

# EVALUATIE VAN CORRECTIEMETHODEN VOOR DEM'S BIJ HET ANALYSEREN EN MONITOREN VAN VOLUMEVERANDERINGEN VAN GLETSJERS.

Y. Bassez

**SLEUTELWOORDEN:** coreregistratie, gapfilling, gletsjermonitoring, python, luchtfotogrammetrie, DEM, volumeberekening.

## SAMENVATTING

Het analyseren van digitale hoogtemodellen vormt een essentiële basis bij het monitoren van hoogte- en volumeveranderingen in gletsjergebieden, echter kunnen er zich ruimtelijke fouten en datagaten voordoen waardoor de betrouwbaarheid van de analyses beperkt worden. Deze fouten kunnen ontstaan door textuurarme oppervlakten zoals sneeuw of ijs, schaduw en de complexiteit van het terrein. Dit onderzoek onderzoekt in welke mate coreregistratie- en gapfillingmethoden deze fouten kunnen corrigeren en hoe hun effectiviteit varieert met terreincomplexiteit en analysedoel. Er werden drie coreregistratie- en drie gapfillingmethoden onderling vergeleken die elk werden uitgetest op twee projectgebieden in IJsland, namelijk Vestmannaeyjar, een dataset met overwegend stabiel terrein en Eyjafjallajökull, een ruw gletsjergebied met zowel de klassieke afsmelting als volumewinst. De drie coreregistratiemethoden die getest werden zijn vertical shift, least Z-difference en de methode van Nuth & Kääb (2011), de drie gapfillingmethoden die getest werden zijn inverse distance weighting, regional hypsometric interpolation en local hypsometric interpolation. De evaluatie gebeurt aan de hand van foutstatistieken omtrent precisie en nauwkeurigheid, rekentijd, consistentie en de impact op de volumeverschilberekening.

De resultaten tonen aan dat systematische hoogtebiases en uitschieters vooral voorkomen in hellend, ruw en schaduwwijk terrein en dat de methode van Nuth & Kääb (2011) deze fouten over het algemeen het best corrigeert alsook de meest consistente en tijdsefficiënte methode is. Voor gapfilling presteren lokale hypsometrische methoden het best in stabiele en matig complexe zones, terwijl IDW robuuster is voor het behoud van totale volumeschattingen in gebieden met sterke lokale hoogteveranderingen. De studie concludeert dat betrouwbare analyses alleen mogelijk zijn wanneer de keuze van coreregistratie- en gapfillingmethode expliciet wordt afgestemd op het type fouten, terreincondities en het beoogde doel van de analyse.

## INHOUDSTAFEL

1. INLEIDING
2. CONTEXT EN KADER
3. METHODOLOGIE
  - 3.1. Onderzoeksmethode
  - 3.2. Projectgebieden
  - 3.3. Software
  - 3.4. Evaluatiecriteria
4. RESULTATEN ONDERZOEK
  - 4.1. Coreregistratie
  - 4.2. Gapfilling
5. CONCLUSIE, DISCUSSIE EN AANBEVELINGEN
  - 5.1. Conclusie
  - 5.2. Discussie
  - 5.3. Aanbevelingen
6. REFERENTIES

## 1. INLEIDING

Bij het monitoren van gletsjers spelen digitale elevatiemodellen (DEM) vandaag de dag een cruciale rol, door het vergelijken van nieuwe DEM's met voorgaande DEM's van hetzelfde gebied kan men in kaart brengen hoe het gebied zich gedragen heeft over een bepaalde tijdspanne. Echter ondervind men bij het verwerken van de data, afkomstig van luchtfotogrammetrie, dat de DEM's soms ruimtelijke onnauwkeurigheden vertonen zoals verdraaiingen en verschuivingen, alsook lege ruimtes op plekken waar er weinig textuur is zoals schaduw, sneeuw, water, etc. Dit onderzoek is gericht op de oorzaken van deze fouten en het evalueren van verschillende correctie- en analysemethoden om deze fouten te kwantificeren en te corrigeren, met als einddoel een meer nauwkeurige analyse van de veranderingen in het IJslandse landschap met bijzondere aandacht voor het afsmelten en andere veranderingen van gletsjers.

## 2. CONTEXT EN KADER

Dit onderzoek speelt zich af in het kader van het in kaart brengen van het steeds veranderende landschap van IJsland met behulp van luchtfotogrammetrie, met bijzondere aandacht voor het monitoren van veranderingen in gletsjergebieden. Hiervoor wordt er gebruik gemaakt van digitale elevatiemodellen (DEM), door recente DEM's te vergelijken met oudere DEM's van een zelfde gebied is men in staat om de veranderingen in het landschap over een bepaalde tijdspanne, zoals het afsmelten en verschuiven van gletsjerijs, in kaart te brengen. Echter is het zo dat de DEM's die men als output verkrijgt na het verwerken van de luchtfoto's met grondcontrolepunten in verwerkingssoftware, zoals Agisoft Metashape, verschuivingen in x, y en z vertonen alsook verdraaiingen rond de x-, y- en z-as. Deze verschuivingen en verdraaiingen, ook wel biases genaamd kunnen verschillende oorzaken hebben. Bij luchtfotogrammetrie worden de horizontale en verticale biases veroorzaakt door verschillen in referentiesysteem, referentiehoogte en onnauwkeurigheden in georeferentie en navigatie (Nuth & Kääb, 2011). Volgens Nuth & Kääb (2011) volstaat het doorgaans om horizontale en verticale verschuivingen te corrigeren om DEM's correct op elkaar af te stemmen, terwijl volgens Li et al. (2023) ook schaaftouten, rotaties en vervormingen door vibraties zoals turbulentie een rol spelen en gecorrigeerd moeten worden, we moeten wel de nuance maken dat Li et al. (2023) focust op satellietbeelden en het dus de vraag is in hoe verre deze parameters een rol spelen bij de dataverzameling met behulp van vliegtuigen.

Li et al. (2023) bespreekt 2 belangrijke coregistratie methoden: de methode van Nuth & Kääb (2011) en de methode van Rosenholm & Torlegaard (1988) (ook gekend als "least Z-difference methode"). Hun vergelijking toont aan dat beide methoden op een andere manier werken om de biases tussen DEM's te corrigeren. De methode van Nuth & Kääb (2011) corrigeert enkel horizontale en verticale verschuivingen, terwijl de LZD methode ook rotaties en schaaftouten corrigeert. Li et al. (2023) concludeert dat de LZD methode bij satellietbeelden beter presteert aangezien deze meer soorten fouten kan corrigeren, al is de vraag of deze extra parameters een rol spelen bij data verzameld met behulp van vliegtuigen alsook in hoeverre de berekening van deze extra parameters het proces zwaarder maken en vertragen. Naast deze

coregistratietechnieken beschrijft de xDEM-documentatie (xDEM developers, 2024) ook de toepassing van een simpele verticale verschuiving, de zogenaamde Vertical shift methode. Deze methode vertrekt van de veronderstelling dat het hoogteverschil tussen twee DEM's hoofdzakelijk wordt bepaald door een uniforme verticale bias, bijvoorbeeld als gevolg van het gebruik van verschillende hoogtereferenties of datums. In tegenstelling tot uitgebreidere coregistratiemethoden houdt de vertical shift geen rekening met horizontale verschuivingen, rotaties of schaaftouten, maar focust zij uitsluitend op het gelijkzetten van de absolute hoogten van twee datasets (Nuth & Kääb, 2011). De verticale correctie wordt bepaald op basis van de hoogteverschillen tussen overeenkomstige pixels in beide DEM's. Hiervoor wordt doorgaans een globale statistische maat gebruikt, zoals het gemiddelde of de mediaan van deze hoogteverschillen. Volgens Xu et al. (2025) is het beter om gebruik te maken van de mediaan aangezien deze robuuster is en minder wordt beïnvloed door uitschieters dan het gemiddelde.

Een tweede soort fout die kan optreden bij DEM's en dient gecorrigeerd te worden zijn datagaten, ook wel gaps of voids genoemd. Deze gaten worden veroorzaakt doordat de image matching algoritmes van verwerkingssoftware zoals Agisoft Metashape er niet in slagen om textuurarme gebieden te herkennen (Agisoft Metashape User Manual Professional Edition, Version 2.2, 2025). Bij gletsjergebieden komt dit vaak voor door grote, egale sneeuwoppervlakten, schaduwrijke zones door bergen en gletsjerspleten waardoor de oppervlaktetextuur moeilijk zichtbaar wordt, sterk reflecterende ijsoppervlakken en water waar weinig of geen onderscheidende patronen zichtbaar zijn (Lee et al., 2008). Volgens McNabb et al. (2019) is het correct opvullen van deze datagaten essentieel, omdat de manier waarop dit gebeurt een directe invloed heeft op de uiteindelijke berekening van hoogten en volumeveranderingen. In McNabb et al. (2019) wordt er onderzoek gedaan naar de prestaties van 11 verschillende interpolatiemethoden en vergeleken deze met elkaar, het onderzoek toonde aan dat de prestaties sterk verschillen: sommige methoden veroorzaken tot 20% afwijking in berekende volumechanges ten opzichte van het referentie DEM, terwijl andere methoden minder dan 1% fout zouden genereren. Het verschil tussen deze methoden is dus aanzienlijk en kan het eindresultaat van een gletsjeranalyse duidelijk vertekenen wanneer er voor de verkeerde methode voor deze casus wordt gekozen. McNabb et al. (2019) verdeelt de verschillende gapfillingmethodes in 2 categorieën: enerzijds zijn er de "global hypsometric methodes", die uitgaan vanuit een algemeen hoogte- of vormprofiel voor het gehele projectgebied, en anderzijds zijn er de "local hypsometric methodes", die enkel rekening houden met gegevens uit de directe omgeving rond het datagat. Uit hun analyse blijkt dan ook dat de global hypsometric methodes, in de xDEM-documentatie (xDEM developers, 2024) ook wel "regional hypsometric methods" genoemd, slechter presteren, deze methodes onderschatten of overschatten de werkelijke hoogte van de ontbrekende punten in de datagaten aanzienlijk wanneer er lokaal veel variatie is in hellingen en hoogtes ten opzichte van het berekende profiel over het gehele projectgebied, wat in de context van gletsjers en bij uitbreiding het gehele ruwe IJslandse landschap vaak het geval is. De local hypsometric methodes daarentegen zouden veel beter presteren op dit soort terrein aangezien zij enkel

rekening houden met data uit een bepaalde straal rond het datagat, vooral de methode van bilineaire interpolatie van dDEM-waarden, dit zijn de verschilwaarden tussen 2 DEM's, gaf volgens de studie de meest betrouwbare resultaten (McNabb et al., 2019).

Naast deze methodes is er in de literatuur nog een andere methode terug te vinden die vaak gebruikt wordt in GIS en DEM toepassingen, namelijk de Inverse Distance Weighting methode (IDW). Volgens Lu & Wong (2008) is IDW een eenvoudige en eerder lichte methode om datagaten mee op te vullen waarbij het principe wordt toegepast dat punten dicht bij het datagat zwaarder doorwegen dan punten die verder weg gelegen zijn. Echter heeft deze methode een beperking, namelijk: klassieke IDW gebruikt één vaste afstandsparameter voor het hele gebied en houdt daardoor geen rekening met verschillen in puntichtheid of terreinvariatie waardoor deze methode lokaal onnauwkeurig kan zijn. Lu & Wong (2008) stelt een verbeterde IDW methode voor waarbij de afstandsparameter wordt aangepast op basis van de lokale spreiding van punten, dit wil dus zeggen dat zones met meer data een grotere invloed zullen hebben bij de interpolatie dan zones met minder data. Ook de xDEM-documentatie (xDEM developers, 2024) sluit zich hierbij aan, xDEM developers (2024) benadrukt dat gapfilling idealiter gebeurt met lokale methodes in de plaats van globale methodes, bij voorkeur gebaseerd op dDEM-waarden of lokale hoogtecontext, omdat deze methoden het beste aansluiten bij de werkelijke terreinvariatie. Globale interpolatiemethoden worden door xDEM afgeraden vanwege hun gevoeligheid voor systematische fouten (xDEM developers, 2024).

Het zorgvuldig opvullen van datagaten vormt, naast coregistratie, een belangrijke stap in het voorbereiden van DEM's voor betrouwbare analyse in gletsjergebieden. Door de structurele aanwezigheid van textuurarme en schaduwrijke zones in dit soort terrein blijft een weloverwogen keuze van gapfilling-methode noodzakelijk om foutieve interpretaties van gletsjerveranderingen te vermijden. Zowel McNabb et al. (2019), Lu & Wong (2008) en xDEM developers (2024) bevestigen dat er voor nauwkeurige gapfilling in DEM's van gletsjergebieden best gebruik wordt gemaakt van lokale interpolatiemethoden en dat globale interpolatiemethoden risico's op over- en onderschatting van de werkelijke hoogtewaarden met zich meebrengen.

Zelfs na het corrigeren van systematische biases en het opvullen van datagaten blijven DEM's residuele fouten bevatten. Deze fouten ontstaan door verschillende bronnen zoals schaduw, textuurarme zones en complexiteit van het terrein (Li et al., 2018; Hugonnet et al., 2022). Textuurarme gebieden, zoals egale sneeuwvlakten of sterk reflecterende ijsoppervlakken, bemoeilijken het image matching proces van verwerkingssoftware zoals Agisoft Metashape, waardoor datagaten of onnauwkeurige hoogtewaarden ontstaan (Agisoft Metashape User Manual Professional Edition, Version 2.2, 2025; McNabb et al., 2019). Schaduwzones door bergen of gletsjerspleten versterken deze effecten, omdat er volgens McNabb et al. (2019) weinig tot geen onderscheidende patronen beschikbaar zijn voor matching. Volgens Rolstad et al. (2009) en Hugonnet et al. (2022) is er een verband tussen de complexiteit van het terrein en de grootte en spreiding van residuele foutenwaarden. Volgens deze onderzoeken vertonen steile en ruwe gebieden systematisch hogere residuele

afwijkingen dan vlakke of gelijkmatige zones. Fouten in DEM's zijn bovendien ruimtelijk gecorreleerd: kleine afwijkingen op pixelniveau kunnen, wanneer ze zich uitbreiden over grotere oppervlakken, leiden tot aanzienlijke vertekeningen in berekende hoogtes en volumes (Rolstad et al., 2009; Hugonnet et al., 2022).

Uit deze context ontstaat de nood aan een duidelijke evaluatie van correctieworkflows, specifiek toegepast op het IJslandse landschap met bijzondere aandacht voor gletsjergebieden. Hieruit vloeit volgende onderzoeksvraag voort:

Hoe effectief zijn coregistratie- en gapfillingmethoden bij het kwantificeren en corrigeren van fouten in DEM's van gletsjergebieden ten gevolge van textuurarmoede, terreincomplexiteit en schaduw?

De onderzoeksvraag wordt verder gestructureerd in volgende deelvragen:

- 1) Welke soorten fouten treden op ten gevolge van textuurarmoede en schaduw?
- 2) In hoeverre beïnvloedt de complexiteit van het terrein de precisie en nauwkeurigheid van de data?
- 3) Welke coregistratiemethode levert de beste correctie van systematische fouten?
- 4) Hoe betrouwbaar vullen gapfilling-methoden de lege plekken op?

### 3. METHODOLOGIE

#### 3.1 Onderzoeksmethode

Het onderzoek wordt gevoerd volgens een experimentele benadering, waarin verschillende methoden voor coregistratie en gapfilling systematisch worden toegepast op verschillende datasets van verschillende terreintypes, met elk hun eigenschappen en moeilijkheden. Door dezelfde methodes op meerdere datasets toe te passen, kunnen de resultaten met elkaar worden vergeleken om per type dataset de meest geschikte methode te kunnen identificeren.

De methodes worden uitgevoerd aan de hand van python scripts die naar aanleiding van dit experiment geschreven werden, deze scripts zijn gebaseerd op de richtlijnen uit de xDEM documentatie (xDEM developers, 2024) en er werd gebruik gemaakt van het tools.py script dat geschreven werd door Friedrich Knuth ([https://github.com/shipp/history/blob/main/notebooks/tutorials/coregistration/core\\_demo\\_xdem\\_translation.ipynb](https://github.com/shipp/history/blob/main/notebooks/tutorials/coregistration/core_demo_xdem_translation.ipynb)). Op deze manier kunnen de methodes op consistente en reproduceerbare wijze toegepast worden.

Naast het experiment wordt een literatuuronderzoek gevoerd om de resultaten van de experimenten te kunnen interpreteren. Studies over coregistratie (Nuth & Kääb, 2011; Li et al., 2023; Rosenholm & Torlegård, 1988) en gapfilling-methoden (McNabb et al., 2019; Lu & Wong, 2008) bieden referentiekaders en theoretische achtergrond. Deze literatuur helpt bij het interpreteren van de effecten van verschillende methodes en bij het bepalen van de meest geschikte methode per dataset.

### 3.2 Projectgebieden

Om deze experimenten uit te voeren werden drie verschillende projectgebieden geselecteerd, de drie geselecteerde datasets verschillen in terreinkenmerken, textuurarmoede en aanwezigheid van schaduwzones, verder beschik ik over 2 DEM's per dataset, een oudere die als referentie dient en een nieuwere om de methodes effectief op uit te voeren. Door alle methodes op elk van de datasets toe te passen, kan per type terrein worden geëvalueerd welke methode het meest betrouwbaar is. De twee projectgebieden die gebruikt worden voor dit onderzoek zijn:

- 1) Vestmannaeyjar
- 2) Eyjafjallajökull



Figuur 1: Locaties van de projectgebieden

#### 3.2.1 Vestmannaeyjar

Het projectgebied Vestmannaeyjar bestaat uit een groep eilanden voor de IJslandse zuidkust, dit projectgebied heeft een aantal eigenschappen welke het interessant maken om het experiment op uit te voeren. Allereerst betreft het een relatief lichte DEM (+ 11 MB) wat er voor zorgt dat het proces licht blijft waardoor de verwerkingstijd binnen de perken blijft en we bijgevolg snel en efficiënt resultaat krijgen. Het projectgebied bevat verschillende terreintypes die zich dicht bij elkaar voordoen zoals gebergtes, open vlakten, lavavelden en een verstedelijkt gebied, dit laat ons toe om te bekijken hoe de algoritmes hier mee omspringen. Verder blijkt dat der zich veel datagaten voordoen ten gevolge van schaduw alsook door de zee, dit laat ons toe om de gapfilling methodes te testen met als doel de datagaten ten gevolge van schaduw zo correct mogelijk op te vullen zonder de lege pixels in de zee op te vullen. Naast deze DEM beschikken we over 2 referentie DEM's uit 2015 zonder datagaten, de ene referentie DEM is uitgedrukt in geoidale hoogte en de andere in ellipsoïdale hoogte, de originele DEM werd gebouwd op basis van de gemeten ellipsoïdale hoogte van de GCP's en de ellipsoïdale hoogtes van de foto's volgens het navigatiesysteem van het vliegtuig, de foto's werden genomen met een camera van het type UltraCam Eagle M3 met een pixelgrootte van 4  $\mu\text{m}$ , de vlieghoogte bedraagt ongeveer 5800 m.

#### 3.2.2 Eyjafjallajökull

Dit projectgebied omvat een gletsjer in een bergachtig gebied, rond de gletsjer. Hier beschikken we over een lichte DEM (+ 110

MB), afkomstig uit satellietfoto's uit 2024. Hier zijn geen datagaten ter hoogte van het gletsjergebied, echter wordt er hier geopteerd om kunstmatig datagaten te creëren in de DEM ter hoogte van de gletsjer zelf om de gapfilling methodes te testen en daarna af te wegen ten opzichte van het origineel. Naast deze DEM beschikken we over 2 referentie DEM's uit 2010 zonder datagaten, de ene referentie DEM is uitgedrukt in geoidale hoogte en de andere in ellipsoïdale hoogte, de originele DEM werd hier gebouwd op basis van ellipsoïdale hoogte van de camera volgens het navigatiesysteem van de satelliet, aangezien het om satellietbeelden gaat werden er geen GCP's gemeten, de beelden zijn afkomstig van de satelliet Pléiades met een pixelgrootte van 13  $\mu\text{m}$  en een vlieghoogte van 694 km (European Space Agency, 2023).



Figuur 2. Projectgebied Vestmannaeyjar



Figuur 3. Projectgebied Eyjafjallajökull

### 3.3 Software

Bij het uitvoeren van dit onderzoek wordt gebruikgemaakt van verschillende softwarepakketten voor het verwerken, corrigeren en analyseren van de data. Allereerst werden de luchtfoto's met de grondcontrolepunten verwerkt in Agisoft

Metashape 2.3.0 om een georeferentieerde puntenwolk te berekenen met als doel uiteindelijk een DEM van het projectgebied te bekomen. Om de verschillende scripts voor coregistratie, gapfilling en onzekerheidsanalyse te schrijven en uit te voeren werd gebruik gemaakt van Spyder 6 met Python versie 3.10.18, dit omdat de xDEM package op het moment van het uitvoeren van het onderzoek nog niet compatibel is met nieuwere Python versies (xDEM developers, 2024). Om maskers toe te passen en de data te analyseren werd gebruik gemaakt van QGIS 3.44.3.

Volgende packages werden geïnstalleerd om de pythonscripts te runnen, opgedeeld in de packages die nodig zijn om de coregistratie en gapfilling methodes uit te voeren enerzijds en in de packages die nodig zijn om de outputs te genereren en de outputplots te genereren:

### 3.3.1 Packages voor uitvoeren van de methodes

- 1) xdem: hoofdpakage voor DEM coregistratie, gapfilling, hoogteverschillen, etc.
- 2) numpy: voor berekeningen en maskering.
- 3) scipy: voor het vinden van dichtstbijzijnde punten (cKDTree) en het analyseren van rotatieparameters (Rotation).

### 3.3.2 Packages voor visualisatie, plots en output TIF's

- 4) matplotlib: voor het genereren van figuren, plots en histogrammen.
- 5) rasterio: voor het lezen en schrijven van TIF bestanden
- 6) geopandas: voor het maken van vector maskers en CRS-transformaties

## 3.4 Evaluatiecriteria

Bij de evaluatie van de kwaliteit van coregistratie en gapfilling technieken worden er vier statistische getallen berekend die elk informatie geven omtrent de precisie of nauwkeurigheid van de methode. De nauwkeurigheid verwijst naar hoe dicht de hoogtewaarden van de gecoregistreeerde of gevulde pixels bij de referentie DEM liggen. De precisie beschrijft hoe uniform de residuele waarden over het gehele oppervlak zijn (Höhle & Höhle, 2009).

Voor het kwantificeren van de nauwkeurigheid worden de mean residual en de median residual bepaald. De mean residual meet de gemiddelde verticale afwijking van de gecoregistreeerde DEM ten opzichte van de referentie DEM, dus de gemiddelde pixelwaarde van het verschilraster. De median residual geeft de mediaan van alle pixelwaarden weer, de mediaanwaarde geeft een betrouwbaarder beeld van de residuele systematische bias aangezien deze niet wordt beïnvloed door uitschieters. Hoe dichter deze twee waarden bij 0 liggen, hoe nauwkeuriger de uitkomst is (Höhle & Höhle, 2009). Naast het evalueren van de nauwkeurigheid van de verschillende methodes kunnen deze waarden ook gebruikt worden om de nauwkeurigheid van de brondata te evalueren.

Voor het kwantificeren van de precisie worden de standaardafwijking en de "normalized median absolute deviation" (afgekort als nmad) bepaald. De standaardafwijking geeft de spreiding van al de residuele waarden rond het

gemiddelde weer. Een lage standaardafwijking betekent dat de residuele waarden dicht bij elkaar liggen, dus dat de hoogteverschillen consistent verspreid liggen over het terrein wat duidt op een hoge precisie.

$$\sigma(r) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (r_i - \mu(r))^2} \quad (1)$$

waar  $\sigma(r)$  = standaardafwijking van alle residuele waarden  
 $n$  = totaal aantal pixels  
 $r_i$  = residuele waarde van pixel  $i$   
 $\mu(r)$  = gemiddelde residuele waarde over de gehele dataset

De normalized median absolute deviation (nmad) beschrijft net als de standaardafwijking de spreiding van de residuele waarden weer, maar doet dit op een manier die veel minder gevoelig is voor uitschieters dan de standaardafwijking. Aangezien de residuele fouten soms niet normaal verdeeld zijn over het gebied, waardoor uitschieters ontstaan, biedt NMAD een betrouwbaarder beeld van de werkelijke spreiding van de hoogteverschillen omdat deze door (Höhle & Höhle, 2009). De berekening bestaat uit de mediaan van de absolute afwijkingen ten opzichte van de mediaan van de residuele waarden, vermenigvuldigd met een schaalfactor die ervoor zorgt dat NMAD vergelijkbaar wordt met de standaardafwijking indien de foutverdeling wél normaal verdeeld is, deze schaalfactor is een constante waarde die volgens Höhle & Höhle (2019) empirisch werd bekomen. Een lage NMAD betekent dat de meeste residuele waarden dichtbij de mediane fout liggen, wat wijst op een zeer consistente verticale foutverdeling en dus een hoge precisie. Omdat NMAD nauwelijks beïnvloed wordt door extreme residuals, wordt deze maat gezien als de betrouwbaarste indicator voor precisie bij DEM-coregistratie en gapfilling, dit is dus ook de belangrijkste waarde die gebruikt wordt bij het beoordelen van coregistratiemethoden (Höhle & Höhle, 2009).

$$nmad = 1,4826 \times med(|r_i - med(r)|) \quad (2)$$

waar  $nmad$  = normalized median absolute deviation  
 $med(r)$  = mediaanwaarde van alle residuele waarden  
 $r_i$  = residuele waarde van pixel  $i$   
1,4826 = schaalfactor om nmad vergelijkbaar te maken met standaarddeviatie bij normale verdeling

Als een dataset een lage nmad en een hoge standaardafwijking vertoont dan betekent dit dat de meeste residuele waarden normaal verdeeld liggen rond de mediane fout maar dat de dataset uitschieters bevat. Wanneer beide getallen laag zijn en dicht bij elkaar liggen dan kunnen we er van uitgaan dat er weinig of geen uitschieters in de dataset zitten, dus hoe dichter beide getallen bij 0 liggen hoe preciezer de uitkomst na het uitvoeren van de techniek is. Naast het evalueren van de precisie van de uitkomst na coregistratie en gapfilling, geven deze waarden ook een beeld over de precisie van de brondata.

## 4. RESULTATEN ONDERZOEK

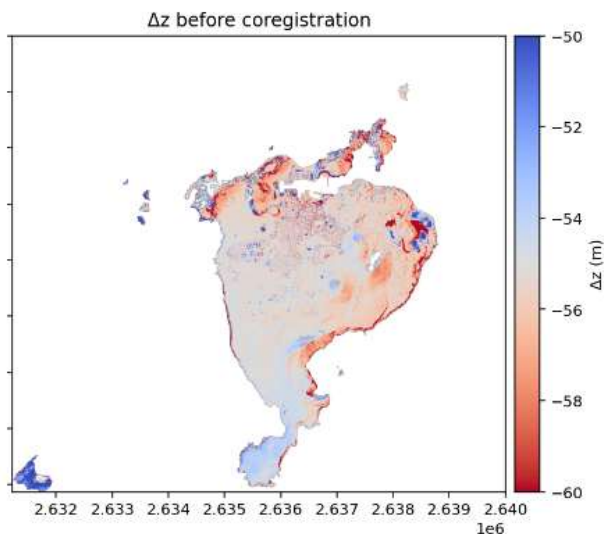
### 4.1 Coregistratie

Voor de beide datasets werden vier coregistratiemethoden geëvalueerd: vertical shift op basis van de mediaan, vertical shift

op basis van het gemiddelde, de methode van Nuth & Kääb (2011) en de Least Z-difference benadering. De prestaties worden beoordeeld op precisie, nauwkeurigheid, duurtijd en stabiliteit. Deze werden zowel toegepast met de referentie DEM uitgedrukt in geoidale hoogte en ellipsoïdale hoogte.

#### 4.1.1 Vestmannaeyjar

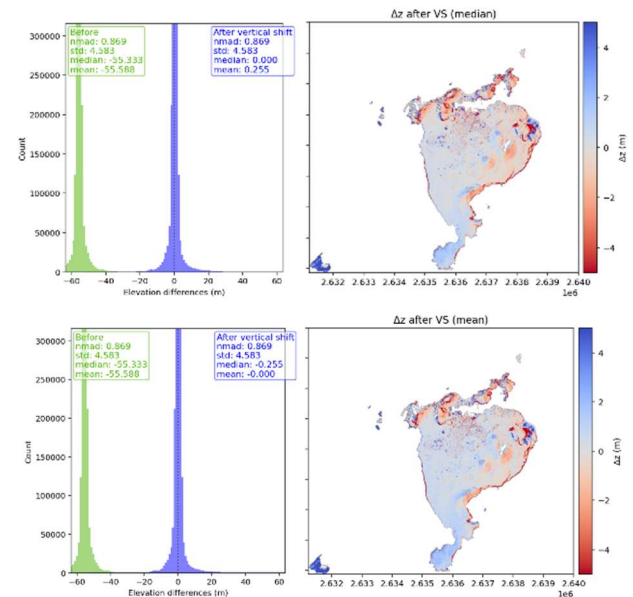
De Vestmannaeyjar dataset vertoont voor coregistratie een groot verschil in mediaan en gemiddelde ten opzichte van de referentie DEM met ellipsoïdale hoogtes, namelijk respectievelijk - 55,333 m en - 55,588 m. In vergelijking met de referentie DEM met geoidale hoogtes bedraagt deze afwijking in mediaan en gemiddelde respectievelijk 9,645 m en 9,388 m. De originele DEM ligt dus gemiddeld gezien 55,588 m lager dan de referentie DEM, wat frappant is aangezien zowel de grondcontrolepunten als de navigatiedata van de luchtfoto's in ellipsoïdale hoogte werden uitgedrukt wat kan wijzen op een constante fout betreffende hoogtereferentie in het proces van data acquisitie of dataverwerking. Als we de nmad en standaardafwijking in rekening nemen zien we dat de nmad 0,869 m bedraagt maar dat de standaarddeviatie 4,583 m bedraagt, dit betekent dat de dataset gezien de nmad over het algemeen precies is maar dat er, gezien de hoge standaardafwijking die veel afwijkt van de nmad, zich verschillende uitschieters voordoen. Op basis van de kleurverdeling in figuur 4 kunnen we afleiden dat deze uitschieters zich vooral voordoen in het hellend terrein.



**Figuur 4.** dDEM Vestmannaeyjar voor coregistratie

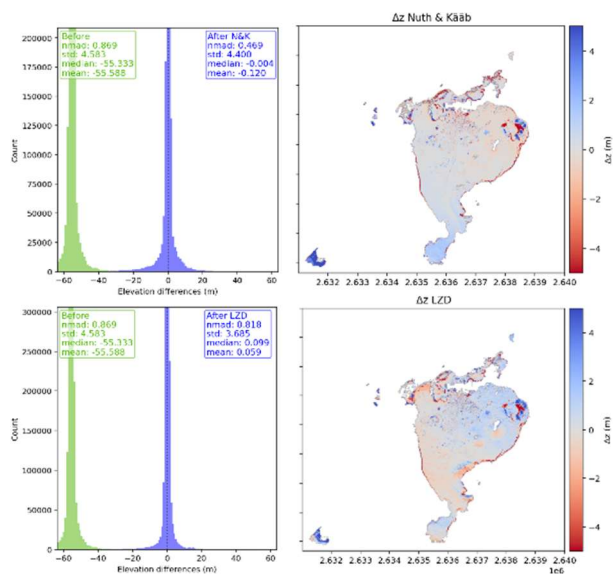
Als we na coregistratie de waardes van de verschillende coregistratiemethoden, ten opzichte van de referentie DEM met ellipsoïdale hoogtes, met elkaar vergelijken dan zien we dat de vertical shift methodes geen verandering brengen in nmad, standaardafwijking en het verschil tussen de mediane en gemiddelde residuele waarde, echter zien we wel dat de gemiddelde of mediane hoogtebias tot 0 wordt herleid, afhankelijk of er gebruik wordt gemaakt van respectievelijk de gemiddelde of mediane hoogtebias tussen de twee DEM's voor het bepalen van de coregistratieparameters, dit is volledig volgens de verwachtingen gezien hier enkel een verticale correctie gebeurt en geen verschil in spreiding van de residuele

waarden veroorzaakt, enkel de nauwkeurigheid van de hoogtebias wordt verbeterd maar de precisie en de grootte en de invloed van de uitschieters blijven ongewijzigd.



**Figuur 5.** Foutverdeling en dDEM na vertical shift met de mediane en gemiddelde residuele waarden

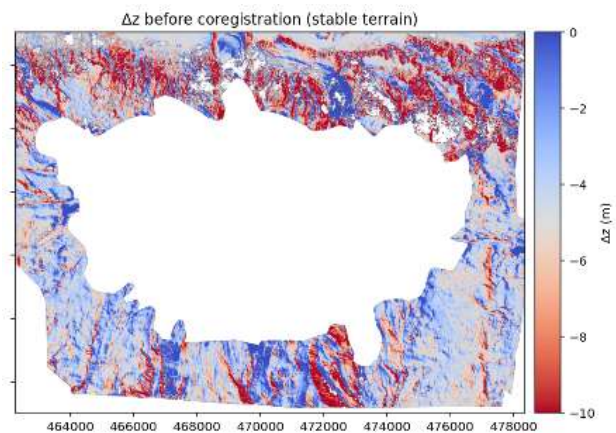
Na het uitvoeren van de methode van Nuth & Kääb (2011) is de nmad verlaagd van 0,869 m naar 0,469 m, wat ongeveer een halvering is en daarmee is deze methode degene die het meest precieze resultaat geeft, zonder rekening te houden met uitschieters. Na het uitvoeren van de LZD methode zien we dat deze met 3,685 m de laagste standaardafwijking vertoont alsook het kleinste verschil tussen de mediane en de gemiddelde residuele waarde, hieruit blijkt dat de uitschieters verkleint werden door de LZD methode en dat de verdeling van de residuele hoogtes symmetrischer wordt. Wanneer we de coregistratiemethoden uitvoeren op basis van de referentie DEM met geoidale hoogtes zien we dat de voor alle methoden de waarden dicht bij deze van de methoden met de referentie DEM met ellipsoïdale hoogte liggen, de uitkomsten liggen dus in dezelfde lijn zonder significante verschillen, ook hier geeft de methode van Nuth & Kääb (2011) de laagste nmad en LZD de laagste standaardafwijking. Als we naar de duurtijd kijken die elke methode nodig had om de berekeningen te maken dan zien we dat de vertical shift methodes en de methode van Nuth & Kääb (2011) het snelste zijn en dat de LZD methode significant trager is dan de andere methodes, dit terwijl we zien dat de rotaties en verschalingen door LZD extreem klein zijn en hier dus verwaarloosbaar zijn. Wanneer we na het 100 keer uitvoeren van de LZD methode en de methode van Nuth & Kääb (2011) de standaardafwijking bepalen op zowel de coregistratiemethoden als de nmad, standaarddeviatie, mediane en gemiddelde residuele waarde, dan zien we dat de methode van Nuth & Kääb (2011) voor alle waarden een significant lagere standaardafwijking vertoont dan de LZD methode, hieruit kan worden opgemaakt dat de methode van Nuth & Kääb (2011) stabiel is dan de LZD methode.



**Figuur 6.** Foutverdeling en dDEM na Nuth & Käab en LZD

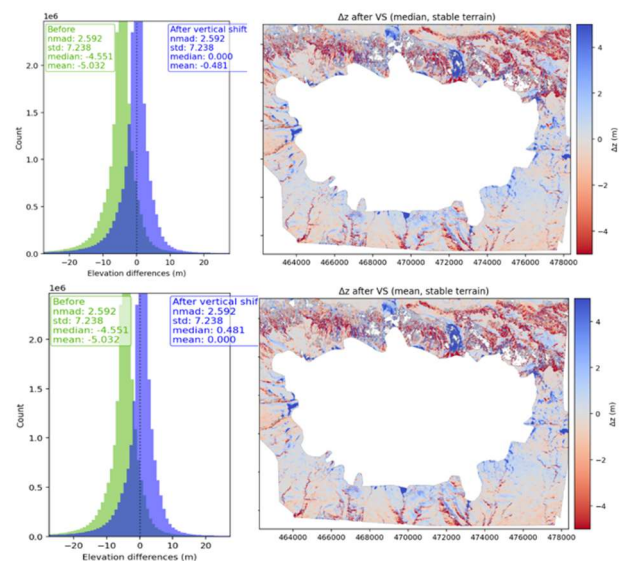
#### 4.1.2 Eyjafjallajökull

De dataset van de Eyjafjallajökull vertoont voor coregistratie een kleinere mediane residuele waarde en gemiddelde residuele waarde in vergelijking met de Vestmannaeyjar dataset, het verschil tussen de mediane en gemiddelde residuele waarde onderling is echter wel groter. De originele DEM ligt gemiddeld gezien 5,032 m lager dan de referentie DEM, dit wijst er op dat er bij de dataverwerking of -acquisitie een gemiddelde hoogtefout van 5,032 m optrad, dit ligt in de lijn der verwachtingen gezien de ground sampling distance van de satellietbeelden 70 cm bedraagt terwijl deze bij de vliegtuigbeelden van Vestmannaeyjar 46 cm bedraagt, dit in combinatie met het feit dat er hier geen grondcontrolepunten geplaatst werden terwijl dit bij Vestmannaeyjar wel gebeurde wat er voor zorgt dat de navigatiegegevens van de stelliet de enige beschikbare hoogtereferentie is. Als we de nmad en standaardafwijking in rekening nemen zien we dat de nmad 2,592 m bedraagt en dat de standaarddeviatie 7,238 m bedraagt, uit deze nmad blijkt dat de precisie veel lager is dan bij de Vestmannaeyjar dataset. De hoge standaarddeviatie en het grote verschil tussen deze standaarddeviatie en de nmad toont aan dat er zich verschillende grote uitschieters voordoen, op basis van de kleurverdeling en kleurintensiteit in figuur 7 kunnen we afleiden dat deze uitschieters over het algemeen groter zijn dan bij Vestmannaeyjar en zich vooral voordoen en groter zijn in het ruwe en rotsachtige terrein, terwijl het meer egale terreinoppervlak aan de zuidoostkant en de westkant minder extreme uitschieters bevat.



**Figuur 7.** dDEM Eyjafjallajökull van het stabiel terrein voor coregistratie

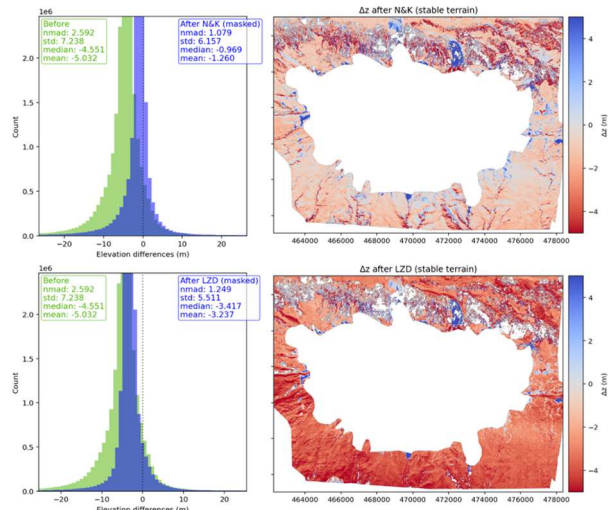
Na het uitvoeren van de coregistratie methodes, op basis van het stabiele terrein, zien we in grote lijnen dezelfde trends als bij de Vestmannaeyjar dataset wat betreft precisie en nauwkeurigheid. De beide methodes van vertical shift geven geen verschil in nmad en standaardafwijking en ook hier blijft het verschil tussen de mediane en de gemiddelde residuele waarde onderling onveranderd ten opzichte van de originele DEM maar de mediane of gemiddelde residuele hoogtebias wordt echter wel naar 0 herleid, afhankelijk of er gebruikt wordt gemaakt van respectievelijk de mediane of gemiddelde hoogtebias om de coregistratie uit te voeren.



**Figuur 8.** Foutverdeling en dDEM na vertical shift met de mediane en gemiddelde residuele waarden (stabiel terrein)

Na het uitvoeren van de methode van Nuth & Käab (2011) blijkt dat de nmad verlaagt is van 2,592 m naar 1,079 m wat net zoals bij de Vestmannaeyjar dataset ongeveer een halvering is, echter is deze waarde nog steeds groter dan bij de Vestmannaeyjar dataset. In figuur 9 kunnen we zien dat er zich nog steeds verschillende uitschieters voordoen in het rotsachtige terrein ten noorden van de gletsjer, welke mogelijks de berekening van de coregistratieparameters beïnvloeden, dit wordt bevestigd

door de hoge standaarddeviatie en het grote verschil tussen mediane en gemiddelde residuele waarde, dewelke weliswaar licht verlaagt werden wat wil zeggen dat de invloed van de uitschieters op de berekeningen licht verkleint is. Na het uitvoeren van de LZD methode zien we dat deze met 5,511 m de laagste standaardafwijking vertoont alsook het kleinste verschil tussen de mediane en de gemiddelde residuele waarde, hieruit blijkt dat de uitschieters en de invloed er van het meest verkleint werden door de LZD methode en dat de verdeling van de residuele hoogtes symmetrischer wordt, echter blijven deze ondanks deze correctie eerder hoog. Ook bij deze dataset zien we dat de vertical shift methodes en de methode van Nuth & Kääb veruit de snelste zijn terwijl ook hier de LZD methode vele malen trager is, ook hier zien we dat de verschalings en rotaties extreem klein zijn en dus overbodige berekeningen veroorzaken. Wanneer we hier zoals bij de Vestmannaeyjar dataset de standaardafwijking op alle waarden na 100 runs bepalen dan zien we dat ook hier de standaardafwijkingen van de methode van Nuth & Kääb (2011) lager liggen dan deze van de LZD methode, echter zien we wel dat deze hier voor beide methodes bij deze dataset hoger liggen dan bij de Vestmannaeyjar dataset.



**Figuur 9.** Foutverdeling en dDEM na Nuth & Kääb en LZD (stabiel terrein)

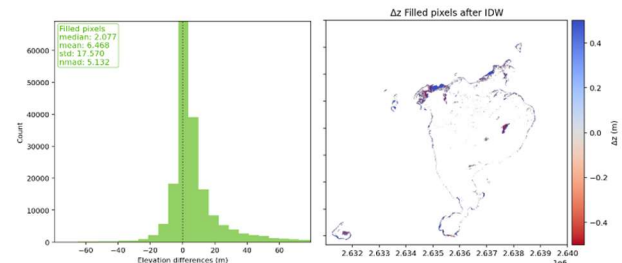
## 4.2 Gapfilling

De prestaties van de drie geteste gapfillingmethoden worden beoordeeld op basis van nauwkeurigheid, precisie en duurtijd. De evaluatie gebeurt aan de hand van de foutstatistieken van de het verschil DEM, berekend als het verschil tussen de gevulde DEM en respectievelijk de referentie DEM voor de Vestmannaeyjar dataset en de originele DEM zonder gaten voor de Eyjafjallajökull dataset. Er wordt voor beide datasets enkel rekening gehouden met de waarden van de gevulde pixels. Voor de Eyjafjallajökull dataset worden de resultaten per gat beschouwd, de resultaten voor alle datagaten samen en het verschil in resultaten van de volumeverschilbepaling.

### 4.2.1 Vestmannaeyjar

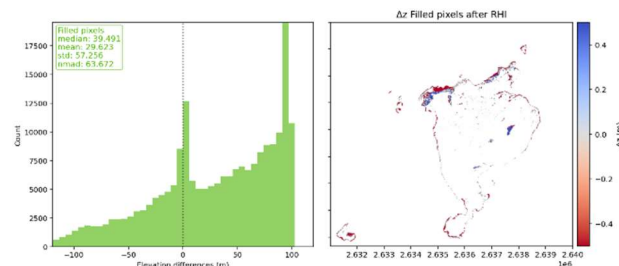
Na het uitvoeren van de IDW methode bedraagt de mediane residuele waarde 2,077 m en de gemiddelde residuele hoogtewaarde 6,468 m. Het grote verschil tussen beide

waarden wijst op een asymmetrische verdeling van de residuele hoogtes. De standaardafwijking van de residuele hoogtewaarden bedraagt 17,570 m en de nmad 5,132 m, wat duidt op een aanzienlijke interne spreiding en een beperkte precisie van de gevulde hoogtewaarden. De rekentijd voor deze methode bedraagt bij deze dataset 1'22" en is hiermee de traagste methode.



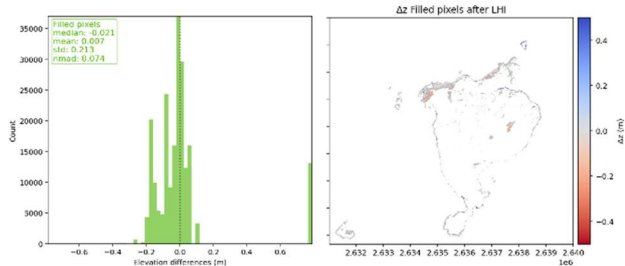
**Figuur 10.** Foutverdeling en dDEM van de gevulde gaten na IDW (Vestmannaeyjar)

Na het uitvoeren van de RHI methode wordt een mediane residuele hoogtewaarde van -39,491 m en een gemiddelde residuele hoogtewaarde van -29,623 m vastgesteld. Deze grote negatieve waarden wijzen op een uitgesproken systematische onderschatting van de hoogte binnen de gevulde gebieden. Het verschil tussen de mediane en gemiddelde residuele hoogtewaarde wijst op een zeer asymmetrische verdeling van de residuele hoogtes en veel grote uitschieters. De standaardafwijking bedraagt 57,256 m en de nmad 63,672 m, wat wijst op een zeer grote spreiding van de residuele waarden, een grote invloed van uitschieters en een zeer lage precisie. De benodigde rekentijd voor deze methode bedraagt 0'11" en is daarmee veruit de snelste methode.



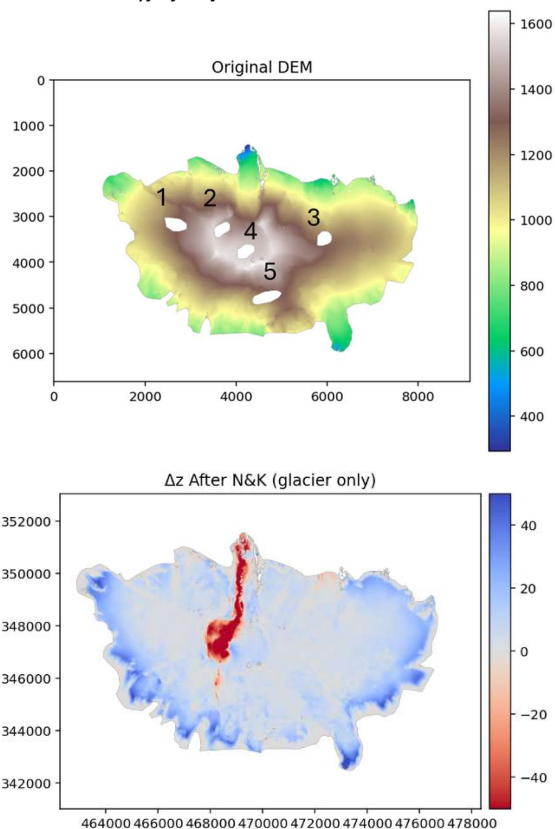
**Figuur 11.** Foutverdeling en dDEM van de gevulde gaten na RHI (Vestmannaeyjar)

Voor de LHI methode zien we een mediane residuele waarde van -0,021 m en een gemiddelde residuele waarde van 0,007 m, deze lage getallen tonen aan dat de uitkomst zeer nauwkeurig is en het kleine verschil tussen deze waarden wijst op een quasi symmetrische verdeling van de residuele waarden. De standaardafwijking van de residuele hoogtes bedraagt 0,213 m en de nmad 0,074 m, dit wijst op een zeer beperkte spreiding van de residuele waarden, weinig invloed van uitschieters en een hoge precisie. De rekentijd voor deze methode bedraagt hier 0'29" en is hiermee trager dan RHI maar aanzienlijk sneller dan IDW.



**Figuur 12.** Foutverdeling en dDEM van de gevulde gaten na LHI (Vestmannaeyjar)

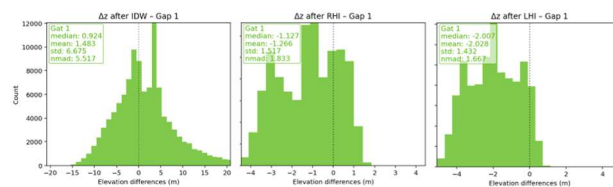
#### 4.2.2 Eyjafjallajökull



**Figuur 13.** Locaties van de datagaten en volumeverlies tussen 2010 en 2024 (Eyjafjallajökull)

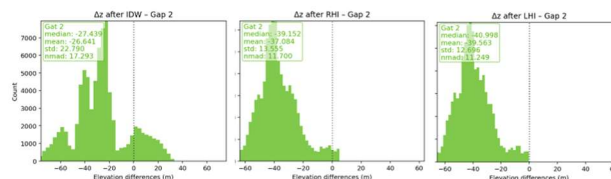
Datagat 1 bevindt zich in relatief stabiel deel van de gletsjer waar het referentie verschilraster, berekend op basis van de originele data zonder gaten, een gelijkmatige ijsafsmelting van slechts 0 m tot 2 m vertoont, de grootte van dit gat bedraagt 112 879 pixels, dus 451 516 m<sup>2</sup>. De ruimtelijke variabiliteit binnen dit gebied is beperkt. Na het uitvoeren van de IDW methode bedraagt de mediane residuele waarde 0,924 m en de gemiddelde residuele waarde 1,483 m. Het verschil tussen beide waarden wijst op een licht asymmetrische verdeling van de residuele hoogtes. De standaardafwijking bedraagt 6,675 m en de nmad 5,517 m, wat duidt op een relatief grote spreiding van de residuele waarden en dus een beperkte precisie binnen dit gat. De RHI methode produceert een mediane residuele waarde van -1,127 m en de gemiddelde residuele waarde bedraagt -1,266 m, het kleine verschil tussen de mediane en gemiddelde residuele waarden wijst op een consistente verticale afwijking over het volledige gat. De standaardafwijking van 1,517 m en de

nmad van 1,833 m zijn significant lager dan bij IDW, dit toont aan dat de spreiding van de residuele waarden compacter is. Na het uitvoeren van de LHI methode zien we een mediane en gemiddelde residuele waarde van respectievelijk -2,007 m en -2,028 m, de vrijwel identieke waarden wijzen op een symmetrische residuele verdeling. De standaardafwijking van 1,432 m en de nmad van 1,667 m zijn de beste waarden die voor dit gat bekomen worden, wat duidt op een kleine spreiding en een hoge precisie van de residuele hoogtewaarden van de gevulde pixels.



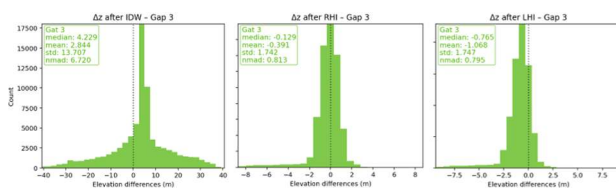
**Figuur 14.** Foutverdeling van de gevulde data voor gap 1 na respectievelijk IDW, RHI en LHI

Datagat 2 bevindt zich in de vulkaankrater op een locatie waar het referentie verschilraster, in tegenstelling tot de rest van de dataset, een sterke aangroei van de gletsjer toont, met hoogteverschillen die onderling sterk variëren van enkele meters tot ongeveer 100 m. De grootte van dit datagat bedraagt 81 171 pixels, dus 324 684 m<sup>2</sup>. Voor IDW bedraagt de mediane residuele waarde -27,439 m en de gemiddelde residuele waarde -26,641 m, de grootte van deze waarden wijzen op een uitgesproken systematische afwijking maar dit zijn voor dit datagat de laagste waarden dus deze methode is ook hier het meest nauwkeurige. De standaardafwijking bedraagt 22,790 m en de nmad 17,293 m, wat duidt op een zeer brede spreiding van de residuele waarden en een lage precisie, de precisie van deze methode is net zoals bij het datagat 1 het laagst. Voor RHI worden een mediane residuele waarde van -39,152 m en een gemiddelde residuele waarde van -37,084 m vastgesteld. Het beperkte verschil tussen beide waarden wijst erop dat de afwijking coherent aanwezig is over het volledige datagat. De standaardafwijking en nmad blijven hoog, wat wijst op een grote spreiding en dus lage precisie. De LHI methode brengt een mediane residuele waarde van -40,998 m en een gemiddelde residuele waarde van -39,563 m. Net zoals bij de RHI methode zien we dat het verschil tussen deze waarden relatief klein is. Deze methode geeft net zoals bij het eerste datagat de laagste standaardafwijking en nmad maar deze blijven alsnog heel hoog met waarden van respectievelijk 12,696 m en 11,249 m, wat duidt op een grote spreiding van de residuele waarden. Als we alle waarden van alle drie de methoden bekijken dan zien we dat deze allemaal zeer hoog zijn, dit betekent dat de precisie en nauwkeurigheid van alle methoden bij dit datagat veel slechter zijn dan bij de andere datagaten.



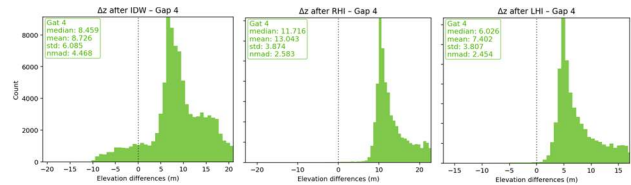
**Figuur 15.** Foutverdeling van de gevulde data voor gap 2 na respectievelijk IDW, RHI en LHI

Datagat 3 is net zoals datagat 1 gelegen in relatief stabiele zone van het gletsjersoppervlak waar het referentie verschilraster, berekend op basis van de originele data zonder gaten, een vrij gelijkmatige ijsafsmelting van enkele meters vertoont en de ruimtelijke variabiliteit beperkt is, het datagat heeft de oppervlakte van 83 007 pixels of 332 028 m<sup>2</sup>. Voor IDW bedraagt de mediane residuele waarde 4,229 m en de gemiddelde residuele waarde 2,844 m. Het verschil tussen beide waarden wijst op een asymmetrische verdeling van de residuele hoogtes. De standaardafwijking bedraagt 13,707 m en de nmad 6,720 m, wat wijst op een grote spreiding en een lage precisie, de IDW methode vertoont hier de hoogste waarden van alle methoden bij dit gat. Na RHI zien we een mediane residuele waarde van -0,129 m en een gemiddelde residuele waarde van -0,391 m, het relatief kleine verschil tussen deze waarden wijst op een eerder kleine systematische afwijking. De standaardafwijking van 1,747 m en nmad van 0,795 m wijzen op een vrij precieze spreiding van de residuele waarden.



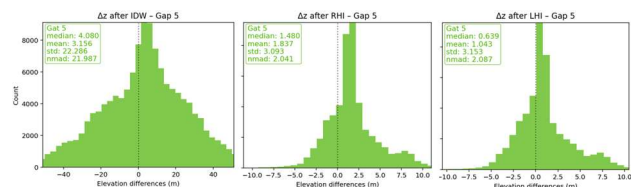
**Figuur 16.** Foutverdeling van de gevulde data voor gap 3 na respectievelijk IDW, RHI en LHI

Datagat 4 bevindt zich in de vulkaankrater bovenop de gletsjer, waar de hellingsoriëntatie afwijkt van deze van het overige gletsjersoppervlak. Het referentie verschilraster, berekend op basis van de originele data zonder gaten, toont in dit gebied een relatief gelijkmatige ijsafsmelting van ongeveer 10 m over quasi het volledige datagat. De grootte van dit datagat bedraagt 94 005 pixels, wat overeenkomt met een oppervlakte van 376 020 m<sup>2</sup>. De ruimtelijke variabiliteit van de hoogteveranderingen is hier matig, maar duidelijk groter dan bij datagat 1 en 3. Na toepassing van de IDW-methode bedraagt de mediane residuele waarde 8,459 m en de gemiddelde residuele waarde 8,726 m. De zeer kleine afwijking tussen beide waarden wijst op een vrij symmetrische verdeling van de residuele hoogtes en een consistente afwijking binnen het datagat. De standaardafwijking bedraagt 6,085 m en de nmad 4,468 m, wat duidt op een matige spreiding van de residuele waarden en een middelmatige precisie. Voor de RHI-methode wordt een mediane residuele waarde van 11,716 m en een gemiddelde residuele waarde van 13,043 m vastgesteld. Het grotere verschil tussen beide waarden wijst op een zekere asymmetrie in de residuele verdeling. De standaardafwijking van 3,874 m en de nmad van 2,583 m zijn duidelijk lager dan bij IDW, wat aangeeft dat de spreiding van de residuele waarden compacter is. De LHI-methode resulteert in een mediane residuele waarde van 6,026 m en een gemiddelde residuele waarde van 7,402 m. Ook hier is het verschil tussen beide waarden beperkt. De standaardafwijking bedraagt 3,807 m en de nmad 2,454 m, wat wijst op een vergelijkbare spreiding en precisie als bij de RHI-methode binnen dit datagat.



**Figuur 17.** Foutverdeling van de gevulde data voor gap 4 na respectievelijk IDW, RHI en LHI

Datagat 5 bevindt zich op de zuidelijke flank van de gletsjer waar het referentie verschilraster, zoals bij gat 1 en 3, een grotendeels gelijkmatige hoogteverandering vertoont die varieert van enkele meters tot lokaal 10 m. In vergelijking met datagat 1 en 3 is de absolute grootte van de hoogteverandering groter, maar de interne variatie binnen het datagat blijft relatief beperkt. De grootte van dit datagat bedraagt 127 840 pixels, wat overeenkomt met een oppervlakte van 511 360 m<sup>2</sup>. Voor de IDW methode bedraagt de mediane residuele waarde 4,080 m en de gemiddelde residuele waarde 3,156 m. Het verschil tussen beide waarden wijst op een asymmetrische verdeling van de residuele hoogtes. De standaardafwijking bedraagt 22,286 m en de nmad 21,987 m, wat duidt op een zeer grote spreiding van de residuele waarden en een lage precisie, ondanks de relatief gelijkmatige hoogteveranderingen in het referentieverschilraster. Na toepassing van de RHI-methode wordt een mediane residuele waarde van 1,480 m en een gemiddelde residuele waarde van 1,837 m vastgesteld. Het verschil tussen beide waarden blijft beperkt, wat wijst op een relatief consistente verticale afwijking. De standaardafwijking bedraagt 3,093 m en de nmad 2,041 m, wat duidt op een beduidend compactere spreiding van de residuele waarden. Voor de LHI-methode bedraagt de mediane residuele waarde 0,639 m en de gemiddelde residuele waarde 1,043 m. De standaardafwijking bedraagt 3,153 m en de nmad 2,087 m. Deze waarden wijzen op een vergelijkbare spreiding en precisie als bij de RHI-methode binnen dit datagat.



**Figuur 18.** Foutverdeling van de gevulde data voor gap 5 na respectievelijk IDW, RHI en LHI

Na toepassing van de IDW methode bedraagt de mediane residuele hoogtewaarde 3,341 m en de gemiddelde residuele hoogtewaarde -1,073 m, hier zien we dat de mediaan de slechtste waarde is voor deze dataset terwijl het gemiddelde de beste waarde is. De standaardafwijking van de residuele hoogtewaarden bedraagt 19,828 m en de nmad 12,038 m, wat de minst precieze resultaten zijn voor deze dataset. Na het uitvoeren van RHI zien we dat de mediane residuele waarde 0,109 m bedraagt en daarmee de beste waarde voor deze dataset bedraagt, de gemiddelde residuele waarde bedraagt -3,457 m, wat slechter is dan IDW maar beter dan LHI. De standaardafwijking bedraagt 16,772 m, wat significant beter is dan IDW maar gevoelig slechter is dan LHI. De nmad bedraagt 1,906 m, dit is het beste resultaat voor deze dataset. Na het uitvoeren van LHI zien we dat de mediane residuele waarde -0,642 m bedraagt en het gemiddelde -5,411 m, welke het

slechtste is voor deze dataset. De standaardafwijking bedraagt 16,419 m en is daarmee de beste voor deze dataset. De nmad is 3,705 m en hiermee veel beter presteert dan IDW maar ook significant slechter dan LHI. Als we de duurtijden van elke methode beschouwen dan zien we dat RHI met 0'40" de snelste methode is, LHI met 1'50" iets langer duurt en IDW is met 3'59" veruit de traagste methode, dit in lijn met de Vestmannaeyjar dataset.

Als we de resultaten van de volumeverschilberekening tussen 2010 en 2024 na elke gapfillingmethode vergelijken met deze van de volumeverschilberekening op basis van het DEM zonder gaten dan zien we dat de totale volumewinst na elke methode onderschat wordt maar dat IDW hier het beste presteert met een onderschatting van 1 408 604,92 m<sup>3</sup> ten opzichte van het originele resultaat, terwijl LHI hier de grootste afwijking geeft met een onderschatting van 11 902 703,90 m<sup>3</sup>, RHI geeft een onderschatting van 11 368 631,26 m<sup>3</sup> van de volumewinst over het gehele gletsjergebied. Dit is in lijn met de resultaten voor datagat 2 die zich op een locatie bevindt met een grote volumewinst, hier zien we de meest nauwkeurige resultaten bij IDW en de minst nauwkeurige bij LHI en RHI. Ook voor het totale volumeverlies geeft IDW met een overschatting van 732 661,47 m<sup>3</sup> het meest waarheidsgetrouwe resultaat. Dit terwijl LHI en RHI een onderschatting van respectievelijk 1 103 411,19 m<sup>3</sup> en 4 470 439,53 m<sup>3</sup> veroorzaken. Het resultaat is dat als we het totale volumeverschil beschouwen, IDW het meest waarheidsgetrouwe resultaat geeft met een volumeverschil per pixel van -24,78 m<sup>3</sup>/px ten opzichte van -24,67 m<sup>3</sup>/px met de originele DEM, voor RHI is dit -25,03 m<sup>3</sup>/px en voor LHI is dit -25,23 m<sup>3</sup>/px.

|                                        | ORIGINEEL    | IDW          | LHI          | RHI          |
|----------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| VOLUMEWINST (M³)                       | 156 060 454  | 154.651.849  | 144.157.750  | 144.691.823  |
| VOLUME VERLIES (M³)                    | -635.836.387 | -636.569.049 | -634.732.976 | -631.365.948 |
| VOLUMEVERSCHIL (M³)                    | -479.775.933 | -481.917.199 | -490.575.226 | -486 674 125 |
| DUURTijd                               | —            | 03'59"       | 01'50"       | 00'40"       |
| VERSCHIL WINST T.O.V. ORIGINEEL (M³)   | —            | -1.408.604   | -11.902.703  | -11.368.631  |
| VERSCHIL VERLIES T.O.V. ORIGINEEL (M³) | —            | 732.661      | -1.103.411   | -4.470.439   |
| VERSCHIL VOLUME T.O.V. ORIGINEEL (M³)  | —            | 2.141.266    | 10.799.292   | 6.898.191    |
| VOLUMEVERSCHIL PER PIXEL (M³/PIXEL)    | -24,67       | -24,78       | -25,23       | -25,03       |

Tabel 1. Resultaten volumeverschilberekening

5. CONCLUSIE, DISCUSSIE EN AANBEVELINGEN

5.1 Conclusie

Na analyse van de data, voor het uitvoeren van coregistratie, zien we dat er datagaten ontstaan op plekken waar er op de luchtfoto's schaduw is, dit is een bevestiging van de stelling van McNabb et al. (2019) wat de invloed van schaduw betreft. Echter zien we in de dataset van Eyjafjallajökull dat er in de gebieden met sneeuw en ijs geen datagaten ontstaan, dit is echter in strijd met de stelling van McNabb et al. (2019) wat de

invloed van sneeuw en ijs betreft. We kunnen hieruit concluderen dat de aanwezigheid van schaduw een oorzaak is van het ontstaan van datagaten tijdens de verwerking van fotogrammetriedata, verder kunne we concluderen dat er de resultaten van dit onderzoek geen bewijs leveren van het ontstaan van datagaten en andere onnauwkeurigheden ten gevolge van sneeuw- en ijsoppervlakten.

Wat de invloed van de complexiteit van het terrein op de precisie en nauwkeurigheid van de data betreft zien we bij de beide datasets dat de precisie en nauwkeurigheid van de data vrij goed zijn op vlak en effen terrein maar deze worden gevoelig slechter wanneer het terrein onregelmatiger en steiler wordt, bij de Eyjafjallajökull dataset zien we dat er zich zeer veel en grote uitschieters voordoen in het ruwe en rotsachtige terrein. De statistieken omtrent precisie en nauwkeurigheid tonen aan dat de data voor Vestmannaeyjar veel preciezer is en dat de residuele waardes significant symmetrischer verdeelt zijn dan de data voor Eyjafjallajökull, welke een veel ruwer terrein heeft dan Vestmannaeyjar. Ook na coregistratie zien we, ondanks het sterk verbeteren van de precisie en nauwkeurigheid, dat er nog steeds duidelijke uitschieters zijn in het steile en ruwe gebied, dit komt tot uiting in relatief hoge standaardafwijkingen en een blijvend verschil tussen de gemiddelde en mediane residuele hoogtewaarden. Dit bevestigt de stellingen van Rolstad et al. (2009) en Hugonnet et al. (2022) dat er een verband is tussen de complexiteit van het terrein en de nauwkeurigheid en precisie van de data, volgens deze onderzoeken vertonen steile en ruwe gebieden systematisch hogere residuele afwijkingen dan vlakke of gelijkmatige zones, dit komt overeen met de resultaten van dit onderzoek.

De resultaten van alle methodes tonen aan dat het gebruik van verschillende hoogtereferentiesystemen tussen de te coregistreren DEM en de referentie DEM geen significante invloed heeft op de prestaties van de coregistratiemethoden. De resultaten van de vertical shift methode bevestigen de verwachtingen uit de literatuur dat deze aanpak enkel geschikt is voor het corrigeren van een uniforme verticale bias. Zowel bij Vestmannaeyjar als bij Eyjafjallajökull wordt de gemiddelde of mediane hoogteafwijking na correctie effectief naar nul herleid, afhankelijk van de gebruikte statistiek. De spreiding van de residuele hoogtewaarden blijft echter ongewijzigd. Deze bevinding sluit nauw aan bij de beschrijving van de vertical shift methode in de xDEM-documentatie (xDEM developers, 2024) en bevestigt dat deze methode enkel geschikt is wanneer andere systematische fouten verwaarloosbaar zijn. De resultaten van dit onderzoek leveren echter geen bewijs voor de stelling van Xu et al. (2025) dat de mediaan robuuster is dan het gemiddelde maar ze tonen wel de verwachte beperkingen aan omtrent de precisie. De methode van Nuth & Kääb (2011) levert voor beide datasets de beste verbetering van de precisie, dit blijkt uit de mate waarin de nmad en standaarddeviatie verkleint worden. ongeveer een halvering ten opzichte van de oorspronkelijke situatie. Deze methode corrigeert naast de uniforme verticale bias ook horizontale verschuivingen en hoogte-afhankelijke fouten, wat resulteert in een duidelijk compactere verdeling van residuele hoogtewaarden. De resultaten bevestigen daarmee de stelling van Nuth & Kääb (2011) dat het corrigeren van horizontale en verticale translatie doorgaans volstaat om luchtfotogrammetrische DEM's betrouwbaar op elkaar af te stemmen. Bovendien blijkt deze methode tijdsefficiënt en stabiel is bij herhaalde toepassing. De

LZD methode vertoont in beide datasets de sterkste reductie van uitschieters en de meest symmetrische verdeling van de residuele hoogtewaarden. Dit bevestigt de theoretische sterkte van deze methode, namelijk het corrigeren van rotaties en schaaflouten, zoals ook beschreven door Li et al. (2023). Tegelijk tonen de resultaten aan dat deze voordelen gepaard gaan met een aanzienlijk hogere rekentijd en een lagere stabiliteit na verschillende runs van de berekende correctieparameters, dit terwijl de reductie van uitschieters slechts licht verbeterd is en de nmad hoger is dan bij de methode van Nuth & Käb (2011). In tegenstelling tot de bevindingen van Li et al. (2023), die aantonen dat LZD bij satellietdata het best presteert, blijkt uit dit onderzoek dat deze methode, met zijn aanzienlijk langere rekentijd, geen duidelijke meerwaarde bieden bij zowel vliegtuig- als satellietdata ten opzichte van de methode van Nuth & Käb (2011). De resultaten van het onderzoek tonen aan dat de methode van Nuth & Käb (2011), in tegenstelling tot de stellingen van Li et al. (2023), hier de beste balans biedt tussen nauwkeurigheid, precisie, efficiëntie en stabiliteit voor DEM's van gletsjergebieden. De vertical shift methode is, in lijn met de verwachtingen volgens de xDEM-documentatie (xDEM developers, 2024), enkel geschikt voor het corrigeren van eenvoudige, uniforme hoogte-offsets, terwijl LZD theoretisch sterk lijkt (Li et al., 2023) maar in dit onderzoek minder sterk blijkt de presteren dan de methode van Nuth & Käb (2011).

Op basis van de resultaten met betrekking tot gapfilling kan worden geconcludeerd dat de effectiviteit van elke gapfillingmethode sterk afhankelijk is van het lokale terreintype, de aard van de hoogteverschillen tussen de DEM's en het doel van de analyse. Bij de gaten op locaties waar de hellingsgraad, -richting en hoogtewaarden redelijk overeenkomen met het algemeen vorm- en hoogteprofiel van het gehele gletsjergebied zien we dat zowel RHI als LHI over het algemeen goed presteren, IDW presteert in deze gebieden significant slechter. Op plekken waar de hellingsgraad en -richting sterk afwijken van het algemeen profiel van het gletsjergebied, zoals dit het geval is bij Vestmannaeyjar (hier bevinden de gaten zich op hellingen in een overwegend vlak terrein) en in de vulkaanrater van de Eyjafjallajökull, zien we dat LHI zowel op vlak van precisie als van nauwkeurigheid veruit de beste resultaten levert, dit terwijl IDW en RHI beide grote fouten genereren. Dit bevestigt de stellingen van McNabb et al. (2019) en xDEM developers (2024), die stellen dat lokale methoden beter presteren op plekken waar de terreinkenmerken variëren, terwijl globale of regionale methoden uitgaan van een algemeen hoogte- en vormprofiel over het gehele gebied. In zones waar er een zeer sterke hoogtevariatie is, zoals plekken met sterke ijsaangroei doorheen de jaren, blijken echter alle geteste gapfillingmethoden te falen om de werkelijke hoogtes te reconstrueren. We zien dat elke methode zeer grote onderschattingen en brede spreidingen vertonen, echter zien we dat IDW de meest nauwkeurige resultaten geeft, hoewel deze nog steeds laag is en samen gaat met een zeer lage precisie. Hoewel de stellingen van McNabb et al. (2019) en de resultaten van de andere zones aantonen dat lokale hypsometrische methoden gemiddeld beter presteren, tonen de resultaten van deze zone aan dat de betrouwbaarheid van gapfillingmethoden afneemt naarmate de lokale terreinvariatie minder representatief is voor de zones waar de datagaten zich bevinden. Samengevat kunnen we stellen dat het onderscheid tussen toepassingsdoelen en terreinvarianties belangrijk is. Voor het publiceren van DEM's en het uitvoeren van pixelgebaseerde hoogteanalyses presteren LHI en, in

mindere mate, RHI het best in stabiele en semi-stabiele terreinen, omdat zij een compacte foutverdeling vertonen en de lokale hoogtecontext respecteren. Voor volumeberekeningen op schaal van de volledige gletsjer zien we dat RHI over het algemeen goed presteert maar wanneer er invloed is van extreme lokale hoogtevariatie, zien we dat IDW nauwkeurige resultaten geeft waardoor de volumeverschilberekening dichter bij de werkelijkheid komt.

## 5.2 Discussie

Wat betreft de conclusies van dit onderzoek omtrent datagaten bij sneeuw- en ijsoppervlakken in gletsjergebieden moet er rekening gehouden worden met het feit dat de gebruikte data slechts een momentopname is van één bepaald moment met één bepaalde camera, het is mogelijk dat de resultaten afwijken naarmate de omstandigheden wijzigen zoals het gebruik van een ander type camera, een andere vlieghoogte, andere weersomstandigheden, een ander tijdstip, etc.. De literatuur die in dit onderzoek gebruikt werd omtrent de gevolgen van textuurarmoede en schaduw zijn gefocust op satellietdata, het is belangrijk om rekening te houden met het feit dat de bevindingen mogelijks minder representatief kunnen zijn bij het gebruik van vliegtuig- of UAV-data.

In dit onderzoek worden de methoden voor coregistratie en gapfilling slechts op twee datasets, met een beperkte variatie aan terreintypes uitgetest, hierdoor is het mogelijk dat de resultaten kunnen afwijken indien er gebruik wordt gemaakt van andere terreintypes, andere resoluties, kleinere of grotere datasets. Ook wordt hier onderzoek gedaan naar een beperkte selectie van methoden terwijl er in de literatuur een uitgebreider gamma aan methoden en verschillende varianten van de onderzochte methoden te vinden. Indien er verder onderzoek zou verricht worden naar dit onderwerp zou het interessant zijn indien er gebruik wordt gemaakt van meerdere datatypes, terreintypes en methoden, zo kan er een breder beeld worden gegeven van de prestaties van elke methode bij verschillende datasets.

Er wordt hier, zoals dit over het algemeen in de literatuur ook gebeurt, telkens slechts één gapfillingmethode toegepast voor de gehele dataset, echter zien we bij de Eyjafjallajökull dataset dat de resultaten voor de datagaten onderling afwijken waardoor het niet mogelijk is om één bepaalde optimale methode aan te duiden voor deze dataset, mogelijks kunnen de resultaten voor gapfilling correcter zijn indien er meerdere methoden in één keer worden toegepast. We zien hier dat voor de volumeverschilberekening de IDW methode als beste uit de test komt maar wanneer we de resultaten per datagat bekijken zien we dat IDW enkel in de zone waar er volumewinst was het best presteert. In dit essay werd geen onderzoek gedaan naar de invloed van deze zone op de resultaten, het is mogelijk dat een andere methode het meest waarheidsgetrouwe volumeverschil weergeeft indien er geen kustmatig gat wordt gemaakt in deze zone of er gebruik wordt gemaakt van een dataset van een ander gletsjergebied waar er zich geen volumewinst voordoet doorheen de jaren.

## 5.3 Aanbevelingen

Op basis van de resultaten en de conclusies kunnen een aantal aanbevelingen worden geformuleerd voor glaciologen en met

uitbreiding alle andere professionals die met DEM's werken en geconfronteerd worden met problemen of onzekerheden omtrent georeferentie datagaten en hoogtereferentie.

Aangezien de waargenomen fouten in DEM's in veel gevallen ontstaan tijdens de dataverzameling, wordt het aanbevolen om, indien mogelijk, bij de planning van de dataverzameling rekening te houden met de weersomstandigheden en zonnestand, dit met het oog op mogelijke schaduwvorming. Daarnaast blijkt uit dit onderzoek dat datagaten in sterke lokale hoogtevariëaties moeilijk betrouwbaar te corrigeren zijn. In dergelijke situaties is het, indien mogelijk en indien nodig met het oog op precisie en nauwkeurigheid, aan te raden om aanvullende dataverzameling uit te voeren. Wat betreft de keuze voor een bepaalde gapfillingmethode is het belangrijk om steeds rekening te houden met het feit dat de betrouwbaarheid van elke methode sterk afhankelijk is van zowel het terreintype als het doel van de data.

Voor de correctie van systematische biases wordt over het algemeen de methode van Nuth & Kääb (2011) aanbevolen als standaardaanpak aangezien deze methode een hoge precisie, korte rekentijd en hoge stabiliteit combineert. De LZD methode kan nuttig zijn wanneer er aanwijzingen zijn dat rotaties en/of verschalings nodig zijn om tot een correct resultaat te komen, maar de hogere rekentijd en lagere stabiliteit maken deze methode minder geschikt als standaardmethode.

## 6. REFERENTIES

- AgiSoft Metashape User Manual Professional Edition, Version 2.2. (2025). [www.agisoft.com](https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_2_2_en.pdf). Retrieved November 21, 2025, from [https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro\\_2\\_2\\_en.pdf](https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_2_2_en.pdf)
- European Space Agency. (2023). *Pléiades*. Earth Online. <https://earth.esa.int/eogateway/missions/pleiades#instrument-s-section>
- Höhle, J., & Höhle, M. (2009). Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(4), 398–406. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.02.003>
- Hugonnet, R., Brun, F., Berthier, E., Dehecq, A., Mannerfelt, E. S., Eckert, N., & Farinotti, D. (2022). Uncertainty Analysis of Digital Elevation Models by Spatial Inference From Stable Terrain. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 15, 6456–6472. <https://doi.org/10.1109/jstars.2022.3188922>
- Lee, C. Y., Jones, S. D., Bellman, C. J., & Buxton, L. (2008). DEM creation of a snow covered surface using digital aerial photography. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci*, 37, B8. [https://isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/8\\_pdf/8\\_WG-VIII-8/05.pdf](https://isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/8_pdf/8_WG-VIII-8/05.pdf)
- Li, T., Hu, Y., Liu, B., Jiang, L., Wang, H., & Shen, X. (2023). Co-registration and residual correction of digital elevation models: a comparative study. *the Cryosphere*, 17(12), 5299–5316. <https://doi.org/10.5194/tc-17-5299-2023>
- Li, C., Wang, Q., Shi, W., & Zhao, S. (2018). Uncertainty modelling and analysis of volume calculations based on a regular grid digital elevation model (DEM). *Computers & Geosciences*, 114, 117–129. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.01.002>
- Lu, G. Y., & Wong, D. W. (2008). An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique. *Computers & Geosciences*, 34(9), 1044–1055. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.07.010>
- McNabb, R., Nuth, C., Kääb, A., & Girod, L. (2019). Sensitivity of glacier volume change estimation to DEM void interpolation. *the Cryosphere*, 13(3), 895–910. <https://doi.org/10.5194/tc-13-895-2019>
- Nuth, C., & Kääb, A. (2011). Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change. *the Cryosphere*, 5(1), 271–290. <https://doi.org/10.5194/tc-5-271-2011>
- Rolstad, C., Haug, T., & Denby, B. (2009). Spatially integrated geodetic glacier mass balance and its uncertainty based on geostatistical analysis: application to the western Svartisen ice cap, Norway. *Journal of Glaciology*, 55(192), 666–680. <https://doi.org/10.3189/002214309789470950>
- Rosenholm, D., & Torlegård, K. (1988). Three-dimensional absolute orientation of stereo models using digital elevation models. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 54(10), 1385–1389.
- xDEM developers. (2024). About xDEM. Read the Docs. [https://xdem.readthedocs.io/en/stable/about\\_xdem.html](https://xdem.readthedocs.io/en/stable/about_xdem.html)
- Xu, X., Wang, W., Ke, L., & Zhou, P. (2025). Weakening of regional contrasts in glacier changes around the Tarim Basin in the early 21st century. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41612-025-01173-y>

