



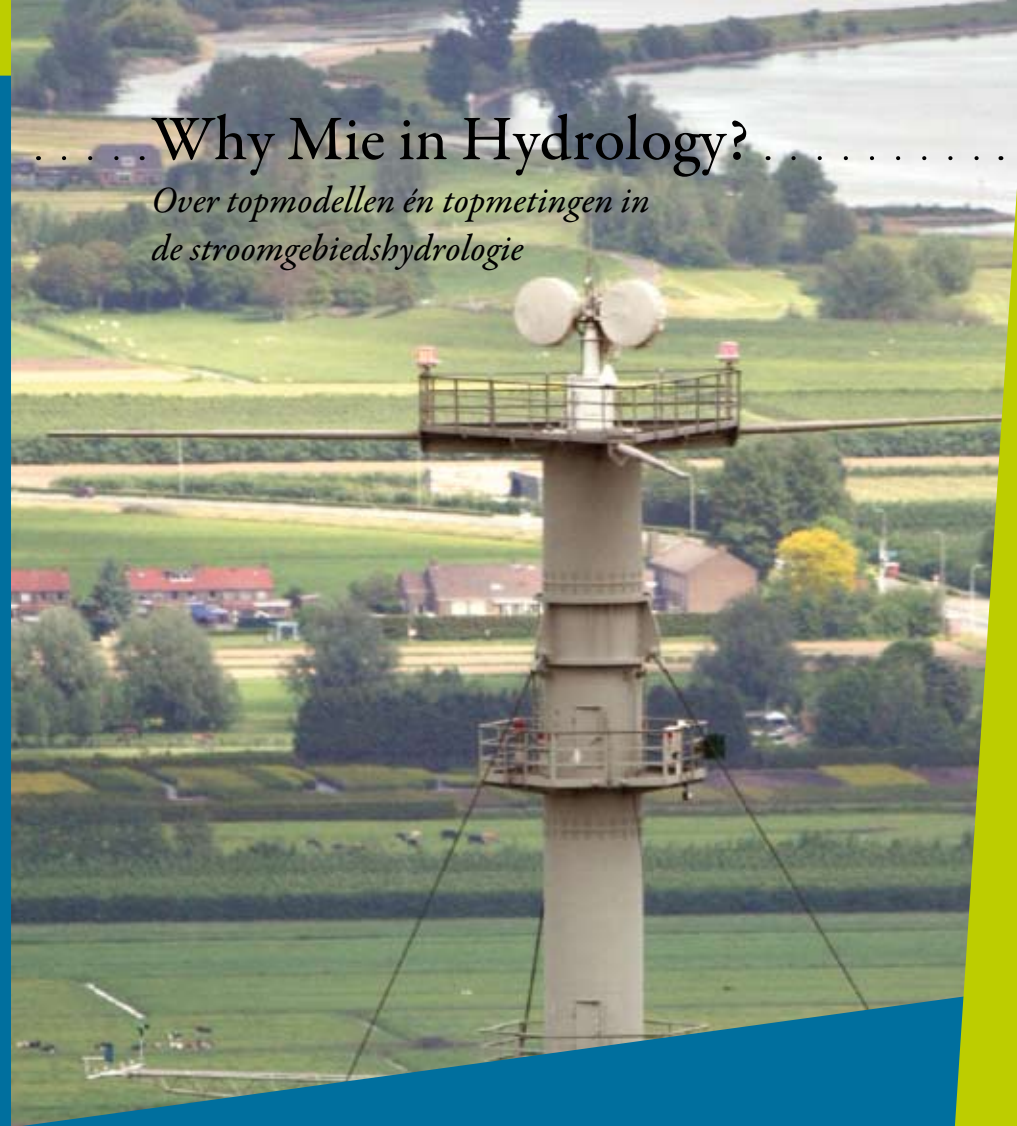
De transformatie van neerslag naar afvoer vormt de kern van de stroomgebiedshydrologie. Toch wordt in de hydrologie en in het waterbeheer veel meer aandacht besteed aan het bouwen van nieuwe modellen dan aan het ontwikkelen van betere instrumenten om neerslag en andere componenten van de hydrologische cyclus te meten.

In zijn inaugurele rede breekt Remko Uijlenhoet een lans voor een hernieuwde belangstelling voor hydrologische meettechnieken – die soms een toevallig bijproduct blijken te zijn van voor heel andere doeleinden ontwikkelde apparatuur.

ISBN 978-90-8585-274-2

Why Mie in Hydrology?

Over topmodellen én topmetingen in de stroomgebiedshydrologie



PROF. DR. IR. R. UIJLENHOET

Inaugurele rede bij de aanvaarding van het ambt van hoogleraar Hydrologie en Kwantitatief Waterbeheer aan Wageningen Universiteit op 16 april 2009



WAGENINGEN UNIVERSITEIT
WAGENINGEN UR

Why Mie in Hydrology?

Over topmodellen én topmetingen in de stroomgebiedshydrologie

PROF. DR. IR. R. UIJLENHOET

Inaugurele rede bij de aanvaarding van het ambt van hoogleraar Hydrologie en Kwantitatief Waterbeheer aan Wageningen Universiteit op 16 april 2009



WAGENINGEN UNIVERSITEIT

WAGENINGEN **UR**

De transformatie van neerslag naar afvoer vormt de kern van de stroomgebiedshydrologie. Toch wordt in de hydrologie en in het waterbeheer van oudsher veel meer aandacht besteed aan het bouwen van nieuwe modellen dan aan het ontwikkelen van betere instrumenten om neerslag en andere componenten van de hydrologische cyclus te meten. In zijn inaugurele rede breekt Remko Uijlenhoet een lans voor een hernieuwde belangstelling voor hydrologische meettechnieken, die soms een toevallig bijproduct van voor heel andere doeleinden ontwikkelde apparatuur blijken te zijn.

De foto op de omslag (tevens Fig. 18) is gemaakt door Raymond Shaw, de foto op de achterzijde door Hidde Leijnse. Figuur 13 is gemaakt door Alexis Berne, Fig. 16 door Ralph Koppelaar en Fig. 26 door Anton Dommerholt. Het eerste deel van de titel van mijn rede is ontleend aan een recent artikel van Pavlos Kollias. Han Stricker heeft mijn rede kritisch doorgelezen. Ik dank hen allen voor hun medewerking.

ISBN 978-90-8585-274-2

Why Mie in Hydrology?

Over topmodellen én topmetingen in de stroomgebiedshydrologie

Mijnheer de Rector, geachte aanwezigen,

Van loopbrug tot stroomgebied

.....

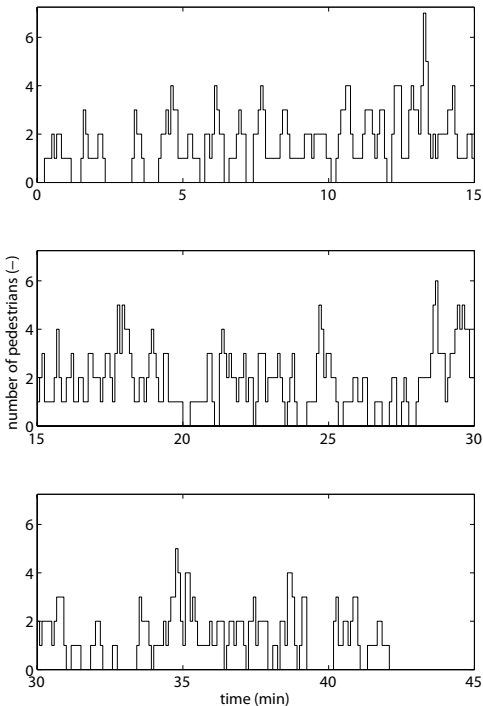


.....

Figuur 1. Toegangsbrug van het Atlasgebouw met voetgangers.

Stelt u zich voor, de loopbrug die als toegang dient voor het Atlasgebouw, het onderkomen van een deel van de Wageningse omgevingswetenschappers, op de nieuwe campus van onze instelling zoals die momenteel verrijst aan de noordzijde van deze plaats (Fig. 1). Op een typische ochtend druppelen de Alterra-onderzoekers, universitaire docenten en een enkele student tussen 8 en 9 uur via deze loopbrug het door architecten zo geroemde gebouw binnen.

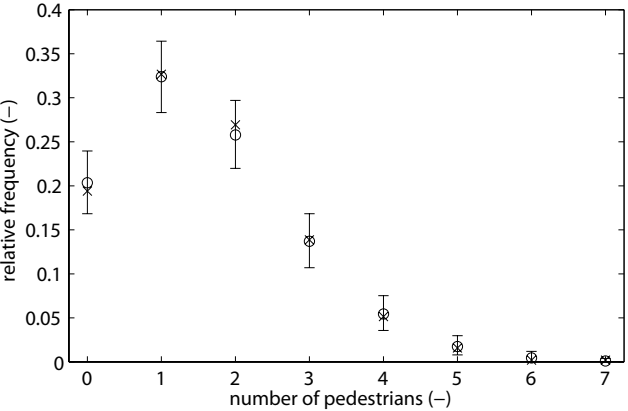
Indien we nu een traject van zeg 20 meter op de loopbrug zouden markeren en om de 5 seconden zouden tellen hoeveel voetgangers zich in dat traject zouden bevinden, dan zouden we gedurende bijna drie kwartier het volgende beeld kunnen krijgen (Fig. 2):



Figuur 2. Aantal voetgangers als functie van de tijd.

In deze figuur staat op de x-as de tijd en op de y-as het aantal voetgangers dat zich op achtereenvolgende tijdstippen binnen het gemarkeerde traject bevindt. Op het oog lijkt dit een reeks toevallige fluctuaties, waarin weinig structuur te ontdekken valt. Laten we desalniettemin een poging wagen dit nader te onderzoeken.

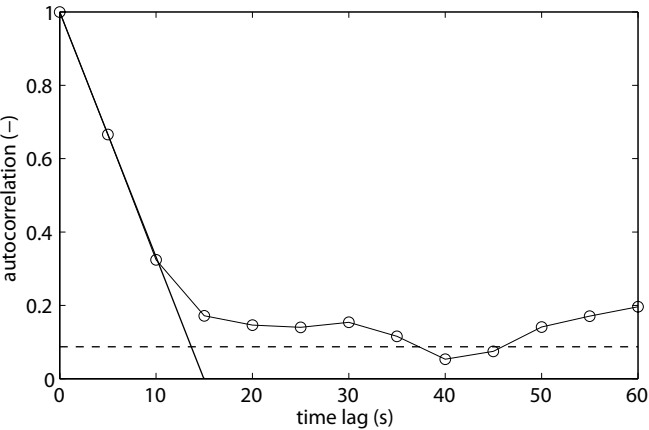
In het algemeen is het voor dit soort toevalsprocessen interessant om te kijken naar de grootte van de schommelingen als zodanig en naar de snelheid waarmee ze optreden. De relatieve frequentie waarmee fluctuaties van een bepaalde grootte voorkomen kan worden bepaald door van de aantallen voetgangers die op de verschillende momenten zijn geteld een histogram te maken (Fig. 3):



Figuur 3. Histogram van het aantal voetgangers. De kruisjes geven de relatieve frequenties van de waargenomen aantallen voetgangers weer, de cirkels die van de verwachte aantallen op basis van de Poissonverdeling en de verticale balken de corresponderende marges als gevolg van toevallige fluctuaties.

Het blijkt dat de relatieve frequenties in dit geval niet significant verschillen van hetgeen verwacht mag worden op basis van een bekende theoretische kansverdeling, de zogenaamde Poissonverdeling. Een interessante observatie, die suggereert dat onze voetgangers niet geclusterd zijn, dat willen zeggen niet in groepjes bij elkaar lopen, want dat is een van de basisaannames waarop de Poissonverdeling is gebaseerd. Kortom, de onderzoekers, docenten en studenten lijken zich min of meer onafhankelijk van elkaar over de loopbrug een weg naar binnen te banen. Veel behoefte aan een praatje lijkt er 's ochtends dus niet te zijn...

Interessanter nog dan de grootte van de fluctuaties in het aantal voetgangers is de snelheid waarmee ze optreden. Een maat daarvoor is de correlatie tussen de aantallen voetgangers op achtereenvolgende tijdstippen. Dit noemen we de autocorrelatie. Is de autocorrelatie 1 dan is er sprake van een perfect lineair verband tussen de aantallen voetgangers op verschillende tijdstippen; is de autocorrelatie 0 dan is een dergelijke lineaire afhankelijkheid volledig afwezig. We kunnen bijvoorbeeld de autocorrelatie berekenen tussen opeenvolgende observaties 5 seconden uit elkaar. We kunnen vervolgens ook onderzoeken hoe deze correlatie verandert als we observaties 10 seconden uit elkaar beschouwen, 15 seconden, enzovoort. Als we nu de berekende autocorrelaties uitzetten tegen de corresponderende tijdsverschillen tussen de observaties, dan krijgen we het volgende beeld te zien (Fig. 4):



Figuur 4. Autocorrelogram van het aantal voetgangers. De cirkels verbonden door rechte lijnen geven de autocorrelaties van de waargenomen aantallen voetgangers weer. De doorgetrokken rechte lijn is het theoretische correlogram voor het geval dat alle voetgangers zich met dezelfde snelheid zouden voortbewegen. Alle autocorrelaties die zich boven de stippellijn bevinden, verschillen significant van nul.

We zien dat de autocorrelatie relatief snel afneemt van de maximale waarde van 1 voor een tijdsverschil van 0 seconden tot nagenoeg 0 voor een tijdsverschil van 15 seconden, waarna de autocorrelatie bijna niet meer significant van 0 verschilt.

De autocorrelatiefunctie zegt ons iets over het geheugen van het systeem dat we beschouwen. Kennelijk heeft ons traject met voetgangers op de loopbrug van Atlas een geheugen van ongeveer 15 seconden, want er is bijna geen sprake meer van lineaire afhankelijkheid tussen observaties die 15 seconden of langer uit elkaar liggen. Omdat we al eerder geconstateerd hadden dat onze voetgangers zich min of meer onafhankelijk van elkaar voortbewogen, betekent dit dat de gemiddelde voetganger er dus zo'n 15 seconden over doet om het gemarkeerde traject van 20 meter te doorkruisen. Dit komt overeen met een gemiddelde loopsnelheid van 80 meter per minuut, ofwel zo'n 4,8 kilometer per uur, wat inderdaad een typische wandelsnelheid voor volwassenen is. Met andere woorden, door simpelweg voetgangers te tellen binnen een bepaald traject op achtereenvolgende tijdstippen, hebben we een uitspraak kunnen doen over de gemiddelde loopsnelheid van die voetgangers!

Indien de voetgangers zich werkelijk allemaal met een snelheid van 4,8 kilometer per uur onafhankelijk van elkaar zouden voortbewegen, dan zou de autocorrelatiefunctie als een perfect rechte lijn afnemen van 1 bij een tijdsverschil van 0 seconden naar 0 bij een tijdsverschil van 15 seconden, wat een heel goede benadering is van onze experimentele resultaten, zoals Fig. 4 laat zien.

Hoewel de totale instroom van studenten en de jaarlijkse schommelingen daarin uiteraard onze bovengemiddelde aandacht hebben, zijn wij als leerstoelgroep Hydrologie en Kwantitatief Waterbeheer uiteraard niet primair geïnteresseerd in het fluctuatiedrag van het aantal voetgangers op de loopbrug van het Atlasgebouw. Wat ik met dit voorbeeld duidelijk heb willen maken is dat, als het gaat om het begrijpen van systeemgedrag, metingen en modellen hand in hand gaan. In het

zoiest beschreven voorbeeld bestonden de metingen uit tellingen van aantallen voetgangers op achtereenvolgende tijdstippen¹.

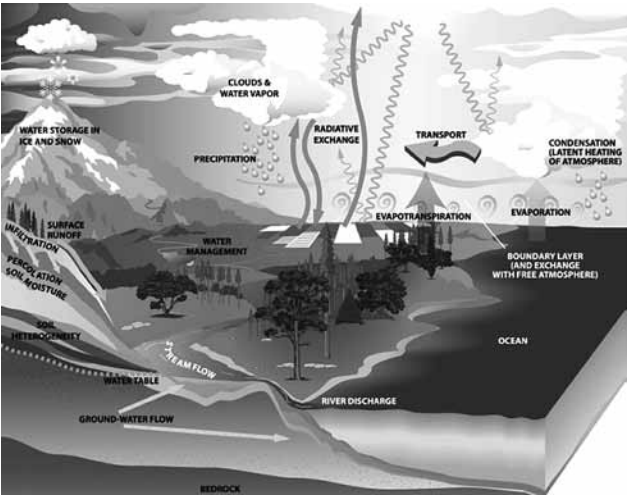
Tot zover de metingen. Het conceptuele model dat we gebruikt hebben om onze metingen te interpreteren is dat van voetgangers die zich met een constante snelheid onafhankelijk van elkaar voortbewegen. Het mag duidelijk zijn dat dit model zijn grenzen kent, bijvoorbeeld wanneer door drukte opstoppen ontstaan, om over de invloed van menselijk (ontwijk)gedrag nog maar te zwijgen. Desalniettemin beschrijft ons conceptuele model, dat maar twee parameters kent – namelijk één voor de kansverdeling van de aantallen voetgangers en één voor de corresponderende autocorrelatiefunctie – de observaties tamelijk goed, zoals blijkt uit Fig. 3 en 4, zonder dat het pad van iedere individuele voetganger expliciet wordt meegenomen. Een vergelijkbare aanpak is ook van toepassing op modellen in de aard- en omgevingswetenschappen, waaronder de stroomgebiedshydrologie (bijvoorbeeld Kirchner, 2006; Oerlemans, 2008).

Als natuurwetenschappelijke discipline houdt de hydrologie zich bezig met het bestuderen van de verschillende componenten van de hydrologische cyclus, ofwel de kringloop van het water (NRC, 1991; Fig. 5). Tijdens zijn afscheidsrede in 1985 aan de toenmalige Landbouwhogeschool, getiteld *'Hoe denken hydrologen'*, kenschetste de geestelijk vader van onze leerstoelgroep Prof. Kraijenhoff van de Leur hydrologen als

'mensen die nadenken over het terrestrische deel van de waterkringloop. Ze denken dus over dat deel van het aardse water dat uit de atmosfeer omlaag is gekomen en dat al afstromend tenslotte weer door verdamping naar de atmosfeer terugkeert' (Kraijenhoff van de Leur, 1985).

¹ Overigens gebiedt de eerlijkheid mij te zeggen dat ik deze metingen niet zelf heb gedaan door de loopbrug van Atlas nauwkeurig in het oog te houden. Het gaat wel degelijk om tellingen van aantallen voetgangers, maar dan een kleine honderd jaar geleden uitgevoerd op een stoep in de stad Wenen door studenten van de fysicus Fürth (1918, 1919), die hiermee experimenteel bewijs wilde verzamelen voor een eerder gepubliceerde theorie over fluctuaties in fysische systemen door Von Smoluchowski (1916), zoals beschreven door Chandrasekar (1943). Het zou uiteraard aardig zijn een dergelijk experiment nog eens te herhalen, maar dan met moderne meetapparatuur, waarbij iedere voetganger een GPS-plaatsbepalingssysteem bij zich zou dragen.

De hydrologie concentreert zich dus in het bijzonder op dat deel van de waterkringloop dat zich net boven, op en juist onder het aardoppervlak bevindt. Deze zogenaamde kritische zone is de dunne schil rondom onze aardbol waar mens, plant en dier leven, de huid van de aarde zo u wilt. Juist daarom is de studie van de hydrologische processen in deze zone niet alleen wetenschappelijk interessant, maar ook van groot maatschappelijk belang, zoals u zich ongetwijfeld kunt voorstellen gezien de niet aflatende media-aandacht voor water-gerelateerde onderwerpen. Maar daarover later meer. Laten we eerst eens wat meer in detail kijken naar twee relevante hydrologische processen, namelijk neerslag en afvoer.



Figuur 5. De kringloop van het water (CCSP, 2003).

In de stroomgebiedshydrologie bestuderen we, zoals de naam al doet vermoeden, de hydrologische processen op de ruimtelijke schaal van stroomgebieden van beken en rivieren, zoals die van de Rijn en de Maas. Voor stroomgebiedshydrologen ziet de kaart van Europa er dus als volgt uit (Fig. 6):



Figuur 6. Europa als verzameling stroomgebieden (de Wit, 2008).

Het gemarkeerde stroomgebied is dat van de Maas, daarnaast ligt dat van de Rijn. Beiden zullen we later nog tegenkomen.

Het mag duidelijk zijn dat in dergelijke stroomgebieden, hoe natuurlijk ze er op deze schaal ook uitzien, de invloed van menselijk ingrijpen wel degelijk merkbaar kan zijn. Denk daarbij niet alleen aan kanalisatie, stuwmuren en verstedelijking, maar bijvoorbeeld ook aan onze eigen polders in laag Nederland. Een deel van het water dat in de vorm van neerslag door het stroomgebied van een bepaalde rivier wordt ingevangen zal uiteindelijk via die rivier dat gebied weer verlaten of, in het geval van de zojuist genoemde polder, er uit worden gepompt. Uiteraard kan het water in de tussentijd ook verdampen of percoleren naar diepere aardlagen. Hoe deze verschillende termen samen de waterbalans van een stroomgebied opmaken,

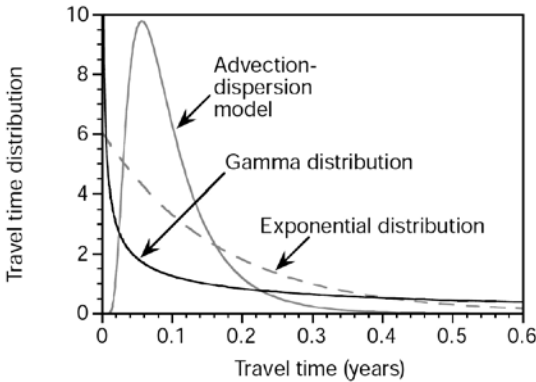
daaraan heeft mijn voorganger Prof. Troch in zijn inaugurele rede in 2001 uitgebreid aandacht besteed (Troch, 2001). Vandaag zullen we ons specifiek richten op de transformatie van neerslag naar afvoer, de kern van de stroomgebiedshydrologie.

Uiteraard gedraagt het hydrologische systeem dat we een stroomgebied noemen zich over het algemeen niet zo eenvoudig als de voetgangersbrug naar het Atlasgebouw die we zojuist hebben beschouwd. Alle voetgangers die het gemarkeerde deel van de brug binnentraden, kwamen er na verloop van tijd ook weer uit. We hebben al gezien dat een deel van het water dat als neerslag op het stroomgebied van een rivier valt, zal verdampen. Met andere woorden, in een hydrologisch systeem halen niet alle voetgangers de eindstreep; een deel van hen zal terugkeren naar waar ze vandaan kwamen. Ook was in ons modelsysteem de capaciteit van de brug of het aantal voetgangers reeds aanwezig nooit een beperkende factor bij de instroom. Dit is in de stroomgebiedshydrologie wel anders: juist het proces van oppervlakkige afstroming vanwege óf een beperkte infiltratiecapaciteit óf een lokale verzadiging van de bodem is een drempelproces dat aanleiding geeft tot sterk niet-lineair gedrag.

Tenslotte was het in het geval van ons brugexperiment ook zo dat alle voetgangers exact hetzelfde traject aflegden en dat ook nog eens met eenzelfde snelheid. Hun reistijden door het systeem waren daarom identiek. Uiteraard kan een waterdeeltje dat niet via verdamping terugkeert naar de atmosfeer via verschillende paden de monding van een rivier bereiken. Deze paden hebben niet alleen een verschillende lengte, ook de geleidbaarheid voor water verschilt sterk binnen een pad en van pad tot pad. Zo kunt u zich voorstellen dat een waterdeeltje dat zich voornamelijk via de ondergrond een weg baant naar het uitstroompunt van een stroomgebied veel meer weerstand zal ondervinden dan een waterdeeltje dat zich voornamelijk via het open water van beken en rivieren verplaatst. Dit maakt dat er op de schaal van een compleet stroomgebied sprake is van een (kans)verdeling van reistijden door het hydrologische systeem (Fig. 7).

De precieze eigenschappen van dergelijke verdelingen zijn niet alleen van belang voor het neerslag-afvoergedrag, maar bijvoorbeeld ook voor het transport van opgeloste stoffen door stroomgebieden.

. . .



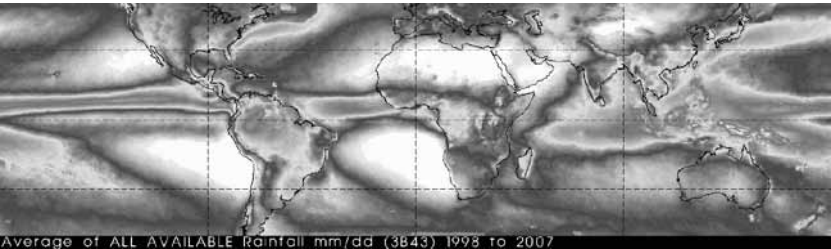
Figuur 7. Reistijdenverdelingen in een stroomgebied (Kirchner, 2000).

Tenslotte richten we ons op de invoer van beide systemen: in het geval van de loopbrug voor Atlas ging het om binnendruppelende medewerkers en studenten, in het geval van een stroomgebied, afhankelijk van de schaal waarop we kijken, om vallende regendruppels, overtrekkende regenbuien of grootschalige weersystemen. Hoewel buien in de hydrologie soms, gelijk de voetgangers op de loopbrug, als een Poisson proces van instantane neerslagpulsen worden gemodelleerd, is de realiteit natuurlijk vele malen complexer. Laten we eens kijken hoe complex neerslag is en hoe we deze complexiteit het beste kunnen karakteriseren vanuit hydrologisch perspectief.

Reis door de regen (van de regen in de drup)

“Waar geen regen valt, is ook niet echt sprake van een hydrologische cyclus”, zo schreef Wilfried Brutsaert (2005) van Cornell University in zijn recent verschenen leerboek, al hoeft je natuurlijk geen beroemd hydroloog te zijn om dat op te merken. Hoewel neerslag de drijvende kracht is achter de terrestrische hydrologische processen, wordt in de hydrologie en in het waterbeheer van oudsher veel meer aandacht besteed aan het ontwikkelen van nieuwe rekenmodellen dan aan het bouwen van betere instrumenten om neerslag en andere componenten van de hydrologische cyclus mee te meten. Zo wordt er momenteel bijvoorbeeld door

verschillende instituten in ons land wél gezamenlijk gewerkt aan een Nationaal Hydrologisch Model Instrumentarium (NHI), maar ontbreekt helaas een dergelijk initiatief als het gaat om een Nationaal Hydrologisch Meet Instrumentarium. Met ons experimentele onderzoek, ondermeer op het gebied van de neerslagmeting en, zoals we later zullen zien, de hydraulica, proberen wij een bijdrage te leveren aan het opvullen van deze lacune.



.....

Figuur 8. Mondiale neerslagklimatologie (1998–2007) afgeleid uit metingen van de Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) satelliet en andere bronnen (http://trmm.gsfc.nasa.gov/trmm_rain/Events/trmm_climatology_3B43.html).

Jaarlijks valt op de gehele aarde gemiddeld ongeveer een meter neerslag, dus verdampt er in die periode uiteraard ook een dergelijke hoeveelheid. Zoals blijkt uit Fig. 8, gebaseerd op 10 jaar gegevens van de Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), de eerste satelliet met een regenradar aan boord, is dit jaarlijkse gemiddelde echter verre van gelijk over de aarde verdeeld. De ruimtelijke variatie van neerslag blijft uiteraard niet beperkt tot de mondiale schaal, maar strekt zich ook uit tot op regionale en lokale schaal. Deze enorme complexiteit over vele ordes van grootte, van de schaal van de aarde tot die van de individuele regendruppel, is kenmerkend voor neerslag (Fig. 9).

“Het regent plaatselijk in het hele land” zegt de weerman of weervrouw dan, een uitspraak die we helaas maar al te vaak horen en waar ik toch altijd weer even over na moet denken, hoewel ik me al geruime tijd met dit onderwerp bezig houd.



Figuur 9. Van de regen in de drup (Victoria Roberts, New York Times, 2000).

Neerslag is uiteraard niet alleen zeer variabel in de ruimte, maar ook in de tijd. Traditioneel meten we in de hydrologie, net als in de meteorologie, regen met behulp van regenmeters, verdeeld over stroomgebieden in de vorm van netwerken. Deze regenmeters leveren in essentie echter puntinformatie over de neerslag, terwijl we in de hydrologie juist geïnteresseerd zijn in de ruimtelijke verdeling ervan binnen een stroomgebied, of in ieder geval toch een goede schatting van het ruimtelijk gemiddelde op die schaal. Zoals u zult begrijpen is dit met een verzameling puntmetingen maar lastig te realiseren. Een lokale bui kan zo maar door de regenmeters in een netwerk worden gemist. Wat we nodig hebben in de hydrologie en het kwantitatieve waterbeheer is gebiedsdekkende neerslaginformatie met een voldoende hoge resolutie in tijd en ruimte. Hoeveel ‘voldoende’ precies is, daar kom ik zodadelijk op terug.

Een techniek die de laatste jaren opgang heeft gemaakt in ons vakgebied is regenradar. RADAR, het acroniem van ‘RADio Detection and Ranging’, biedt, zoals de naam suggereert, de mogelijkheid om vanaf één punt in een stroomgebied door middel van radiogolven doelen te detecteren en de afstand tot die doelen te

bepalen. Radar is dus een zogenaamde ‘remote sensing’ ofwel teledetectie-techniek. In ons geval zijn die doelen verzamelingen van regendruppels in de lucht, maar in andere toepassingsgebieden hebben die doelen vanzelfsprekend een heel ander karakter. Radar als techniek heeft oorspronkelijk gedurende de tweede wereldoorlog een stormachtige ontwikkeling doorgemaakt. Waar neerslag aanvankelijk slechts als een bron van storingen voor militaire doeleinden werd gezien, zijn al snel de mogelijkheden onderkend om van de ruis voor het ene vakgebied een signaal voor het andere te maken.



Figuur 10. Buienradar (Wessels, 1964).

Dat blijkt bijvoorbeeld uit de omslag van een voorlichtingsboekje van de hand van Herman Wessels (1964) van het KNMI, dat bijna een halve eeuw geleden is verschenen in de reeks ‘Actuele Onderwerpen’. Er is in die 45 jaar natuurlijk veel veranderd, waaronder het beschikbaar komen van real-time radarneerslaginformatie via het internet, maar qua naamgeving is alles nog bij het oude gebleven: *buienradar.nl*

Zoals gezegd berust de werking van de radar als vlakdekkende regenmeter op het uitzenden van een radiosignaal richting een regenbui. De regendruppels in die bui zullen een deel van dat signaal opvangen en terugkaatsen richting de radarantenne. Het verschil tussen het uitgezonden en het ontvangen vermogen zegt ons iets over de hoeveelheid regendruppels en de grootte ervan in het meetvolume van de radar. Die grootheden hangen uiteraard ook samen met de regenintensiteit waar wij als

hydrologen in geïnteresseerd zijn. Op die manier kunnen we, door een relatie te leggen tussen radar reflectie en regenintensiteit, radar inzetten ten behoeve van neerslagmeting voor hydrologie en waterbeheer.

Cruciaal voor het bepalen van die relatie is dus enerzijds dat we weten hoeveel van de ontvangen radio-energie een regendruppel van een gegeven grootte terugkaatst richting de radar en anderzijds hoeveel druppels van een gegeven grootte zich in het radar-meetvolume bevinden. Het antwoord op die eerste vraag kunnen we vinden door de veldvergelijkingen van Maxwell op te lossen voor elektromagnetische verstrooiing door homogene bolletjes water die vallen door de lucht. Dat is, zoals u zult begrijpen, geen dagelijkse kost voor hydrologen. Gelukkig voor ons is dit probleem zo'n honderd jaar geleden al exact opgelost. Dat brengt mij bij de titel van mijn oratie (Fig. 11): Why Mie?



Figuur 11. Why Mie? (<http://www.boomerang.nl/>)

Nee, collega's voedings- en levensmiddelenwetenschappers van Wageningen Universiteit, u hoeft niet te vrezen dat een op hol geslagen hydroloog tijdens zijn oratie laat weten dat hij toch een andere leeropdracht aanvaardt. Voor u, levens-

wetenschappers, is 2009 het Darwin jaar, waar we tijdens de viering van de Dies Natalis van deze universiteit op 9 maart jongstleden nog uitgebreid bij hebben stilgestaan. Echter, voor ondermeer astronomen, kolloïdchemici, meteorologen en een enkele hydroloog stond 2008 in het teken van de honderdste verjaardag van Gustav Mie's (1908) publicatie 'Bijdragen aan de optica van troebele media, in het bijzonder kolloïdale metaaloplossingen'.

GUSTAV MIE (1868–1957)



Figuur 12. Gustav Mie (Mishchenko en Travis, 2008).

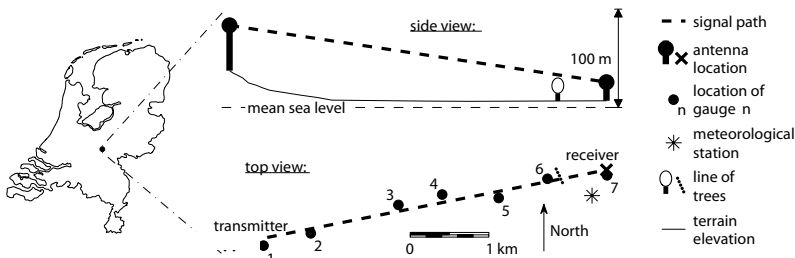
Het is de zogenaamde Mie-theorie die een exacte oplossing geeft voor elektromagnetische verstrooiing door homogene bolletjes als functie van de golflengte van de invallende straling en de grootte en diëlektrische eigenschappen van het bolletje. Deze Mie-theorie speelt in de genoemde vakgebieden (en nog vele andere) een belangrijke rol, in het bijzonder daar waar het gaat om het interpreteren van metingen met behulp van licht of andere elektromagnetische golven (Van de Hulst, 1957; Kollias et al., 2002; Mishchenko en Travis, 2008). En dat is nu precies waar het ons als hydrologen om te doen is bij ons onderzoek naar het gebruik van radar ten behoeve van regenmeting. Evenals bij de analyse van de voetgangersfluctuaties die eerder ter sprake kwamen, gaan model en meting hier dus hand in hand. That's why Mie!

Maar Mie heeft nog meer in petto voor de hydrologie:



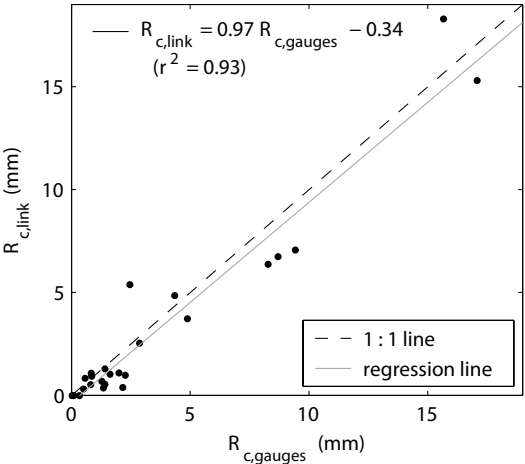
Figuur 13. Beperking van het zicht door regen boven het Meer van Genève.

Radar is, zoals ik u zojuist heb uitgelegd, gebaseerd op de verstrooiing van uitgezonden radiogolven door regendruppels. Uiteraard gaat bij die verstrooiing een deel van het vermogen, dat binnen de radarbundel in voorwaartse richting propageert, verloren. Door nu op zekere afstand van de zendende antenne een ontvangende antenne te plaatsen is het mogelijk om het verlies in vermogen over het pad tussen beide antennes te meten. Dat verlies hangt uiteraard af van de totale hoeveelheid water die zich op het pad bevindt en de manier waarop die hoeveelheid is verdeeld over de regendruppels in de bundel, vergelijkbaar met de manier waarop zonlicht wordt verzwakt door regen (Fig. 13). De Mie-theorie biedt ook voor dit probleem een oplossing.



Figuur 14. Straalverbinding Rhenen-Wageningen (Leijnse et al., 2007).

Een aantal jaren geleden hebben we met een dergelijke opstelling metingen gedaan over een pad van ongeveer 5 kilometer tussen Rhenen en Wageningen (Fig. 14). We hebben daarbij het verlies aan vermogen tussen de zender in Rhenen en de ontvanger in Wageningen vergeleken met de gemiddelde regenintensiteit over dit pad, bepaald uit een zevental regenmeters die we voor deze gelegenheid in een lijn hadden opgesteld. Uit de Mie-theorie konden we afleiden dat bij de gebruikte frequentie de regenintensiteit ongeveer rechtevenredig zou moeten zijn met de demping van het signaal, hetgeen we experimenteel konden bevestigen met onze meetgegevens.



Figuur 15. Straalverbinding als regenmeter (Leijse et al., 2007).

Na correctie voor een hoeveelheid residuele demping ten gevolge van natte antennes waren we in staat om deze straalverbinding als ruimtelijk integrerende regenmeter te gebruiken, zoals Fig. 15 laat zien voor in totaal 25 buien. Een mooi resultaat, zeker als u zich realiseert dat de gebruikte straalverbinding oorspronkelijk niet als regenmeter was gebouwd, maar als instrument om op basis van signaalfuctuaties (die scintillaties genoemd worden) en aanvullende metingen de verdamping te schatten. Over serendipiteit gesproken...

Vervolgens werden wij er door de ontwerpers van het instrument, collega's van de Faculteit Elektrotechniek van de TU in Eindhoven, op gewezen dat het hele land in feite volstaat met straalverbindingen die ruwweg dezelfde frequentieband gebruiken (Fig. 16).

.....



Figuur 16. Een deel van het netwerk van commerciële straalverbindingen in Nederland.

Onderdeel ervan zijn namelijk de welbekende antennes die worden gebruikt ten behoeve van de mobiele telecommunicatie. Van dergelijke straalverbindingen (met een gemiddelde lengte van enkele kilometers) bevinden zich er meer dan tienduizend in Nederland. Dat is pas een dicht regenmeternetwerk! In samenwerking met één van de grote mobiele telecom-bedrijven in Nederland en het KNMI zijn wij momenteel bezig met het onderzoeken van de mogelijkheid om operationeel duizenden van dergelijke straalverbindingen in te zetten om landsdekkende neerslagkaarten te produceren. En dat alles dankzij Mie!

...

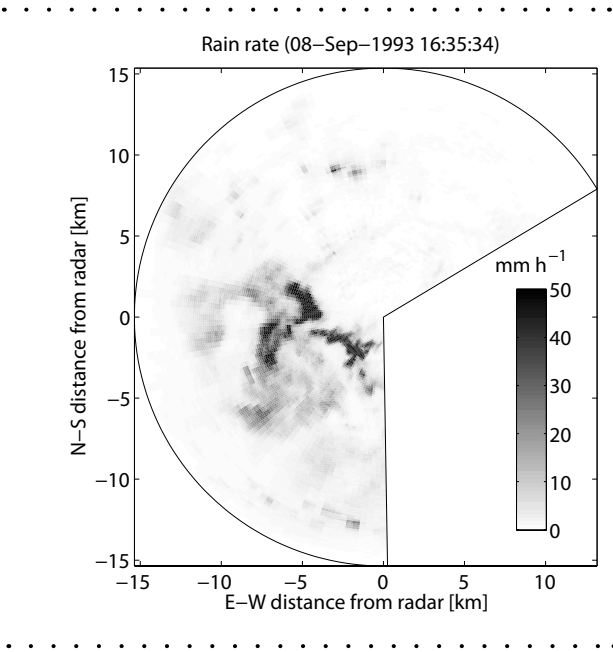
De hydrologische toepassing van dit commerciële netwerk is vooralsnog echter toekomstmuziek. Dat geldt niet voor regenradar. Sinds in de jaren '70 de eerste pogingen werden ondernomen om radar te gebruiken voor de meting van ruimtelijke neerslagpatronen ten behoeve van de neerslag-afvoermodellering – de reeds eerder genoemde Prof. Kraijenhoff van de Leur, was op dit terrein binnen Nederland een voortrekker – heeft radar zich ontwikkeld tot een techniek die bij uitstek geschikt is voor kwantitatieve hydrologische toepassingen.

Waar staan we momenteel als het gaat om neerslagmonitoring met behulp van radar? Voor toepassingen op mondiale schaal is er sinds 1997 de al eerder genoemde Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), die binnen enkele jaren zal worden opgevolgd door de Global Precipitation Mission (GPM). De ruimtelijke resolutie van de neerslagproducten uit deze satellietmissies is zo'n 5 kilometer in het horizontale vlak en 250 meter in de hoogte. Waar de dekking van TRMM, zoals de naam al suggereert, beperkt is tot de tropen, zal de dekking van GPM bijna globaal zijn, namelijk van 70 graden noorder- tot 70 graden zuiderbreedte. Maar het voornaamste verschil tussen TRMM en GPM is dat de laatste zal bestaan uit een constellatie van een tiental satellieten. Het resultaat hiervan zal zijn dat de herhalingsfrequentie van GPM ongeveer 3 uur zal zijn, terwijl die van TRMM, afhankelijk van de precieze locatie op aarde, kan oplopen tot enkele dagen. Stelt u zich eens voor, iedere 3 uur een bijna mondiale, zij het instantane, neerslagkaart met een ruimtelijke resolutie van 5 kilometer. Dat biedt grandioze mogelijkheden voor hydrologie en waterbeheer in gebieden op aarde waar de dekkingsgraad op basis van regenradars aan de grond of regenmeters nu nog beperkt is of zelfs volledig afwezig.

Voor toepassingen op continentale- en nationale schaal (of stroomgebieden van grotere rivieren) zijn er momenteel, voornamelijk in Noord Amerika, Europa en het Verre Oosten, netwerken van regenradars, die door de operationele meteorologische diensten van de betrokken landen worden beheerd. De typische resolutie van dergelijke systemen is momenteel zo'n 1 kilometer in de ruimte en 5 minuten in de tijd. Voor toepassingen op lokale schaal tenslotte, zeg de schaal van kleinere stroomgebieden, waterschappen of stedelijke gebieden, wordt momenteel gewerkt aan de ontwikkeling van radarsystemen met een beperkt bereik (van enkele tientallen kilometers), maar met een zeer hoge resolutie in tijd en ruimte (fracties

. . .

van een minuut en enkele tientallen meters). Dit soort systemen, dat zich nu nog in de ontwikkelingsfase bevindt, is uiteraard ook buitengewoon geschikt voor de bestudering van de fijnstructuur van regen (Fig. 17).



Figuur 17. Regenbui waargenomen met de hoge-resolutie radar SOLIDAR van de TU Delft (Uijlenhoet, 2008).

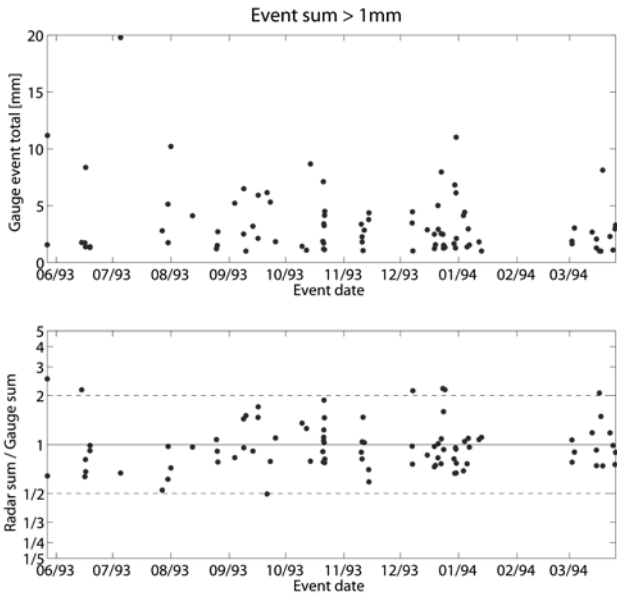
Onze leerstoelgroep heeft sinds begin jaren ‘90 een vruchtbare samenwerking met de radar-onderzoekers van de Faculteit Elektrotechniek, Wiskunde en Informatica van de TU in Delft. De radar die staat afgebeeld in Fig. 18, een foto die u van de uitnodiging voor deze oratie zult herkennen, is de jongste telg uit een hele familie radarsystemen die de afgelopen decennia door onze Delftse collega’s is ontwikkeld. Heel toepasselijk, vanuit stroomgebiedshydrologisch perspectief, ziet u op de achtergrond de rivier de Lek. IDRA, de IRCTR Drizzle Radar, is geïnstalleerd op de top van de 213 meter hoge KNMI-meetmast van de Cabauw Experi-

mental Site for Atmospheric Research (CESAR), van waaruit deze ‘miezerige’ radar (in de beste zin van het woord uiteraard) een prachtig uitzicht heeft over het Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden, waar onze leerstoelgroep een dicht netwerk van regenmeters en andere geavanceerde hydrologische meetapparatuur heeft staan.



Figuur 18. De IRCTR Drizzle Radar (IDRA) – een ‘miezerige’ radar?

Neerslagmetingen met de voorganger van IDRA, SOLIDAR genaamd, zijn in het kader van een promotie-onderzoek bij onze leerstoelgroep gedurende een lange periode vergeleken met cijfers van onze eigen regenmeters (Fig. 19).



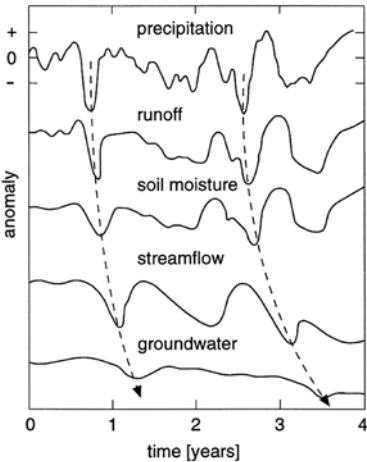
Figuur 19. Vergelijking van SOLIDAR met een regenmeter (Van de Beek et al., 2009).

De onderste helft van Fig. 19 laat een vergelijking zien tussen SOLIDAR en een regenmeter voor bijna 200 regenbuien met een duur van minimaal een half uur en een neerslagsom van minimaal een millimeter. De totale hoeveelheid neerslag per bui, gemeten met de regenmeter, staat in de bovenste helft van de figuur weergegeven. U ziet dat het verschil tussen radar en regenmeter voor 95% van de buien kleiner is dan een factor 2, wat gegeven het verschil in ruimtelijke en temporele resolutie van radar versus regenmeter, alleszins acceptabel is. Bovendien is het systematische verschil beperkt.

Dit betekent dat we met dergelijke radarsystemen in staat zijn om met een ongekend hoge resolutie in tijd en ruimte, in dit geval 16 seconden en 30 meter, neerslag te meten. Dat biedt vanzelfsprekend prachtige mogelijkheden voor fundamenteel onderzoek naar de fijnstructuur van neerslag en voor toegepast onderzoek, waarin gemeten radar-neerslagvelden als invoer voor hydrologische modellen worden gebruikt. In dat kader werken we momenteel, in samenwerking met onze Delftse radar-collega's, aan een vergelijking tussen de nieuwe radar IDRA en ons eigen regenmeternetwerk.

De hartslag van een stroomgebied

De schitterende mogelijkheden die remote sensing van neerslag met behulp van dergelijke hoge-resolutie radarsystemen biedt, roept natuurlijk ook de vraag op welke resolutie in tijd en ruimte we eigenlijk nodig hebben ten behoeve van hydrologie en kwantitatief waterbeheer. Daartoe zullen we eerst wat meer in detail moeten gaan kijken naar hoe stroomgebieden van rivieren neerslag nu eigenlijk in afvoer transformeren.

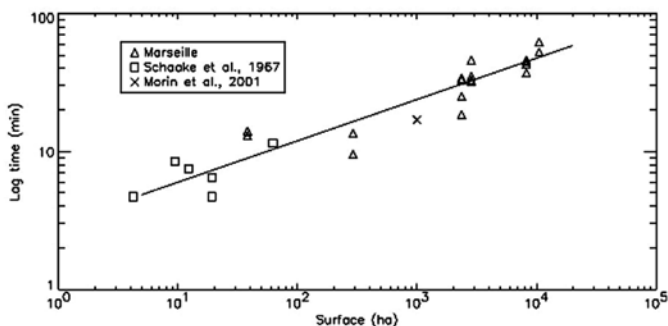


Figuur 20. Propagatie van neerslagfluctuaties door de verschillende componenten van de waterkringloop (naar Changnon, 1987).

Stroomgebieden functioneren wat hun neerslag-afvoer gedrag betreft over het algemeen als een soort lage-doorlaatfilters (low-pass filters). De hoogfrequente neerslagfluctuaties die de drijvende kracht vormen achter de terrestrische hydrologische processen worden binnen stroomgebieden getransformeerd in lager-frequentie schommelingen in de afvoer, zoals in Fig. 20 is te zien. Als we het complement van de neerslag beschouwen, namelijk de droge periodes tussen de buien of – op langere tijdschalen – droge seizoenen tussen nattere jaargetijden of drogere jaren tussen jaren met meer neerslag, en we beschouwen hoe dergelijke meteorologische droogtes door het hydrologische systeem propageren naar het grondwater, dan zien we overigens een vergelijkbaar proces, zoals u ook in Fig. 20 kunt zien. De tijdschalen van de ‘natte’ en de ‘droge’ kant van de hydrologie zijn uiteraard wel zeer verschillend.

We kunnen de hydrologische respons van een stroomgebied op een neerslagpuls karakteriseren door middel van een reactietijd, bijvoorbeeld gedefinieerd als de tijdsvertraging tussen het zwaartepunt van de neerslagbui en het zwaartepunt van de bijbehorende afvoerpiek of hydrogram.

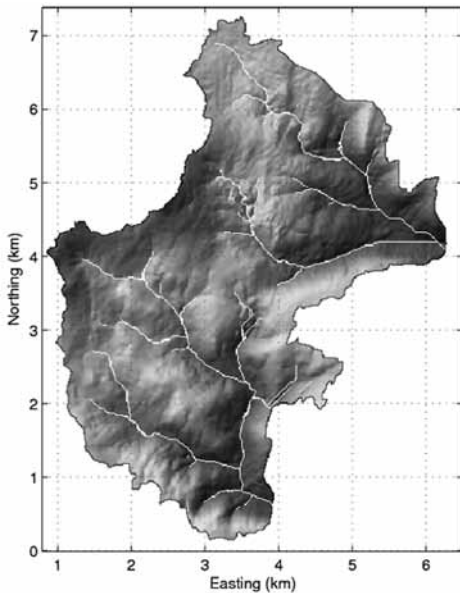
Het zal u duidelijk zijn dat, als we de afvoerdynamiek van een stroomgebied zo volledig mogelijk willen beschrijven met een hydrologisch model, we de neerslaginformatie beschikbaar dienen te hebben met een tijdstap die enige malen kleiner is dan de karakteristieke responstijd van een stroomgebied. Met andere woorden, de typische reactietijd van stroomgebieden bepaalt het maximale tijdsinterval waarover we ons neerslagsignaal mogen aggregeren. Het is uiteraard ondoenlijk om met dagneerslagcijfers het hydrologische functioneren van een stroomgebied met een responstijd van enkele uren te willen beschrijven, net zo goed als het zinloos is om een rekenmodel van een hydrologisch systeem met een reactietijd van een dag te willen voeden met kwartierneerslagen. Toch wordt met dit soort voor de hand liggende relaties in de hydrologische praktijk niet altijd voldoende rekening gehouden.



Figuur 21. Reactietijd als functie van stroomgebiedsoppervlak (Berne et al., 2004).

Zoals Fig. 21 laat zien, hangt de karakteristieke tijdschaal van het beschouwde hydrologische systeem, de hartslag van het stroomgebied z gezegd, samen met het drainerend oppervlak. Ook andere aspecten kunnen een rol spelen, zoals de steilheid van de hellingen (de topografie), de ruimtelijke structuur van het waterloppennetwerk (de topologie), het landgebruik en de vegetatie, en eigenschappen van de ondergrond zoals de dikte, doorlatendheid en porositeit van de watervoerende bodemlagen. Prof. Kraijenhoff van de Leur (1958) heeft vorig jaar precies een halve eeuw geleden een inmiddels klassiek geworden artikel gepubliceerd waarin hij liet zien hoe de karakteristieke responstijd van een typisch Nederlands hydrologisch systeem, dat gekenmerkt wordt door een homogene bodem tussen evenwijdige kanalen op een ondoorlatende laag, samenhangt met de geometrie en de hydraulische eigenschappen van de watervoerende laag. In dezelfde traditie heeft mijn directe voorganger Prof. Troch (2003) samen met collega's de theorie van Kraijenhoff uitgebreid voor hellende stroomgebieden, waardoor uiteraard ook parameters die de hellinggeometrie beschrijven (steilheid en vorm) in de vergelijking kwamen.

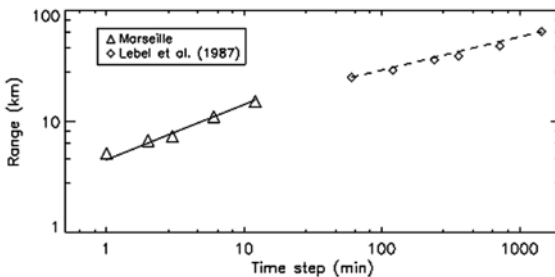
Het subtiel samenspel tussen de ruimtelijke samenhang van de hellingen en de structuur van het waterloppennetwerk binnen een stroomgebied (Fig. 22) in de bepaling van de hydrologische respons is vervolgens een actieve onderzoekslijn binnen onze leerstoelgroep geworden (Berne et al., 2005b).



Figuur 22. Stroomgebied als een collectie hellingen gedrapeerd rondom een netwerk van waterlopen (Bogaart en Troch, 2006).

U kunt zich voorstellen dat het relatieve belang van de ruimtelijke structuur van de hellingen ten opzichte van dat van de waterlopen in de bepaling van de respons-tijd van een stroomgebied een functie is van de grootte en de verzadigingsgraad van dat stroomgebied. Voor kleinere stroomgebieden speelt het waterloppennetwerk slechts een beperkte rol en wordt de respons voornamelijk door de hellingen bepaald, terwijl voor grotere stroomgebieden juist de topologie van het waterloppennetwerk een bepalende factor wordt, zeker als de fractie verzadigde gebieden beperkt is (bijvoorbeeld D’Odorico en Rigon, 2003). De invloed van de topografie als verklarende factor in de hydrologische respons is overigens reeds lang geleden onderkend en stond aan de basis van het bekende Topmodel, waarbij ‘Top’ staat voor ‘Topografie’ (Beven en Kirkby, 1979). Vandaar dat hydrologen heel andere associaties hebben bij de term ‘topmodel’ dan veel andere mensen...

Indien we ons nu beperken tot de klasse van neerslag-afvoermodellen die het ruimtelijke aspect van de hydrologische processen niet expliciet meenemen, de zogenaamde ruimtelijk geaggregeerde 'lumped' modellen, dan hebben we voldoende aan de stroomgebiedsgemiddelde neerslag als modelinvoer. De mate van (on) zekerheid waarmee we in staat zijn om die gemiddelde neerslag over een heel stroomgebied te schatten, hangt uiteraard samen met de ruimtelijke verdeling van die neerslag binnen het stroomgebied. Zelfs voor ruimtelijk geaggregeerde modellen is het dus noodzakelijk dat we kennis hebben van de statistiek van de ruimtelijke variatie van de neerslag.



Figuur 23. Decorrelatie-afstand als functie van aggregatie-interval.

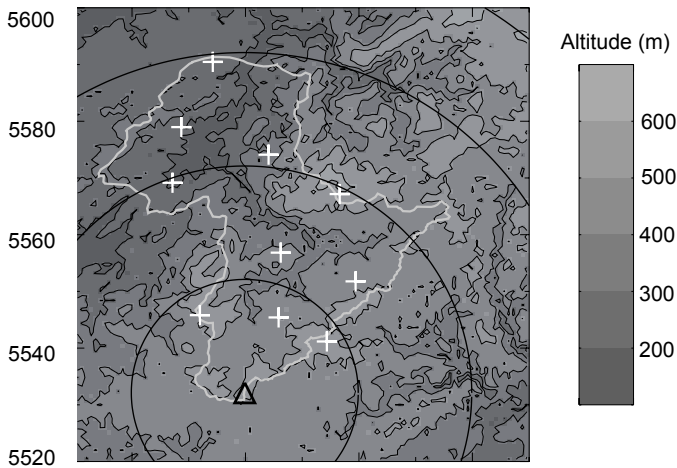
Een maat voor die statistiek is de ruimtelijke correlatiestructuur en een belangrijke parameter die deze structuur karakteriseert is de zogenaamde decorrelatie-afstand (Fig. 23). Dat is de afstand tussen twee regenmeters waarop de regenhoeveelheden die door die regenmeters worden gevangen geen of nog maar een zeer beperkte lineaire afhankelijkheid vertonen. Het zal u niet verbazen dat, als we de stroomgebiedsgemiddelde neerslag binnen een beperkte marge willen schatten, we onze regenmeters gemiddeld veel dichter bij elkaar dienen te zetten dan de afstand waarop de neerslag decorreleert. Die decorrelatie-afstand hangt uiteraard samen met het tijdsinterval waarover we de neerslag mogen aggregeren, die – zoals we zojuist gezien hebben – wordt bepaald door de responstijd van het beschouwde stroomgebied.

Het is gemakkelijk te begrijpen dat de decorrelatie-afstand toeneemt met het aggregatie-interval, zoals Fig. 23 laat zien: hoe langer de periode waarover we neerslagcijfers sommeren, des te meer gaan de neerslagsommen van naburige stations op elkaar lijken. Maar hoe groot de decorrelatie-afstand voor een gegeven tijdsinterval precies is en hoe snel deze toeneemt als dat interval langer wordt, hangt uiteraard af van het type neerslag en het klimaat dat we beschouwen: voor zomerse convectieve buien verwachten we uiteraard een kortere decorrelatie-afstand dan voor stratiforme herfst- of voorjaarsregens. Omdat in verschillende klimaten de relatieve bijdragen van deze neerslagtypen aan de totale neerslagsom verschillend zijn, zal de gemiddelde relatie tussen decorrelatie-afstand en aggregatie-interval er voor verschillende gebieden anders uitzien. We verwachten in Zuid Europa over het algemeen kortere decorrelatie-afstanden, omdat de neerslag daar gemiddeld convectiever van aard is dan bij ons, waar stratiforme systemen een prominenter rol spelen.

Kortom, waar het de reactietijd van een stroomgebied is die bepaalt over welke tijdstap we de neerslag maximaal mogen aggregeren, is het de minimale decorrelatie-afstand van de neerslag op die tijdschaal die bepaalt hoe dicht ons regenmeter-netwerk dient te zijn. De hydrologie van een stroomgebied bepaalt dus de tijdschaal en de klimatologie van de neerslag de ruimteschaal waarop we de regenhoeveelheden dienen te kennen.

Het belang van deze analyse is dat we nu in staat zijn een expliciete relatie te leggen tussen de karakteristieke responstijd van een stroomgebied en de gewenste afstand tussen regenmeters, voor het geval we het neerslag-afvoerproces in dit stroomgebied ruimtelijk geaggregeerd willen modelleren. Wat we hieruit leren is dat de dichtheid van het regenmetersnetwerk dat we nodig hebben om dit hydrologische proces adequaat te modelleren over het algemeen veel hoger is dan wat op basis van operationele netwerken haalbaar is. Dat is nu precies de kracht van regenradar, waarvan het belang alleen nog maar evidenter wordt als we de hydrologische processen ruimtelijk expliciet modelleren, bijvoorbeeld omdat we willen inzoomen op locale processen zoals 'flash floods', aardverschuivingen of veranderingen in landgebruik.

. . .

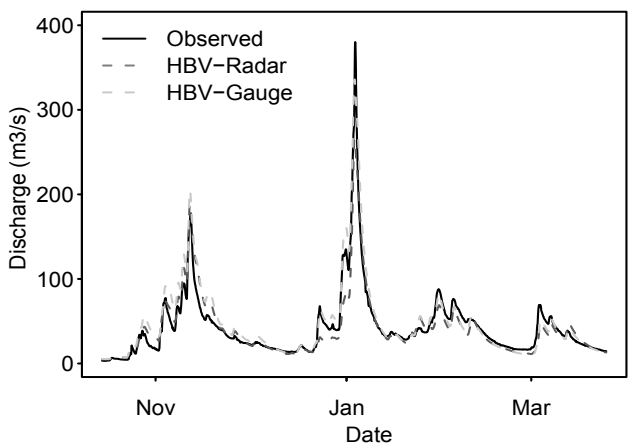


Figuur 24. Stroomgebied van de Ourthe bovenstrooms van Tabreux met de locaties van 10 regenmeters en de regenradar van Wideumont (Berne et al., 2005a).

Wat betekent dit nu in de hydrologische praktijk? Daarvoor beschouwen we het stroomgebied van de Ourthe, een belangrijke zijrivier van de Maas, in de Belgische Ardennen (Fig. 24). Het stroomgebied heeft een oppervlak van zo'n 1600 km² en wordt gekenmerkt door een aanzienlijke variatie in topografie en vegetatie. Op de meest zuidelijke punt van het stroomgebied is enkele jaren geleden door de Belgische meteorologische dienst KMI in samenwerking met de Waalse hydrologische dienst SETHY een radar geïnstalleerd. In het kader van een samenwerkingsproject met collega's van deze instanties is door één van onze promovendi de radarneerslaginformatie, na een zorgvuldige bewerkingslag, gebruikt als invoer voor een hydrologisch model van de Ourthe (Fig. 25).

Daarnaast is ook informatie van een relatief dicht netwerk van ruim 40 regenmeters gebruikt om neerslagvelden te schatten. Het toegepaste hydrologische model is het ruimtelijk geaggregeerde neerslag-afvoermodel dat door Rijkswaterstaat is geïmplementeerd als onderdeel van het operationele hydrologische

voorspellingssysteem voor het Maasstroomgebied. Merk op dat dit neerslag-afvoer-model niet gekalibreerd is op de afvoermetingen voor de getoonde periode. Figuur 25 laat zien dat beide bronnen van neerslaginformatie ongeveer even goede resultaten geven in vergelijking met de gemeten afvoeren. Deze resultaten tonen aan dat we nu kennelijk in staat zijn om het neerslag-afvoerproces op een adequate manier te beschrijven met behulp van radardata die op geen enkele manier zijn aangepast aan regenmetercijfers, zoals tot voor kort gebruikelijk was in de internationale hydrometeorologische onderzoekswereld. Dit geeft aan dat we aan het begin staan van een periode waarin we, door topmodellen én topmetingen op een slimme manier te combineren, het hydrologische functioneren van stroomgebieden steeds beter zullen leren begrijpen.



Figuur 25. Gemodelleerde afvoeren voor de Ourthe op basis van neerslag uit radar en regenmeters in vergelijking met gemeten afvoeren (Hazenberget al., 2008).

Hydrologie voor kwantitatief waterbeheer

Hoewel een dergelijk begrip vanuit wetenschappelijk oogpunt uiteraard reeds heel bevredigend kan zijn, spelen er uiteraard ook belangrijke maatschappelijke vragen waarvoor een grondige kennis van de stroomgebiedshydrologie onontbeer-

lijk is. Die vragen hebben alles te maken met kwantitatief waterbeheer, het tweede deel van mijn leeropdracht. Dat is waar ik in het laatste deel van mijn betoog bij stil wil staan. Omwille van de tijd zal ik mij beperken tot een korte behandeling van een drietal aspecten van kwantitatief waterbeheer waaraan onze leerstoelgroep aandacht besteedt, te weten: 1) de hydraulica; 2) de statistiek van extreme neerslag ten behoeve van het operationele waterbeheer; 3) de mogelijke consequenties van klimaatverandering voor het afvoerregime van rivieren.



Figuur 26. Sediment-recirculatiegoot in het nieuwe hydraulica laboratorium van Wageningen Universiteit en Researchcentrum.

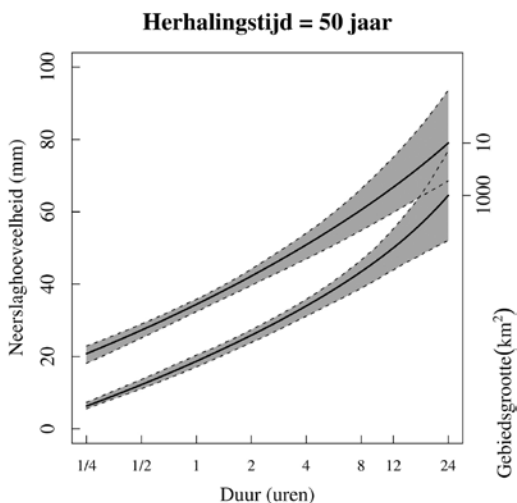
Cruciaal voor een goed begrip van het neerslag-afvoerproces is uiteraard niet alleen dat we in staat zijn om neerslag nauwkeurig te meten, maar ook afvoer. Onze leerstoelgroep heeft een lange geschiedenis in de hydraulica of waterloopkunde. Sterker nog, historisch gezien kunnen we stellen dat de stroomgebiedshydrologie in Wageningen is voortgekomen uit de hydraulica, zoals mijn collega Piet Warmerdam zal kunnen beamen. Op de nieuwe campus die aan de noordzijde van de stad vrijrijst, beschikt Wageningen Universiteit en Researchcentrum opnieuw over een eigen hydraulica laboratorium (Fig. 26). Het wordt door verschillende leerstoelgroepen binnen het domein van de omgevingswetenschappen gebruikt voor onderwijs en onderzoek.

Vanuit het perspectief van onze leerstoelgroep gaat het daarbij uiteraard om onderwerpen die relevant zijn voor hydrologie en kwantitatief waterbeheer, zoals het ontwikkelen en testen van nieuwe meettechnieken voor afvoerbepalingen in beken en rivieren, evenals modelonderzoek naar stromingsprocessen, inclusief sedimenttransport, die relevant zijn voor het Nederlandse waterbeheer. Bij dit laatste kan bijvoorbeeld gedacht worden aan rivierkundige onderwerpen als de fysische onderbouwing van hermeanderingsprojecten. Bij de leerstoelgroep werken momenteel vier promovendi aan onderwerpen die verband houden met de hydraulica. Ik maak van de gelegenheid gebruik u mee te delen dat het nieuwe hydraulica laboratorium komend najaar feestelijk geopend zal worden.

Voor het ontwerp van operationele waterbeheerssystemen is het van belang om kennis te hebben van de kansverdeling van extreme neerslag, waarmee uitspraken gedaan kunnen worden over de daarmee gepaard gaande extreme waterstanden en afvoeren. Tot op dit moment worden dergelijke kansverdelingen afgeleid uit lange tijdreeksen van puntmetingen van neerslag met behulp van regenmeters (Smits et al., 2004; Wijngaard en Kok, 2004). Echter, zoals we reeds gezien hebben, is in de hydrologie en het kwantitatieve waterbeheer puntneerslag over het algemeen weinig relevant – waar het om gaat is gebiedsneerslag. De radarsystemen van operationele weerdiensten zoals het KNMI leveren inmiddels lang genoeg betrouwbare neersluginformatie in digitale vorm, zo'n tien jaar, om een poging te wagen een archief van radargegevens dat aan een zorgvuldige kwaliteitscontrole is onderworpen, te gebruiken om bij uitspraken over de statistiek van extreme neerslag ook het voor hydrologie en waterbeheer zo belangrijke ruimtelijke aspect te betrekken.

Figuur 27 toont de eerste resultaten van een dergelijke analyse voor extreme neerslag in Nederland, uitgevoerd door een promovendus van onze leerstoelgroep die werkt bij het KNMI onder begeleiding van twee collega's van dat instituut. De figuur laat duidelijk zien dat de verwachte extreme neerslag met een zekere herhalingstijd aanzienlijk wordt gereduceerd als we het oppervlak dat we beschouwen vergroten van 10 (de schaal van een stad) naar 1000 vierkante kilometer (de schaal van een waterschap). Het in rekening brengen van deze reductie kan uiteraard aanzienlijke gevolgen hebben voor het dimensioneren van waterlopen en kunstwerken ten behoeve van het operationele waterbeheer.

• • •



Figuur 27. Regenduurlijnen als functie van het beschouwde oppervlak (Overeem et al., 2009).

Tenslotte, de mondiale veranderingen in het aardsysteem die ons de komende eeuw te wachten staan, vaak samengevat met de term ‘global change’, staan momenteel in het middelpunt van de belangstelling, zowel vanuit wetenschappelijk als maatschappelijk oogpunt. Ontwikkelingen die voor hydrologie en kwantitatief waterbeheer met name relevant zijn, hebben betrekking op projecties van landgebruiks- en klimaatverandering. Omdat het aardsysteem complex is, met vele positieve en negatieve terugkoppelingen, waarvan een deel is terug te voeren op de kringloop van het water waarover ik in het begin van mijn betoog sprak, (Bierkens et al., 2008) is het niet eenvoudig en vaak zelfs onmogelijk om oorzaak en gevolg van dit soort veranderingen strikt van elkaar te scheiden.

Indien we ons beperken tot de consequenties van deze veranderingen voor hydrologie en waterbeheer, dan rijst uiteraard de vraag hoe wij ons het best tegen deze veranderingen kunnen wapenen, hetzij door het tij te keren (mitigatie), hetzij door ons aan de veranderende omstandigheden aan te passen (adaptatie). Of

natuurlijk door een combinatie van die twee. Op verzoek van de regering heeft de Deltacommissie (2008) zich over het antwoord op deze vraag vanuit Nederlands perspectief gebogen. Het rapport dat de commissie afgelopen najaar presenteerde, heeft – zoals u waarschijnlijk niet is ontgaan – tot de nodige maatschappelijke en wetenschappelijke discussie geleid. Vooral de stellingname over de aangenomen zeespiegelstijging, waarbij de commissie is uitgegaan van een ‘plausibele bovengrens’ waar bij het dimensioneren van onze zeedijken rekening mee zou moeten worden gehouden, heeft de nodige vragen opgeroepen.

Wat water betreft dient Nederland zich uiteraard niet alleen te wapenen tegen een vermeende zeespiegelstijging, maar ook tegen een veranderend afvoerregime van de rivieren Rijn en Maas. Het gaat daarbij uiteraard niet alleen om hoogwaters, maar ook om periodes van droogte en de daarmee gepaard gaande lage afvoeren. Het inschatten van de consequenties van een veranderend klimaat voor het afvoergedrag van de stroomgebieden van Rijn en Maas is vanzelfsprekend ook een thema van onderzoek binnen onze leerstoelgroep. Idealiter zou men een volledig gekoppeld atmosfeer-landgebruik-hydrologie model voor deze stroomgebieden willen construeren, waarin alle relevante terugkoppelingen worden meegenomen, maar dat is op dit moment modelmatig en rekentechnisch nog een brug te ver. Vandaar dat het gebruikelijk is om met ongekoppelde modellen van atmosfeer en hydrologie te werken, waarbij onze neerslag-afvoer modellen gevoed worden door de uitvoer van klimaatmodellen.

Met dergelijke klimaatmodellen is het mogelijk om projecties van temperatuur en neerslag te construeren op basis van broeikasgas-emissie scenario's voor de komende eeuw, zoals die worden opgesteld door het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2004). Een nadeel van het gebruik van klimaatmodellen als forcering voor hydrologische modellen is dat slechts relatief korte perioden, van bijvoorbeeld een eeuw, kunnen worden doorgerekend. Dit is uiteraard aan de korte kant indien u zich realiseert dat de rivierdijken in Nederland volgens de wet zodanig ontworpen moeten worden dat gemiddeld niet vaker dan eens in de 1250 jaar de waterstand de dijkhoogte overschrijdt. Om statistisch betrouwbare uitspraken te kunnen doen over hydrologische extremen, of dat nu piekafvoeren of periodes van droogte zijn, zouden dus eigenlijk hydrologische tijdreeksen met een

• • •

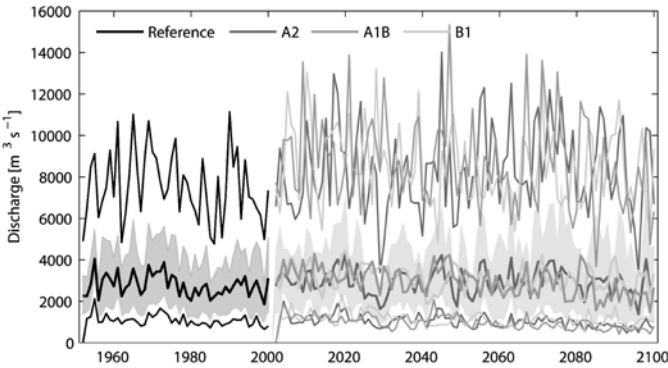
lengte van meerdere malen die 1250 jaar gegenereerd moeten worden. Dat behoort met de huidige stand van de modellen en rekenkracht niet tot de mogelijkheden. Vandaar dat er naast klimaatmodellen ook wordt gewerkt met de uitvoer van zogeheten weergeneratoren, waarmee op basis van stochastische processen relatief snel lange tijdreeksen gegenereerd kunnen worden. De expliciete link met de broeikasgas-emissie scenario's wordt dan natuurlijk wel losgelaten.

De leerstoelgroep Hydrologie en Kwantitatief Waterbeheer is via verschillende door de Europese Commissie gefinancierde projecten intensief betrokken bij onderzoek naar de consequenties van klimaatverandering voor hydrologie en waterbeheer, zowel met betrekking tot hoogwater als met betrekking tot droogte. Een voorbeeld daarvan betreft een recent voltooid promotie-onderzoek, waarin de aandacht voornamelijk uitging naar de rivier de Rijn (Hurkmans et al., 2009). Voor het gehele Rijnstroomgebied bovenstrooms van Lobith, waar zoals u weet de Rijn ons land binnenkomt, is een ruimtelijk gedistribueerd hydrologisch rekenmodel opgezet. Het 185 duizend vierkante kilometer grote stroomgebied is daarbij verdeeld in ongeveer 8000 cellen van iets minder dan 5 bij 5 kilometer. De belangrijkste hydrologische processen die zich binnen dergelijke cellen afspelen, evenals het transport door het waterlopenetwerk, zijn geschematiseerd volgens een door collega's van de universiteiten van Princeton en Washington in de Verenigde Staten ontwikkelde methodiek. De uitvoer van modelsimulaties met een neergeschaald klimaatmodel ontwikkeld door het Max Planck Instituut voor Meteorologie in Hamburg is gebruikt als invoer voor het genoemde hydrologische model. De consequenties van drie broeikasgasemissie-scenario's zijn op die manier voor alle 8000 cellen doorgerekend voor de tweede helft van de 20ste eeuw en de gehele 21ste eeuw (in totaal dus drie maal 150 jaar) met een tijdstap van 3 uur (Fig. 28).

Wat we in Fig. 28 zien is dat voor alle drie de doorgerekende emissie-scenario's de afvoeren in de 21ste eeuw het gehele jaar door gemiddeld hoger zullen zijn dan in het huidige klimaat. Ook geven de modelresultaten aan dat de Rijn in de loop van deze eeuw zal veranderen van een gecombineerde smeltwater-regenwater rivier in een door regenwater gedomineerde rivier. Wat verder opvalt, is het contrast tussen de eerste helft en de tweede helft van deze eeuw, waarbij het erop lijkt dat het aantal en de hoogte van de afvoerpieken in de loop van de eeuw enigszins zal

. . .

afnemen. Geen reden tot gerustheid overigens, want een vergelijkbare analyse van de lage afvoeren op basis van dezelfde modelresultaten laat juist een toename van het aantal en de omvang van de droogtes zien in de loop van de 21ste eeuw, met bijbehorende risico's voor bevaarbaarheid en drinkwatervoorziening.



Figuur 28. Jaarlijks gemiddelde (vette lijnen), minimale en maximale (dunne lijnen) dagafvoeren voor de Rijn bij Lobith gedurende de tweede helft van de 20ste en de gehele 21^{ste} eeuw voor drie emissie-scenario's (Hurkmans et al., 2009). Binnen de grijze band bevindt zich 80% van de waarden.

Dit zijn boeiende resultaten, die hun weg naar de wetenschappelijke vakliteratuur inmiddels gevonden hebben, maar waarover we wat interpretatie betreft nog steeds stimulerende discussies hebben met collega-hydrologen en klimatologen. Want, zonder ook maar iets af te willen doen aan de enorme hoeveelheid werk en het mooie proefschrift van de betreffende promovendus, de belangrijkste boodschap die ik u vandaag zou willen meegeven is: bekijkt u deze modelresultaten vooral met een gezonde dosis scepsis, dat doen wij zelf namelijk ook!

Dit is wat er met de huidige generatie klimaat- en hydrologische modellen op dit moment mogelijk is op deze schaal, maar daar is uiteraard wel het nodige op af te dingen. Als u bijvoorbeeld eens wist welke forse correcties er nodig zijn om de uitvoer van de klimaatmodellen voor het huidige klimaat enigszins in de pas te

laten lopen met de observaties van temperatuur en neerslag, om nog maar te zwijgen over de fundamentele vragen die wij ons als hydrologen stellen bij de manier waarop sommige belangrijke processen, zoals grondwaterstroming, in het gebruikte hydrologische model zijn geschematiseerd. Daarmee wil ik zeker niet zeggen dat we maar moeten stoppen met dit type onderzoek, omdat we de hydrologische en meteorologische processen kennelijk nog niet helemaal in de vingers hebben. Integendeel, daar zijn de wetenschappelijke vragen veel te interessant en de maatschappelijke vragen die ons gesteld worden veel te belangrijk voor. De grote uitdaging zit hem in het kwantificeren en attribueren van de onzekerheden waarmee dit soort analyses onvermijdelijk gepaard gaan.

Ik ben dan ook verheugd dat de universitaire hydrologische onderzoeksgroepen in Nederland, sinds 2005 verenigd in het Boussinesq Centrum voor Hydrologie (KNAW, 2005), recentelijk op initiatief van collega Savenije uit Delft gezamenlijk de stoute schoenen hebben aangetrokken en het idee geopperd hebben om een klein deel van de enorme investeringen die de Deltacommissie in haar rapport voorstelt, te reserveren voor hydrologisch basisonderzoek. Een dergelijke investering, via in open competitie te verwerven onderzoeksfondsen zoals te doen gebruikelijk binnen de academische wereld, zal zich, door verbeterde proceskennis en dito hydrologische modellen, dubbel en dwars terugbetalen.

Deze overwegingen vormen voor de leerstoelgroep Hydrologie en Kwantitatief Waterbeheer een grote stimulans, om naast het genoemde grootschalige, modelmatige onderzoek, het meer kleinschalige, experimentele onderzoek om de hydrologische processen in stroomgebieden beter te begrijpen, met veel enthousiasme voort te zetten. Laten we de hydrologische parametrisaties in onze topmodellen tot op de bodem uitzoeken door lering te trekken uit onze topmetingen. Zelfs de bekende stroomgebiedshydroloog Keith Beven (2006) erkende recentelijk, na een lange en productieve carrière in de neerslag-afvoermodellering, dat de Heilige Graal voor de hydrologie in de 21^{ste} eeuw het ontwikkelen is van methoden om water(damp)fluxen op voor de hydrologie en het kwantitatieve waterbeheer relevante tijd- en ruimteschalen te meten. En zo is het maar net!

Dankwoord

Tenslotte zou ik een woord van dank willen uitbrengen aan al diegenen die op de één of andere manier een bijdrage hebben geleverd aan het feit dat ik hier nu sta.

Allereerst dank ik uiteraard de Rector Magnificus, de Raad van Bestuur en de Benoemings Advies Commissie voor het in mij gestelde vertrouwen. Ik doe mijn best u niet teleur te stellen.

Hoewel ik in Wageningen ben opgeleid in de hydrologie en het waterbeheer, heeft mijn promotie-onderzoek zoals u weet mijn aandacht in de richting van de hydrometeorologie doen verschuiven. Sinds ik op deze plek een klein decennium geleden mijn proefschrift verdedigde, sta ik bij mijn schoonfamilie bekend als 'Rainman'. Ik vrees dat ik daar ook met deze rede weinig verandering in heb kunnen brengen. Ik gebruik dit dan maar als een geuzennaam.

Er zijn gelukkig in mijn omgeving altijd mensen geweest die me, zodra ik iets te veel met mijn hoofd in de wolken dreigde te gaan lopen, met beide benen terug op de grond hebben gezet. Ik denk daarbij speciaal aan mijn mentor (sinds 20 jaar) Han Stricker, mijn promotoren Prof. Feddes en Prof. Ligthart, mijn begeleiders tijdens mijn Marie Curie Fellowship in Grenoble, Guy Delrieu en Jean-Dominique Creutin, mijn collega's uit Barcelona Daniel Sempere Torres en Pep Porrà, mijn postdoc begeleiders Jim Smith en Matthias Steiner in Princeton en tenslotte mijn voorganger Prof. Troch.

Collega's en oud-collega's (inclusief Alexis Berne) van de leerstoelgroep Hydrologie en Kwantitatief Waterbeheer: het zijn roerige tijden geweest, zeker sinds het vertrek van mijn voorganger in november 2005. Jullie hebben mij misschien wel sneller in mijn huidige rol geaccepteerd dan ik dat zelf heb gedaan. Dat we staan waar we staan, met een forse instroom aan studenten in alle fasen van de studie, met inmiddels meer dan 10 promovendi en een aantal postdocs, en een prima portefeuille aan onderwijs, onderzoek en projecten, hebben we te danken aan onze hechte en oprechte samenwerking. Dank daarvoor.

Ik zie uit naar een verdere voortzetting en versterking van de samenwerking met de collega's binnen het Centrum voor Water en Klimaat, speciaal met de leerstoelgroepen Bodemnatuurkunde, Ecohydrologie en Grondwaterbeheer, Meteorologie en Luchtkwaliteit, en Aardsysteemkunde. Ik koester de netwerken waarin wij samenwerken met universiteiten en instituten elders in het land en daarbuiten, in het bijzonder het al eerder genoemde Boussinesq Centrum voor Hydrologie, onder voorzitterschap van mijn jaargenoot Prof. Bierkens, en het CESAR-consortium dat in Prof. Russchenberg een inspirerende trekker heeft.

Marjan, Sander, Daan en Rik: dat ik jullie moet bedanken is duidelijk, maar hoe ik jullie ooit zou kunnen bedanken voor jullie onvoorwaardelijke steun, dat kan ik niet onder woorden brengen. Pa en Arn, mooi om dit moment samen te kunnen delen, al blijft het jammer dat ons gezin niet meer compleet is.

Tenslotte richt ik mij tot de studenten, zowel de huidige studenten van Wageningen Universiteit als de soms heel jonge 'studenten' die ik hier in de zaal zie zitten. De hydrologie is een mooi vak en een belangrijk vak, ik hoop dat jullie dat duidelijk is geworden. Bovendien is het een vak met toekomst. De New York Times van 7 maart jongstleden kopte dat volgens het Amerikaanse Bureau voor Arbeidsstatistiek de vraag naar hydrologen tussen 2006 en 2016 met 24% zal stijgen, veel sneller dan het gemiddelde van alle andere beroepen. Hydrologen hebben de toekomst!

Mijnheer de Rector, geachte aanwezigen,

Ik heb gezegd.

Referenties

- Beek, C.Z. van de, H. Leijnse, R. Uijlenhoet, J.N.M. Stricker en H.W.J. Russchenberg (2009). Performance of high-resolution X-band radar for rainfall measurements in The Netherlands. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, in preparation.
- Berne, A., G. Delrieu, J.-D. Creutin en C. Obled (2004). Temporal and spatial resolution of rainfall measurements required for urban hydrology. *J. Hydrol.*, 299, 166–179.
- Berne, A., M. ten Heggeler, R. Uijlenhoet, M. Delobbe, Ph. Dierickx, en M. de Wit (2005a). A preliminary investigation of radar rainfall estimation in the Ardennes region and a first hydrological application for the Ourthe catchment. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 5, 267–274.
- Berne, A., R. Uijlenhoet en P.A. Troch (2005b). Similarity analysis of subsurface flow response of hillslopes with complex geometry. *Water Resour. Res.* 41, W09410.
- Beven, K. (2006). Searching for the Holy Grail of scientific hydrology: $Q_t = (S, R, \Delta t)A$ as closure. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 10, 609–618.
- Beven, K.J. en M.J. Kirkby (1979). A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.* 24, 43–69.
- Bierkens, M.F.P., A.J. Dolman en P.A. Troch, editors (2008). *Climate and the Hydrological Cycle*. IAHS Special Publications 8, IAHS Press, Wallingford.
- Bogaart, P.W. en P.A. Troch (2006). Curvature distribution within hillslopes and catchments and its effect on the hydrological response. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 10, 925–936.
- Brutsaert, W. (2005). *Hydrology - An Introduction*. Cambridge University Press, Cambridge.
- CCSP (2003). Strategic Plan for the U.S. Climate Change Science Program. A Report by the Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research, Washington DC.
- Chandrasekhar, S. (1943). Stochastic problems in physics and astronomy. *Rev. Mod. Phys.* 15, 1–89.
- Changnon, S.A., Jr. (1987). *Detecting Drought Conditions in Illinois*. Circular 169, Illinois State Water Survey, Champaign.
- Deltacommissie (2008). *Samen Werken met Water - Een land dat leeft bouwt aan zijn toekomst*. Bevindingen van de Deltacommissie 2008.

• • •

- D'Odorico, P. en R. Rigon (2003). Hillslope and channel contributions to the hydrologic response. *Water Resour. Res.* 39, 1113–1121.
- Fürth, R. (1918). Statistik und wahrscheinlichkeitsnachwirkung. *Physik. Zeitschr.* 19, 421–426.
- Fürth, R. (1919). Statistik und wahrscheinlichkeitsnachwirkung (nachtrag). *Physik. Zeitschr.* 20, 21.
- Hulst, H. C. van de (1957). *Light Scattering by Small Particles*. John Wiley & Sons, New York.
- Hurkmans, R.T.W.L., W. Terink, R. Uijlenhoet, P.J.J.F. Torfs, D. Jacob, en P.A. Troch (2009). Changes in streamflow dynamics in the Rhine basin under three high-resolution regional climate scenarios. *J. Clim.*, conditionally accepted.
- IPCC (2004). *Fourth Assessment Report - Climate Change 2004*. United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Geneva.
- Kirchner, J.W. (2006). Getting the right answers for the right reasons: Linking measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology. *Water Resour. Res.* 42, W03S04.
- Kirchner, J.W., X. Feng en C. Neal (2000). Fractal stream chemistry and its implications for contaminant transport in catchments. *Nature* 403, 524–527.
- Kollias, P., B.A. Albrecht en F.D. Marks Jr. (2002). Why Mie? Accurate observations of vertical air velocities and rain drops using a cloud radar. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 83, 1471–1483.
- Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen (2005). *Turning the Water Wheel Inside Out - Foresight Study on Hydrological Science in The Netherlands*. Report of the Foresight Committee on Hydrological Science, Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences, Amsterdam.
- Kraijenhoff van de Leur, D.A. (1958). A study of non-steady groundwater flow with special reference to a reservoir-coefficient. *De Ingenieur* 19, 87–94.
- Kraijenhoff van de Leur, D.A. (1985). *Hoe Denken Hydrologen?* College op 9 mei 1985 door Prof. Ir. D.A. Kraijenhoff van de Leur bij zijn afscheid als hoogleraar in de hydraulica en afvoerhydrologie aan de Landbouwhogeschool.
- Leijnse, H., R. Uijlenhoet en J.N.M. Stricker (2007). Hydrometeorological application of a microwave link, Part II: Precipitation. *Water Resour. Res.*, 43, W04417, doi:10.1029/2006WR004989.
- Mishchenko, M.I. en L.D. Travis (2008). Gustav Mie and the evolving discipline

- of electromagnetic scattering by particles. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 89, 1853–1861.
- Mie, G. (1908). Beiträge zur optik trüber medien, speziell kolloidaler metallösungen. *Ann. Phys.* 25, 377–445.
- National Research Council (1991). *Opportunities in the Hydrological Sciences*. National Academy Press, Washington D.C.
- Oerlemans, J. (2008). *Minimal Glacier Models*. Igitur, Utrecht Publishing & Archiving Services, Universiteitsbibliotheek Utrecht.
- Overeem, A., T.A. Buishand, I. Holleman en R. Uijlenhoet (2009). Extreme-value modeling of areal rainfall from weather radar. *Water. Resour. Res.*, in preparation.
- Smits, I., J. Wijngaarden, R. Versteeg en M. Kok (2004). *Statistiek van Extreme Neerslag in Nederland*. STOWA Rapport Nr. 2004 - 26.
- Smoluchowski, M. von (1916). Drei vorträge über diffusion, Brownsche molekularbewegung und koagulation von kolloidteilchen. *Physik. Zeitschr.* 17, 557–571, 585–599.
- Troch, P.A. (2001). *Laten We de (Water)Balans Opmaken*. Inaugurele rede bij de aanvaarding van het ambt van hoogleraar Hydrologie en Kwantitatief Waterbeheer aan de Wageningen Universiteit op 26 april 2001.
- Troch, P.A., C. Paniconi en E.E. van Loon (2003). Hillslope-storage Boussinesq model for subsurface flow and variable source areas along complex hillslopes: 1. Formulation and characteristic response. *Water Resour. Res.* 39, 1316–1325.
- Uijlenhoet, R. (2008). Precipitation physics and rainfall observation. Chapter 4, in: *Climate and the Hydrological Cycle* (M.F.P. Bierkens, A.J. Dolman en P.A. Troch, editors), IAHS Special Publications 8, IAHS Press, Wallingford, 59–97.
- Wessels, H.R.A. (1964). Buienradar. *Actuele Onderwerpen Reeks*, 1023, 14 aug. 1964.
- Wijngaard, J. en M. Kok (2004). *Nieuwe Neerslagstatistiek voor Waterbeheerders*. Brochure 26a, STOWA en KNMI.
- Wit, M.J.M. de (2008). *Van Regen tot Maas - Grensoverschrijdend Waterbeheer in Droge en Natte Tijden*. Uitgeverij Veen Magazines, Diemen.