Universiteit Utrecht

Faculteit Geowetenschappen

Oratie

De watertorens van de wereld

Walter Immerzeel

Universiteit Utrecht

De watertorens van de wereld

Walter Immerzeel
Hoogleraar 'Mountain water resources, hazards and climate change'

Inaugurele rede uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt van hoogleraar
aan de faculteit Geowetenschappen van de Universiteit Utrecht,
op 19 februari 2020

COLOFON

ISBN
978 90 6266 567 9

Uitgave
Faculty of Geosciences – Utrecht University, 2020

Foto Walter Immerzeel
Ed van Rijswijk

Omslagfoto
Walter Immerzeel

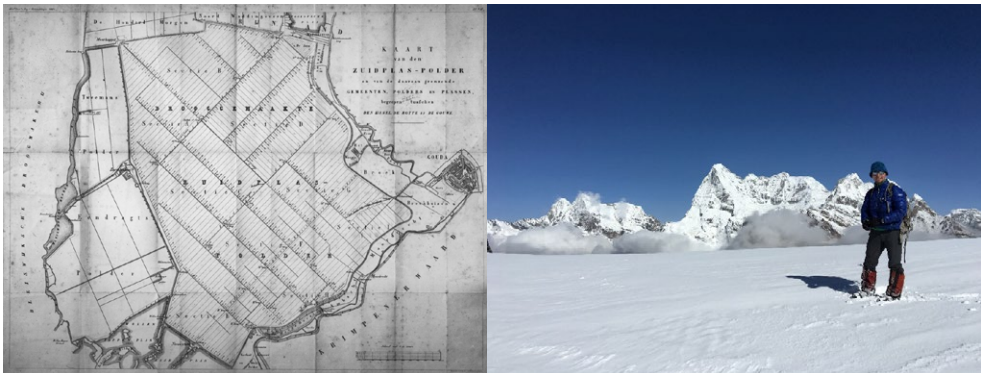
Grafische verzorging
C&M (9788)

Introductie

Mijnheer de Rector Magnificus, beste collega's, studenten, lieve vrienden, familie,

Zoals u wellicht begrepen heeft ben ik gefascineerd door bergen en alles wat met water, sneeuw en ijs te maken heeft. Dat is best vreemd eigenlijk voor iemand die geboren is in de Zuidplaspolder vlakbij het laagste punt van Nederland, 6,76 meter onder NAP om precies te zijn (Figuur 1). Nederland is een land waar de hoogste berg sowieso maar liefst 322,4 meter hoog is. Toch wil ik de komende drie kwartier proberen uit te leggen waarom berggebieden zo'n aantrekkingskracht hebben, waarom ze zo belangrijk zijn voor de mensheid, en bovenal waarom ze wetenschappelijk zo interessant zijn.

Bergen hebben al eeuwen een aantrekkingskracht op de mensheid en dat komt omdat die grootse wildernis ons nietig laat voelen en ons dwingt tot relativeren en dat is juist in deze tijd enorm belangrijk. Het maakt zo'n berg namelijk helemaal niets uit of wij er zijn of niet. Wij leven nu in het Anthropoceen, een tijdperk waar de Nederlandse Nobelprijswinnaar Paul Crutzen als eerste over publiceerde in het jaar 2000. Een periode waarin de mens zijn leefomgeving tot het uiterste uitbuit en we het klimaat op aarde door ons handelen aantoonbaar hebben veranderd met mogelijke gevolgen die niet te overzien zijn. De onderliggende reden is dat de maatschappij vereist dat we steeds meer presteren, produceren, verdienen en we moeten steeds sneller gaan.



Figuur 1 *Van de Zuidplaspolder (-7 m NAP) naar de Himalaya (+6000 m)*

De aarde legt ons nu echter harde grenzen op en die worden steeds duidelijker en er moet iets veranderen. Dat geldt ook een beetje voor het academische systeem. De prestatiedruk is enorm en er is een keiharde competitie om beperkte hoeveelheid onderzoeksgelden, en er moet veel gepubliceerd worden om aan de top mee te blijven doen. Nu doen wij dat in Utrecht heel erg goed, maar het is maar de vraag of dit op lange termijn houdbaar blijft.

Competitie, willen winnen en een drang naar groei zit nu eenmaal in onze genen en dit systeem veranderen is een enorme uitdaging en de songtekst van Eddie Vedder's 'Society' geschreven voor de film 'Into the Wild' brengt dit mooi onder woorden. In dit waargebeurde verhaal vertrekt Chris McCandless na het afronden van zijn studie en met een glorieuze toekomst op Harvard in het verschiet de bergen van Alaska in. Hij is de in zijn ogen gekte van de op prestatiedrang gerichte samenleving waarin hij vertoeft zat.

De tekst gaat als volgt:

When you want more than you have
you think you need
and when you think more than you want
your thoughts begin to bleed

There's those thinking more or less, less is more
But if less is more how you're keeping score?
Means for every point you make
Your level drops

Ik wil hiermee niet zeggen dat we moeten stoppen met presteren en collectief de wildernis in moeten trekken, maar het is wel goed om hierover na te denken en samen vorm te geven hoe we de universiteit kunnen maken tot een plek waar we toponderzoek doen en onderwijs geven, waar teamwerk beloond wordt en iedereen zich gewaardeerd voelt.

Waarom zijn bergen belangrijk?

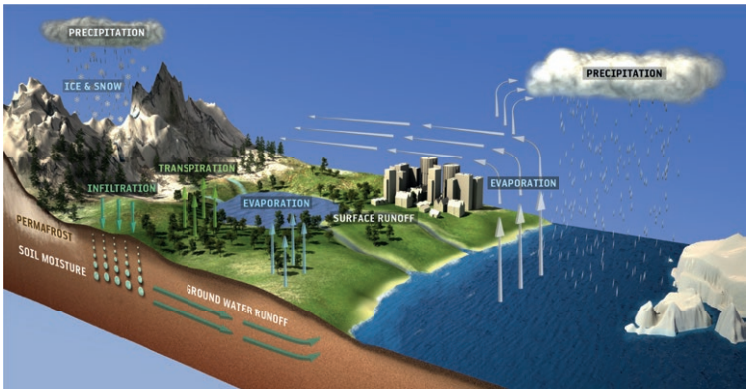
Laten we teruggaan naar het wetenschappelijk en maatschappelijk belang van berggebieden. De officiële titel van mijn leerstoelgroep is 'Mountain water resources,

hazards and climate change'. Ik wil u vandaag meenemen op een reis langs al deze facetten van berggebieden in hun samenhang en op verschillende schaalniveaus.

Een metafoor die wij veelvuldig gebruiken en hebben gebruikt om het belang van berggebieden te duiden is de term 'watertoren'.

De titel van deze oratie is 'De Watertorens van de Wereld', de titel van mijn meest geciteerde artikel in Science uit 2010 is 'Climate change will impact the asian water towers' en de titel van ons meest recente artikel in Nature van een maand geleden is 'Importance and vulnerability of the world's water towers'. Blijkbaar is de term watertoren een sterke metafoor. Bergen zijn watertorens om een aantal redenen (Figuur 2).

Ten eerste is er een orografisch effect. Dat wil zeggen er valt in de bergen meer regen dan in de laagvlakte omdat warme vochtige lucht opstijgt als het tegen een berg aanbotst, afkoelt en condenseert. Ten tweede valt veel neerslag in de bergen in de vorm van sneeuw, en dat sneeuwpakket vormt een natuurlijke buffer. Het smeltwater komt beschikbaar op een later tijdstip dan dat het is gevallen. Ten derde zijn er grote watervoorraden opgeslagen in gletsjerijs en ook dat water vormt een belangrijke buffer in periodes dat het warm is, maar er weinig neerslag valt. In totaal zijn er op de wereld ruim 215.000 gletsjers, met een totaaloppervlakte van 705.000 km^2 en een totaal ijsvolume van 158.000 km^3. Als al die gletsjers zouden smelten dan zou de zeespiegel gemiddeld met 32 cm stijgen (Farinotti et al., 2019). Om u een idee te geven hoeveel dat is: we zouden heel Nederland met een ijspakket van 3,8 km dik



Figuur 2 *De watercyclus (credit: European Space Agency)*

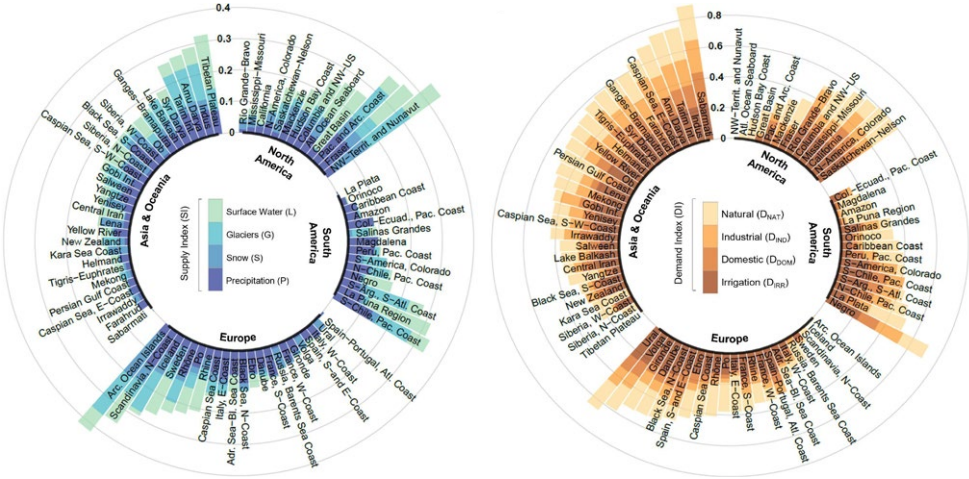
moeten bedekken om die hoeveelheid ijs op te slaan. Het zijn dus bijna letterlijk watertorens.

Regen en smeltwater uit berggebieden zijn van groot belang voor veel irrigatie systemen, met name in Azië. Het irrigatiesysteem in het stroomgebied van de Indus bijvoorbeeld is voor het merendeel afhankelijk van water uit de Himalaya en Karakoram gebergtes. In totaal wordt in de Indus meer dan 200.000 km^2 geïrrigeerd met dit bergwater.

Minstens zo belangrijk zijn de mogelijkheden die bergrivieren bieden om energie uit waterkracht op te wekken. Neem bijvoorbeeld de bekende Drieklovendam in China. In 2018 genereerde deze dam 102 miljard kWh. In Nederland gebruiken we per jaar rond de 120 miljard kWh, waarvan 17 miljard kWh uit hernieuwbare bronnen (2017). Dus deze ene dam produceert meer dan 5 keer zoveel energie dan de totale productie van hernieuwbare energie in Nederland. Op dit moment wordt slechts een fractie van de waterkrachtmogelijkheden in berggebieden benut.

Naast hun belangrijke watervoorzienende rol voor irrigatie en waterkracht hebben bergen ook een aantal belangrijke andere functies. Ze vormen de directe leefomgeving van de 300 miljoen mensen en 1,6 miljard mensen wonen in stroomgebieden die afhankelijk zijn van water uit de bergen. Veel belangrijke en kwetsbare ecosystemen met een grote en vaak unieke biodiversiteit zijn te vinden in het hooggebergte. Ook zijn bergen qua toerisme van groot belang en elke jaar vertrekken er bijvoorbeeld alleen al bijna 1 miljoen Nederlanders naar de Alpen voor wintersport. Bergen spelen ook een belangrijke culturele en religieuze rol. Mt. Kailash in Tibet bijvoorbeeld wordt verondersteld de woning van de Hindu God Shiva te zijn, en dit is waar de Indus, Ganges en Brahmaputra rivieren hun oorsprong hebben. Jaarlijks maken duizenden pelgrims een boeddhistische bedevaart naar deze heilige berg. Een ander voorbeeld is Varanasi in India, waar jaarlijks miljoenen Hindoes religieuze rituelen uitvoeren aan de oevers van de Ganges.

Het is dus duidelijk dat bergen belangrijk zijn om verschillende redenen, maar hoe meet je dat nou precies? In een recente studie samen met National Geographic hebben wij het belang van de belangrijkste watertorens op aarde gekwantificeerd door middel van een zogenaamde *Water Tower Index* (Immerzeel et al., 2019). Of een bergketen belangrijk is of niet hangt niet alleen af van hoeveel neerslag er in de bergen valt, hoeveel gletsjers en sneeuw er zijn, maar ook, of misschien vooral van wat er benedenstrooms gebeurt. Hoeveel mensen wonen daar, hoeveel water is er lokaal beschikbaar, en hoeveel water is er nodig voor landbouw en industrie en om de natuurlijke ecosystemen in stand te houden? Om de aanbodkant vanuit de bergen in kaart te brengen hebben we een *supply index* bedacht.



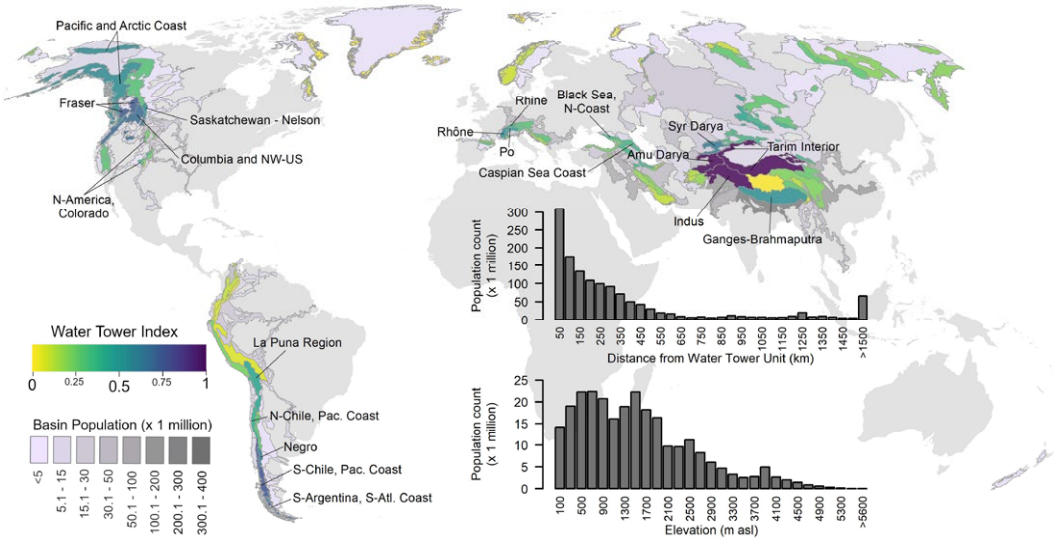
Figuur 3 De supply index (links) en de demand index (rechts) voor de 78 belangrijkste watertorens van de wereld (Immerzeel et al., 2019)

Die *supply index* is samengesteld uit indicatoren voor de hoeveelheid neerslag, de sneeuw afhankelijkheid, het ijsvolume en de massabalans van de gletsjers en de hoeveelheid oppervlaktewater. Al deze elementen samen vormen een maat voor de aanbod kant.

Vervolgens hebben we ook naar de gebruikerskant gekeken. Hoeveel water is er extra benedenstrooms nodig om aan de vraag voor irrigatie, huishoudens, industrie en natuur te voldoen. Dit wordt tot uitdrukking gebracht met de *demand index*.

Het is duidelijk dat er grote variatie bestaat tussen en binnen de continenten in de grootte en samenstelling van zowel de *demand* als de *supply index* (Figuur 3). Er zijn watertorens met heel veel aanbod, maar geen vraag (Tibetaans Plateau), maar ook gebieden met veel vraag en geen aanbod (Sabarmati). Er zijn ook watertorens die zowel hoog scoren op de *supply index* als op de *demand index* en daar gaat het om.

Figuur 4 laat de uiteindelijke *Water Tower Index* zien voor alle 78 watertorens die we hebben geanalyseerd. Per continent zijn de vijf belangrijkste watertorens gelabeld. Mondiaal gezien is het stroomgebied van de Indus de meest belangrijke watertoren; grote gletsjers, relatief veel neerslag in de bergen, een persistente sneeuwbedekking



Figuur 4 *De watertoren index kaart (Immerzeel et al., 2019)*

in combinatie met een kurkdroog benedenstrooms klimaat, waar zich het grootse irrigatiegebied ter wereld bevindt en de bevolking razendsnel groeit.

Als laatste stap hebben we in de studie ook naar de kwetsbaarheid gekeken van de top vijf belangrijkste watertorens per continent. Daarbij hebben we factoren als de bevolkingsgroei, de economische groei, de klimaatverandering en de kwaliteit van bestuur en de geopolitieke spanning meegenomen, en het blijkt dat met name in Azië de belangrijke watertorens ook zeer kwetsbaar zijn.

Alle resultaten van deze studie kunnen online[1] bekeken worden op een prachtige website die door National Geographic is ontwikkeld op basis van onze gegevens. U kunt hier uw favoriete bergketen opzoeken, bepalen hoe belangrijk en kwetsbaar het gebied is en besluiten of u hier nog wel naar toe kunt op vakantie. Op basis van deze studie concluderen wij dat bergen erkent moeten worden als een uniek systeem op aarde net zoals bijvoorbeeld oceanen en tropische regenwouden. We stellen ook vast dat de kwetsbaarheid van berggebieden het gevolg is van zowel klimaatverandering als sociaal-economische groei. Die laatste is wellicht nog wel belangrijker. Het is daarom essentieel dat er specifiek beleid gericht op natuurbescherming en klimaatadaptatie

1 www.natgeo.com/perpetualplanet

in berggebieden wordt ontwikkeld en dat dit hoog op de politieke agenda komt. Gelukkig zijn daar al belangrijke stappen in gezet.

De rol van klimaatverandering

Al in 1912 stond in een Nieuw-Zeelandse krant, dat het verbranden van steenkool kan leiden tot een temperatuurverhoging op aarde (Figuur 5). Echter het heeft heel lang geduurd voordat erkent werd dat dit een groot maatschappelijk probleem is. In 1962, maakte Esso samen met oliebedrijf Humble zelfs deze reclame. Vol trots claimen zij in deze advertentie dat als je alle olie die zij per dag produceren in warmte zou omzetten dat je dan per dag 7 miljoen ton aan gletsjerijs zouden kunnen laten smelten.

Bergen en met name gletsjers zijn iconisch voor klimaatverandering. Gletsjers staan al geruime tijd in het centrum van de klimaatdiscussie. In 2009 na de publicatie van het 4th Assessment report van het klimaatpanel van de Verenigde Naties, de IPCC, zijn de gletsjers in de Himalaya voorpaginanieuws geworden. Dit werd veroorzaakt door een monumentale fout in het rapport, namelijk dat alle gletsjers in 2035 in de Himalaya verdwenen zullen zijn. Dat is uiteraard gelukkig niet het geval. De oorzaak van deze fout was dat er eigenlijk nagenoeg geen wetenschappelijk onderzoek was gedaan op dit terrein. Deze conclusie was gebaseerd op een niet-wetenschappelijk

The Rodney & Otamatea Times
WAITEMATA & KAIPARA GAZETTE.
PRICE—10s per annum in advance
WARKWORTH, WEDNESDAY, AUGUST 14, 1912.
3d per Copy.

Science Notes and News.

COAL CONSUMPTION AFFECTING CLIMATE.

The furnaces of the world are now burning about 2,000,000,000 tons of coal a year. When this is burned, uniting with oxygen, it adds about 7,000,000,000 tons of carbon dioxide to the atmosphere yearly. This tends to make the air a more effective blanket for the earth and to raise its temperature. The effect may be considerable in a few centuries.

EACH DAY HUMBLE SUPPLIES ENOUGH ENERGY TO MELT 7 MILLION TONS OF GLACIER!

This giant glacier has remained unmelted for centuries. Yet the petroleum energy Humble supplies—if converted into heat—could melt it at the rate of 80 tons each second! To meet the nation's growing needs for energy, Humble has applied science to nature's resources to become America's Leading Energy Company. Working wonders with oil through research, Humble provides energy in many forms—to help heat our homes, power our transportation, and to furnish industry with a great variety of versatile chemicals. Stop at a Humble station for famous Esso Extra gasoline, and see why the "Happy Motoring"-Sign is the World's First Choice!

HUMBLE OIL & REFINING COMPANY
America's Leading Energy Company
Esso

Figuur 5 Krantenartikel uit 1912 (links) en advertentie uit 1962 (rechts)

rapport van het wereld natuurfonds. Een positief gevolg van het ontdekken van deze fout was echter dat er enorm veel aandacht en geld beschikbaar kwam voor onderzoek naar klimaatverandering in de Himalaya en de hoeveelheid kennis op dit terrein is de afgelopen 10 jaar gigantisch toegenomen.

De Pontifical Academy of Sciences van het Vaticaan organiseert jaarlijks exclusieve wetenschappelijke bijeenkomsten over onderwerpen met groot maatschappelijk belang. Met de IPCC-aandacht voor de gletsjers als aanleiding werd in mei 2011 een workshop georganiseerd met als titel 'Fate of Mountain Glaciers in the Anthropocene' in Vaticaanstad. Ik werd hiervoor uitgenodigd naar aanleiding van ons artikel in Science in 2010 en het was veruit de meest indrukwekkende conferentie waar ik ooit ben geweest. De gemiddelde leeftijd van de deelnemers was minimaal twee keer zo hoog als die van mijzelf. Samen met 20 collega's, waaronder drie Nobelprijswinnaars, bediscussieerden we twee dagen lang onder het genot van de beste wijnen uit het Vaticaan en onder toeziend oog van de Zwitserse garde het lot van de gletsjers in het Anthropoceen. Nog afgezien van de indrukwekkende setting, viel mij als jonge vader en onderzoeker, vooral de pessimistische kijk op de toekomst van deze Nobelprijswinnaars. Ik realiseerde me dat we als mensheid echt verkeerd bezig zijn en dat het wetenschappelijk onderzoek naar de impact van klimaatverandering van groot belang kan zijn voor de maatschappij en dat het onderzoek dat ik tot dan toe deed in het hooggebergte van Azië zeer relevant was en is.

Er is een overweldigende hoeveelheid visueel bewijs dat gletsjers zich terugtrekken en smelten. In Figuur 6 aan de linkerkant ziet u bijvoorbeeld een foto van de

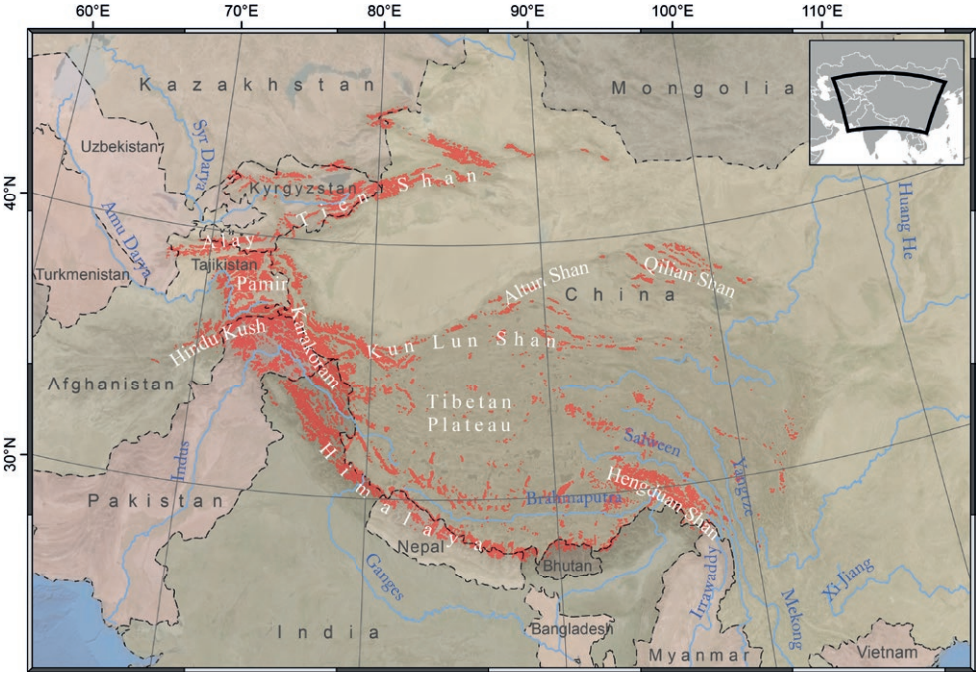
Figuur 6 *De Rongbuk gletsjer aan de noordkant van Mt. Everest in 1921 (foto George Mallory) en 2007 (foto David Breashears)*

Rongbuk gletsjer aan de noordkant van Mt. Everest gemaakt door de Engelse klimmer George Mallory in 1921. Wellicht was hij overigens degene die de Everest als eerste beklom in 1924 in plaats van Sir Edmund Hillary en Tensing Norgay in 1953. Het lichaam van Mallory werd pas in 1999 gevonden 100 meter onder de top van de Mt. Everest. Het is nooit duidelijk geworden of hij op de weg naar de top was of al aan de afdaling begonnen was.

Aan de rechterkant ziet u dezelfde foto uit het jaar 2007 vanaf exact dezelfde positie genomen door de Amerikaanse klimmer David Breashears, die de Everest 5 keer beklom. De veranderingen zijn overduidelijk en in deze periode van 86 jaar is de gletsjer meer dan 100 meter dunner geworden. Dat is hoger dan de Domtoren die hier voor de deur staat. Op basis van dit soort foto's is het dus duidelijk dat er van alles verandert in dit gebied. Echter niet alleen qua gletsjers, maar ook qua sneeuw, moessonregens, vegetatie en watergebruik. Veel van deze veranderingen komen door klimaatverandering.

Het bijzondere van klimaatverandering in berggebieden is dat de temperatuur op grote hoogte sneller stijgt dan in het laagland. Tussen mijn geboortejaar 1975 en nu is de CO_2 concentratie toegenomen van 331 ppm naar 409 ppm en de gemiddelde temperatuur op aarde is met ongeveer een graad gestegen. Echter de temperatuur in Kathmandu, de hoofdstad van Nepal, stijgt twee keer zo snel. Dat is natuurlijk slecht nieuws voor de berggebieden en dit proces wordt in de literatuur ook wel *Elevation Dependent Warming* genoemd en wordt veroorzaakt door een aantal terugkoppelingen in het systeem, waarvan de sneeuw-albedo feedback wellicht de belangrijkste is. Doordat het warmer wordt valt er minder sneeuw, smelt het sneller, wordt het aardoppervlakte donkerder, wordt er minder zonnestraling weerkaatst en stijgt de temperatuur vervolgens weer sneller.

Veel van ons onderzoek richt zich op het hooggebergte en de grote rivieren in Azië (Figuur 7). Dit is niet voor niks, want dit is wereldwijd, de regio waar klimaatverandering de meeste impact zal hebben om verschillende redenen. Tien grote rivieren vinden hun oorsprong in deze bergketens; de Syr Darya en de Amu Darya die in het Aral meer afwateren, de Indus, de Ganges, de Brahmaputra, de Irrawaddy, de Salween, de Mekong, de Yangtze en de Gele Rivier. In de stroomgebieden van al deze rivieren woont ongeveer 25% van de totale wereldbevolking. Er zijn ook enorme klimaatcontrasten in dit gebied. Het zuidoosten wordt gedomineerd door de moessonregens die elk jaar voor grote hoeveelheden neerslag en overstromingen zorgen. Hier bevindt zich, in de Megalaya hills, de natste plek op aarde waar meer dan 11 meter neerslag valt per jaar. Aan de noordkant van



Figuur 7 De bergketens en stroomgebieden van Azië (Kraaijenbrink, 2018)

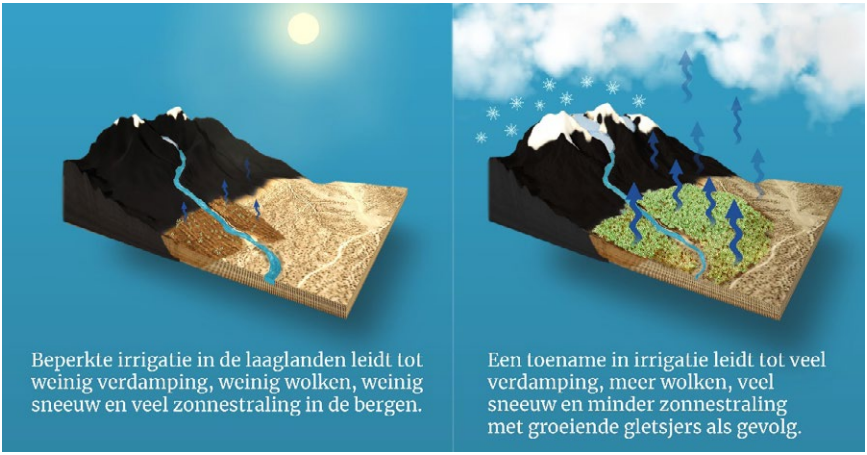
de Himalaya op het Tibetaans Plateau is het kurkdroog en valt er maximaal een paar honderd millimeter per jaar. Buiten de poolgebieden bevatten deze berggebieden de grootste ijsvoorraden op aarde en wordt de hydrologie voor een belangrijk deel bepaalt door sneeuw en gletsjer smeltwater. Om die reden is het gebied erg gevoelig voor klimaatverandering.

De gletsjers in de regio gedragen zich over het algemeen net zoals elders in de wereld. Ze smelten. Gemiddeld werd elke gletsjer in het gebied per jaar in de periode tussen 2000 en 2016 ongeveer 20 centimeter dunner. Probeert u zich daar eens een voorstelling van te maken. Duizenden gletsjers die elk jaar 20 centimeter dunner worden over hun hele oppervlakte. Dat is heel veel extra water. Het is ook te zien dat er grote variatie is en dat de gletsjers aan de zuidkant, in het moesson gedomineerde gebied, het snelst hun massa verliezen. Er is nog iets interessants aan de hand, en er zijn ook gletsjers die stabiel zijn of zelfs groeien. Dat gebeurt nagenoeg nergens op de

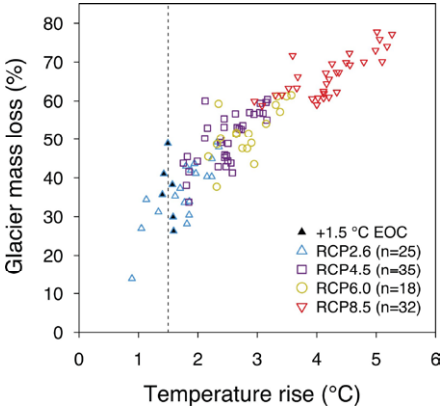
wereld. Dit is een gebied rondom de Karakoram, Pamir en de Kunlun Shan gebergtes en dit fenomeen wordt in de literatuur wel de *Karakoram Anomaly* genoemd.

Dit fenomeen werd voor het eerst beschreven in 2005 door Ken Hewitt en sindsdien zijn er vele studies aan gewijd. Er zijn een aantal theorieën in omloop, maar wat wij hebben laten zien met modellen is dat een toename in irrigatie vanuit grondwater in het stroomgebied van de Tarim heeft gezorgd voor meer verdamping. Dit heeft twee belangrijke effecten ten faveure van de gletsjers. Enerzijds leidt het meer vocht in de atmosfeer en tot meer sneeuwval in de bergen en anderzijds leidt het tot meer bewolking waardoor minder kortgolvige zonnestraling de gletsjers kan bereiken en ze minder hard smelten (Figuur 8). Toen ik dit recent in China presenteerde werd men enorm enthousiast: Als we nu maar genoeg grondwater oppompen dan groeien die gletsjers vanzelf weer aan. Dat lijkt mij een slecht idee.

Hoe zit dat eigenlijk met de toekomst? In 2015 werd in Parijs een historisch ambitieus klimaatakkoord ondertekend door uiteindelijk 197 landen. Daarin werd afgesproken om de opwarming van de aarde aan het einde van deze eeuw niet verder te laten oplopen dan 2°C ten opzichte van het pre-industriële tijdperk en om te streven naar een toename van maximaal 1,5°C. Die waarden zijn natuurlijk vrij willekeurig en wij waren benieuwd wat dit nu precies betekent voor de gletsjers in Azië.



Figuur 8 *Irrigatie beïnvloedt het regionale klimaat*

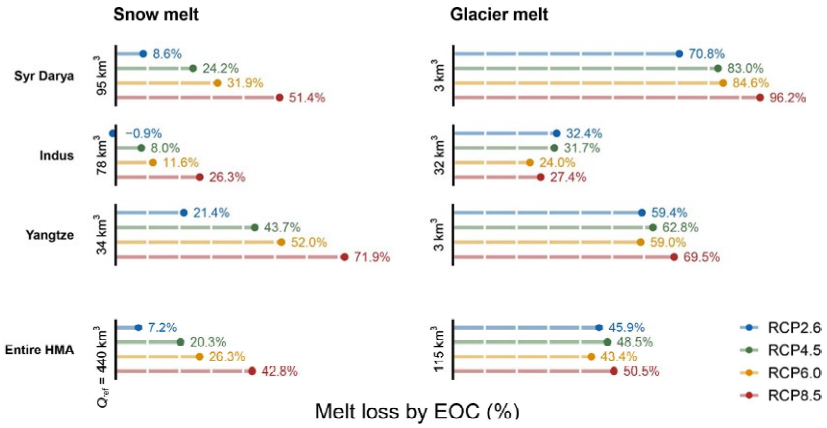


Figuur 9 *Verlies in ijsvolume in Azië als functie van de wereldwijde temperatuur stijging (Kraaijenbrink et al., 2017)*

Met een nieuw gletsjermodel aangedreven met de output van de laatste klimaatmodellen hebben we dit uitgerekend. Het blijkt dat zelfs als we het ambitieuze 1,5°C doel halen, dan nog zullen we ongeveer 36% van al het gletsjerijs verliezen aan het eind van deze eeuw (Figuur 9). In meer extreme scenario's loopt dit op tot 64%.

We zijn op dit moment ver verwijderd van het 1.5 graden doel. Amerika heeft zich teruggetrokken uit het klimaatverdrag, en de klimaattop in Madrid van december vorig jaar is mislukt zonder dat er concrete afspraken zijn gemaakt. Op dit moment volgen we dus een extremer scenario wat mogelijk zal leiden tot een ijsverlies van 50 tot 60% in Azië. Er is overigens veel discussie over het pad waarop we ons nu precies bevinden. Uit een studie twee weken geleden gepubliceerd in Nature blijkt dat het meest extreme scenario dat het klimaatpanel van het IPCC hanteert, het zogenaamde RCP 8.5 scenario, inderdaad heel extreem is en niet als een business-as-usual scenario moet worden gezien. Dit scenario zal tot een temperatuurstijging leiden van ongeveer 5°C aan het einde van de eeuw. Dat zal alleen optreden zonder enig beleid en ingrijpen en ook dat ligt niet voor de hand. De waarheid ligt denk ik, zoals vaak, in het midden, en het is onze verantwoordelijkheid als wetenschapper altijd naar die waarheid op zoek te zijn. Zelfs als we de opwarming tot 3°C weten te beperken staan we nog voor enorme uitdagingen.

Laten we snel teruggaan naar de bergen voordat dit heel deprimerend wordt. Wetenschappelijk hebben de gletsjers de afgelopen jaren heel veel aandacht gekregen, maar recent onderzoek heeft laten zien dat sneeuw wellicht een nog belangrijkere rol vervult. Sneeuw smeltwater heeft relatief een groter aandeel in de rivierafvoer en



Figuur 10 Verschil in toekomstige sneeuw en ijssmelt ((Kraaijenbrink et al., 2020))

er is een sterke afname van de maximale opgeslagen jaarlijkse hoeveelheid sneeuw gedurende de afgelopen 40 jaar.

Een andere, wellicht nog wel belangrijkere conclusie is dat sneeuwsmelt veel gevoeliger is voor klimaatverandering dan gletsjersmelt. Hier ziet u voor verschillende stroomgebieden en voor heel Azië de afname in gletsjer en sneeuwsmelt aan het einde van de eeuw voor verschillende scenario's. Twee dingen vallen op. Ten eerste is de jaarlijkse hoeveelheid sneeuwsmelt ongeveer vier keer zo groot als de hoeveelheid gletsjersmelt en ten tweede is de sneeuwsmelt afname veel gevoeliger voor welk klimaatscenario we volgen (Figuur 10). Met andere woorden het maakt dus voor de toekomstige sneeuwsmelt enorm veel uit of president Trump aan de macht blijft of niet.

Meten is weten

Tot zover de grootschalige studies, maar de *devil is in the details*, en ik wil nu de overstap maken naar een volledig ander schaalniveau. Ik ben ervan overtuigd dat om echt te begrijpen hoe de atmosfeer, de cryosfeer en de hydrosfeer samenhangen je met de stijgijzers in de sneeuw moet staan. Het doen van veldwerk hoog in de

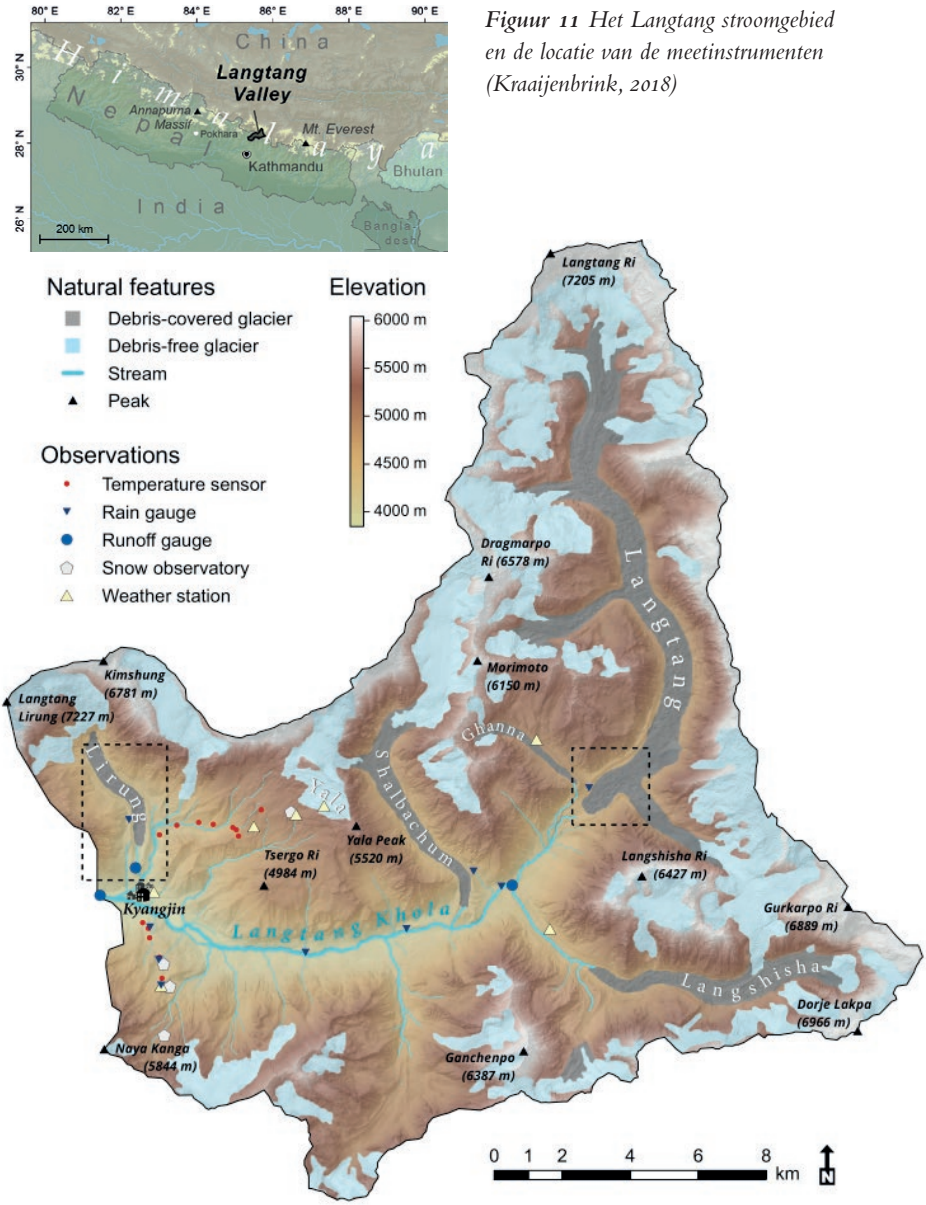
Himalaya en het proberen te begrijpen van kleinschalige processen is een van de meest uitdagende, bevredigende, frustrerende en tegelijk ook leukste onderdelen van mijn vak.

Het is altijd moeilijk uit te leggen, maar ik zal het toch proberen. Ik ben inmiddels wel op 15 onderzoeksexpedities geweest, en elke keer als ik terug ben begint het na een paar maanden weer te kriebelen. Ik denk het een combinatie is van de grootste schoonheid van de bergen, het afzien en het avontuur, het teamwerk, en de pure focus op veldwerk. Met name de afwezigheid van e-mail en mobiele telefoon werkt zeer louterend. Ik kan het iedereen aanraden. Daarnaast is het contact met de lokale bevolking ook ontzettend leuk en leerzaam. Wij kunnen een voorbeeld nemen aan de weerbaarheid, flexibiliteit en innovativiteit van mensen die hun hele leven hoog in de bergen wonen.

Er zijn bijna geen meteorologische metingen boven de 4000 meter in de Himalaya. Qua metingen op extreme locaties is er echter steeds meer mogelijk. Een goed voorbeeld daarvan is de expeditie die National Geographic in het voorjaar van 2019 organiseerde naar de Mt. Everest parallel aan onze globale studie waar ik eerder over sprak. Met behulp van genereuze financiële ondersteuning van Rolex zijn er weerstations tot bijna op de top van Mt. Everest geïnstalleerd tot een hoogte van 8400 meter. Deze data kun je in real-time bekijken en worden zelfs via een twitterbot elk uur de wereld ingestuurd. Dat was 10 jaar geleden ondenkbaar.

Alhoewel iets minder extreem dan dit, doet wij veel metingen in het Langtang gebied in Nepal (Figuur 11). Samen met partners hebben wij deze proeftuin opgezet en het is nu een van de meest bemeten gebieden in het hooggebergte in de Himalaya. We doen hier metingen met drones aan gletsjers, we hebben weerstations, we meten sneeuweigenschappen en we meten rivierafvoeren. Alles met het uiteindelijke doel om de water cyclus in het hooggebergte te begrijpen. Ik wil u daarvan twee specifieke voorbeelden geven.

Een onderdeel waarmee we echt wereldwijde bekendheid hebben gekregen is het promotieonderzoek van Philip Kraaijenbrink, waarbij we met drones naar puin-gletsjers hebben gekeken. Al in 2013 zijn we daar mee begonnen in Nepal. Met de drones kun je zeer gedetailleerde hoogtemodellen maken van het oppervlakte van de gletsjer en door dat elk half jaar te herhalen kun je nauwkeurig het smeltgedrag in kaart brengen. De dikte van het puin op dit soort gletsjers beïnvloedt de smeltsnelheid volgens de zogenaamde Østrem curve. Deze curve laat zien dat een dunne laag puin de smelt versnelt en een dikke laag het ijs isoleert en zorgt voor een lagere smeltsnelheid. Onze drone resultaten hebben echter laten zien dat het vooral



Figuur 11 Het Langtang stroomgebied en de locatie van de meetinstrumenten (Kraaijenbrink, 2018)

de ijskliffen en meertjes op dit soort gletsjers zijn waar de smelt optreedt, en dat dat verklaart waarom deze gletsjers sneller smelten dan je op grond van de curve zou verwachten.

Het uitvoeren van de drone metingen is spannend. Hier ziet u hoe een drone gelanceerd wordt met de Mt. Everest op de achtergrond. Zo'n drone kost ongeveer 20 duizend euro en het is elke keer maar weer de vraag of hij het redt in de ijle lucht, met onvoorspelbare winden en ook grote roofvogels zien zo'n drone nog wel eens als een bedreiging of zelfs als een potentiele partner. Tot nu toe is de schade gelukkig beperkt gebleven en hebben we heel veel geleerd van de unieke data die deze campagnes opleveren.

Het tweede voorbeeld van het kleinschalige onderzoek dat we doen is het onderzoek van promovenda Emmy Stigter naar sublimatie. Wij stelden namelijk vast dat als we alle inkomende en uitgaande componenten van water en ijs in ons stroomgebied optelden dat er dan iets miste. Onze hypothese was dat sublimatie wel eens de reden zou kunnen zijn waarom er water verdwijnt. Sublimatie is de faseovergang van ijs naar waterdamp in de atmosfeer en dat proces treedt vooral op bij een lage luchtvochtigheid, veel straling en harde wind. Allemaal ingrediënten die je hoog in de Himalaya tegenkomt. Sublimatie is net als verdamping een turbulent proces, en turbulentie meten is op zeeniveau al een grote uitdaging. Wij hebben op twee locaties op 5800 meter en op 5300 meter een aantal maanden metingen gedaan. In Figuur 12 ziet u onze meetopstelling op de Yala gletsjer op een hoogte van 5300 in Nepal waar we met een eddy-correlatie toren die 10 keer per seconde vocht en windveranderingen meet, de sublimatie kunnen afleiden. Samen met stralingsmetingen en een simulatiemodel levert dat belangrijke inzichten op over hoe belangrijk sublimatie nu eigenlijk is. De modelstudie liet bijvoorbeeld zien dat wel 21% van de jaarlijkse sneeuwval door sublimatie weer de atmosfeer in kan verdwijnen.

Naast sublimatie bestuderen we ook andere sneeuw processen. Met een andere meetopstelling kijken we bijvoorbeeld hoe dik het sneeuwpakket is en hoeveel water erin is opgeslagen. Deze sensor meet gammastraling die door de rotsen wordt uitgestraald. Door de sneeuw wordt dat signaal afgezwakt en de mate van afzwakking kun je vervolgens gebruiken om de hoeveelheid water in het sneeuwpakket vast te stellen. Die informatie gebruiken we vervolgens weer om onze sneeuwmodellen te kalibreren.

Het punt dat ik met deze voorbeelden wil maken is dat het doen van echte veldmetingen in de bergen van essentieel belang is, en door op een slimme manier modellen, metingen en satellietbeelden te combineren kunnen we in dit soort

Figuur 12 De meetopstelling op Yala gletsjer om sublimatie te meten (foto: Joseph Shea)

moeilijk toegankelijke gebieden toch veel te weten komen over de watercyclus en hoe die in de toekomst zal veranderen.

Natuurlijk is dit veldwerk spectaculair en leuk, maar het is ook gevaarlijk, je kunt hoogteziek worden, onderkoeld raken en bevriezingsverschijnselen krijgen. We hebben alles wel zo'n beetje mee gemaakt in de loop der jaren. Het raakt je flink als een teamlid heel erg hoogteziek wordt, en met helikopter moet worden afgevoerd. Vaak zijn de metingen die we doen zijn op locaties waar van alles kan gebeuren waar je je niet op kan voorbereiden. Meestal hoort u alleen de succesverhalen, maar vandaag wil ik u toch ook de andere kant van de medaille niet onthouden.

Alleen om in de buurt van de eerste gletsjer te komen, moeten we over niet al te beste wegen een dag lang ons leven wagen langs afgronden van meer dan duizend meter hoog. Vervolgens lopen we drie dagen door de vallei omhoog en alle spullen worden door dragers getild. Zonder deze helden zouden wij helemaal geen onderzoek hier kunnen doen (Figuur 13).

Op 25 April 2015 werd Nepal getroffen door een grote aardbeving met een kracht van 7,8 op de schaal van Richter. Ook ons onderzoekgebied in Langtang werd zwaar

Figuur 13 *Omgevallen bus (links) en drager met onderzoeksmateriaal (rechts)*

getroffen en ook dat had een grote persoonlijke impact, omdat wij hier natuurlijk heel veel mensen kenden. In Figuur 14 ziet u het grootste dorp in de vallei dat door een enorme ijs en sneeuwlawine werd bedolven die werd getriggerd door de aardbeving. In totaal kwamen hier meer dan 250 mensen om, en de kracht van de lawine was ongeveer gelijk aan 50% van de kracht van de atoombom op Nagasaki. Overal in de vallei waren grote lawines, drukgolven en steenslag en ongeveer 50% van al onze meetopstellingen waren kapot. Sommige stations vonden we een paar honderd meter verderop terug.

Daarnaast hebben we regelmatig te maken met 'normale' lawines en extreme sneeuwval die stations omverblazen. Of er is zoveel smelt dat een station dat 5 meter diep in het ijs was geboord binnen een half jaar helemaal is uitgesmolten en om is gevallen. En dan laat ik de voorbeelden met ontploffende accu's en de yaks die stations omduwen nog maar even voor wat ze zijn. En dat allemaal van ons belastinggeld hoor ik u denken. Ik kan u geruststellen. Gelukkig gaat het merendeel wel goed, zijn deze metingen van onschatbare waarde, en mede omdat we dit

Figuur 14 *Langtang voor (2012) en na (2015) de lawine (foto's door David Breashears)*

doen behoren we nu bij de top van de wereld op dit onderzoeksgebied. Minstens zo belangrijk is ook het teamband en de vriendschappen die je tijdens dit soort expedities opbouwt.

De toekomst

Het laatste deel van deze oratie wil ik gebruiken om naar de toekomst te kijken. Ik wil het toekomstig onderzoek en onderwijs richten op drie grote thema's die nauw met elkaar verweven zijn en waarbinnen nog grote vragen te beantwoorden zijn.

Het eerste thema omvat het beter in kaart brengen van de watercyclus in het hooggebergte door innovatieve metingen. Er is nog veel te leren over bijvoorbeeld de neerslagprocessen op grote hoogte, de sneeuwhydrologie, sublimatie, dynamiek van puingletsjers en de grondwaterhydrologie om er een paar te noemen. Door bijvoorbeeld samen op te trekken met collega's van het Instituut voor Marien en

Atmosferisch Onderzoek, die brede ervaring hebben met het doen van metingen op Groenland en Antarctica, is er denk ik veel mogelijk. Ik zie een toekomstig Utrecht Centre of Excellence in Extreme Environment Research wel voor me en dat lijkt me ook uitstekend passen binnen het 'Pathways to Sustainability' strategische thema van de Universiteit.

Het tweede thema waar ik op zou willen inzetten is de koppeling tussen de impact van klimaatverandering in het hooggebergte en de enorme sociaaleconomische veranderingen die benedenstrooms optreden. Globale hydrologische modellen zijn onvoldoende in staat om berg specifieke hydrologische processen goed te kwantificeren. Daarnaast is het een grote uitdaging om menselijke ingrepen in het systeem, zoals stuwdammen, grond- en oppervlakte wateronttrekkingen en irrigatiesystemen op een plausibele manier in kaart te brengen en er zijn grote schaalverschillen te overbruggen. Binnen dit thema, zou ik hier graag in nauwe samenwerking met de leerstoelgroep hydrologie, aan werken met als doel bij te dragen aan het klimaat- en groeibestendig maken van de kwetsbaarste, bergafhankelijke stroomgebieden in de wereld.

Het laatste thema, waar ik mij de komend jaren op wil gaan richten zijn de extremen en de natuurrampen. Berggebieden worden veelal gekenmerkt door aardbevingen, lawines, aardverschuivingen en overstromingen. Veel echte grote rampen zijn complex en vaak samengesteld uit meerdere factoren. De lawine in Langtang bijvoorbeeld die ik u eerder liet zien werd geïnitieerd door een grote aardbeving, maar de impact was zo groot, omdat er een hoeveelheid sneeuw lag die slechts 1:100 jaar voorkomt ten gevolge een cycloon in het jaar ervoor. Daarnaast bevond het dorp zich recht in het pad van de lawine en waren er abnormaal veel mensen vanwege een religieus festival. De impact van een natuurramp hangt dus af van de omvang van de extreme gebeurtenis, de kwetsbaarheid van het systeem en de blootstelling van mensen en infrastructuur. Dit zou ik graag op regionale schaal in kaart brengen en in het bijzonder bepalen hoe klimaatverandering de toenemende blootstelling van mensen en infrastructuur verder verstrekt.

Ik denk ook dat wij aan de vooravond staan van een aantal spectaculaire technologische veranderingen die ons vakgebied ingrijpend gaan veranderen.

Met ontwikkelingen zoals bijvoorbeeld de Google Earth Engine wordt het steeds eenvoudiger om met groot detail ruimtelijke berekeningen in de 'cloud' goedkoop en efficiënt uit te voeren met bijna 'real-time' toegang tot de laatste satellietbeelden, weergegevens en klimaatmodellen. Dat heeft al geleid tot veel wetenschappelijk doorbraken en dat zal zich in de toekomst steeds verder uitbreiden.

In het afgelopen decennium is er een razendsnelle ontwikkeling geweest wat betreft de kosten, gewicht en nauwkeurigheid van meteorologische en hydrologische sensoren. Met name de combinatie met de drone ontwikkeling is indrukwekkend. Het zal in de toekomst steeds makkelijk worden om lichtgewicht meetopstellingen in extreem terrein te plaatsten en via satelliet of mobiele telefoonnetwerken constante toegang tot de data te hebben.

Tot slot hebben artificial intelligence en big data ook sinds enkele jaren hun intrede gedaan in de geowetenschappen. Met behulp van deze technieken worden nieuwe verbanden ontdekt en disciplines met elkaar verbonden. Het is echter wel zaak om niet blind te varen op deze toch vaak "black box" technieken. Onze proceskennis en nieuwsgierigheid naar waarom iets werkt zoals het werkt moet wel de leidende drijfveer blijven.

Gezien deze razendsnelle ontwikkelingen, die eigenlijk veel breder binnen de geowetenschappen voor grote veranderingen gaan zorgen, hebben we ook een grote onderwijsuitdaging. Naast kennis van fysisch geografische en geologische processen is het voor de geowetenschapper van de toekomst ook essentieel om resultaten in een maatschappelijke context te leren plaatsen, om goed te leren programmeren, om mooie figuren en visualisaties te leren maken, om te leren rekenen met supercomputers, om mee te gaan met de laatste ontwikkelingen op remote sensing gebied en om de mogelijkheden en tekortkomingen van artificial intelligence en big data te leren begrijpen. Dat vereist structurele aanpassingen, de wil om constant te vernieuwen en op dit terrein hebben we nog veel te winnen.

Dankwoord

Tot slot een kort dankwoord. Voordat ik daar aan begin wil ik u op het hart drukken zo meteen tijdens de borrel vooral van een drankje te genieten en u niet verplicht te voelen eindeloos in de rij te staan voor felicitaties. Dat komt wel!

Allereerst een diepe buiging voor het 'mountain hydrology' team: Arthur, Emmy, Hongbo, Fanny, Jakob, Max, Philip, René, Pleun, Remco, Sanita en Sonu. De afgelopen jaren hebben jullie gezamenlijk een topprestatie geleverd waar ik heel trots op en dankbaar voor ben. Het is een plezier om met jullie samen te werken. Ten tweede is het een voorrecht om al jaren nauw met Marc Bierkens en Steven de Jong samen te werken. De brainstormsessies, de coaching, het vertrouwen, en de trips naar Nepal. Allemaal essentiële ingrediënten om tot dit hoofdgerecht te komen. Tot slot ook veel dank aan iedereen die ik niet bij naam kan noemen; de collega's bij fysische

geografie, in Nepal, en bij partnerinstituten; de studenten; de dragers; de gidsen en alle Nepali!

Ik wil ook mijn ouders bedanken voor de onvoorwaardelijke steun en vrijheid die jullie me altijd hebben gegeven. Wat een voorrecht dat jullie hier vandaag bij kunnen zijn. En natuurlijk mijn zusjes, schoonouders, zwagers en schoonzussen. Zo'n fijne familiebasis is toch een belangrijke randvoorwaarde om je werk, of eigenlijk alles, goed te kunnen doen. Dan richt ik me nu tot de voorste rij.

Thijmen en Ruben, ik realiseer me dat dit een echt *OK Boomer* moment voor jullie is, toch is het een plezier elke dag thuis te komen en me te realiseren wat echt belangrijk is; bootcamp, breakdance, snowboarden, youtube, huiswerk, CITO's en pizza's. Tot slot, Hilde, onze zes maanden durende huwelijksreis in 1999 naar Nepal, stond aan de wieg van de reis naar dit podium ruim twintig jaar en vele hoogtepunten later. Dank voor al je steun en ik hoop dat we nog lang niet op de helft zijn.

Slotwoord

Ik hoop dat ik u, met deze kraanvogelvlucht over de bergen, duidelijk heb kunnen maken, waarom berggebieden zo fascinerend zijn en waarom het zo belangrijk is om ze te beschermen. Ik wil mij hier de komende jaren vol energie voor in blijven zetten. Ik heb een groot vertrouwen in de wetenschap en ik denk dat als wetenschappelijk onderzoek en technologische vernieuwing hand in hand gaan en we Ghandi's fameuze quote *'The Earth provides enough to satisfy every man's need but not for every man's greed'* wat meer ter harte zouden nemen, dat we dan alle uitdagingen die de komende decennia gaan brengen het hoofd kunnen bieden.

Ik heb gezegd.

Referenties

Farinotti, D., Huss, M., Fürst, J. J., Landmann, J., Machguth, H., Maussion, F., et al. (2019). A consensus estimate for the ice thickness distribution of all glaciers on Earth. *Nat. Geosci.* 12, 168-173. doi:10.1038/s41561-019-0300-3.

Immerzeel, W. W., Lutz, A. F., Andrade, M., Bahl, A., Biemans, H., Bolch, T., et al. (2019). Importance and vulnerability of the world's water towers. *Nature*. doi:10.1038/s41586-019-1822-y.

Kraaijenbrink, P. D. A. (2018). *High-resolution insights into the dynamics of Himalayan debris-covered glaciers (PhD thesis)*. Utrecht: Faculty of Geosciences, Utrecht University Available at: https://dspace.library.uu.nl/handle/1874/369004.

Kraaijenbrink, P. D. A., Bierkens, M. F. P., Lutz, A. F., and Immerzeel, W. W. (2017). Impact of a global temperature rise of 1.5 degrees Celsius on Asia's glaciers. *Nature* 549, 257-260.

Kraaijenbrink, P. D. A., Stigter, E. E., Yao, T., and Immerzeel, W. W. (2020). Climate change decisive for Asia' s snow meltwater supply. *Nat. Clim. Chang. (in Rev.)*

Walter Immerzeel (1975) studeerde milieukunde aan de Universiteit Utrecht. Na zijn studie heeft hij twee jaar in Nepal gewoond en gewerkt bij het International Centre for Integrated Mountain Development in Kathmandu. Hier is zijn passie voor berghydrologie ontstaan. Na deze periode in Nepal is hij gepromoveerd bij de vakgroep fysische geografie aan de Universiteit Utrecht en heeft zich ontwikkeld tot een toonaangevend onderzoeker op het raakvlak van de hydrologie, glaciologie en klimaatverandering in berggebieden. In 2019 is hij benoemd tot hoogleraar 'Mountain water resources, hazards and climate change' bij de faculteit Geowetenschappen. Hij heeft deelgenomen aan een groot aantal veldwerken in de Himalaya en zijn onderzoek verbindt ruimtelijke schalen variërend van een specifieke gletsjer tot het stroomgebied van een grote rivier. Walter Immerzeel heeft grote belangstelling voor het samenbrengen van verschillende disciplines en te leren begrijpen hoe klimaatverandering en menselijke activiteiten de duurzame ontwikkeling van berggebieden beïnvloeden.