie (vergelijking 4.13) en het meandergetal. De waarde van 15 komt overeen met bereik voor meanderende, onregelmatige, begroeide wateren met een kleine bovenbreedte ( $< 30 m$ ) [WHC, 1992, FISRWG, 2001, Dingman, 1993]. Om nadrukkelijker rekening te houden met het effect van vegetatie, is de wandruweheidsfactor afhankelijk gesteld van de waterdiepte volgens vergelijking 4.16 [WHC, 1992].

$$K_m = 15 \cdot D^{1/3} \quad (4.16)$$

[Toelichting van de symbolen:  $K_m$  wandruweheidsfactor ( $m^{1/3} \cdot sec^{-1}$ );  $D$  waterdiepte ( $m$ )]

- **Bepaling meanderbreedte:** op basis van bovenstaande vergelijkingen en enkele aanvullende berekeningen, kan de meanderbreedte worden bepaald. Hiervoor dient op de eerste plaats het meandergetal berekend te worden, door het maaiveldverhang (invoergegeven uit GIS) te delen door het berekende waterspiegelverhang (vergelijking 4.10). Door vervolgens de meandergolflengte (vergelijking 4.7) te vermenigvuldigen met het meandergetal, is de lengte van de as van de waterloop verkregen. Deze lengte wordt vervolgens in de vorm van een sinusoïde (golfvorm) verdeeld over de knooppunten A, B en C van de meandergolflengte (zie figuur 2.6). Naarmate het lengteverschil tussen de as van de waterloop en de meandergolflengte groter wordt, zal de loodrechte afwijking (meanderamplitude) tussen die knooppunten toenemen (sterkere kronkeling). Tenslotte is de meanderbreedte bepaald door de meanderamplitude te sommeren met de

bovenbreedte (zie figuur 2.6). Om pragmatische reden zijn de betrouwbaarheidsmarges voor de meanderbreedte gebaseerd op de procentuele verschillen tussen de voorspelde bovenbreedte en de bijbehorende betrouwbaarheidsmarge.

### **Tot slot**

In het bovenstaande is uiteengezet op welke wijze een methode is ontwikkeld waarmee Waterschap Veluwe onder de huidige omstandigheden, de boven- en meanderbreedte zo nauwkeurig mogelijk kan voorspellen. Het blijkt dat deze methode is opgebouwd uit een complex aan onderling samenhangende empirische vergelijkingen. Het betreft een nieuwe methode door combinatie van bestaande vergelijkingen uit hydromorfologische en cultuurtechnische ontwerprichtlijnen. De methode voorspelt de boven- en meanderbreedte aan de hand van gegevens over waterafvoer, maaiveldverhang en bodemtype. Uit de vergelijkingen blijkt dat met de methode ook andere geometrische kenmerken voorspeld kunnen worden, namelijk: waterdiepte, meandergolf lengte en waterspiegelverhang. Tevens is het mogelijk om met de methode een beeld te krijgen van de ontstaanswijze (natuurlijk of antropogeen), aan de hand van de specifieke stromingsenergie.

Om gezien de complexiteit van de vergelijkingen, een juiste en gebruikersvriendelijke toepassing te waarborgen, zijn de vergelijkingen in een rekenprogramma verwerkt. In het volgende hoofdstuk is de werking van de methode nader toegelicht aan de hand van een voorbeeld met twee stroomgebieden.



## 5 TOEPASSING METHODIEK: 2 PRAKTIJKVOORBEELDEN

Nu in het vorige hoofdstuk de methode voor de bepaling van de boven- en meanderbreedte is beschreven, volgt hier de beschrijving van de toepassing daarvan. Dit is gedaan door voor twee stroomgebieden stapsgewijs de werkwijze te beschrijven waarmee de boven- en meanderbreedte bepaald kunnen worden. Omwille van de voorbeeldfunctie is willekeurig een beekstelsysteem met een relatief hoge en een relatief lage afvoer geselecteerd (respectievelijk de Veldbeek en de Voorsterbeek).

In het onderstaande is per paragraaf het beekstelsysteem gekarakteriseerd, waarna is ingegaan op de invoergegevens en de uitkomsten van de methode. In de discussieparagraaf zijn de uitkomsten nader beschouwd, waarbij ook is ingegaan op de betrouwbaarheid. In de vierde paragraaf zijn conclusies getrokken over het gebruik en de toepassing van de methode.

Voor de toepassing van de hier ontwikkelde methodiek, is ten behoeve van de gebruiksvriendelijkheid een rekenprogramma opgesteld op basis van de vergelijkingen uit het vorige hoofdstuk. Met dit programma kan de boven- en meanderbreedte worden voorspeld voor waterlopen met een voldoende hoge specifieke stromingsenergie. De toepassing van de methodiek, zo blijkt hier, laat voor het beheergebied zien dat in slechts 5% van het aantal stroomgebieden, enkele waterlooptrajecten voorkomen die mogelijk een natuurlijke ontstaanswijze hebben. Het hier beschouwde traject van de Voorsterbeek is daar een voorbeeld van. In de andere stroomgebieden (waaronder de Veldbeek) is de specifieke stromingsenergie te gering om een waterloop te vormen of in stand te houden. Over de toepassing van de methode is gesteld dat de kwaliteit en betrouwbaarheid van de voorspelde uitkomsten voldoende zijn voor het gebruik als ondersteunend instrumentarium bij ruimtelijke inrichtingsvraagstukken zoals bij de Watertoets.

### 5.1 STROOMGEBIED VELDBEEK

De Veldbeek is een sterk gekanaliseerde en genormaliseerde watergang. Deze beek ligt in het zuidwesten van het beheergebied van Waterschap Veluwe, in de omgeving van Putten. Het traject dat hier is uitgewerkt beslaat het meest stroomafwaartse deel van deze beek. Uit GIS-analyse blijkt dat de beek omgeven is door lemige beekerdgronden (bodempijfercode 23) en een rechte patroonvorm heeft met een bovenbreedte van circa 4 m. Het maaiveldverhang is circa  $1,5 \text{ m} \cdot \text{km}^{-1}$ . De maatgevende afvoer is  $1,35 \text{ m}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$ .

#### 5.1.1 INVOERGEGEVENS

Uit de bovenstaande karakterisering kunnen de volgende invoergegevens worden herleid:

- Bodemtype: lemige beekerdgronden = cohesief (§ 3.2);
- Maaiveldverhang:  $1,5 \text{ m} \cdot \text{km}^{-1}$ ;

- Dominante afvoer:  $1,35 \text{ m}^3 \cdot \text{sec}^{-1} \cdot 1,1$  (klimaatcorrectie) =  $1,49 \text{ m}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$  (§ 4.2.4);
- Waterafvoer T=50:  $1,49 \text{ m}^3 \cdot \text{sec}^{-1} \cdot 1,65$  =  $2,46 \text{ m}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$  (§ 4.2.4);

### 5.1.2 RESULTATEN

**Voorspelling bovenbreedte Veldbeek:** omdat sprake is van een cohesief bodemtype zijn vergelijking 4.5 en 4.6 van toepassing. De bovenbreedte wordt voorspeld op basis van een dominante afvoer van  $1,49 \text{ m}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$ . Rekening houdend met de voorwaarde van minimale specifieke stromingsenergie, blijkt dat de voorspelde stromingsenergie ( $6 \text{ W m}^{-2}$ ) lager is dan de vereiste  $10 \text{ W m}^{-2}$ . Dit betekent op basis van de conclusies uit paragraaf 3.5 en 4.2.4., dat de Veldbeek onder zelfregulerende omstandigheden zou verdwijnen door aanzanding/verlanding. Een voorspelling van de bovenbreedte is daarom bij de beschreven gebiedskenmerken hier niet verantwoord.

**Voorspelling meanderbreedte Veldbeek:** van toepassing zijn de vergelijkingen 4.5 tot en met 4.16. De meanderbreedte wordt voorspeld op basis van de waterafvoer T=50 van  $2,46 \text{ m}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$ . Rekening houdend met de voorwaarde van minimale specifieke stromingsenergie blijkt dat de voorspelde stromingsenergie ( $8 \text{ W m}^{-2}$ ) lager is dan de vereiste  $10 \text{ W m}^{-2}$ . Een voorspelling van de meanderbreedte is daarom bij deze gebiedskenmerken, hier evenals de bovenbreedte ook niet verantwoord.

## 5.2 STROOMGEBIED VOORSTERBEEK

De Voorsterbeek is evenals de Veldbeek een sterk gekanaliseerde en genormaliseerde watergang. Deze beek ligt in het zuidoosten van het beheergebied van Waterschap Veluwe, in de omgeving van Voorst. Het traject dat hier is uitgewerkt, beslaat het meest stroomafwaarts deel van deze beek. Uit GIS-analyse blijkt dat de beek omgeven is door lemige beekerdgronden (bodempijfercode 23) en een rechte patroonvorm heeft met een bovenbreedte van circa 12 m. Verder blijkt dat het maaiveldverhang is circa  $2 \text{ m} \cdot \text{km}^{-1}$  bedraagt. De maatgevende afvoer is  $3,8 \text{ m}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$ .

### 5.2.1 INVOERGEGEVENS

Uit bovenstaande karakterisering kunnen de volgende invoergegevens worden herleid:

- Bodemtype: lemige beekerdgronden = cohesief (§ 3.2);
- Maaiveldverhang:  $2 \text{ m} \cdot \text{km}^{-1}$ ;
- Dominante afvoer:  $3,8 \text{ m}^3 \cdot \text{sec}^{-1} \cdot 1,1$  (klimaatcorrectie) =  $4,18 \text{ m}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$  (§ 4.2.4);
- Waterafvoer T=50:  $4,18 \text{ m}^3 \cdot \text{sec}^{-1} \cdot 1,65$  =  $6,9 \text{ m}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$  (§ 4.2.4);

### 5.2.2 RESULTATEN

**Voorspelling bovenbreedte Voorsterbeek:** evenals bij de Veldbeek is ook hier sprake van een cohesief bodemtype, zodat de vergelijkingen 4.5 en 4.6 van toepassing zijn. De bovenbreedte wordt voorspeld op basis van een dominante afvoer van  $4,18 \text{ m}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$ .

Rekening houdend met de voorwaarde van minimale specifieke stromingsenergie blijkt dat de voorspelde stromingsenergie ( $14 \text{ W m}^{-2}$ ) hoger is dan de vereiste  $10 \text{ W m}^{-2}$ . Hierdoor is op basis van vergelijking 4.5 een bovenbreedte van circa 6 m voorspeld. De betrouwbaarheidsmarges (vergelijking 4.6) geven een interval aan tussen 4 m en 8 m.

**Voorspelling meanderbreedte Voorsterbeek:** van toepassing zijn vergelijkingen 4.5 tot en met 4.16. De meanderbreedte wordt voorspeld op basis van de waterafvoer  $T=50$  van  $6,9 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$ . Rekening houdend met de voorwaarde van minimale specifieke stromingsenergie blijkt dat de voorspelde stromingsenergie ( $17 \text{ W m}^{-2}$ ) hoger is dan de vereiste  $10 \text{ W m}^{-2}$ . Dit betekent dat op basis van de relevante vergelijkingen een meanderbreedte is voorspeld van circa 19 m. De betrouwbaarheidsmarges geven een interval aan tussen 14 m en 27 m.

### 5.3 DISCUSSIE

#### 10 $\text{W m}^{-2}$ als maat voor de minimale specifieke stromingsenergie

In dit onderzoek is de minimale specifieke stromingsenergie gesteld op  $10 \text{ W m}^{-2}$ . Uit de resultaten van de vergelijkingen blijkt dat deze “voorwaarde van minimale specifieke stromingsenergie”, voor de Veldbeek inhoudt dat voorspellingen van de boven- en meanderbreedte niet verantwoord zijn. Dit betekent dat voorspeld is dat de Veldbeek ter plaatse van de voorbeeldlocatie, onder niet menselijk beïnvloede omstandigheden zou verzanden en op termijn als waterloop verdwijnt. Het voorbeeld van de Voorsterbeek laat zien dat deze onder niet menselijk beïnvloede omstandigheden voldoende specifieke stromingsenergie heeft om de waterloop te handhaven en/of te veranderen.

Om een breder beeld te krijgen van de consequentie van de gehanteerde waarde van  $10 \text{ W m}^{-2}$  voor het beheergebied van Waterschap Veluwe, is de kritische maatgevende afvoer bepaald. Dit is de afvoer die op basis van een bepaald maaiveldverhang leidt tot een specifieke stromingsenergie van  $10 \text{ W m}^{-2}$ . Hierbij is uitgegaan van de variatie in het beheergebied van 0,5 à 3 m/km (zie § 3.1). De berekende kritische maatgevende afvoer staat per bodemtype, voor vier maaiveldverhangklassen afgebeeld in tabel 5.1.

**Tabel 5.1:** Kritische maatgevende afvoer [ $\text{m}^3 \text{ sec}^{-1}$ ]: specifieke stromingsenergie  $10 \text{ W m}^{-2}$

		Bodemtype	
		Cohesief	Niet cohesief
maaiveldverhang	0,5 $\text{m} \cdot \text{km}^{-1}$	36	61
	1 $\text{m} \cdot \text{km}^{-1}$	9	16
	2 $\text{m} \cdot \text{km}^{-1}$	2.5	4
	3 $\text{m} \cdot \text{km}^{-1}$	1	1.75

Uit tabel 5.1 blijkt dat naarmate het maaiveldverhang toeneemt, de kritische maatgevende afvoer afneemt om te voldoen aan de minimale specifieke stromingsenergie van  $10 \text{ W m}^{-2}$  (zie vergelijking 2.2). Het effect van het bodemtype op de afvoer wordt behandeld in het onderstaande. Op basis van het voorkomende maaiveldverhang en de maatgevende afvoeren in het beheergebied van Waterschap Veluwe, leidt tabel 5.1 tot het beeld dat mogelijk slechts vijf van de zesennegentig stroomgebieden een gedeeltelijk oorspronkelijke ontstaanswijze hebben. Alhoewel voorbeelden ontbreken van niet menselijk beïnvloede omstandigheden, lijken deze voorspellingen niet onlogisch als ook oude kaartbeelden [Schouten, 2000] en andere gebiedskenmerken in beschouwing worden genomen. Calibratie van de gehanteerde minimale specifieke stromingsenergie, is noodzakelijk om uitsluitsel te kunnen geven over de hier gehanteerde waarde van  $10 \text{ W m}^{-2}$ .

### Gevoeligheid & betrouwbaarheid

Om een beeld te krijgen van de gevoeligheid van de methode voor bepaalde invoergegevens, zijn in tabel 5.2 en 5.3 de uitkomsten weergegeven van respectievelijk de boven- en meanderbreedte. De grijs gearceerde waarden geven de combinatie van invoergegevens aan waarbij de minimale specifieke stromingsenergie groter is dan  $10 \text{ W m}^{-2}$ .

- **Bovenbreedte:** de bepaling hiervan gebeurt op basis van vergelijkingen die gerelateerd zijn aan waterafvoer en bodemtype. Uit tabel 5.2 blijkt dat voor niet-cohesieve bodemtypes een circa 30% hogere bovenbreedte wordt voorspeld, dan voor cohesieve bodemtypes.

**Tabel 5.2:** Gevoeligheidsanalyse bovenbreedte.

		Maaiveldverhang					
		1 m · km <sup>-1</sup>	2 m · km <sup>-1</sup>	3 m · km <sup>-1</sup>	1 m · km <sup>-1</sup>	2 m · km <sup>-1</sup>	3 m · km <sup>-1</sup>
		Cohesief bodemtype			Niet cohesief bodemtype		
Afvoer	1 m <sup>3</sup> · sec <sup>-1</sup>	2.9	2.9	2.9	3.8	3.8	3.8
	2 m <sup>3</sup> · sec <sup>-1</sup>	4.1	4.1	4.1	5.4	5.4	5.4
	4 m <sup>3</sup> · sec <sup>-1</sup>	5.8	5.8	5.8	7.7	7.7	7.7
	6 m <sup>3</sup> · sec <sup>-1</sup>	7.1	7.1	7.1	9.4	9.4	9.4

De onzekerheidsmarges (niet afgebeeld) hebben een bereik van circa 30% rond de voorspelde bovenbreedte. Dit betekent dat de onzekerheidsmarges voor de niet-cohesieve en de cohesieve bodemtypes (resp. vergelijking 4.4 en 4.6) elkaar voor circa 50% overlappen. Bijvoorbeeld: de waarde van de bovenmarge voor het cohesieve bodemtype komt ongeveer overeen met de voorspelde waarde van de bovenbreedte van het niet cohesieve bodemtype (en vice versa). Dit betekent dat onnauwkeurigheden in bodemtypebepaling gedeeltelijk kunnen worden opgevangen binnen de onzekerheidsmarges.

Uit tabel 5.2 blijkt verder dat een verdubbeling van de afvoer, voor beide bodemtypes resulteert in circa 40% hogere bovenbreedtes. Dit beeld is in overeenstemming met gegevens uit de literatuur zoals staat beschreven in paragraaf 4.2.1. Uitgaande van dezelfde afvoer en maaiveldverhang blijkt uit de grijs gearceerde waarden in tabel 5.2, dat de specifieke stromingsenergie van wateren in cohesieve bodems hoger is dan in niet cohesieve bodems. Hieruit blijkt dat in cohesieve bodems (onder dezelfde omstandigheden), sneller een permanente (stabiele) waterloop gehandhaafd kan worden dan in niet cohesieve bodems. Dit houdt verband met de verhoudingsgewijs kleinere bovenbreedte van waterlopen cohesieve bodemtypes (zie vergelijking 2.2). Niet cohesieve bodems hebben namelijk een geringere oeverstabiliteit waardoor onstabiele bredere en ondiepere waterlopen ontstaan met een geringere stroomsnelheid en dus ook een lagere specifieke stromingsenergie (§2.3.3).

In het algemeen blijkt dat bij een waterafvoer van meer dan  $2 \text{ m}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$  en een maaiveldverhang van meer dan  $2 \text{ m} \cdot \text{km}^{-1}$ , er sprake is van voldoende specifieke stromingsenergie om een bovenbreedte te vormen en te handhaven. Feitelijk mogen de vermelde bovenbreedtes buiten de grijze arcering niet worden weergegeven omdat daar niet voldaan wordt aan de voorwaarde voor minimale specifieke stromingsenergie (§ 4.2.4).

- **Meanderbreedte:** de bepaling hiervan gebeurt op basis van vergelijkingen die gerelateerd zijn aan waterafvoer, bodemtype en maaiveldverhang. Voorspelling van de meanderbreedte vindt plaats als waterspiegelverhang correcties noodzakelijk zijn op basis van het concept van gelijkmatig energieverbruik. Die correcties vinden plaats door laterale morfologische veranderingen (bochtuitschuringen). Bij die omstandigheden wordt hier de meanderbreedte voorspeld, omdat dan extra ruimtebeslag plaatsvindt. Uit tabel 5.3 blijkt dat de meanderbreedte pas voorspeld wordt bij een waterafvoer van meer dan  $4 \text{ m}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$  en een maaiveldverhang van meer dan  $2$  à  $3 \text{ m} \cdot \text{km}^{-1}$ .

**Tabel 5.3:** Gevoeligheidsanalyse meanderbreedte.

		Maaiveldverhang					
		$1 \text{ m} \cdot \text{km}^{-1}$		$2 \text{ m} \cdot \text{km}^{-1}$		$3 \text{ m} \cdot \text{km}^{-1}$	
		Cohesief bodemtype			Niet cohesief bodemtype		
Afvoer	$1 \text{ m}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$	0	0	0	0	0	0
	$2 \text{ m}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$	0	0	0	0	0	0
	$4 \text{ m}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$	0	0	24.6	0	0	20.6
	$6 \text{ m}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$	0	13.5	43.7	0	0	45.6

Bij een toenemende waterafvoer neemt de meanderbreedte verhoudingsgewijs minder sterk toe, dit als gevolg van negatieve terugkoppelingseffecten. Ook blijkt dat voor niet-cohesieve bodems een grotere meanderbreedte voorspeld wordt dan voor cohesieve

bodems. Dit beeld is in overeenstemming met gegevens uit de literatuur (zie § 4.2.1). De voorspelde betrouwbaarheidsmarges tussen verschillende waarden overlappen elkaar en verdisconteren verschillen in bodemtype.

### **Rekenprogramma**

In het voorafgaande zijn de resultaten beschreven van de voorspellingen voor alleen de boven- en meanderbreedte. Omwille van het overzicht zijn namelijk alle tussenresultaten van andere vergelijkingen uit hoofdstuk vier niet getoond en toegelicht. De getoonde resultaten zijn de uitkomsten van een rekenprogramma (Excel). Dit rekenprogramma is voor dit onderzoek opgesteld op basis van de beschreven vergelijkingen. Het rekenprogramma zal daarom als deel van dit onderzoek, aan Waterschap Veluwe worden opgeleverd. Uit het overzicht van de invoergegevens blijkt dat deze op eenvoudige wijze te verkrijgen zijn uit het GIS van Waterschap Veluwe.

## **5.4 CONCLUSIE**

### **Veerkrachtstrategie: ruimteverlies & ruimteclaims**

Door toepassing van de vergelijkingen uit het vierde hoofdstuk, wordt voorspeld dat in “slechts” 5% van het aantal stroomgebieden in het beheergebied van Waterschap Veluwe, enkele waterlooptrajecten voorkomen die mogelijk een natuurlijke ontstaanswijze hebben. Hierdoor kan geconcludeerd worden dat in circa 95% van het aantal stroomgebieden de oppervlaktewateren dus zullen verdwijnen in een situatie zonder menselijke beïnvloeding. Uit de discussie blijkt namelijk dat de specifieke stromingsenergie van de meeste wateren onvoldoende zal zijn om de waterloop te vormen en te handhaven. In het algemeen kan geconcludeerd worden dat uitvoering van de veerkrachtstrategie (bevordering natuurlijke processen), hier leidt tot het verdwijnen van veel bestaande oppervlaktewateren. Dit is opmerkelijk, omdat de veerkrachtstrategie één van de speerpunten is in het waterbeleid om water weer meer ruimte te geven (zie hoofdstuk één).

De hier voorspelde verdwijning van veel oppervlaktewateren wordt bevestigd door het beeld van Londo (1997) en Schouten (2000). Daaruit blijkt namelijk dat onder natuurlijke omstandigheden slechts enkele beken in het beheergebied voorkomen (zie ook discussie § 3.4). Uit de voorspelde waarden van de boven- en meanderbreedte van wateren die wel voldoende specifieke stromingsenergie hebben, blijkt voor de Voorsterbeek dat de natuurlijke bovenbreedte de helft is van de bestaande bovenbreedte. Verder blijkt dat de voorspelde meanderbreedte van de Voorsterbeek circa anderhalf maal de bestaande bovenbreedte is. De overstromingsvlakte (die hier niet in beschouwing is genomen) zal bij een natuurlijke bovenbreedte fors toenemen door de afgenomen afvoercapaciteit. Dit benadrukt het feit dat een overstromingsvlakte onlosmakelijk is verbonden met het hydromorfologische systeem.

### **Toepassing en gebruik van de methode**

Uit de resultaten en de discussie blijkt de gevoeligheid van de methode voor voornamelijk de waterafvoer en het maaiveldverhang. Hoewel de betrouwbaarheidsmarges een voldoende bandbreedte aangeven, is het voor een juiste analyse aan te bevelen om de waterafvoer en het maaiveldverhang met circa 25 % te variëren. Ondanks alle onzekerheden die ten grondslag liggen aan het gebruik van empirische vergelijkingen (§ 4.1 & 4.2), en met name aan de voorspelling van de meanderbreedte, blijken de voorspellingen overeen te stemmen met de concepten uit het tweede hoofdstuk en de waterlooppatronen uit de literatuur zoals staan beschreven in paragraaf 4.2.1.

### **Validatie**

Over de bestaande hydromorfologische concepten concludeert Knighton (1998) in algemene zin, dat er geen algehele overeenstemming is over de bestaande hydromorfologische concepten die het “hoe en waarom vraagstuk” kunnen verklaren van de morfologie van waterlopen. Knighton benadrukt dat de aannames en onzekerheden van veel van de geaccepteerde concepten niet gevalideerd zijn met veldgegevens en dat daarom nader onderzoek noodzakelijk blijft. Ook blijkt voorliggend onderzoek met dit onderzoeksdilemma te kampen. Doordat in dit kader geen veldonderzoek is uitgevoerd, heeft dit onderzoek geen bijdrage kunnen leveren aan de validatie van de bestaande concepten. Wel is het mogelijk dat door de nieuwe combinatie van bestaande vergelijkingen deze methode bijdraagt aan het oplossen van het “hoe en waarom vraagstuk” van Knighton.

### **Toepassing**

De hier ontwikkelde methode voor bepaling van de boven- en meanderbreedte is gebaseerd op bestaande beproefde concepten. Ondanks de genoemde beperkingen, kan op basis van de huidige inzichten voorlopig geconcludeerd worden dat de methode geschikt is om te voorspellen of een waterloop onder natuurlijke omstandigheden morfologisch gehandhaafd blijft en wat daarbij de boven- en meanderbreedte is. Gesteld is dat de kwaliteit en betrouwbaarheid van de voorspelde uitkomsten voldoende zijn voor het gebruik van de methode als ondersteunend instrumentarium bij ruimtelijke inrichtingsvraagstukken zoals bij de Watertoets. Nader veldonderzoek is wenselijk om de betrouwbaarheid van de methode voor Waterschap Veluwe verder te verhogen.





## 6 RELEVANTIE VOOR WATERSCHAP VELUWE

### **Ondersteunend instrumentarium voor besluitvorming ruimtelijke inrichting**

Met dit onderzoek is een methode ontwikkeld waarmee het ruimtebeslag (en zo blijkt, ook het ruimteverlies) kan worden voorspeld dat noodzakelijk is voor het instandhouden en herstellen van veerkrachtige watersystemen (zie hoofdstuk 1). Deze methode is opgebouwd uit een stelsel van hydromorfologische en cultuurtechnische vergelijkingen. Deze onderling sterk samenhangende vergelijkingen zijn verwerkt in een rekenprogramma. Met dit rekenprogramma beschikt Waterschap Veluwe over een instrumentarium waarmee de ruimtelijke vertaling van een waterhuishoudkundige doelstelling (i.c. veerkrachtige watersystemen) onderbouwd kan worden. Vanwege de rol in het Watertoetsproces, is het voor Waterschap Veluwe van groot belang om in het wateradvies een goede onderbouwing te kunnen geven van ruimtelijke vertalingen van waterhuishoudkundige doelstellingen. Dit houdt verband met de verantwoordelijkheid van het waterschap voor de kwaliteit van de ruimtelijke onderbouwing van het wateradvies en met de vergoeding van schade bij een onjuist advies. Door de wateradviezen mede te baseren op het ruimtebeslag vanuit de veerkrachtstrategie, kan bij de besluitvorming over de ruimtelijke inrichting ook het belang van een verdere verbetering van het watersysteem en een duurzamer gebruik van watersystemen zorgvuldiger worden afgewogen. Hiermee kan met dit onderzoek een bijdrage worden geleverd aan de versterking van de afstemming tussen de beleidsvelden van water en ruimtelijke inrichting.

### **Instrumentarium voor beleidsstrategieën en dimensioneringsvraagstukken**

De voorspelling van het ruimtebeslag voor het instandhouden en herstellen van veerkrachtige watersystemen, is hier bepaald aan de hand van de boven- en meanderbreedte. Naast deze twee morfologische oppervlaktewaterkenmerken, heeft het onderzoek ook vergelijkingen opgeleverd voor de voorspelling van andere morfologische oppervlaktewaterkenmerken. Voorbeelden hiervan zijn waterdiepte, meandergolflengte, stroomsnelheid en meandergetal. Dit betekent dat met de inzichten uit dit onderzoek, het instrumentarium niet alleen voor ruimtelijke inrichtingsvraagstukken bruikbaar is. Maar ook voor bijvoorbeeld de ontwikkeling van beleidsstrategieën en dimensioneringsvraagstukken bij beekherstelprogramma's of andere inrichtingsplannen gebruikt kan worden.

### **Hantering van veerkracht als strategie bij het oppervlaktewaterbeheer**

Uit de verkenning van het *veerkrachtconcept* voor toepassing in het oppervlaktewaterbeheer blijkt, dat de veerkrachtstrategie in het beheergebied van Waterschap Veluwe zal leiden tot het op grote schaal verdwijnen van oppervlaktewateren. Op basis van de gehanteerde uitgangspunten blijkt namelijk dat de meeste wateren te weinig stromingsenergie (combinatie van waterafvoer en waterspiegelverhang) hebben, om door zelfregulering hun morfologie te handhaven. Hieruit kan worden afgeleid dat het grootste gedeelte van de oppervlaktewateren

in het beheergebied van Waterschap Veluwe, een niet natuurlijke oorsprong heeft. In slechts enkele benedenstroomse trajecten van circa 5% van het aantal stroomgebieden, zal de stromingsenergie voldoende zijn voor handhaving van een waterloopvorm (recht of meanderend). Deze wateren, zo kan worden afgeleid uit de hier gebruikte voorbeelden, zullen in bovenbreedte afnemen en mogelijk meer ruimte nodig hebben voor laterale migratie (vergroting meanderbreedte).

In het algemeen kan daarom gesteld worden dat het nastreven van veerkrachtstrategie leidt tot een afname van de huidige waterafvoercapaciteit en daarmee tot een toename van de duur, de frequentie en de omvang van inundaties. Voor Waterschap Veluwe kan geconcludeerd worden dat de veerkrachtstrategie doorgaans zal leiden tot een afname van het ruimtebeslag van de waterlopen en tot een toename van het ruimtebeslag van waterbergingsgebieden. Duidelijk is dat deze effecten forse beperkingen voor het bestaande gebruik van oppervlaktewatersysteem tot gevolg kunnen hebben.

Veerkrachtstrategie is geen doel op zich en kan gezien de consequenties een effectieve strategie zijn, indien meerdere waterhuishoudkundige en ruimtelijke doelstellingen gerealiseerd kunnen worden. In de nota Ruimte [VROM, 2004] is dit ook benadrukt en worden functiecombinaties met water gezien als mogelijkheid om de identiteit van gebieden te versterken. De samenhang met de “natuurlijke ontstaansgeschiedenis” van landschappen en steden speelt in die nota een belangrijke rol. Veerkrachtstrategie kan hierbij een effectieve strategie zijn bij het inrichten van een “natuurlijker watersysteem”, om daarmee het “landschap afleesbaar te maken” en waterhuishoudkundige en ruimtelijke doelstellingen te realiseren.

## LITERATUUR

- Berg, J.H., van den, (1995).  
'Prediction of alluvial channel pattern of perennial rivers'. In tijdschrift *Geomorphology*, nr. 12, p. 259-279.
- Berg, J. van den, J. de Kramer, M. Kleinans, A. Wilbers (2000).  
'De Allier als morfologisch voorbeeld voor de Grensmaas, Deel 1: vergelijkbaarheid en rivierpatroon'. In tijdschrift *Natuurhistorisch maandblad van het Natuurhistorisch genootschap in Limburg*, jrg. 89, nr. 7 (juli), p. 118 - 122.
- Bloemendaal, F.H.J.L. & J.G.M. Roelofs (1988).  
*Waterplanten en waterkwaliteit*. Stichting Uitgeverij van de Koninklijke Natuurhistorische Vereniging en Vakgroep Aquatische Oecologie en Biogeologie van de Katholieke Universiteit Nijmegen, Utrecht.
- Bolkestein, H., I. Delleman, P. Donker, E. van Ginkel, J. Koster, R. Oosterdijk, B. Pijpers, M. Veerman-Dronkert (2004).  
*Water juridisch bergen, Verkenning juridische instrumentaria realisering waterberging*, Directeurenoverleg waterschappen in Gelderland en Waterschap Groot Salland, z.pl.
- Bouwknegt, J. & A.J. Gelok (1992).  
'Hydraulische aspecten van beekmeandering'. In tijdschrift *Landinrichting*, jrg. 32, nr 3, p. 9-15.
- CECW-EH-D (1994)  
*Channel stability assessment for flood control projects, EM 1110-2-1418, z.pl.*  
[www.usace.army.mil/inet/asace-docs/](http://www.usace.army.mil/inet/asace-docs/)
- Church, M. (2002).  
'Geomorphic thresholds in riverine landscapes?'. In tijdschrift *Freshwater biology*, nr. 47, p. 541-557.  
[www.cnr.uidaho.edu](http://www.cnr.uidaho.edu)
- Commissie Waterbeheer 21<sup>e</sup> eeuw (2000).  
*Waterbeleid voor de 21<sup>e</sup> eeuw, Geef water de ruimte en aandacht die het verdient*. Unie van waterschappen en de Staatsecretaris van verkeer en Waterstaat, z.pl.
- Dingman, S.L. (1993).  
*Physical hydrology*, University of New Hampshire, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Europees Parlement en de Raad van de Europese Unie (2003).  
*Europese Kaderrichtlijn Water*. Europees Parlement en de Raad van de Europese Unie, Brussel.
- Farias, H.D., M.T. Pilan, M.T. Mattar, F.J. Pece (1998).

*Regime width of alluvial channels: Conciliation of several approaches*, Universidad Nacional del Ester, Instituto de Recursos Hidricos, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologias (4200) Santiago del Estero, Argentina, <http://www>.

FISRWG: The Federal Interagency Stream Restoration Working Group (2001).  
*Stream corridor restoration, Principles, processes, and practices*, USDA- Natural Resources Conservation Service, [http://www.usda.gov/stream\\_restoration](http://www.usda.gov/stream_restoration).

German, S.E. & D.A. Sear (2003).  
*Geomorphological audit of tybe river Wyllye*, Conserving Natura 2000 Rivers Conservation Techniques Series No. 9. English Nature, Peterborough.

Klijn, F. & M. Marchand (2000).  
'Veerkracht, Een nieuw doel voor het waterbeheer?'. In tijdschrift *Landschap, Tijdschrift voor landschapsecologie en milieukunde*, jrg. 17, nr. 1, p. 31-44.

Kleinmans, M.G. (2002).  
*Sorting out sand and gravel: sediment transport and deposition in sand-gravel bed rivers*, The Royal Dutch Geography Society/Faculty of Geographical Science, Utrecht University, Utrecht.

Kleinmans M.G., J. van den Berg, A. Wilbers, J. de Kramer (2000)  
'De Allier als morfologisch voorbeeld voor de Grensmaas, Deel 3: sedimenttransport en afpleistering'. In tijdschrift *Natuurhistorisch maandblad van het Natuurhistorisch genootschap in Limburg*, jrg. 89, nr. 9 (september), p. 202 - 207.

Knighton, D. (1998).  
*Fluvial forms and processes, A new perspective*. Department of Geography, University of Sheffield, UK, Arnold, London.

Kramer, J. de, A. Wilbers, J. van den Berg, M. Kleinmans, (2000)  
'De Allier als morfologisch voorbeeld voor de Grensmaas, Deel 2: oevererosie en meandermigratie'. In tijdschrift *Natuurhistorisch maandblad van het Natuurhistorisch genootschap in Limburg*, jrg. 89, nr. 8 (augustus), p. 189 – 198.

Locher, W.P. en H. de Bakker, (1990)  
*Bodemkunde van Nederland, Deel 1, Algemene bodemkunde*, Tweede druk, Malmberg, Den Bosch.

Leopold, L.B. et. al. (1964).  
*Fluvial processes in geomorphology*, Dover publication, Inc, New York.

Londo, G. (1997).  
*Natuurontwikkeling*. Backhuys Publishers, Leiden. Bos- en natuurbeheer in Nederland deel 6.

- Maidment, D.R., (1992)  
*Handbook of hydrology*, McGraw-Hill, Inc, z.pl.
- Miller, D.E. (1999)  
Deformable stream banks: can we call it restoration without them?, In tijdschrift *Wildland hydrology*, *American water resources association*, jrg. onbekend, p. 293-300; [www.interfluve.com](http://www.interfluve.com).
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat (1998).  
*Vierde Nota waterhuishouding, Waterkader*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Den Haag.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2000).  
*Anders omgaan met water, Waterbeleid in de 21<sup>e</sup> eeuw*. Kabinetsstandpunt, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Den Haag.
- Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, Rijksplanologische Dienst (2000).  
*Vijfde Nota over de Ruimtelijke Ordening 2000/2020, Ruimte maken, ruimte delen*. Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, Den Haag.
- Montgomery, D.R., J.M. Buffington (z.jr).  
Chapter 2, Channel processes, classification and response, p. 13–42. Uitgave onbekend; [www.swf.usace.army.mil/pubdata](http://www.swf.usace.army.mil/pubdata)
- Peters, B., M. Maris, N. Schaafstra, B. Thomas, K van de Weyer (1999)  
‘Het Wormdal, beekdalprocessen en natuurwaarden’. In tijdschrift *Natuurhistorisch maandblad van het Natuurhistorisch genootschap in Limburg*, jrg. 88, nr. 7 (juli), p. 155 – 164.
- Peters, B., H. van Buggenum, R. Gubbels, J. Hermans, A. Ovaa (1999)  
‘Flora en fauna in het Geuldal’. In tijdschrift *Natuurhistorisch maandblad van het Natuurhistorisch genootschap in Limburg*, jrg. 88, nr. 7 (juli), p. 165 - 180.
- Peters, B. (2001)  
‘Hermeandering door omgevallen bomen langs de Geul’. In tijdschrift *Natuurhistorisch maandblad van het Natuurhistorisch genootschap in Limburg*, jrg. 90, nr. 10 (oktober), p. 188 - 193.
- Raad voor het landelijk gebied (2001)  
*Bergen met beleid, Signaaladvies over de implementatie van waterberging en waterbuffering in beleid en uitvoeringsplannen*, Raad voor het landelijk gebied, Amersfoort.
- Rommelzwaal, A. & J. Vroon (2000 a).  
*Werken met water, Veerkracht als strategie*. RIZA/ RIKZ, Lelystad.
- Rommelzwaal, A & J. Vroon (2000 b).

- Veerkracht, Aan het werk met een nieuw beleidsbegrip!, In *Landschap, Tijdschrift voor landschapsecologie en milieukunde*, jrg. 17, nr. 3-4, p. 187-191.
- Rosgen, D. (z.jr.)  
The reference reach, A blueprint for natural channel design. In tijdschrift *Wildland hydrology, American water resources association*, jrg. onbekend, [www.dnr.state.oh.us/soilandwater](http://www.dnr.state.oh.us/soilandwater)
- Schouten, M.G.C. (2000).  
*De natuur als beeld in religie, filosofie en kunst*, KNNV Uitgeverij, Utrecht;
- Sear, D.A., S.E. German, C.T. Hill, J. Branson (2002).  
*Impact of recent floods on channel morphology and physical habitat using RHS re-survey, R&D Technical Report W5A-064/TR*, DEFRA/Environment Agency Flood and Coastal Defence R&D Programme, Bristol;
- Shields, F.D., R. Ronald, R. Copeland, P.C. Klingeman, M.W. Doyle, A. Simon (2003).  
'Design for stream restoration'. In tijdschrift *Journal of hydraulic engineering*, p. 575-584. [www.unc.edu](http://www.unc.edu)
- Stiboka: Stichting voor Bodemkartering (1960 – 1980).  
*Bodemkaart van Nederland*, digitaal vectorbestand van bodemtypen en grondwatertrappen, schaal 1:50.000.
- Skidmore, P.D. & D.E. Miller (z.jr.)  
Application of defomable stream bank concepts to natural channel design; artikel pag 1 t/m 7; [www.interfluve.com](http://www.interfluve.com).
- Skidmore, P.D. D.E. Miller, F.D. Shields, M.W. Doyle (z.jr.)  
A catagorisation of approaches te natural channe design; artikel pag 1 t/m 12; [www.interfluve.com](http://www.interfluve.com).
- Schoor, M.M. & E. Stouthamer (2003).  
*Ecomorfologische kartering van de Rijntakken in Nederland, Ontwikkeling van een methodiek ten behoeve van de Kaderrichtlijn Water*, RIZA rapport 2003.009, RIZA, Arnhem.
- Van der Vlist, M.. et al. (2001).  
*Handreiking Watertoets, Waarborg voor water in ruimtelijke plannen en besluiten*. Bestuurlijk Overleg Waterbeheer 21<sup>e</sup> eeuw, Den Haag.
- Verdonschot, P. et. al. (1995).  
*Beken stromen, Leidraad voor ecologisch beekberstel*. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer, Utrecht.
- Vereniging van Nederlandse Gemeenten, Unie van waterschappen, Interprovinciaal Overleg, Rijkswaterstaat (2003).

*Nationaal Bestuursakkoord Water (NBW)*. Vereniging van Nederlandse Gemeenten, Unie van waterschappen, Interprovinciaal Overleg, Rijkswaterstaat, Den Haag.

Vereniging van Nederlandse Gemeenten, Unie van waterschappen, Interprovinciaal Overleg, Rijkswaterstaat (2001).

*Startovereenkomst Water*. Vereniging van Nederlandse Gemeenten, Unie van waterschappen, Interprovinciaal Overleg, Rijkswaterstaat, Den Haag.

Wagemaker, F. et. al. (2003).

Toepassing van de watertoets krijgt vorm. In *H<sub>2</sub>O, Tijdschrift voor watervoorziening en waterbeheer*, jrg. 36, nr. 10, p. 8-9.

Ward, A., D. Mecklenburg, J. Mathews, D. Farver (2002).

Sizing stream setbacks to help maintain stream stability; 2002 ASAE Annual International meeting / CIGR XVth World congress, artikel pag 1 t/m 35; [www.nemo.osu.edu](http://www.nemo.osu.edu)

Waterschap Veluwe (2001)

*Waterbeheerplan 2002-2006*, Waterschap Veluwe, Apeldoorn.

Waterschap Veluwe (2002)

*Waterkoersen voor de Veluwe, Een strategische stroomgebiedvisie en watertoets over het herstel en behoud van de veerkracht van de Veluwe watersystemen*, Waterschap Veluwe, afdeling watersystemen, Apeldoorn.

Watts, F.J. (1980).

*HEC 16, Addendum to highways in the river environment/hydraulic and environment design consideration (HEDC)*, Department of transportation, United States Government, [www.engineering.usa.edu/classes/cee/](http://www.engineering.usa.edu/classes/cee/)

WHC: Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch vademecum (1992)

Cultuurtechnisch vademecum, Vereniging voor landinrichting, Utrecht

Wolfert, H.P. (2001).

*Geomorphological change and river rehabilitation, Case studies on lowland fluvial systems in the Netherlands*. Alterra Green World Research, Wageningen.





## BIJLAGE A: STROOMGEBIEDEN

Toelichting: Weergegeven zijn de stroomgebieden in het beheergebied van Waterschap Veluw. In de tabel staat per stroomgebied de dominante afvoer vermeld.

Nr.	Hoofdstroomgebied	Deelstroomgebied	Dominante afvoer [m3/sec]
1	Veluwemeer	Andhuizerbeek en Horsterbeek	0,5442
2	Wolderwijd - Nuldernauw	Beek Dasselaar	0,5842
3	Veluwemeer	Bijsselse beek	0,6299
4	Veluwemeer	Bovenbeek	0,1048
5	Wolderwijd - Nuldernauw	Drielanden	0,1993
6	Zuidelijke IJsselvallei	Eerbeekse beek	2,1533
7	Polder Hattem	Polder Hattem	2,6076
8	Drontermeer	Polder Oosterwolde-Oldebroek	6,1495
9	Apeldoorns kanaal	Gemaal Kazerweg	0,0438
10	Apeldoorns kanaal	Gemaal Oude beek	0,1454
11	Veluwemeer	Goorbeek (Gemaal de Goorpomp)	0,2617
12	Noordelijke IJsselvallei	Groote wetering (incl Terwoldse en Nijbroekse wetering)	8,7502
13	Veluwemeer	Hierdense beek	2,1404
14	Wolderwijd - Nuldernauw	Horstsche beek	0,6195
15	Apeldoorns kanaal	Kayersbeek en Zwaanspreng	0,6064
16	Veluwemeer	Killenbeek	0,2798
17	Veluwemeer	Klarenbeek	0,3643
18	Wolderwijd - Nuldernauw	Krakenburgbeen	0,1855
19	Veluwemeer	Lange Elsloot	0,2604
20	Zuidelijke IJsselvallei	Leuvenheimse beek	0,9587
21	Veluwemeer	Middelbeek	0,0966
22	Veluwemeer	Molenbeek	0,7912
23	Noordelijke IJsselvallei	Nieuwe Wetering	1,4199
24	Noordelijke IJsselvallei	Nijbroekse wetering	1,9246
25	Veluwemeer	Nodbeek	0,2657
26	Zuidelijke IJsselvallei	Oekensche en Rienderensche beek	1,7193
27	Apeldoorns kanaal	Oosterhuizerspreng	0,0064

Nr.	Hoofdstroomgebied	Deelstroomgebied	Dominante afvoer [m3/sec]
28	Apeldoorns kanaal	Oude beek	0,1927
29	Veluwemeer	Pangelerbeek	0,3034
30	Veluwemeer	Papenbeek	0,1425
31	Drontermeer	Puttenerbeek/Eekterbeek	2,0058
32	Wolderwijd - Nuldernauw	Schaapsdijkbeek	0,2596
33	Zuidelijke IJsselvallei	Soerense beek	0,8261
34	Wolderwijd - Nuldernauw	Stadswater Harderwijk (Stadsdennen)	0,6810
35	Wolderwijd - Nuldernauw	Stadswater Harderwijk (Stingerbosch)	0,4829
36	Noordelijke IJsselvallei	Terwoldse wetering	0,9922
37	Veluwemeer	Tochtsloot	0,2098
38	Wolderwijd - Nuldernauw	Tonsel (Harderwijk)	0,7430
39	Wolderwijd - Nuldernauw	Tweelingbeekje	0,1274
40	Veluwemeer	Varelse beek	0,2407
41	Apeldoorns kanaal	Vijvers wijk Malkenschoten	0,0606
42	Zuidelijke IJsselvallei	Voorsterbeek	4,1463
43	Apeldoorns kanaal	Vrijenberger- en Veldhuizenerspreng	0,0484
44	Zuidelijke IJsselvallei	Watergang Leuvenheim	0,0337
45	Veluwemeer	Watergang Rooyendijk (Nunspeet)	0,0703
46	Veluwemeer	Watergang Waterweg (Nunspeet)	0,1358
47	Noordelijke IJsselvallei	Polder (gemaal) Terwolde	9,8166
48	Uiterwaarden IJssel	Uiterwaarden	0,5118
49	Uiterwaarden IJssel	n.v.t.	n.v.t.
50	Uiterwaarden IJssel	n.v.t.	n.v.t.
52	Noordelijke IJsselvallei	Fliert	1,1569
53	Grift	Grift landbouwenclave 3	0,0232
54	Grift	Grift enclave De Overbosch	0,0958
55	Grift	Grift enclave Horsterbrug	0,1357
56	Grift	Grift enclave De Horst	0,0238
57	Grift	Grift enclave De Botse	0,0253
58	Grift	Grift landbouwenclave 2	0,0260

Nr.	Hoofdstroomgebied	Deelstroomgebied	Dominante afvoer [m3/sec]
59	Apeldoorns kanaal	Apeldoorns kanaal	0,0856
60	Apeldoorns kanaal	Egelbeek	0,1777
61	Apeldoorns kanaal	Heerderbeken	0,4628
62	Apeldoorns kanaal	Meibeek/Wenumsche beek	0,2015
63	Drontermeer	Onzichtbare afwatering Drontermeer	0,0672
64	Veluwemeer	Onzichtbare afwatering Veluwemeer	0,0432
65	Apeldoorns kanaal	Paalbeek/Vlasbeek	1,0249
66	Apeldoorns kanaal	Papegaaibeek	0,1132
67	Apeldoorns kanaal	Smallertse beek	0,8768
68	Apeldoorns kanaal	Ugchelse beek/Orderbeek	1,4696
69	Grift	Grift enclave Horsthoekerbeek noord	0,0525
70	Grift	Grift als watergang	0,0684
71	Grift	Grift enclave Horsthoekerbeek midden	0,0154
72	Grift	Grift enclave Heerde	0,2944
73	Grift	Grift enclave Horsthoekerbeek zuid	0,1463
74	Grift	Grift enclave Vemde	0,0415
75	Grift	Grift enclave Dijkhuizen	0,3595
76	Grift	Grift enclave Dorpsche beek Epe	0,3126
77	Grift	Grift enclave Lage Kamp	0,3390
78	Grift	Grift enclave Westendorp	0,1675
79	Grift	Grift enclave Vossenbroek	0,1808
80	Grift	Grift enclave Nijmolense beek	0,0137
81	Grift	Grift enclave Eekterveld	0,1167
82	Grift	Grift enclave Hartense molenbeek Vaassen	0,0919
83	Grift	Grift enclave Dorpsche beek Vaassen	0,2815
84	Grift	Grift enclave gemaal Eierstreekweg	0,1091
85	Grift	Grift enclave De Haere	0,1158
86	Grift	Grift enclave Ramsbrug	0,8716

Nr.	Hoofdstroomgebied	Deelstroomgebied	Dominante afvoer [m <sup>3</sup> /sec]
87	Grift	Grift enclave Marleweg	0,0385
88	Grift	Grift landbouwenclave 1	0,0076
89	Grift	Grift enclave Koningsbeek	0,0505
90	Grift	Grift enclave Wiesel	0,0921
91	Grift	Grift enclave Orderbeek	0,0850
92	Wolderwijd - Nuldernauw	Onzichtbare afwatering Wolderwijd	0,0920
93	Wolderwijd - Nuldernauw	Veldbeek	1,4402
94	Wolderwijd - Nuldernauw	Volenbeek	0,5895
95	Wolderwijd - Nuldernauw	Schuitenbeek zuid	0,8988
96	Wolderwijd - Nuldernauw	Schuitenbeek totaal (incl veldbeek & schuitenbeek zuid)*	5,1538

## BIJLAGE B: KENNISTABEL EMPIRISCHE VERGELIJKINGEN

Literatuur over bepaling bovenbreedte	Geldigheidsgebied	Relatie	Formule
Lacey (1929) [Knighton, 1998; pag. 173]	waterlopen in Punjab	Qdom. m <sup>3</sup> /sec	4.84 Q <sup>0.50</sup>
Simons & Albertson (1963) [Knighton, 1998; pag. 173]	Zandige oevers	Qdom. m <sup>3</sup> /sec	5.23 Q <sup>0.50</sup>
	Cohesieve oevers, kleine sed. vracht	Qdom. m <sup>3</sup> /sec	3.93 Q <sup>0.50</sup>
	Cohesieve oevers, grote sed. vracht	Qdom. m <sup>3</sup> /sec	2.55 Q <sup>0.50</sup>
Mahmood et al. (1979) [Knighton, 1998; pag. 173]	Waterlopen in Pakistan	Qdom. m <sup>3</sup> /sec	4.93 Q <sup>0.51</sup>
Leopold et al, 1964, pag. 218, 244.	Cohesieve oevers	Qdom. ft <sup>3</sup> /sec	Q <sup>0.75</sup>
	Zand oevers	Qdom. ft <sup>3</sup> /sec	Q <sup>0.90</sup>
CECW-EH-D, 1994; chap5 pag. 5-8	Bankfull width (feet) for sandy alluvial banks 2,7Qbf <sup>0,5</sup>	Qdom. m <sup>3</sup> /sec	4,9181 Q <sup>0.50</sup>
	Bankfull width (feet) for average cohesive or coarse granular banks = diepte-formule voor NIET-cohesieve bodems:	Qdom. m <sup>3</sup> /sec	3,8252 Q <sup>0.50</sup>
	Bankfull width (feet) for stiff cohesive or very coarse granular banks = diepte-formule voor cohesieve bodems:	Qdom. m <sup>3</sup> /sec	2,9144 Q <sup>0.50</sup>
German & Sear, 2003	Cohesieve oevers, pleisterlaag (Kleine sed. Vracht??)	Qdom. m <sup>3</sup> /sec	3.9072 Q <sup>0.5462</sup>

Literatuur over bepaling meandergolflengte	Geldigheidsgebied	Relatie	Formule
FISRWG, 2001; pag. 7-48 nr 30.	1,6 m <= breedtes = 4,3 km	breedte (m)	7,496 breedte <sup>1,12</sup>
FISRWG, 2001; pag. 7-49	"wide range of streams" NB: aanzienlijke spreiding	Qdom. ft <sup>3</sup> /sec	38 Q <sup>0,467</sup>
CECW-EH-D, 1994; chap5 pag. 5-13	(---)	breedte (m)	2 * pi() * breedte

Literatuur over bepaling meandergolfenlengte	Geldigheidsgebied	Relatie	Formule
Manual HEC 16, 1980	(---)	breedte (m)	$11,03 \text{ breedte}^{1,01}$

Literatuur over bepaling diepte	Geldigheidsgebied	Relatie	Formule
CECW-EH-D, 1994; chap5 pag. 5-9	Diepte medium sands (low bed sed transport) = diepte-formule voor NIET-cohesieve bodems:	Qdom. m3/sec	$0,5519 Q^{0.3357}$
	Diepte fine sands (low bed sed transport) = diepte-formule voor cohesieve bodems:	Qdom. m3/sec	$0,684 Q^{0.3372}$
FISRWG 2001, pag. 7-48 nr 39	1,6 m <= breedtes = 4,3 km	breedte (m)	$0,1492 B^{0,89}$