

GLETSJERS OPMETEN, WAAROM EN HOE?

Jelle Eyselbergs¹

¹ HoGent, Opleiding Vastgoed: Landmeten, Gent, België

SLEUTELWOORDEN: Gletsjer, klimaatverandering, fotogrammetrie, laserscanning, drones, ablatie, albedo, accumulatie

SAMENVATTING:

Klimaatverandering heeft een grote invloed op onze omgeving. De veranderingen in omvang van gletsjers is hierin een grote indicator. In deze paper wordt geduid op het belang van het opmeten hiervan aangezien het een essentiële klimaatvariabele betreft. Er wordt ook gekeken naar verschillende methodes om dit te doen. Zowel terrestrische manieren van werken, vanop de grond, als met luchtbeelden worden onder de loep genomen. Voor- en nadelen van het werken met staken, laserscanning, drones en ook satellieten worden besproken en met elkaar vergeleken. Terrestrische methodes zijn vaak preciezer en in sommige gevallen zelfs de enige mogelijkheid. Zij vragen echter mankracht en stellen soms een logistiek vraagstuk. Luchtbeelden kunnen sommige onbereikbare plaatsen in beeld brengen en grotere oppervlaktes scannen maar mankeren soms aan flexibiliteit en precisie. We kunnen wel concluderen dat hun technologie verbeterd en zo de inzetbaarheid verhoogt. Naast de grootte van het ijs speelt ook de snelheid waarmee het beweegt een belangrijke rol. Uiteindelijk kunnen we onze ogen niet langer sluiten voor wat klimaatverandering met onze planeet, en gletsjers in het bijzonder, doet. Aangezien geen één gletsjer dezelfde is, is de manier waarop we ze opmeten geval per geval te bekijken en heeft ook technologische evolutie daar een grote invloed op.

1. GLETSJERS

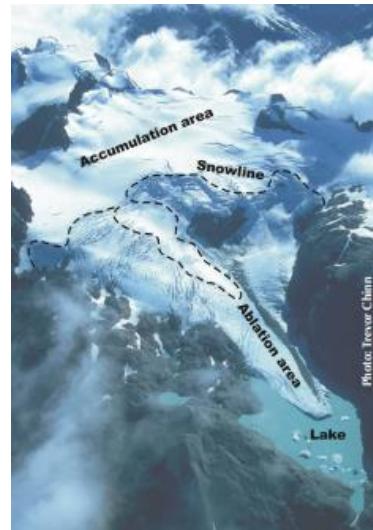
1.1 Wat zijn gletsjers?

Gletsjers zijn enorme ijsmassa's die ontstaan zijn uit sneeuw die niet gesmolten is. Ze bevinden zich, op enkele uitzonderingen na, in hooggebergten en in de poolgebieden. Ze ontstaan niet op één dag of jaar. Sneeuw die valt boven de sneeuwgrens zal, ook tijdens de zomer, niet smelten. De sneeuw zal zich gedurende de jaren die volgen, opstapelen. Door het gewicht dat hierdoor ontstaat wordt de sneeuw omgezet in fijne ijskristallen, ook wel firn genoemd. Hoe meer sneeuw er valt, hoe dieper de laag, hoe hoger de druk. De firn wordt omgezet in ijskristallen. De diepere delen van een gletsjer hebben een typisch blauwe kleur omdat de zuurstof uit de sneeuwvlokken is uitgeperst. Hoe zuiverder het ijs, hoe meer het rood en geel uit het zonlicht wordt opgenomen (Joris, 2024).

De gletsjer neemt op deze manier toe in omvang. Dit wordt accumulatie genoemd. Hij wordt ook al maar zwaarder. Als de druk dan hoog genoeg is wordt het diepst gelegen ijs terug stroperig. Dit in combinatie met de zwaartekracht zorgt er voor dat de gletsjer naar beneden begint te schuiven. De snelheid waarmee de gletsjer schuift is afhankelijk van meerdere factoren. De hellingsgraad van de berg, de vorm van het dal, de grootte van de gletsjer, de oriëntatie en de tijd van het jaar zijn er daar enkele van. Onder de sneeuwlijn gekomen is de gletsjer weer meer vatbaar voor smelten. Al het ijs dat een gletsjer hierdoor verliest noemt men ablatie. Als de accumulatie boven de sneeuwgrens groter is dan de ablatie groeit de gletsjer aan. Als de ablatie daarentegen groter is zien we een gletsjer die krimpt in omvang.

De snelheid waarmee gletsjers bewegen is niet alleen heel verschillend van gletsjer tot gletsjer. Dat kan gaan van enkele meters per jaar tot zelfs kilometers. Het is ook van belang voor de metingen. Snel bewegende gletsjers maken dat sommige metingen maar enkele dagen relevant blijven. Het is dus zeker een factor waarmee rekening gehouden moet worden.

Gletsjers worden ingedeeld op basis van hun ligging en zelfs hun thermische eigenschappen. Een eerste opdeling kan gemaakt worden tussen alpiene gletsjers en continentale. Deze zijn dan weer opgedeeld volgens waar ze zich ten opzichte van de hoofdgletsjer of ijskap bevinden. Er bestaan valleigletsjers, afvoergletsjers, cirques,... (European Space Agency, 2013) Ook thermische verschillen kunnen voor een opdeling zorgen. Er bestaan wel degelijk ook warme gletsjers. Hierbij is bijvoorbeeld de oppervlaktetemperatuur zowel in de accumulatiezone als in de ablatiezone steeds in de buurt van het smelpunt.



Figuur 1: Opbouw van een gletsjer

1.2 Klimaatverandering

Gletsjers zijn zeer gevoelig aan de klimaatverandering. Temperatuursverandering hebben snel hun effect omdat de oppervlaktetemperatuur van de meeste gletsjers in de bergen dicht bij 0°C ligt. Warmere lucht kan er voor zorgen dat de sneeuwgrens naar boven opschuift. Hierdoor verandert de verhouding tussen accumulatie en ablatie en

zal de gletsjer dan ook sneller krimpen dan groeien. Het GCOS, Global Climat Observing System, heeft van de massa van gletsjers dan ook één van zijn 50 essentiële klimaatvariabelen gemaakt (Rabatel et al., 2017). Dit maakt het extra belangrijk om een duurzame manier te vinden om deze op te meten.

Niet elke gletsjer krimpt of groeit even snel. Daarom mag men niet meteen lokale metingen veralgemenen. Idealiter moet worden gezocht naar een totaalbeeld alvorens er op het niveau van klimaat uitspraken over te doen. Zo kan gek genoeg de klimaatverandering sommige gletsjers net, tijdelijk, doen groeien. Door stijgende temperaturen in de luchtlagen kunnen deze namelijk meer vocht bevatten. Dit kan zorgen voor meer sneeuw in de accumulatiezone. Deze groei geldt enkel voor uitzonderingen en dus mogen er geen algemene conclusies aan gekoppeld worden.

Onderzoek toont ons dat gletsjers die in direct contact staan met een gletsjermeer, gevormd door o.a. hun eigen ijswater, sneller smelten dan wanneer het ijs geen direct contact met dit water maakt (Salinger et al., 2008). Ook de aanwezigheid van puin kan een invloed hebben op het smelten. Onderzoek op gletsjers in de Himalaya dat een vergelijking maakt tussen gletsjers met puin, zonder puin en gletsjers met puin en meren kwam tot volgende vaststellingen. Een lichte puinlaag zou het smelten vertragen maar van zodra er ook meren in het verhaal aanwezig zijn verloopt het smeltproces net beduidend sneller (Basnett et al., 2013).

Los van de signaalfunctie die deze ijsreuzen uitvoeren is het smelten van ijs op het land één van de grote oorzaken van de stijging van de zeespiegel. Ook dichter bij de gletsjer zelf wordt de kans op modderstromen, overstromingen en aardverschuiving groter. Vele rivieren vinden ook hun bron in gletsjers. Dat maakt dat er na een teveel aan water, door veel smeltwater, ook een tekort aan water kan komen omdat er niet veel ijs meer over is. Gletsjers zijn op zich ook een enorme drinkwaterreserve. Het is water dat makkelijker gebruikt kan worden voor drinkwater dan zout zeewater.

2. OPMETEN

Er zijn verschillende methoden om de bewegende ijsreuzen die gletsjers zijn op te meten en in kaart te brengen. Ze hebben allemaal hun voor- en nadelen. Enkele daarvan zijn hier bij elkaar gebracht om te zoeken naar de beste methode om dit monitoringsvraagstuk aan te pakken. Ook bij de snelheid waarmee het ijs beweegt wordt even stil gestaan. Deze vergelijking beperkt zich tot berggletsjers binnen de middelste breedtegraden.

2.1 Met behulp van staken

Een eerste methode om te meten is door het plaatsen van staken waarop jaar na jaar de verschillen in accumulatie en ablatie kunnen worden afgemeten. Om deze staken te plaatsen en ze achteraf ook terug te vinden is een vast patroon en een goede nummering van groot belang. Elke gletsjer is anders maar het is meestal interessant om als eerste een centrale as van staken te vormen van beneden aan de voet tot boven in het firngebied. Deze staken krijgen de nummers 10, 20, 30, ... mee. De volgende assen worden loodrecht op de centrale as geplaatst. Voor de nummers

wordt vergelijkbaar met huisnummers gewerkt. De staken links van de centrale as krijgen oneven nummers (11, 13, 15, ...). De staken aan de rechterkant worden even genummerd (12, 14,...). In het firngebied is het ook aangeraden om de metalen staken van een soort voet of platform te voorzien waardoor zij niet weg zakken in de sneeuw en de metingen op deze manier ongeldig worden (Østrem et al., 1966).

Als een gletsjer smelt is dit meteen op de staken af te lezen. Als de staak oorspronkelijk slechts voor 30 cm boven het ijs uitstak en bij een volgende meting bedraagt het verschil 50 cm dan is 20 cm ijs verloren gegaan. Om algemene conclusies over de gletsjer te kunnen trekken moeten echter alle staken op eenzelfde manier worden opgemeten. Als de staak rechtstreeks in het ijs wordt geplaatst telt het verschil in hoogte tussen de top van de staak en het ijssopervlak als referentie. Als er bij de plaatsing echter nog sneeuw op het ijs aanwezig is moet ook de sneeuwdiepte mee bepaald worden. Omdat in de bergen vaak sprake is van schuine vlakken moet ook telkens aan dezelfde kant van de paal, met de richting van de gletsjer mee, gemeten worden.

De accumulatie van de gletsjer is moeilijker meetbaar omdat de verse sneeuw zich vaak onregelmatig over de accumulatiezone heeft verdeeld. Er moet dus op regelmatige basis een sneeuwdieptemeting gebeuren. De makkelijkste metingen liggen benden aan de gletsjertong. De belangrijkste metingen, vanwege een grotere accumulatie liggen boven. Om de sneeuwdiepte te bepalen kan men gebruik maken van een toestel dat met behulp van geluidsgolven op zoek gaat naar een soort "zomerkorst". Dit is een harder laagje dat zich vormt bij warme zomers. Bij koude zomers is dit laagje echter veel onduidelijker. Koude neerslag in de zomer kan de laag nog breken waardoor die niet uniform gevormd wordt.

Los van de hoogte doen deze staken ook dienst om de beweging van de gletsjer te monitoren. Aangezien het ijs beweegt, bewegen de staken mee. Voor een correct beeld moet dus niet alleen de hoogte worden afgelezen maar moet ook de positie worden bepaald, bijvoorbeeld met behulp van een totaalstation. Door de beweging van de staken is deze methode minder interessant op 'snelle' gletsjers.

Dit is een tamelijk arbeidsintensieve manier van meten en door de werkuren die er in kruipen ook niet goedkoop. Bovendien zijn niet alle gletsjers even goed bereikbaar. Dit maakt dat er in 2017 maar zo'n 440 gletsjers wereldwijd op deze manier gemonitord worden. Van de bijna 200 000 gletsjers is dit slechts 0.25%. Voor lange termijn evoluties zoals het klimaat zijn er zelfs maar 40 die voor langer dan 40 jaar continue data hebben (Rabatel et al., 2017).

2.2 Terrestrische fotogrammetrie

Deze methode is iets goedkoper en makkelijker toepasbaar op het terrein. Door ervoor te zorgen dat foto's vanop dezelfde plaats en onder dezelfde hoek worden genomen kan men de evolutie van de gletsjer in kaart brengen. Men kan zelfs de foto's in een animatie steken om zo de evolutie als een film weer te geven. Grondig ingemeten referentiepunten zorgen dat de foto's vanuit de verschillende opstelpunten nog beter met elkaar overlappen. Terrestrische fotogrammetrie wordt wel best

toegepast op de iets kleinere gletsjers. Voor grotere gletsjers wordt vaak overgegaan op luchtfotogrammetrie omdat het aantal verschillende zichtpunten te hoog begint op te lopen.

Door de verschillende foto's met voldoende overlap over elkaar te schuiven kan met de juiste berekeningen, op de computer, een orthofoto verkregen worden. Men mag hierbij niet uit het oog verliezen dat op het terrein ook controlepunten, waarvan men de coördinaten kent, moeten zichtbaar zijn. Anders dan op een gewone simpele foto kan hierop gemeten worden. De parallax, de schijnbare verschuiving van dingen afhankelijk van het standpunt waaruit men kijkt, is namelijk weggewerkt hierdoor. Ook een digitale terreinmodel kan verkregen worden. Als dan de digitale terreinmodellen van verschillende jaren, genomen in dezelfde periode van het jaar, met een GIS-programma¹ op elkaar worden gelegd kunnen verschillen berekend worden. Op die manier kan men dus zien of de gletsjer is afgenumogen of net toegenomen.

2.3 Laserscanning

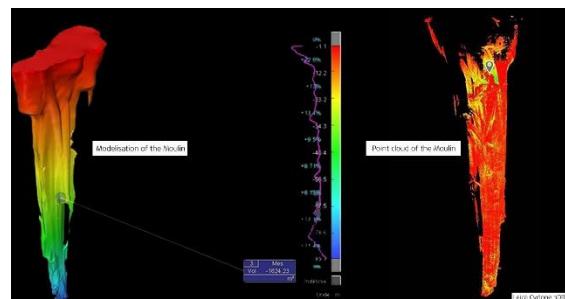
Een andere methode om vanop het terrein de grootte van gletsjers te bepalen is die met behulp van laserscanning. Door de keuze van de juiste laserscanner kan men tot op 2500 m een juistheid van zo'n 25 mm bereiken (Kaufmann, 2003). Echter moet er wel gebruik gemaakt worden van targets. De laserscanner zendt namelijk laserstralen uit en verzamelt dan de gegevens van de gereflecteerde laserstralen die het toestel detecteert. Hiermee worden puntenwolken gecreëerd. Door metingen uit te voeren vanop verschillende plaatsen op de gletsjer wordt die in zijn geheel in beeld gebracht. Om de verkregen puntenwolken mooi aan elkaar te laten aansluiten zijn deze targets van belang. Doordat targets vanop meerdere meetlocaties zichtbaar zijn krijgt het computersysteem dat de puntenwolken samenbrengt een referentie. De targets inmeten met een totaalstation verhoogt de precisie van de metingen. Targets plaatsen, op een duurzame manier, vraagt echter ook meer tijd en geeft soms praktische problemen. Er wordt dan ook onderzoek gedaan naar het gebruik van natuurlijke targets, rotsen e.d., om bij deze opstelling in te zetten.

Een gletsjer van gemiddelde grootte kan op een dag tijd door één persoon worden opgemeten. Door dit ieder jaar te herhalen, liefst twee keer per jaar, kunnen digitale terreinmodellen verkregen worden en vergeleken. De periode waarin deze metingen kunnen plaatsvinden is echter niet oneindig lang. Dit dient bij voorkeur in de laatste maand van het hydrologische jaar te gebeuren, wanneer de gletsjer op zijn kleinst is, en in de winter, als hij op zijn grootst is. Om dan op die tijd alle gletsjers opgemeten te krijgen is niet evident.

Een andere grote troef die laserscanners in handen hebben is hun lichte gewicht en flexibiliteit. Door de klimaatverandering en de daarbij horende stijgende temperaturen in de bergen smelten meer en meer gletsjers weg. Dat ijswater moet ergens naartoe. Op zijn weg naar beneden veroorzaakt het spleten die al maar dieper en breder worden. Voor de steile verticale wanden die

hierdoor ontstaan is vanuit de lucht werken geen optie. Ook voor totaalstations is dit vaak te moeilijk terrein. Niet alleen smeltwater maar ook verzakkingen of veranderingen in de topografie van de berg waardoor het ijs naar beneden schuift kunnen spleten en verticale wanden veroorzaken waar men met andere meetmethoden geen beelden van kan maken.

Produceerden fabriceerden lichtgewicht laserscanners om deze moeilijk bereikbare plaatsen toch in kaart te brengen. Een voorbeeld hiervan is geograaf en glacioloog Luc Moreau van de universiteit van Savoie Mont Blanc CNRS. Zijn werkgebied bevindt zich in de alpen op de Frans-Italiaanse grens. Hij maakt samen met zijn team gebruik van de BLK2GO van Leica om spleten in de gletsjers van het Mont Blancmassief in beeld te brengen. Door eerst een aantal druksenoren aan te brengen en dan het toestel in de schacht te laten zakken kan men een mooi beeld maken van hoe het er vele meters onder het gletsjeroppervlak aan toe gaat. Door deze metingen te herhalen kan er ook aan monitoring gedaan worden (Kadded, z.d.).



Figuur 2: Opmeting van een gletsjerspleet met behulp van Leica Cyclone 3DR door F. Kadded

2.4 UAV

Is de gletsjer te moeilijk bereikbaar door rotsen, spleten of andere obstakels moet er worden overgeschakeld op luchtbekijken. Een eerste manier om deze te verkrijgen is via drones. Drones maken het mogelijke onderzoekerren meteen een pak groter. Het grote voordeel ten opzichte van de satellieten, die een nog groter terrein beslaan, is de hoge resolutie die ze kunnen behouden. Noot: Er zijn ook satellietbeelden met een hogere resolutie maar deze zijn tamelijk duur. Naast resolutie bezit men ook een grotere vrijheid van timing. Daar waar uw satelliet overvliegt, bewolkt of niet, kan je dat met een drone beter sturen. Het kost echter wel op zijn minst één 'dronepiloot'.

Het type drone waarmee men vliegt is bij gletsjermetingen hoog in de bergen van belang. Multirotordrones zijn de meest gebruikte als het gaat om het in kaart brengen van gebieden. Hoe hoger men gaat hoe ijler de lucht. Als deze te ijlig wordt kunnen de propellers van dit type drone moeilijk lift creëren en dus minder makkelijk verticaal opstijgen. Sommige drones hebben de mogelijkheid om grotere rotors te installeren om dit probleem te verhelpen. Een andere oplossing is kijken naar drones met vaste vleugels. Deze werken als vliegtuigen. Zij hebben dan weer meer plaats nodig om van de grond te komen. Naast plaats om op te stijgen en te landen moet ook over een

¹ GIS staat voor geografisch informatiesysteem en wordt gebruikt om verschillende data te beheren en te linken aan een locatie.

vluchtplans nagedacht worden aangezien deze drones ook niet zo kort kunnen draaien als hun broers met propellers (Crosby, 2022).

Een voordeel aan drones is dat men kan kiezen welke camera's men op het toestel monteert. Hierbij dient wel rekening gehouden te worden met welk gewicht de drone in kwestie aan kan en hoe nauwkeurig men wenst te meten. Men kan dus naast klassieke optische beelden ook een warmtecamera installeren. Dit heeft men onder andere gebruikt in een onderzoek op de Zébru-gletsjer in de Italiaanse alpen. De gletsjer, die nu bestaat uit twee stukken, is in 2004 getroffen door een zware rotslawine. Nu kon men vaststellen dat ijs dat onder een dunne puinlaag terecht gekomen was warmer is omdat het donkerder gekleurd is. Is de puinlaag echter dikker dan beschermt deze net het ijs tegen zonnestralen. Dit zijn elementen die bij verdere onderzoeken zeker in het achterhoofd moeten gehouden worden (Rossini et al., 2023).

2.5 Optische satellietbeelden

Doormiddel van satellieten kan men ook aan remote sensing doen. Dit is simpel gezegd een manier om de dingen op te meten zonder ze daadwerkelijk aan te raken. Dit begrip is niet enkel op satellieten van toepassing. De term wordt echter wel vaak gebruikt bij vliegtuig- of satellietgestuurde toepassingen. Er bestaan hierin actieve en passieve manieren van meten. Het verschil zit hem in de manier waarop de gemeten stralen worden opgewekt. Satellieten maken hierbij gebruik van de passieve meting. Ze sturen met andere woorden zelf geen signalen uit om later de weerkaatste stralen terug op te vangen maar ze maken gebruik van natuurlijke straling. Dat kan gaan van lichtstralen uitgezonden door de zon en weerkaatst op het aardoppervlak over ultravioletstraling tot zelfs thermische straling uitgezonden door de te onderzoeken objecten. Uit de frequenties van straling die ook zichtbaar zijn voor het blote oog kan men al veel informatie verkrijgen. Door ook in te zetten op bijvoorbeeld ultraviolet licht kan nog meer informatie verkregen worden over de objecten in kwestie. De thermische straling kan worden gedetecteerd binnen de infraroodstraling en de microgolfstraling. Men kan ook niet alles zien vanuit de ruimte. De frequenties tussen het infrarood en de microgolf, frequenties van $14 \mu\text{m}$ tot 1 cm, worden tegen gehouden door de atmosfeer en kunnen dus niet door satellieten gedetecteerd worden (Remote Sensing Of Snow And Ice, z.d.).

De toename van zowel het aantal satellieten als de kwaliteit van de satellietbeelden is de afgelopen jaren enorm gestegen. Ook is de temporele resolutie, ofwel de frequentie waarmee zo'n satelliet over hetzelfde deel van het aardoppervlak vliegt, verhoogt. Neem daar nog bij dat ook het aantal bits van de sensoren is verhoogt en dat maakt dat ook onderzoek vanuit deze invalshoek interessant wordt. Daar waar men vroeger onderzoek moest verrichten met beelden die minder frequent en van een kleinere oppervlakte konden genomen worden kan men nu zijn onderzoeksterrein vergroten. Door dit herhaaldelijk in kaart brengen kan men veel preciezer de massabalans berekenen.

Voor grotere gletsjers kan men met behulp van middel van hoge resolutie satellietbeelden, zoals door SPOT-5/HRS of ASTER, of radarbeelden, SRTM, digitale hoogtemodellen

opstellen. Voor gletsjers kleiner dan 10 km is echter de verticale precisie van 5 m te groot om een correcte massabalans te berekenen. De nieuwere generatie kunstmanen, zoals de Worldview en de Pléiades, zijn veelbelovend. Hun verticale precisie zou maar 1 m bedragen en zelfs kunnen dalen naar 0,5 m als het gletsjeroppervlak niet te veel reliëf vertoont. Om uit deze al maar beter wordende beelden de gegevens te halen die men nodig heeft zijn er een aantal methoden.

De ELA-methode (Equilibrium Line Altitude) is een zoektocht naar de evenwichtslijn om aan de hand daarvan de massa van de gletsjer te bepalen. Deze lijn valt op het einde van de zomer samen met de sneeuwgrens. Alles hierboven maakt deel uit van de accumulatiezone, alles eronder valt onder de ablatiezone. Dit evenwicht probeert men te vinden doormiddel van optische satellietbeelden met een hoge resolutie. De hoogte van de evenwichtslijn heeft op jaarlijkse schaal een hoge correlatie met de SMB, size mass balance. De lengte, oppervlakte, massa-balans is het meest relevant in termen van klimaat, omdat deze wordt bepaald door de processen van accumulatie en ablatie aan het gletsjeroppervlak, voornamelijk aangestuurd door de atmosferische omstandigheden.

Om deze methode te kunnen gebruiken zijn een aantal dingen nodig. Eerst en vooral twee digitale hoogtemodellen die de hele te bestuderen gletsjer bestrijken, bij de start van het onderzoek en naar het einde toe. Er moet ook minstens één wolkenvrije satellietfoto genomen worden per jaar dat het onderzoek loopt. Deze moet genomen worden op het einde van de zomer of in het droogseizoen in het geval van de buitenste tropen. Als laatste is er ook een schatting nodig van de ijsmassa in de buurt van de evenwichtslijn. Voor die schatting worden ook nog vaak metingen ter plaatse uitgevoerd.

Deze methode werd door Antoine Rabatel, lid van de universiteit Grenoble Alpes, en zijn team toegepast op dertig gletsjers in de Franse Alpen. Door op deze manier de grootte-massa-balans te berekenen op basis van beeldmateriaal gaande van 1983 tot 2014 gaven zij een boost aan het gletsjeronderzoek. Vroeger waren er maar vijf gletsjers in de Franse alpen waarvan men voor langer dan dertig jaar de grootte-massa-balans gedocumenteerd had. Dat vroeg ook de nodige tijd aangezien het ging om metingen ter plaatse. Na het onderzoek van A. Rabatel zijn de gletsjers waarvan onderzoek data beschikbaar is dus verzesvoudigd (Rabatel et al., 2005).

De Albedo-methode is de methode die gebruik maakt van de kwantificering van het albedo over de hele breedte van de gletsjer uit optische satellietbeelden met een gemiddelde resolutie. Albedo is het vermogen van de aarde om elektromagnetische straling, in dit geval licht, terug te kaatsen. Dit is sterk afhankelijk van het soort materiaal dat de bodem bedekt. Verse sneeuw of ijs hebben een veel hoger reflectievermogen dan grond maar ook smeltende sneeuw scoort lager. Verse sneeuw en ijs die zich in de accumulatiezone bevinden kunnen zo dus onderscheiden worden van hun smeltende familie in de ablatiezone. Naarmate het einde van het ablatieseizoen nadert wordt de sneeuwgrens op die manier steeds duidelijker.

Een nadeel van de satelliet-albedomethode is dat het geen bruikbare schatting kan geven van de absolute waarde van de oppervlaktemassa-balans. Dat geldt voor de

zomerbalans en evenzeer voor de jaarbalans. Men moet dus nog ter plaatse metingen uitvoeren om de schijnbare tegenstellingen te verklaren tussen wat men kan afleiden uit de satellietbeelden en de werkelijkheid. Merk op dat de klimaatverandering een proces is van meerdere jaren. Om het effect hiervan op de gletsjer te meten heb je meer aan de variaties in massa-balans dan aan de absolute cijfers. Een voordeel is dan weer dat de methode een minder hoge resolutie vereist dan de ELA-methode.

De sneeuwkaartmethode is een derde manier van kijken naar satellietbeelden. De methode maakt gebruik van het in kaart brengen van de gemiddelde regionale sneeuwbedekking uit optische satellietbeelden met een lage resolutie. Dagelijks worden hiervoor satellietbeelden omgezet in sneeuwkaarten. Hierbij wordt er ook vanuit gegaan dat op basis van gemiddelden de sneeuwgrens kan bepaald worden. De resolutie van de beelden ligt op 1km. Omdat er dagelijks gekeken wordt maakt men ook gebruik van een ‘wolkenmasker’ om er voor te zorgen dat bij veel bewolking de sneeuwgrens niet wordt overschat.

Nadelen heeft het meten vanuit satellieten zeker ook. Wolkenmasker of niet, wolken kunnen toch behoorlijk lastig zijn. Hun effect is ook veel harder merkbaar in de zomer dan in de winter. Als laaghangende wolken niet worden opgemerkt kan het ‘wolkenmasker’ zijn werk niet doen. Het effect is veel groter op een niet-besneeuwde pixel dan op één waar toch al sneeuw lag. Er wordt dus meer sneeuw gezien in de zomer dan er in werkelijkheid is. Ook de andere methodes hebben last van wolken. Voor de ELA-methode valt het al bij al nog mee omdat er meer en meer kunstmanen rond onze aarde vliegen die met de juiste resolutie foto’s trekken. Ook heeft onderzoek aangetoond dat ook foto’s tot een maand voor het einde van het hydrologische jaar kunnen gebruikt worden om de evenwichtslijn, en dus ook de grootte-massa-balans, te bepalen. Dit komt ook omdat op het einde van de zomer de sneeuwgrens en de dikte van het pak niet meer zo sterk variëren.

De albedomethode maakt dan weer gebruik van minder scherpe maar frequentere beelden. Dit in combinatie met een algoritme om de wolken eruit te halen kan toch nog grote fouten geven. Zeker in sterk bewolkte regio’s, waar de bewolking dagen blijft hangen, zoals bijvoorbeeld Nepal in het moessonseizoen, kan dit problemen geven. Ook in Nieuw-Zeelandse bergen waar tot 70% van de beelden bewolking kan bevatten is dit niet optimaal.

De gletsjer moet zich voor deze manieren van meten hoog genoeg bevinden want als in een zeldzaam geval de sneeuwgrens zich boven de bergen bevindt kan er geen deftige balans worden opgemaakt.

Puin is een factor waar de drie werkwijzen ook nog problemen mee ondervinden. Enerzijds zijn de gletsjers waarop ze werden toegepast volledig of relatief puinvrij. Anderzijds heeft de aanwezigheid van puin een niet te onderschatten effect op het smeltproces van de gletsjer. Een behoorlijke grootte-massa-balans kan dus niet worden berekend.

Zowel de sneeuwkaartmethode als de albedomethode worden nog voornamelijk toegepast op gletsjers waarvan ook terrestrische bronnen van data aanwezig zijn. Men doet dit vooral om de metingen verder te kalibreren. Ze

zouden echter ook algemener opgevat worden en op zichzelf gebruikt worden om de grootte-massa-balans te berekenen.

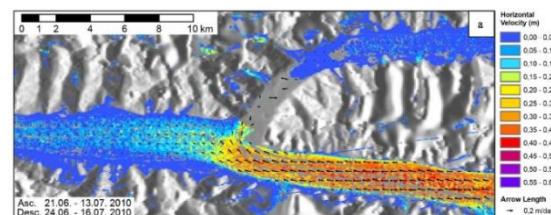
Ondanks dat deze drie manieren om met satellieten te meten ervoor zorgen dat meer gletsjers op langere termijn gemonitord kunnen worden mogen we wel niet over het hoofd zien dat deze gekalibreerd zijn, en goedgekeurd, op de middelste breedtegraden. Voor de gebieden meer naar de polen en dichter bij de evenaar zal de methode moeten worden aangepast.

Omdat elk van deze methoden, al dan niet sezoengebonden, voor- en nadelen heeft is het misschien wel de moeite waard om ze tezamen te onderzoeken, en later ook in te zetten, op dezelfde gletsjer. Zo kan het beste uit elke manier van werken naar boven worden gehaald. De fameuze balans zou in de winter berekend kunnen worden met de sneeuwkaartmethode en in de zomer met de albedomethode. Om alles te controleren kan de ELA-methode dienst doen (Rabatel et al., 2017).

2.6 Radar

Een manier om niet de massa maar de snelheid van het ijs te meten en berekenen is doormiddel van radar. Door middel van de Synthetic Aperture Radar (SAR) kan men beelden schieten zowel overdag als ’s nachts. De weersomstandigheden zijn daarbij ook niet van belang. De radar gaat hierbij op zoek naar zogenaamde kruiscorrelatieparen van afbeeldingen. Dit zijn herkenningspunten, soms op basis van een combinatie van slechts enkele pixels. Ze worden vergeleken op twee beelden die op een verschillend tijdstip genomen zijn. Op basis van de tijd, dagen of maanden, die verstrekken is tussen de twee afbeeldingen kan de snelheid berekend worden. De snelheid waarmee het ijs naar beneden komt heeft uiteraard ook zijn invloed op de massaberekening (Elliades, 2016). De snelheid is ook van belang als men kijkt naar de hoeveelheid smeltwater die een gletsjer jaarlijks produceert. Als twee gletsjers niet van grootte veranderen gedurende jaren en de ene gletsjer sneller naar beneden schuift dan de andere zal de ‘snelle’ gletsjer meer dynamiek vertonen. Er zal sprake zijn van meer accumulatie maar ook van ablatie en er zal dus ook meer smeltwater aan te pas komen.

De beweging van het gletsjeroppervlak is niet overal gelijk. Omdat de snelheid van het ijsoppervlak sterk afhankelijk is van de interne bewegingen en vervormingen in de ijssmassa is het interessant om de kaart, die met pijlen of kleuren de snelheid weergeeft, ook naast een hoogtemodel te leggen. Op deze manier kan naagegaan worden of de verschillen in snelheid al dan niet te wijten zijn aan de topografie van het terrein.



Figuur 3: Oppervlaktesnelheid Inylchek gletsjer, Kyrgyzstan (Sylvia Magnussen, magnus@gfz-potsdam.de, z.d.)

2.7 Andere meetmethodes

Het totaalstation wordt niet apart beschreven maar kan bij vele van de methodes, zeker de terrestrische, als meerwaarde van dienst zijn. Het precies lokaliseren van de grondcontrolepunten en targets verhoogt de nauwkeurigheid van de metingen. Ook om de positie van de staken te bepalen kan een totaalstation dienst doen.

Als men niet de mogelijkheid heeft om de gletsjer zelf op te meten kan gekozen worden om met het smeltwater te werken. Door de grote van gletsjermeren en/of het debiet van rivieren te meten en deze metingen te herhalen in de tijd kan men het waterverlies van een gletsjer documenteren. Men dient hiervoor uiteraard ook rekening te houden met de weersomstandigheden. Nadeel is wel dat op deze manier enkel naar het verlies of ablatie wordt gekeken en niet naar de accumulatie.

3. VERGELIJKING

In dit artikel zijn verschillende methoden aangehaald om de massa en snelheid van gletsjers te meten. Om deze nu te vergelijken kunnen ze opgedeeld worden in twee grote categorieën. We hebben enerzijds de terrestrische metingen, het werk op de grond, en anderzijds de beelden vanuit de lucht geschoten.

Het grondwerk vraagt tijd, personeel en logistiek. Niet elke gletsjer is ook, op een veilige manier, bereikbaar. Dat zijn zeker nadelen die bij het luchtwerk minder spelen. Het is dan weer wel flexibel tegenover weersomstandigheden. Daar waar een drone die flexibiliteit ook nog heeft zijn satellietbeelden veel meer afhankelijk van de bewolking op het moment van overvliegen.

Wat de juistheid van de metingen betreft doen de grondmetingen het nog steeds beter dan de luchtfoto's. Echter wordt het verschil al maar kleiner omdat al maar meer en ook al maar betere camera's en sensoren rond onze planeet komen te draaien. Er moet wel nog aan de algoritmes gewerkt worden waarmee deze beelden verwerkt worden. Het grotere oppervlak dat bereikt kan worden in een kortere tijd dan bij het veldwerk beperkt zich momenteel nog binnen bepaalde breedtegraden en heeft ook nog last van externe factoren als daar zijn puinbelasting.

Ook speciale structuren zoals agronden, kloven en spleten vragen om een terrestrische aanpak.

De kostprijs is uiteraard ook een factor die meespeelt. Bij het werk ter plaatse moet materiaal en mensen betalen. Bij het werk met satellietbeelden moet men beelden kopen. Beelden met een hoge resolutie, vaak nodig om juiste conclusies te kunnen trekken, zijn vrij duur. Als echter de oppervlakte in rekening wordt genomen die men wenst te onderzoeken zal men zien dat, hoe groter men het onderzoeksgebied neemt, hoe kosten- en tijdsefficiënter de satellietbeelden zullen worden.

Ook bij de snelheidsmetingen zijn dezelfde principes van toepassing. Terrestrische metingen kunnen hier vaak ook ter ondersteuning zijn van de uit de lucht verkregen resultaten.

4. CONCLUSIES

Klimaatverandering is een niet te ontkennen fenomeen dat een enorme invloed heeft op de vele verschillende elementen op onze planeet. Gletsjers dragen hierbij een grote signalfactor. De grootte van de meeste van deze ijsreuzen is in de afgelopen decennia afgenomen. De zeespiegel is gestegen. (Dienst Klimaatverandering, z.d.) Het is dan ook heel belangrijk dat men juiste, maar ook efficiënte, manieren vindt om, ten eerste hun grootte, en ten tweede de evolutie daarvan, op te meten.

Gletsjers zelf zijn dan weer heel verschillend. Zij verschillen in grootte, hoogte, breedteligging, oriëntatie, temperatuur en andere factoren. Zelfs de hoeveelheid puin die er op ligt kan een wezenlijk verschil geven. Ook in de snelheid waarmee het ijs naar beneden raast is geen één gletsjer hetzelfde. Dit maakt de uitdaging alleen maar groter.

Dit maakt dan ook dat het antwoord op de vraag, wat nu de beste meetmethode is, heel genuanceerd is. Wetenschap en technologie leggen de bal meer en meer in het kamp van de satellietbeelden om deze kwesties op te lossen maar er zijn nog zoveel uitzonderingen. Net omdat die satellieten nog niet overal aankunnen en net omdat manuele controle soms nog onontbeerlijk is, lijkt een goede combinatie vinden van de klassieke terrestrische meetmethodes en de satelliet gestuurde essentieel.

REFERENTIES

Basnett, S., Kulkarni, A. V., & Bolch, T. (2013). The influence of debris cover and glacial lakes on the recession of glaciers in Sikkim Himalaya, India. *Journal Of Glaciology*, 59(218), 1035–1046. <https://doi.org/10.3189/2013jog12j184> (01/11/2024)

Crosby, A. (2022, 26 april). *Rivers of ice: Using drones to understand glaciers*. GeoNadir. <https://geonadir.com/glacier-mapping-with-drones/> (02/11/2024)

Dienst Klimaatverandering. (z.d.). *IJsdkappen en gletsjers*. Klimaat | Climat. <https://klimaat.be/klimaatverandering/waargenomen-veranderingen/ijsdkappen-en-gletsjers> (24/10/2024)

Euillard, L.D., Eulliades, P.A., Riveros, N.C., Masiokas, M.H., Riuz, L., Pitte, P., Elefante, S., Casu, F., Balbarani, S., (2016) Detection of glaciers displacement timeseries using SAR. Remote Sensing of environment (184), 188-198. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003425716302607?casa_token=suoXmy-jNJcAAAAA:821SC7nK44nXxgf_ouT6N_NwNazjqAQ_C7VhKy9Zf0AQgzMvjif2cDcyH5cIVYGemVs-KCRwrIHsU (24/10/2024)

European Space Agency. (2013, 31 mei). *ESA - Eduspace NL - Opwarming van de aarde - Gletsjers*. https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_Global_NL/SE_M31GJSDNG_0.html (01/11/2024)

Joris. (2024, 5 juli). Wat is een gletsjer? *In de Bergen*. <https://www.indebergen.be/weblog/53241-wat-is-een-gletsjer/> (02/11/2024)

Kadded, F. (z.d.). *Monitoring alpine glaciers and climate change with 3D laser scanning*. <https://leica-geosystems.com>. Geraadpleegd op 1 november 2024, van <https://leica-geosystems.com/case-studies/reality-capture/monitoring-alpine-glaciers-and-climate-change-with-3d-laser-scanning> (24/10/2024)

Kaufmann, V., Bauer, A., Paar, G., (2003) *Terrestrial laser scanning for rock glacier monitoring*. https://www.staff.tugraz.at/viktor.kaufmann/Chapter_011.pdf (03/11/2024)

Paice, C. (2023, 31 januari). *Gletsjers beklimmen in Centraal-Azië (fotoreportage)*. EOS Wetenschap. <https://www.eoswetenschap.eu/natuur-milieu/gletsjers-beklimmen-centraal-azie-fotoreportage> (24/10/2024)

Rabatel, A., Dedieu, J., & Vincent, C. (2005). Using remote-sensing data to determine equilibrium-line altitude and mass-balance time series: validation on three French glaciers, 1994–2002. *Journal Of Glaciology*, 51(175), 539–546. <https://doi.org/10.3189/172756505781829106> <https://leica-geosystems.com/nl-be/case-studies/reality-capture/monitoring-alpine-glaciers-and-climate-change-with-3d-laser-scanning> (01/11/2024)

Rabatel, A., Sirguey, P., Drolon, V., Maisongrande, P., Arnaud, Y., Berthier, E., Davaze, L., Dedieu, J., & Dumont, M. (2017). Annual and Seasonal Glacier-Wide Surface Mass Balance Quantified from Changes in Glacier Surface State: A Review on Existing Methods Using

Optical Satellite Imagery. *Remote Sensing*, 9(5), 507. <https://doi.org/10.3390/rs9050507> (02/11/2024)

Remote Sensing of Snow and Ice. (z.d.). Google Books. https://books.google.be/books?hl=nl&lr=&id=780IKxPcq_pYC&oi=fnd&pg=PA1&ots=d7Gm6RGa54&sig=GdfzZ57vhE3kZNPw6J_mmlIONXAo&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false (02/11/2024)

Rossini, M., Garzonio, R., Panigada, C., Tagliabue, G., Bramati, G., Vezzoli, G., Cogliati, S., Colombo, R., & Di Mauro, B. (2023). Mapping Surface Features of an Alpine Glacier through Multispectral and Thermal Drone Surveys. *Remote Sensing*, 15(13), 3429. <https://doi.org/10.3390/rs15133429>

Salinger, J., Chinn, T., Willsman, A., Fitzharris, B., & NIWA. (2008). Glacier response to climate change. In *Water & Atmosphere* (Vol. 16, Nummer 3). <https://hot-topic.co.nz/wp-content/uploads/2008/09/wa-16-3-glaciers-hi-res.pdf> (24/10/2024)

Sylvia Magnussen, magnus@gfz-potsdam.de. (z.d.). *Glaciers*. <https://www.gfz-potsdam.de/en/section/remote-sensing-and-geoinformatics/topics/radar-remote-sensing/glaciers> (03/11/2024)

Østrem, G., Stanley, A., & DEPARTMENT OF MINES AND TECHNICAL SURVEYS. (1966). *GLACIER MASS BALANCE MEASUREMENTS* [Book]. DEPARTMENT OF MINES AND TECHNICAL SURVEYS. <https://publikasjoner.nve.no/diverse/1966/glaciermassbalancemeasurements1966.pdf> (01/11/2024)