

30 jaar vooruitgang in neerslag- afvoermodellering

Arnold van 't Veld¹, Wytze Schuurmans², Roeland Allewijn³

De afgelopen 30 jaar heeft de hydrologie een snelle ontwikkeling doorgemaakt. Om deze ontwikkeling inzichtelijk te maken is een modellering uit een promotieonderzoek uit 1985 opnieuw uitgevoerd met de data en modellen van nu. Het onderzoek betreft het maken van een neerslag-afvoermodel voor een stroomgebied in de Dolomieten, een gebied dat qua inrichting in de afgelopen 30 jaar niet ingrijpend is veranderd. Wat opvalt, is de enorme toename van hoge resolutie data en de beschikbaarheid van ruimtelijke modellen. Wat verder opvalt, is dat het thans enige weken kost om de data te verzamelen en een model te maken, terwijl dat vroeger ruim een jaar kostte. Wat niet is veranderd, is dat nog steeds weinig afvoermeetreeksen beschikbaar zijn, terwijl dit voor de kalibratie en validatie van het model essentieel is.

Inleiding

De ontwikkelingen in techniek en software gaan snel, maar tegelijk gaan veranderingen in methoden en werkwijzen geleidelijk zodat we ons niet altijd bewust zijn van de vooruitgang in de hydrologie. Een manier om vooruitgang in de hydrologie inzichtelijk te maken is het gebruik van casuïstiek. Min of meer toevallig stuitten we vorig jaar op een relevante casestudie tijdens een bezoek van Rijkswaterstaat aan het 3Di lab, ontwikkellocatie van 3Di, in Utrecht. Dertig jaar geleden heeft Roeland Allewijn een promotieonderzoek uitgevoerd naar de neerslag-afvoerrelatie in het Dolomietengebergte. Daarbij werden satellietbeelden gebruikt om de afvoercharacteristieken van het stroomgebied te beschrijven. Het stroomgebied is in de afgelopen 30 jaar niet ingrijpend veranderd, maar de data en de modellen die ons nu ter beschikking staan wel. De promotiestudie uit 1990 is daarom "herhaald" met data en modellen die thans beschikbaar zijn. Dit artikel doet hiervan verslag en geeft daarmee inzicht in de vooruitgang die in de afgelopen decennia op het gebied van neerslag-afvoermodellering is geboekt.

Studiegebied en onderzoeksvraag

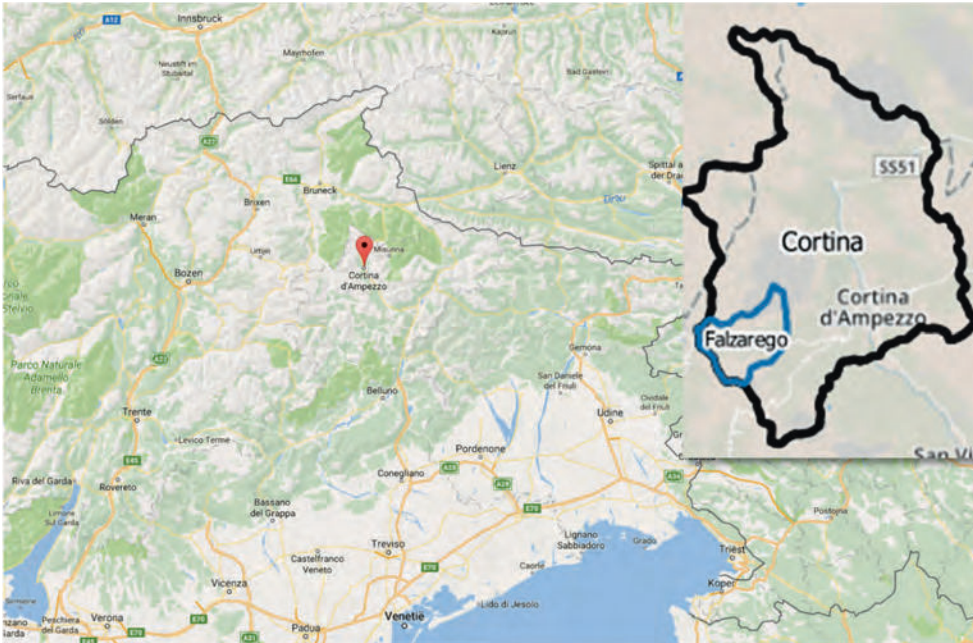
Het studiegebied is gelegen in de Italiaanse Dolomieten rond de plaats Cortina d'Ampezzo (afbeelding 1) en is bekend als skigebied. Het stroomgebied bestaat veelal

1 Nelen & Schuurmans, Utrecht, arnold.vantveld@nelen-schuurmans.nl

2 Nelen & Schuurmans, Utrecht, wytze.schuurmans@nelen-schuurmans.nl

3 Rijkswaterstaat Water, Verkeer & Leefomgeving, Lelystad

uit dolomietgebergte, heeft een hoogteligging tussen 1200 en 2800 m boven zee-niveau en heeft een oppervlakte van 210 km². De oorspronkelijke onderzoeksvraag was: "Wat is de relatie tussen enerzijds de neerslaghoeveelheid en -intensiteit en anderzijds de afvoer uit het stroomgebied, zowel in termen van de totale afvoer als de piekafvoer?". Dit inzicht is nodig om riviermaatregelen te dimensioneren, maar geeft tevens inzicht in de impact van stroomgebiedsmaatregelen om de piekafvoer te dempen.

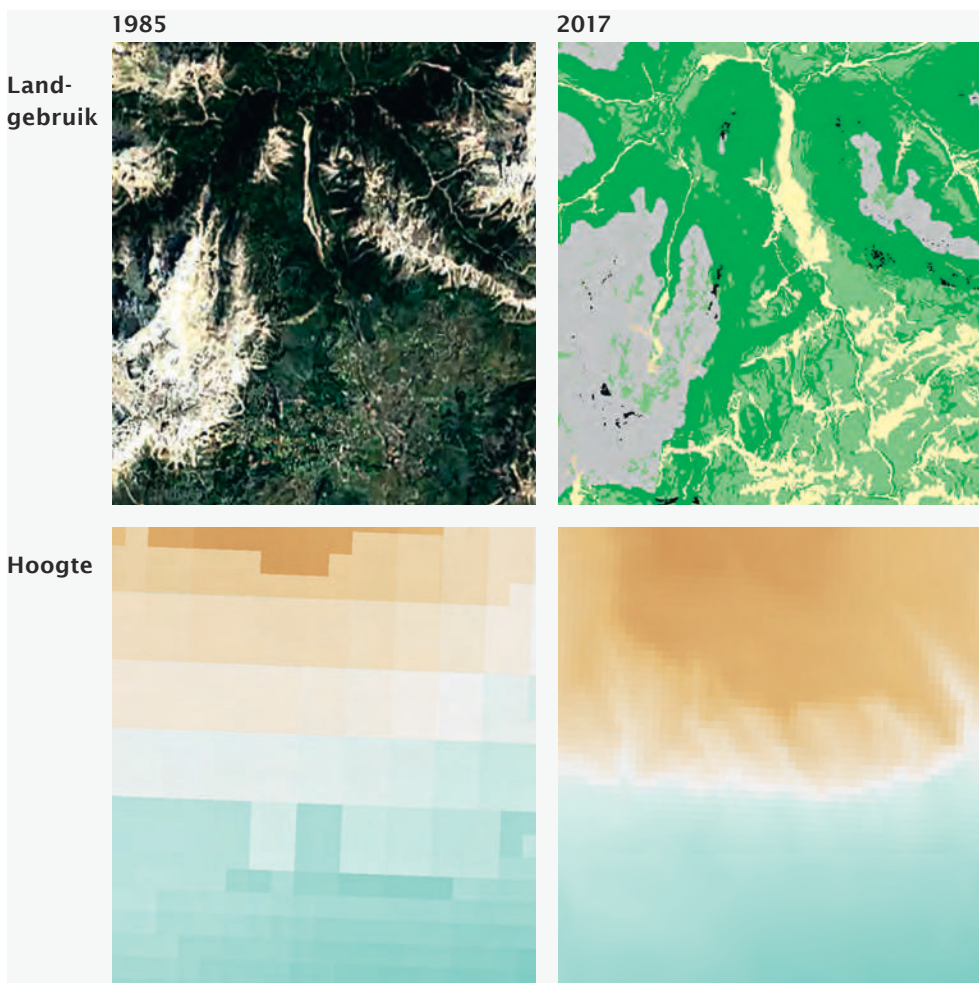


Afbeelding 1: Studiegebied met het Cortina d'Ampezzo stroomgebied (zwart) en sub-stroomgebied Falzarego (blauw)

Beschikbare data

In het promotieonderzoek (Allewijn, 1990) is gebruik gemaakt van de destijds enige Landsat TM beelden met een resolutie van 30 × 30 m, aangevuld met luchtfoto's en veldonderzoek. Anno 2017 zijn meerdere databronnen met een hogere resolutie van 1 x 1 m beschikbaar, zoals hoogtedata (Tarquini, 2007, 2012), een landgebruikskaart, satellietfoto's en ruimtelijke neerslagdata. Afbeelding 2 toont deze verbetering visueel.

Ook op het gebied van dataverwerking zijn sinds 1990 ontwikkelingen doorgemaakt. Oorspronkelijk werd de luchtfoto gebruikt voor het handmatig classificeren van het gebied. Nu is een algoritme beschikbaar om op basis van een gedetailleerde hoogtekartaart de oppervlakte- en grondwatercondities te schatten (Rennó et al., 2008). Vijf terreinclassificaties zijn onderscheiden met toevoeging van de boomgrens: Plateau, Berghelling (steen), Berghelling (bos), Terras en Grasland. Elke klasse krijgt zijn eigen set van neerslag-afvoerparameters op basis van bodem en vegetatie.



Afbeelding 2: Vergelijking brondata 1985 (links) en 2017 (rechts) met destijds enige Landsat TM beelden (30 × 30 m) uit 1985 en landgebruik op 1 × 1 m; hoogtekaart van 30 × 30 m naar 1 × 1 m.

Model

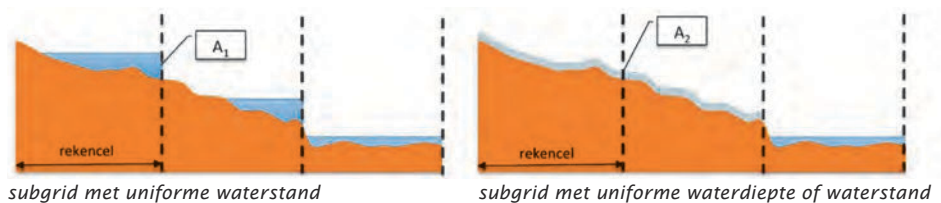
Om optimaal gebruik te maken van de ruimtelijke informatie die uit de satellietbeelden kan worden ontleend, is in 1990 een nieuw neerslag-afvoermodel gemaakt. Dit model heet LACS; LAndsat-supported Conceptual Semi-distributed. Daarbij is gezocht naar een model met een ruimtelijke component (semi-gedistribueerd) en met een realistische beschrijving van de hydrologische processen (conceptueel model). Dit model is onderverdeeld in een Water Balance component en een Time Distributed component. De eerste component berekent welk deel van de neerslag tot afstroming komt. De tweede component berekent het verloop van de snelle en langzame afvoer in de tijd, na een neerslaggebeurtenis. Na het uitwerken van het modelconcept in modelcode, oftewel het programmeren van het model, is het stroomgebied geschematiseerd, gekalibreerd en geverifieerd.

In de recent uitgevoerde studie is gebruik gemaakt van een bestaande modelcode, te weten 3Di, waarin hetzelfde type uitgangspunten wordt gehanteerd (3Di, 2014). 3Di is net als LACS ook een model met fysisch herleidbare parameters. In deze Stroomingen staat een uitgebreid artikel waar de werking van 3Di wordt toegelicht (Schuurmans en van Leeuwen, 2017). Een verschil met het LACS-model is dat de Water Balance component en de Time Distributed component zijn geïntegreerd. In het 3Di model zijn bovendien de mathematische beschrijvingen van het neerslag-afvoerproces en die van de hydraulica van beken en rivieren geïntegreerd in één modelcode (zie kader). Dit heeft als voordeel dat diverse processen door één model, in plaats van meerdere kunnen worden afgehandeld. Ten slotte is het aantal ruimtelijke componenten gestegen van tientallen in het LACS model, naar miljoenen in het 3Di model.

Neerslag-afvoermodellering met 3Di

3Di simuleert 2D afstroming door middel van een subgrid rekentechniek. Deze rekentechniek is valide indien de variatie van de waterstand veel kleiner is dan de variatie van de waterdiepte. Dit geldt voor estuaria, rivieren en bij een fluvial overstroming.

Als we de subgrid rekentechniek toepassen op neerslag-afvoerprocessen in hellend gebied, dan is de aanname van een constant waterniveau per rekencel niet meer correct. Toepassing van dit uitgangspunt zal daarom leiden tot vreemde resultaten: het regenwater verzamelt zich namelijk in de diepste delen van elke rekencel tegen de celranden. Het (verticale) doorstroomoppervlak (A_1) van de bovenstroomse naar de benedenstroomse rekencel wordt flink overschat. Door het verzamelen van water in de diepste delen wordt tevens het (horizontale) natte oppervlak onderschat en daarmee het wrijvingsgevend oppervlak, resulterend in een te lage weerstand. Het gevolg is dat het water veel te snel de helling afstroomt.



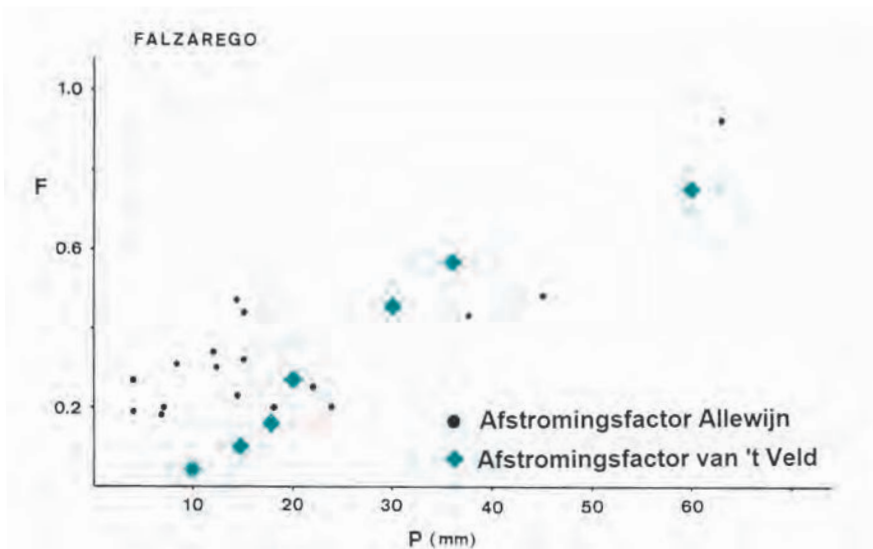
Voor dunne waterlagen, zoals bij neerslagafvoer, wordt er daarom van uitgegaan dat de waterdiepte in een rekencel uniform is en niet het waterniveau. Het volume water wordt binnen de rekencel gelijkmatig over de subgrids verdeeld. Het doorstroomoppervlak (A_2) en het wrijvingsgevend oppervlak worden daarmee veel realistischer bepaald.

Het rekenhart bepaalt continue op basis van de hoogte van de subgrids, de stromingscondities en gebruikersinstellingen, welk uitgangspunt van toepassing is: een uniform waterniveau, of een uniforme waterdiepte. Dit gebeurt elke tijdstap voor elke rekencel. Op basis van de gekozen conditie wordt het doorstroomoppervlak en de wrijving bepaald. In de overgangszone van hellend naar vlak worden het doorstroomoppervlak en de wrijving gemiddeld voor beide condities, zodat sprake is van geleidelijke overgangen.

Omdat gebruik kon worden gemaakt van bestaande modelcode en GIS-functionaliteiten, kost het nu veel minder tijd om het model op te zetten dan destijds. Ter vergelijking: destijds duurde het programmeren en opzetten van het model een jaar, terwijl het nu een week duurde.

Resultaten

De oorspronkelijke afvoermetingen zijn niet meer vindbaar. In het proefschrift staan wel enkele grafieken en tabellen, bijvoorbeeld afbeelding 3, en deze zijn gebruikt om de modelresultaten van destijds met nu te vergelijken. Kort samengevat is in het proefschrift de afstromingsfactor bepaald voor de piekafvoer in relatie tot de neerslagintensiteit. Met andere woorden, dat is het percentage neerslag dat tot afstroming komt. Deze afstromingsfactor neemt toe bij hogere neerslagintensiteiten. Het proefschrift laat zien dat er een grote spreiding is tussen neerslagintensiteit en afvoer. Dit kan worden verklaard uit de voorgeschiedenis, het verloop van de buien en de onnauwkeurigheid van de neerslaginformatie. In het 3Di model is gebruik gemaakt van dezelfde waarden als het proefschrift met betrekking tot infiltratie en berging, die zijn geïnclassificeerd op basis van landgebruik en gesteente. Daardoor kon al snel een vergelijkbare relatie tussen neerslag en afvoer worden gevonden. Deze relatie is voor een intensieve bui met een duur van 1 uur gepresenteerd in afbeelding 3.

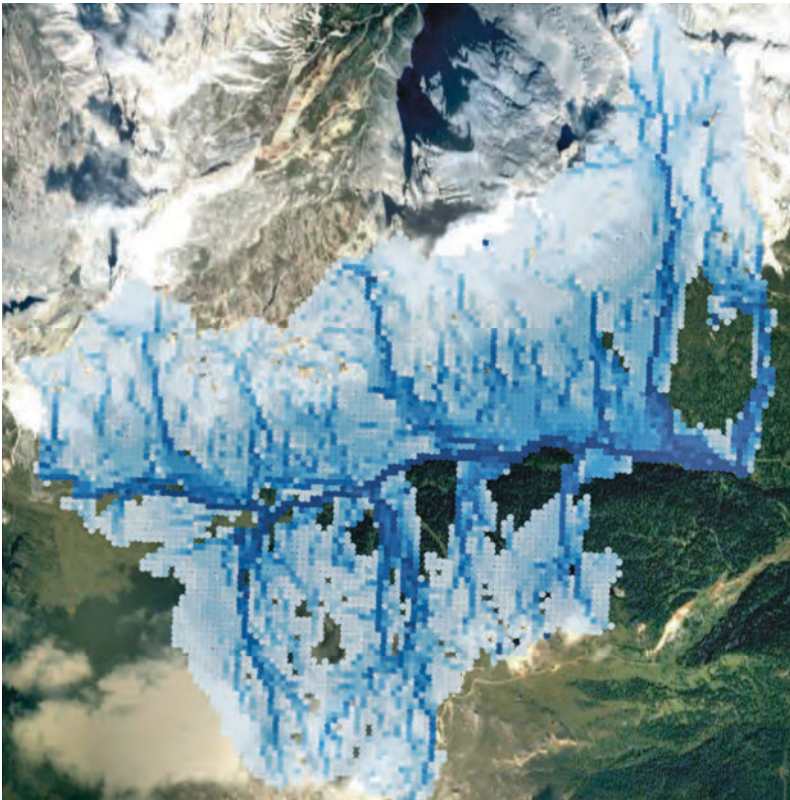


Afbeelding 3: Afstromingsfactor (F) versus neerslag (P) voor afstroomgebied Falzarego.

Het 3Di-model geeft niet alleen de afstromingsfactor, maar ook inzicht in de afvoer in ruimte en tijd. Daarmee wordt de ruimtelijke verspreiding van infiltratie, de afvoer op verschillende locaties (afbeelding 4) en de timing van afvoerpieken uit de verschillende dalen inzichtelijk. De niet-lineaire en dynamische karakteristieken van de neerslag-afvoerrelatie veroorzaakt door de diversiteit in hoogte, bodemsoort en grondgebruik, worden eveneens direct zichtbaar. Dit resulteert bijvoorbeeld in de onderstaande grafiek (afbeelding 5) met een afvoerloop met twee opeenvolgende pieken.



Afbeelding 4: Gesimuleerd verloop van de afvoer in de tijd na een bui van 10 en 14 mm in 60 minuten. Helaas waren afvoermetingen niet beschikbaar.



Afbeelding 5: Berekende afvoer in 3Di vier uur na de bui van 14 mm in 60 minuten.

Bevindingen

De uitgevoerde casestudie geeft inzicht in de vooruitgang die in de afgelopen 30 jaar is geboekt in neerslag-afvoermodellering. Wat opvalt, is de enorme toename ruimtelijke gegevens. Niet alleen zijn meer gegevens beschikbaar, het is nu ook veel eenvoudiger om deze te verzamelen, te bewerken en ermee te rekenen. Thans is het mogelijk om in enkele weken tijd ruimtelijke gegevens te krijgen van hoogte, landgebruik en neerslag. Dit zijn belangrijke kenmerken om het beschrijvende en voorspellende vermogen van ruimtelijke neerslag-afvoermodellen te verbeteren.

Ondanks dat de fysische werkelijkheid tegenwoordig veel beter wordt beschreven door de beschikbare data, blijft kalibratie van neerslag-afvoermodellen noodzakelijk en sterk bepalend voor de modeluitkomsten. Afvoermetingen zijn echter nog steeds schaars en als ze er al zijn nog steeds moeilijk te achterhalen. Het model is daarom vergeleken met de afstromingsfactor zoals bepaald in het proefschrift. Het kostte ons weinig moeite om een goede fit te krijgen door gebruik te maken van dezelfde metingen op het gebied van infiltratie en berging per type landgebruik en gesteente. Niet-lineaire, dynamische neerslag-afvoercharacteristieken komen in het nieuwe neerslag-afvoermodel als vanzelf tot uiting door het gebruik van ruimtelijke gegevens.

Veel neerslag-afvoermodellen zijn nog steeds gebaseerd op *lumped* modellen of bakjesmodellen. In deze modellen moeten nauwkeurige ruimtelijke gegevens worden geaggregeerd om bruikbaar te zijn voor deze modellen. Een ruimtelijk gedistribueerd, 2D neerslag-afvoermodel, zoals 3Di, maakt het mogelijk om op dezelfde ruimtelijke resolutie te rekenen als de resolutie van de gegevens. Aggregatie van data is daardoor niet meer nodig.

In de studie uit 1990 moest zelfs een semi-gedistribueerde modelcode worden geprogrammeerd. Nu kan worden gewerkt met beschikbare modelcodes. De huidige modelconcepten zijn in wezen niet sterk veranderd, maar de ruimtelijke resolutie waarop we ze toepassen wel. In plaats van ongeveer 10 ruimtelijke afvoereenheden, bestaat een model nu uit 10 miljoen ruimtelijke afvoereenheden.

De vraag is in hoeverre het meerwaarde biedt om met hoge resolutie, ruimtelijk gedistribueerde neerslag-afvoerenmodellen te werken. Als we alleen geïnteresseerd zijn in de neerslag-afvoerrelatie, dan is het voordeel inzicht gering, maar als we het effect van ruimtelijke ingrepen in een gebied inzichtelijk willen maken, dan is een model nodig van het gebied. Klimaatverandering en ruimtelijk adaptatie dwingen ons om over te stappen op gebiedsmodellen, in plaats van neerslag-afvoermodellen. Daarnaast is het goedkoper om een hoge resolutie, ruimtelijk model te maken, dan een versimpeld model. Dat komt doordat elke vereenvoudiging tijd en expertise vraagt om deze keuze te verantwoorden.

Men kan zich afvragen wat de meerwaarde is van een hoge resolutie, ruimtelijk gedistribueerd model, als de kalibratie nog steeds bepalend is voor de modeluitkomsten. De meerwaarde is afhankelijk van de vraagstelling. Het proefschrift geeft antwoord op deze vraag en stelt: "*Het is voor tal van praktische hydrologische problemen niet voldoende dat het model uitsluitend de afvoer van het totale stroomgebied voorspelt.*"

Om het effect van ruimtelijke ingrepen te onderzoeken of voor het uitvoeren van scenario's is een ruimtelijk inzicht nodig." De huidige ruimtelijke neerslag-afvoermodellen, zoals 3Di, geven de mogelijkheid om ruimtelijke effecten en ingrepen in kaart te brengen.

De oorspronkelijke studie was één van de eerste studies waarbij satellietbeelden werden gebruikt om een neerslag-afvoermodel te maken. Dertig jaar later is het gebruik van remote sensing data feitelijk standaard geworden. Het gebruik van ruimtelijk gedistribueerde en gedetailleerde neerslag-afvoermodellen is nu nog nieuw, maar wij verwachten dat dit binnen enkele jaren de standaard werkwijze is. De noodzaak van de kalibratie geeft aan dat belangrijke informatie over het neerslag-afvoerproces ontbreekt. Afvoermetingen blijven daarom bijzonder waardevol en juist hierop kan nog veel vooruitgang worden geboekt.

Als we dertig jaar vooruit kijken, dan verwachten we nog grotere veranderingen. De beschikbaarheid van meer nauwkeurige en hogere resolutie data zal verder toenemen. Via remote sensing zal de actuele neerslag, verdamping en bodemvocht continue bekend zijn en neerslag-afvoermodellen zullen real time meedraaien. Een dicht meetnet van waterstands- en afvoermetingen zal online beschikbaar zijn om de modelresultaten en metingen op elkaar te fitten. (Nieuwe) modellen kunnen ons ondersteunen om deze nauwkeurige data om te zetten naar informatie, om zo toekomstige uitdagingen, zoals extremere droge en natte perioden als gevolg van klimaatverandering, het hoofd te kunnen bieden.

Literatuur

Allewijn, R. (1990) Remote Sensing and runoff modelling in alpine areas. A Landsat-supported conceptual semi-distributed rainfall-runoff model, applied to the N-Italian Alps. Meetkundige Dienst – Delft, Vrije Universiteit te Amsterdam

Rennó, C.D., Nobre A.D., Cuartas L.A., Soares J.V., Hodnett M.G., Tomasella J., Waterloo M.J. (2008), HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. *Remote Sensing of Environment*. doi:10.1016/j.rse.2008.03.018

Schuurmans, W en van Leeuwen, E. (2017), 3Di: Hollands glorie in watermodellering. *Stromingen*, 2017:3

Tarquini S., Isola I., Favalli M., Mazzarini F., Bisson M., Pareschi M. T., Boschi E. (2007), TINITALY/01: a new Triangular Irregular Network of Italy, *Annals of Geophysics* 50, 407 - 425.

Tarquini S., Vinci S., Favalli M., Doumaz F., Fornaciai A., Nannipieri L. (2012), Release of a 10-m-resolution DEM for the Italian territory: Comparison with global-coverage DEMs and anaglyph-mode exploration via the web, *Computers & Geosciences* 38, 168-170. doi:10.1016/j.cageo.2011.04.018

30 years of progress in rainfall runoff modelling

Over the past 30 years, the field of hydrological discharge modelling has rapidly evolved. To demonstrate this progress, the hydrological model developed in the 1980s for the PhD thesis of Roeland Allewijn is compared with currently available data and modelling tools. The hydrological model used for this comparison comprises a rainfall-runoff model of a catchment in the Italian Dolomites near the city of Cortina d'Ampezzo. This catchment area has not radically changed over the past 30 years.

The comparison revealed that data and model availability have drastically improved over the past three decades and as a consequence the required development time has greatly reduced. Currently available data have a higher resolution and are readily accessible. In the past, data collection took over a year, which is now reduced to only one week. A key difference between model development 30 years ago and current practice, is that model coding is not needed, and only a schematization has to be made for an 'off the shelf model'. Another difference is that the Allewijn model consisted of ten model units, while a contemporary fully distributed rainfall-runoff model easily comprises millions of model units. When using a modern model combined with a high number of model units and high resolution data, less time was required to build a model: in our case only one week was needed for an effort that required a full year 30 years ago.

Nevertheless, the expertise and experience of the modeller and field discharge data are required to adequately calibrate the model. The expectation is that calibration will also be needed in the future, which implies that discharge data of catchments remain indispensable to build reliable models.
