

# 3D-modellering as fasiliteerder by die konteksuitbeelding van topografiese integrasie van petrogliewe

A Lamprecht,<sup>1</sup> L Boardman,<sup>2</sup> T de Klerk,<sup>2</sup> C Yates<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Antieke Teks: Teks, Konteks en Resepsie, Noordwes-Universiteit, Suid-Afrika

<sup>2</sup> Navorsingseenheid vir Omgewingswetenskappe en Bestuur, Noordwes-Universiteit, Suid-Afrika

<sup>3</sup> Mantis Books, Suid-Afrika

**Korresponderende outeur:** Lynette Boardman **E-pos:** [lynette.boardman@gmail.com](mailto:lynette.boardman@gmail.com)

Hoewel dit min in die rotskunsstudieveld toegepas word, word die digitale 3D-skepping van petrogliewe nie meer as 'n uitsonderlike metodologie in hierdie veld beskou nie. Sagteware wat ontwikkel word om meer gebruikersvriendelik te wees, tesame met die imperatief tot die opskerpings van dokumenteerders se digitale kundigheid, het daartoe gelei dat hierdie vorm van opname en verwerking van petrogliefdata<sup>1</sup> 'n algemene standaard geword het. Nietemin val die fokus tans grotendeels op die estetiese waarde van só 'n 3D-model, asook op die uitdaging van hoe om die groot 3D-datastelle doeltreffend te stoor. 'n Kwessie wat tot op hede nog nie veel aandag geniet het nie, is die ondersoek na die diverse navorsingsaspekte wat ontsluit word met die 3D-modellering van petrogliewe. Die doel van hierdie studie is gevolglik om te toon hoe 'n 3D-modelleringspyplyn toegepas kan word om 'n meer holistiese begripvorming te bereik ten opsigte van die kunstenaar se benutting van die topografie van die rots met betrekking tot die konteksuitbeelding van die bepaalde petrogliewe. Die data wat vir dié oogmerk as gevallestudie gebruik word, is twee rotspanele met petrogliewe wat op 'n erfenisterrein in die Schoonspruitvallei, Klerksdorpdistrik, Suid-Afrika, aangetref word. Die proses word begin deur elke paneel in 2D uit te beeld en daarna in kontras te plaas met die navorsingsvermoë wat die 3D-modelle van elkeen bied. Die bevinding van hierdie studie toon gevolglik die mate aan waarin 3D-modellering van rotskuns relevante konteks aan die analiseerder van petrogliewe kan bied op 'n wyse wat nie moontlik is in 'n 2D-verteenvoordinging nie.

**Sleuteltermes:** Rotskuns, petrogliewe, 3D-modellering, argeologie, erfenis, rotstopografie, fotogrammetrie, Schoonspruitvallei, Klerksdorpdistrik.

**3D Modelling as facilitator in the contextual representation of topographical integration of petroglyphs:** Although rarely used in the field of rock art studies, the digital 3D creation of petroglyphs is no longer regarded as an exceptional methodology in this field. Software being developed to be more user-friendly, combined with the imperative enhancement of documenters' digital expertise, has led to this form of recording and processing petroglyph data becoming a common standard. Nevertheless, the current focus largely remains on the aesthetic value of such a 3D model, as well as the challenge of efficiently storing large 3D datasets. An aspect that has not yet received much attention is the exploration of the diverse research opportunities unlocked by the 3D modelling of petroglyphs. The aim of this study is, therefore, to demonstrate how a 3D modelling pipeline can be applied to achieve a more holistic understanding of the artist's utilisation of the rock's topography in relation to the contextual depiction of specific petroglyphs. The data used for this purpose as a case study consists of two rock panels containing petroglyphs located at a heritage site in the Schoonspruit Valley, Klerksdorp District, South Africa. The process starts by depicting each panel in 2D, followed by contrasting it with the research capabilities provided by the 3D models of each panel. The findings of this study consequently illustrate the extent to which 3D modelling of rock art can provide relevant context to the analyst of petroglyphs in ways that are not possible with a 2D representation.

**Keywords:** rock art, petroglyphs, 3D modelling, archaeology, heritage, rock topography, photogrammetry, Klerksdorp District, Schoonspruit Valley.

1. Die woord "petroglief" is afgelei van Griekse woorde wat "rots" en "skryf" beteken.

## Inleiding

Dit is die verantwoordelikheid van argeoloë om deurgaans te streef om die veld van hul dissipline uit te brei deur te verken hoe aspekte van die verlede op 'n nuwe wyse bestudeer kan word, asook op watter wyse die verlede relevansie het vir verdere fasette van die hede wat voorheen nie oorweeg is nie (Mithen, 2001). So is rotskuns 'n studieveld binne argeologie wat nog meer ontvanklik moet wees (en wel is) vir nuwe metodologieë en interpretasies. Die bestaande leemte in kennis rakende die ouderdom, tegnieke en betekenis van hierdie ryk kulturele erfenis maak die ontvanklikheid vir nuwe navorsingsmetodes vir rotskunsnavorsing soveel groter. Waaroor wel sekerheid bestaan, is dat rotskuns reeds millennia lank regoor die wêreld beoefen word, selfs tot op hede. Dit is as middel gebruik om inligting oor te dra van die tye waartydens dit geskep is, 'n getuie van die mens se belewenis van sy/haar omgewing, kulturele oortuigings, betekenisvolle gebeure en natuurlik ook die vermoë van die kunstenaar (Wilcox, 1963).

Hierdie antieke uitdrukkings in die vorm van rotskuns word deur UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) geklassifiseer as 'n tasbare, (grootliks) onbeweeglike kulturele erfenis (Ioannides & Patias, 2023). In teenstelling met die meeste kulturele erfenisse waarvan die objek vir 'n lang tydperk ondergronds "bewaar" bly, is rotskuns se ligging hoofsaaklik bogronds en is dit daarom uitgelewer aan voortdurende antropogeniese en natuurlike elemente wat tot die degenerasie van hierdie kunswerke lei (Plets *et al.*, 2012; Lopez-Menchero Bendicho *et al.*, 2017). Die realiteit hiervan is dat rotskunswerke met verloop van tyd heeltemal tot niet sal gaan en slegs die data wat analogies en digitaal opgeneem en bewaar is, beskikbaar sal wees vir visuele tentoonstelling en bestudering. Om hierdie rede word daar al etlike jare gepoog om oplossings te vind vir die bewaring van hierdie kulturele nalatenskap. Tog het die doel hiervan nie altyd die middele geheilig nie en is die eerste tydperk van "oplossings" gekenmerk deur rotspaneel wat uit hul natuurlike omgewing verwyder is na hoofsaaklik museums en private versamelings. Hierdie optrede het gelei tot die beskadiging van kunswerke tydens die verwydering uit hul natuurlike omgewing, asook die verdere agteruitgang daarvan vanweë die onvoldoende sorg waarmee dit daarna in die nuwe bestemmings gehuisves is (Hollmann & Msimanga, 2008; Henry, 2007; Universiteit van die Witwatersrand, Johannesburg, 2020). Hierna het 'n tydperk gevolg waartydens gepoog is om die rotskunswerke eerder in hul natuurlike omgewing te dokumenteer by wyse van natrektekening, asook vryf- en gietwerk (Plets *et al.*, 2012). Volgens resente rotskunsliteratuur is die meeste rotskunsspesialiste dit vandag eens dat bogenoemde metodes ook 'n negatiewe impak op die behoud van rotskuns het en word dit grootliks vermy. Die groter bekostigbaarheid van digitale dokumenteringstoerusting die afgelope vier dekades, asook opsies om die data digitaal te stoor en aanlyn beskikbaar te stel, het die gewildheid van hierdie nuwe digitale metode as alternatief laat toeneem. Die aantal publikasies hieroor dien as bewys van hierdie nuwe voorkeur (Cerasoni *et al.*, 2022; Horn *et al.*, 2019; Katsianis *et al.*, 2008; Kęsik *et al.*, 2022; Marín-Buzón *et al.*, 2021; McCarthy, 2014; Plets *et al.*, 2012; Sapirstein, 2018; Sharp & Litschi, 2014).

Aangesien argeologie 'n veld is waarin verskeie dissiplines soos geografie, rekenaarprogramering, antropologie, ens geïnkorporeer is, het dit die voortou geneem om die nuwe metodologieë en digitale tegnologie op die proef te stel (Valdez-Tullett & Figueiredo-Persson, 2023). Só het rotskunsnavorsing dan ook nie teruggestaan toe een van hierdie ontwikkelings, naamlik 3D-modellering, die lig in die akademiese wêreld gesien het nie. Die gewildheid hiervan het veral gegroei onder dokumenteerders van spesifiek petrogliewe, want waar piktograwe 2D-uitbeeldings is, is petrogliefskeppings in wese 3D met die skeppingsproses wat reduktief van aard is. Tydens hierdie proses is die buitelyne van die motief uitgekrap om dan lynpetrogliewe te vorm, of harde klippe is gebruik om dit uit te skraap, of het as 'n pons gedien wat met 'n ander voorwerp gehamer is om gekepte petrogliewe te skep (Jalandoni & Tacon, 2018; Malan, 1965). Soms is meer as een metode ook gekombineer en die buitelyne van 'n kunswerk is eers uitgekrap, waarna kepies op die oppervlak binne hierdie omlyning verder uitgekrap is (Willcox, 1984; Parkington *et al.*, 2008).

Saam met die ontwikkeling van 3D-metodologieë hou sagtewarepakkette wat aan die verbruiker ingeboude opsies vir verbeterde visualisering van 'n 3D-model se oppervlak bied, 'n groter voordeel in. Voorbeelde van hierdie opsies sluit onder meer in die Minnaertrefleksiealgoritme en die sogenaamde *Radiance Scaling*-variante in *Meshlab* (Carrero-Pazos *et al.*, 2018; Gil-Docampo *et al.*, 2019).

Een van die oogmerke tydens argeologiese 3D-dokumentering is om soveel moontlik konteks- en (ten minste die onmiddellike) ruimtelike data van die objek vir navorsingsdoeleindes in die fotodatastel in te werk. Hierdie oogmerk impliseer 'n balans tussen die grootte van die area rondom die objek wat bykomend gedokumenteer word en om steeds genoeg op die objek ingefokus te wees om nie die kwaliteit van die fynere besonderhede in die eindproduk te verlaag nie. Toegepas op petrogliewe, moet vooraf bepaal word hoeveel van die omliggende rotstopografie relevant is vir die fotodatastel wat geskep wil word. Die dokumenteerder kan dan foto- of lasergrammetrietegnieke, of beide, op die bepaalde area toepas (Cassen *et al.*, 2014; Peña-Villasenín *et al.*, 2019). Die grootte van die area wat gedokumenteer word, staan in 'n regstreekse verhouding tot die hoeveelheid tyd wat in die veld gespandeer word om dit op te neem, asook die verwerkingstyd en lêergrootte van die verwerkte 3D-model. Gevolglik word dikwels slegs die onmiddellike area waarop die petrogliewe voorkom, gedokumenteer sonder om ag te slaan op die rotstopografie waarop dit geskep is (Martinez, 2001). Só 'n metodiese inkorting het tot gevolg dat die dokumentering van die konteks en onmiddellike ruimte rondom die petroglief(petrogliewe) uitge laat word en dus 'n leemte kan laat in die latere holistiese begripvorming van die geskepte 3D-data.

Dus, om die waarde van 'n 3D-modelleringsspylyn waar die petroglief(petrogliewe) tesame met die relevante omliggende rotstopografie in 3D geskep word te illustreer, is in hierdie studie van terrestriële fotogrammetrie en sagtewarepakkette wat gratis en oopbron is, gebruik gemaak. Hoewel lasergrammetrie ook 'n algemene 3D-dokumenteringstegniek vir petrogliewe is

(Alexander *et al.*, 2015; Wojcicki *et al.*, 2022), is op 'n fotogrammetriemetodiek besluit. Die redes sluit in (1) die kosteaspek daarvan en (2) die uitvoerbaarheid van die beoogde opname. Met slegs 'n kamera wat rondgedra en opgestel moet word, in teenstelling met 'n skandeerder, rekenaar en kragtoevoer wat met die gebruik van lasergrammetrie in die veld nodig is, is die proses vergemaklik en kostedoeltreffend gehou. In verskeie vergelykende studies is ook bevind dat fotogrammetrie beter resultate in die dokumentering van komplekse geometrieë lewer (Peña-Villasenin *et al.*, 2019; Gil-Docampo *et al.*, 2019). Pena-Villasenin *et al.* (2019) sê:

...with an extremely simple photogrammetry technique that is accessible to everyone and that has great performance in terms of execution and cost, results were obtained that improve on those obtained with terrestrial laser scanning for the documentation of a petroglyph with complex geometry.

Vir die doel van hierdie studie is twee rotspanele met petrogliewe wat op 'n erfenisterrein in die Schoonspruitvallei in die Klerksdorpdistrik in Suid-Afrika aangetref word, geïdentifiseer om as gevallestudie te dien. Die keuse van die rotspanele is gemaak na aanleiding van die afwyking in die patroonmatigheid van die data-analise, in die sin dat hierdie twee rotspanele addisionele rotstopografiese eienskappe getoon het wat van die "normale" patroonmatigheid verskil het. Die waarde van die resultate wat verkry is, is bepaal op grond van die addisionele navorsingsaspekte wat ontsluit word met betrekking tot begripsvorming van die kunstenaar se moontlike oogmerk met die skep van die betrokke petrogliewe.

## Agtergrond van studie

Die betrokke gevallestudieterrein is 'n verklaarde graad II-provinsiale erfenisterrein, geleë noord van Klerksdorp, in die Noordwes-provinsie van Suid-Afrika. Die petrogliewe op die terrein is verspreid oor 'n gebied van ongeveer 70 000 m<sup>2</sup>, waarvan die grootste korpus gevind word op 'n heuwel met die hoogste punt wat nagenoeg 20 m bo die omliggende vlaktes uitstaan. Die rotskunswerke hier bestaan uitsluitlik uit petrogliewe, beide in lyn- en gekepte vorm (Boardman, 2022), wat waarskynlik deur die Khoi-San- inheemse volkere geskep is (Ouzman, 2001). 'n Aantal petrogliewe is duidelik met die blote oog sigbaar, terwyl die oorgrote meerderheid slegs waargeneem kan word as die vroegoggend- of laatmiddagson teen 'n lae hoek daaroor skyn. Die soek, vind en identifisering van die petrogliewe is 'n langsame en duur proses wat daarom groterdeels slegs moontlik is binne die tyd van hoër sigbaarheid, van ongeveer 'n halfuur ná sonsopkoms tot en met 11:00, en dan net voor sonsondergang. Daarbenewens is rotspanele ook bedek met jare se plantreste en natuurlike plantegroei soos doringstruik, veldgras en diere- en voëluitwerpsels.

### **In-persoon-identifisering van petrogliewe met relevante rotstopografie**

Die eerste stap van die navorsingsproses is die identifisering van relevante rotspanele (Figuur 1 en 3). Alhoewel verskeie panele met petrogliewe op die terrein geïdentifiseer is met rotstopografie wat moontlik relevant kan wees tot navorsers se holistiese

begripsvorming van die kunstenaar se oogmerk, is daar vir hierdie studie twee panele gekies waar hulle in hul skeppings op 'n eiesoortige manier van die topografie van die betrokke rotse gebruik gemaak het.

### **Paneel 1**

Met die eerste oogopslag lyk dit of die volledig gekepte petroglief op hierdie paneel slegs 'n alleenstaande eland is wat digby 'n natuurlike holte in die rots geskep is (Figuur 1).

Met verdere fisiese visuele bestudering het die moontlikheid ontstaan van 'n hipotese waar die kunstenaar doelbewus beoog het om die eland uit te beeld in 'n posisie wat hy by die "watergat" water drink, veral siende dat die holte met water sou vul wanneer dit reën (Figuur 2). In die San-kultuur is 'n watergat as 'n "poort" na die spirituele wêreld geag (Lewis-Williams *et al.*, 2000), terwyl die elandbul se konnotasie met water en die bonatuurlike maak en/of beheer van reën 'n algemene verskynsel in dié kultuur se rotskunswerke is (Stewart & Challis, 2023). Die hoeveelheid water wat dit neem om die holte te vul alvorens dit aan die onderkant ten opsigte van die oriëntasie van Figuur 2 begin uitloop, is ongeveer 650 ml.

### **Paneel 2**

Opmerklik van hierdie rots in Paneel 2 is dat, hoewel daar ruimtelik verskeie opsies rondom die natuurlike holte in die rots beskikbaar was om die eland te skep, die uitbeelding wat uit gekepte buitelyne bestaan, spesifiek binne die holte gemaak is (Figuur 3).

Met oorweging van die moontlike hipoteses rondom die San-kultuur se assosiering van die eland met water/reën, is daar besluit om die holte met water te vul (Figuur 4). Die holte se volume was nagenoeg 200 ml water alvorens dit begin uitvloei het, eers met die eland se stert langs (regs op die foto) en toe verder af met die natuurlike kontoere van die rots saam tot waar dit op die grond uitloop.

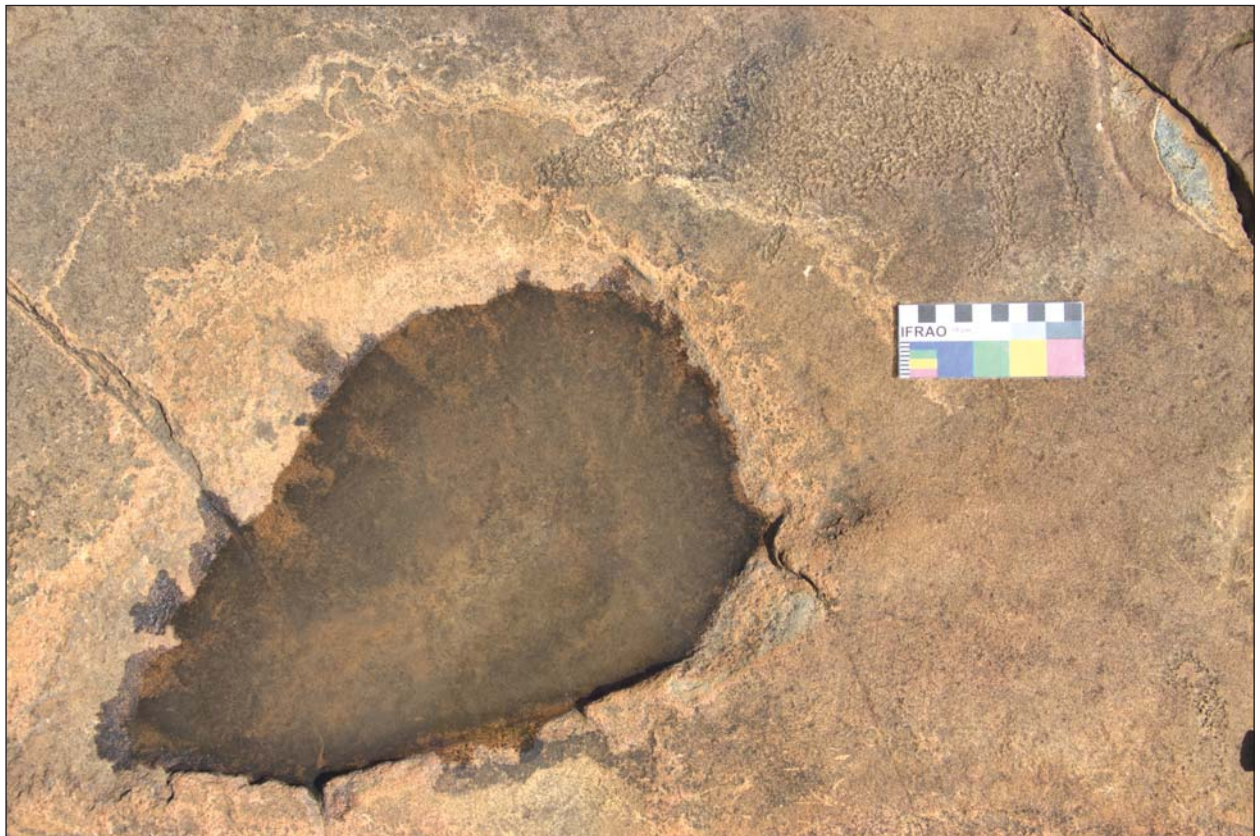
In die San-kultuur is een van die mites met betrekking tot die eland dat die eerste eland in 'n watergat geskep is en ook daar geslaap het (Lewis-Williams, 2015). Die eland sou dan deur heuning en water wat in 'n holte in 'n klip gemeng is om hom te voer, uit sy slaapplek gelok word (Bleek, 1924). Tydens transdansen van die San word die "reëndier", wat onder meer 'n elandbul kan wees, denkbeeldig in 'n watergat gevang en weggelei na die plek waar reën benodig word, waar dit dan geslag word (Orpen, 1874; Lewis-Williams, 1981; Lewis-Williams & Pearce, 2004).

Sou die panele in Figuur 1 en 3 nie persoonlik besoek en bestudeer gewees het nie, is dit onwaarskynlik dat 'n persoon slegs uit die 2D-foto's 'n hipotese sou kon vorm dat die rotstopografie moontlik deel van die kunstenaar se uitbeeldingsoogmerk kon uitmaak.

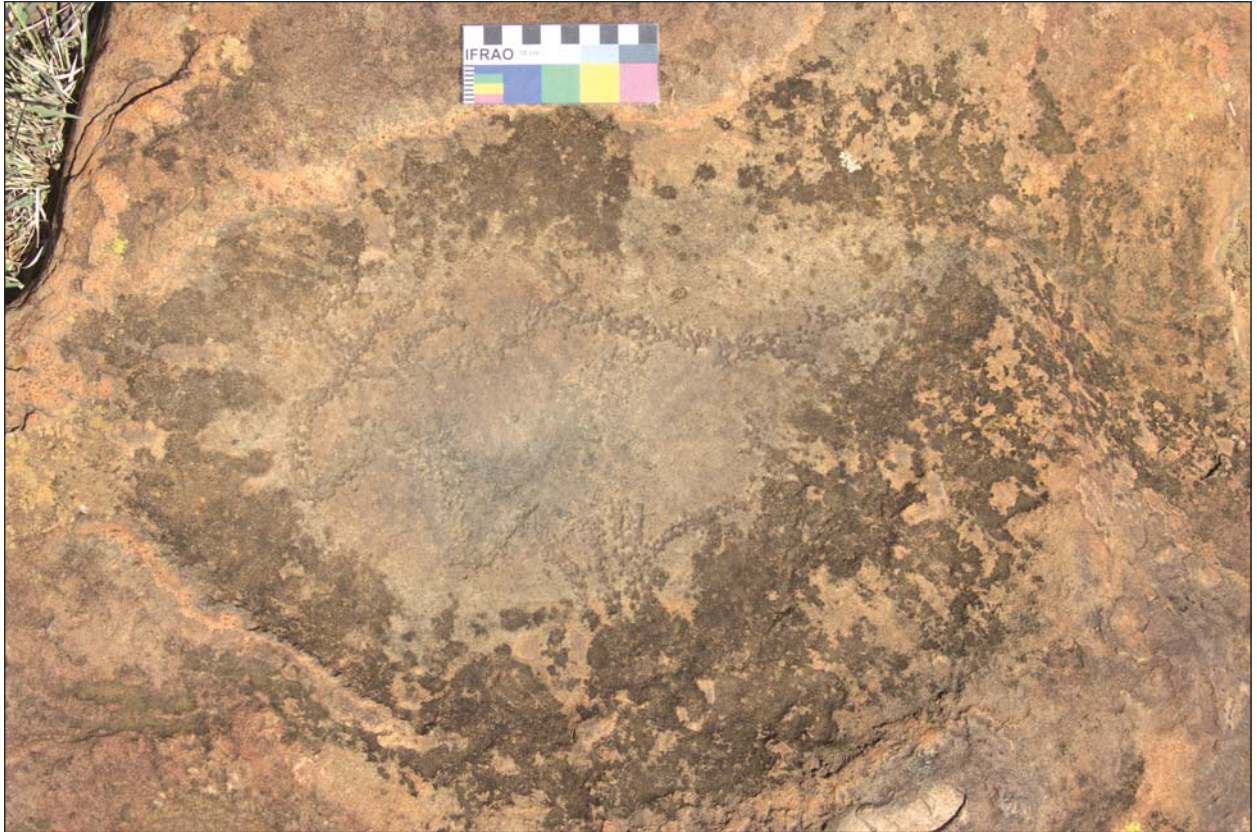
Hoewel data-insameling en navorsing steeds aktief op die rotskunterrein deur die outeurs van hierdie artikel gedoen word (Boardman *et al.*, 2024), het die betrokke studie se



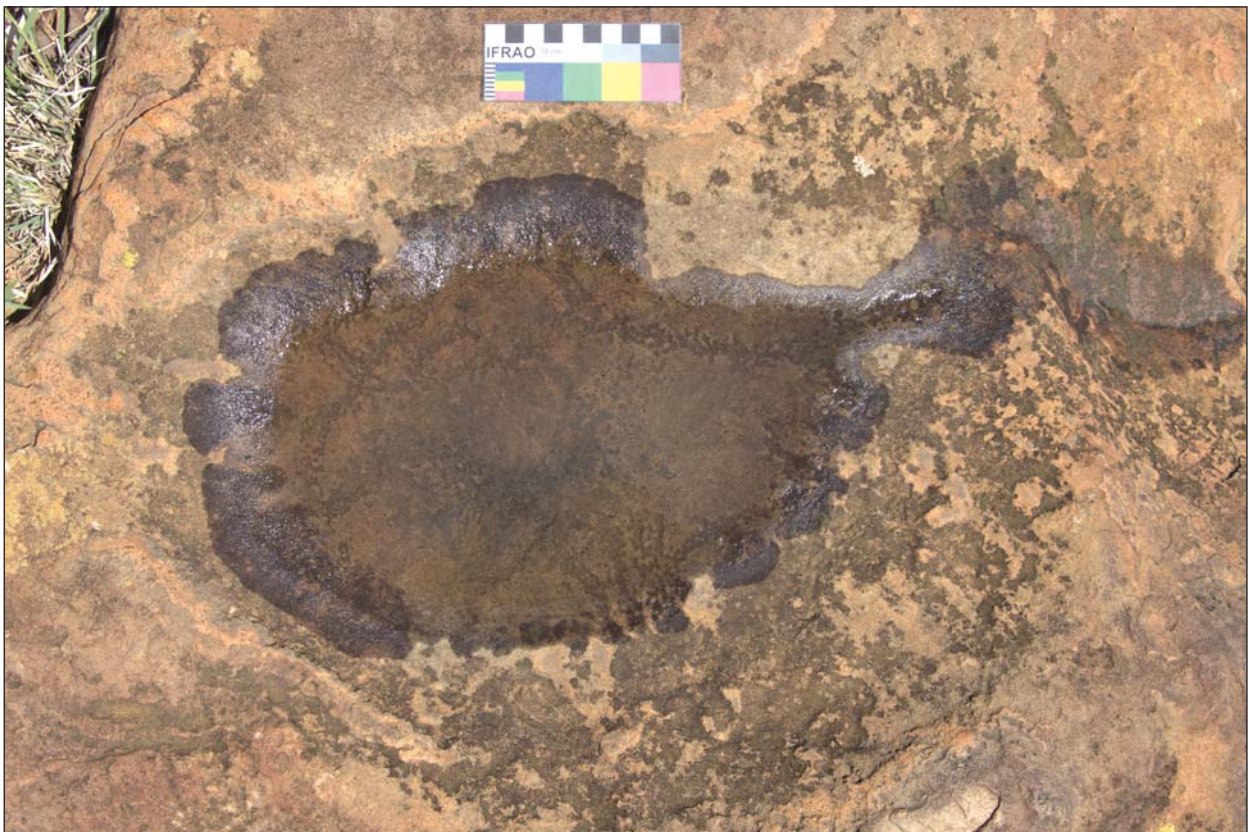
**Figuur 1:** Paneel 1 met 'n eland-uitbeelding regs bo van die natuurlike holte in die rotsoppervlak



**Figuur 2:** Paneel 1 – Die natuurlike holte gevul met water



**Figuur 3:** Paneel 2 – 'n Petroglief van 'n eland geskep in 'n natuurlik holte in die rotsoppervlak



**Figuur 4:** Paneel 2 – Die holte met die petroglief van die eland, gevul met water

3D-modelleringspylyn (soos uiteengesit in Figuur 5) 'n onderdeel uitgemaak van 'n spesifieke projek wat geloods is met die oogmerk om die petrogliewe op die terrein volledig te dokumenteer en 3D-modelle daarvan te skep vir bewarings- en navorsingsdoeleindes.

## Metodologie

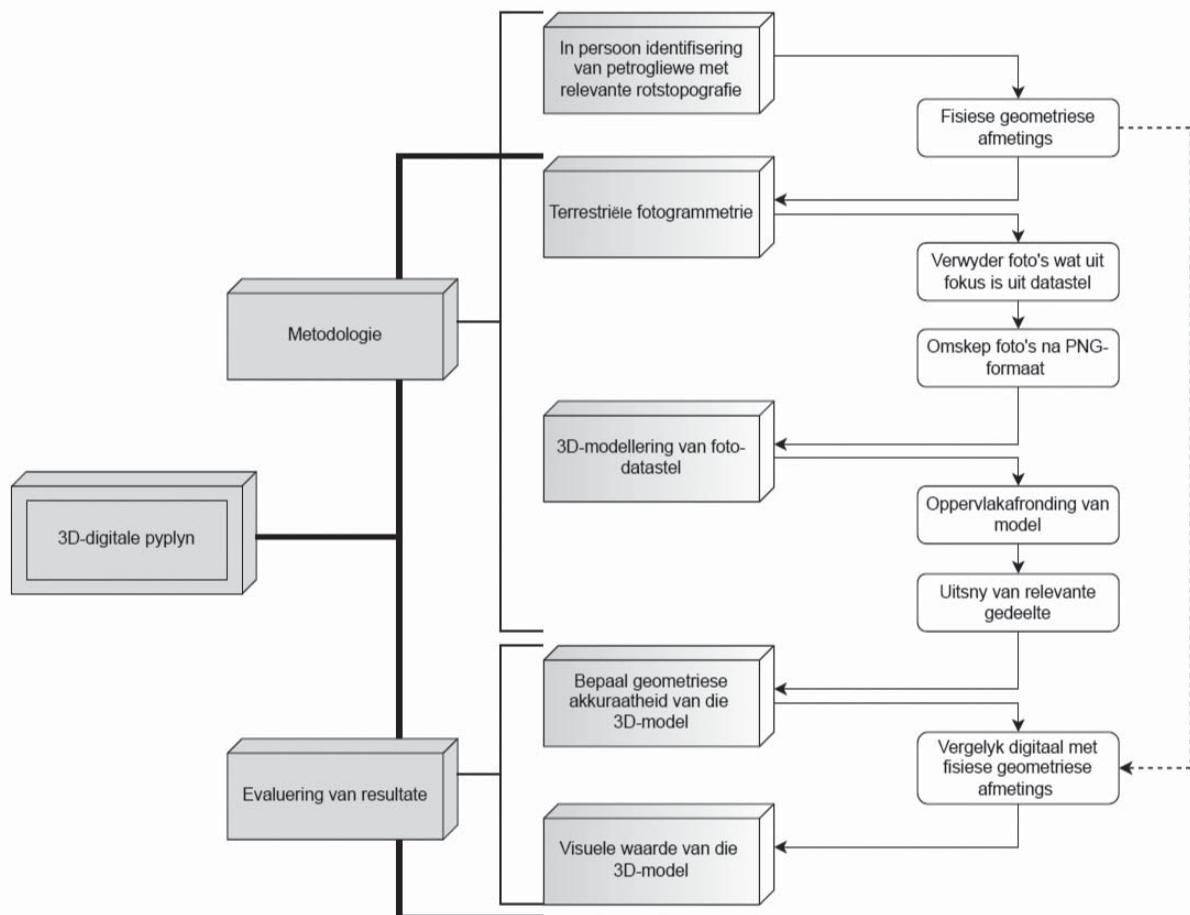
Nadat die relevante rotspanele gekies is, is met die eerste stap in die 3D-modelleringspylyn begin, naamlik terrestriële fotogrammetrie (TF).

### Terrestriële fotogrammetrie

Vir TF is 'n draagbare DELR-kamera (digitale enkellensrefleks-kamera), die Nikon EOS 90D met 'n EF 18-135 IS USM-lens, gebruik. Die beginsel waarvolgens hierdie dokumenteringstegniek uitgevoer is, is reeds in besonderhede in verkeie publikasies beskryf (Boardman, 2022; Lesvignes *et al.*, 2019; George *et al.*, 2017). Iets spesifiek daarvan wat op hierdie studie van toepassing is, is dat die stellings van die sluiterspoed (tydsmeting van hoeveel lig deur die sluiterspoed deurgelaat word), f-stop (grootte van die lensopening) en ISO (ligsensitiwiteit van die sensor), oorgelaat is aan die kamera se sagteware om by wyse van algoritmes die beste verhouding tussen die verstellings te bepaal. Hoewel die petrogliewe in die reël meer sigbaar is in die vroeë oggend- of laatmiddagson, kon daar in hierdie geval egter ook nie gedurende hierdie bepaalde tydgleuwe foto's

geneem word nie. Die rede hiervoor was dat die lae hoek van die sonlig nie net skaduwees van nabygeleë plantegroei oor die panele gewerp het nie, maar ook dat die ongelike rotstopografie tot skaduwees oor gedeeltes van die panele gelei het. Dus kon fotogrammetrie slegs plaasvind in die tydgleuf tussen laatoggend en vroegmiddag.

Voorts moes die TF ook twee maal op beide panele toegepas word om data van die gewenste kwaliteit te verkry. Met die uitvoer van die eerste TF op Paneel 1 het die wind deurgaans takkies en los gras in die water in die holte gewaai. Met die beweging van die water wat deur die wind teweeggebring is, het die takkies en gras daarin deurgaans van posisie verander. Om optimale resultate met fotogrammetrie te verkry, is dit belangrik dat die objek wat gefotografeer word gedurende die proses in 'n stilstande posisie moet wees. Die kamera is die bewegende objek, wat ook nie nodig is om op 'n driepootstaander monteer te word nie. Die rede hiervoor is dat die montering vir elke foto te lank sal neem met inagnome van die hoeveelheid foto's wat per paneel geneem word; en ook dat dit nie moontlik is om so 'n staander op baie lae grade bo die grondoppervlak op te stel nie (wat nodig is met die uitvoering van TF in 'n natuurlike omgewing). Verder is die fotogrammetriesagteware wat die verwerking van die fotodata hanteer sô ontwikkel dat dit matige distorsie in die foto's kan hanteer sodat dit nie 'n nadelige uitwerking op die eindproduk het nie.



Figuur 5: 3D-modelleringspylyn van die studie

Met die terugkeer na die terrein vir 'n tweede fotosessie, was dit 'n windstil dag en kon 70 foto's suksesvol geneem word. Met Paneel 2 is 'n "toets-TF" eers gedoen om die resultate te bestudeer alvorens 'n volledige TF-proses uitgevoer is. Só 'n "toets-TF" behels 'n kleiner hoeveelheid foto's wat geneem word vanuit verskillende hoeke en hoogtes. Die kwaliteit van die fotodatastel is nie die oogmerk nie, maar dis eerder om relevante data in te samel om te bepaal of daar wel 'n wesenlike moontlikheid bestaan van die hipotese wat in die veld gevorm is. Na afloop van verwerking van die "toets-TF" is besluit om ook 'n volledige TF op Paneel 2 te doen.

Met die tweede TF van beide panele is 'n totaal van 70 foto's van elk vanuit verskillende hoeke rondom die panele en op vier verskillende hoogtevlakke geneem, wat by wyse van 'n digitale gradeboog (Figuur 6) bepaal is.

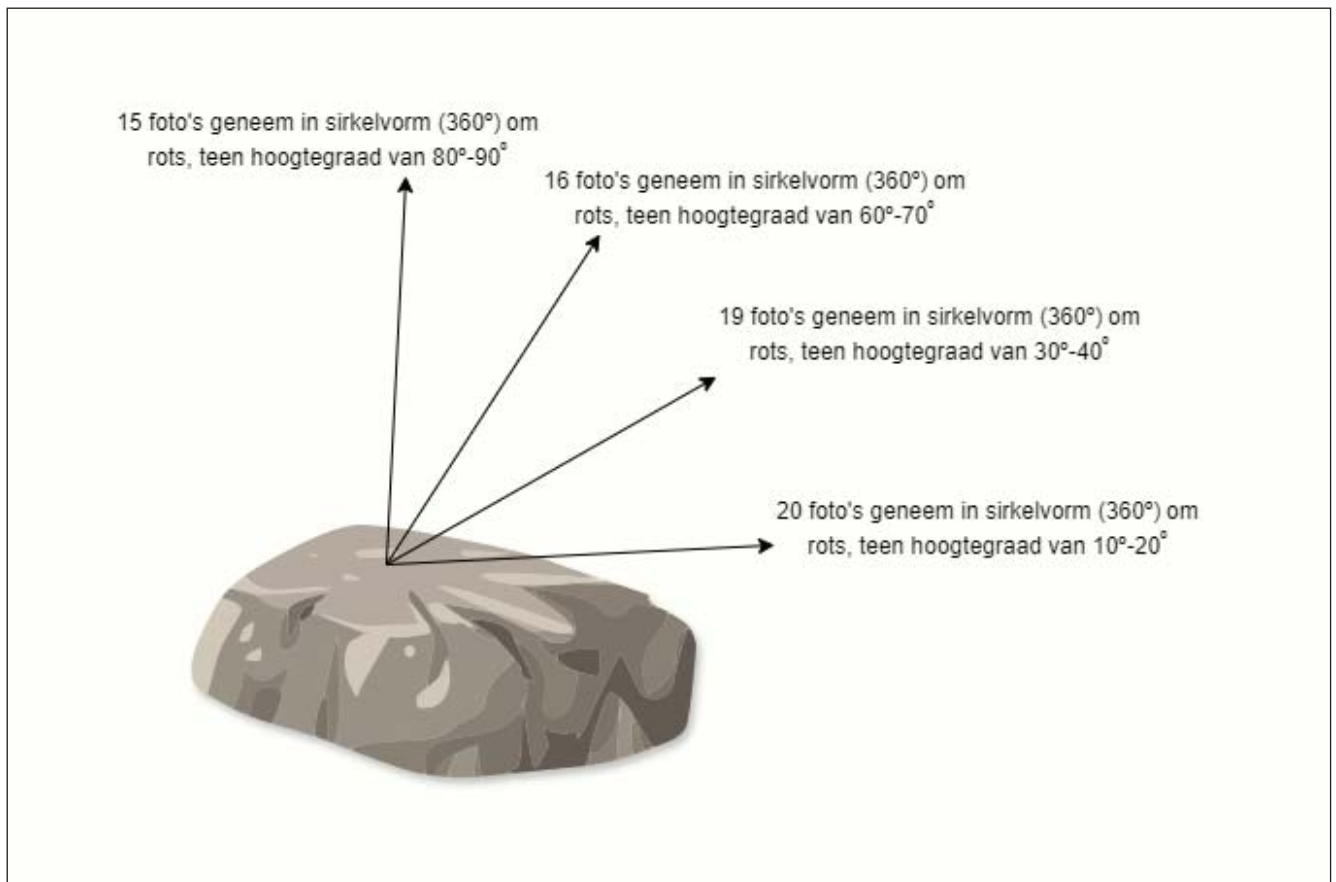
Hoewel 'n groter aantal foto's die potensiaal bied om meer besonderhede van die paneel te toon, beteken dit ook groter datastelle wat verwerk en gestoor word (tyd en stoorruimte wat oorweeg moet word). Daarom moet gepoog word om 'n goue middeweg te vind ten opsigte van die hoeveelheid foto's wat geneem word teenoor die maksimum oppervlakbesonderhede wat met die sensor van 'n kamera verkry kan word.

### Geometriese afmetings

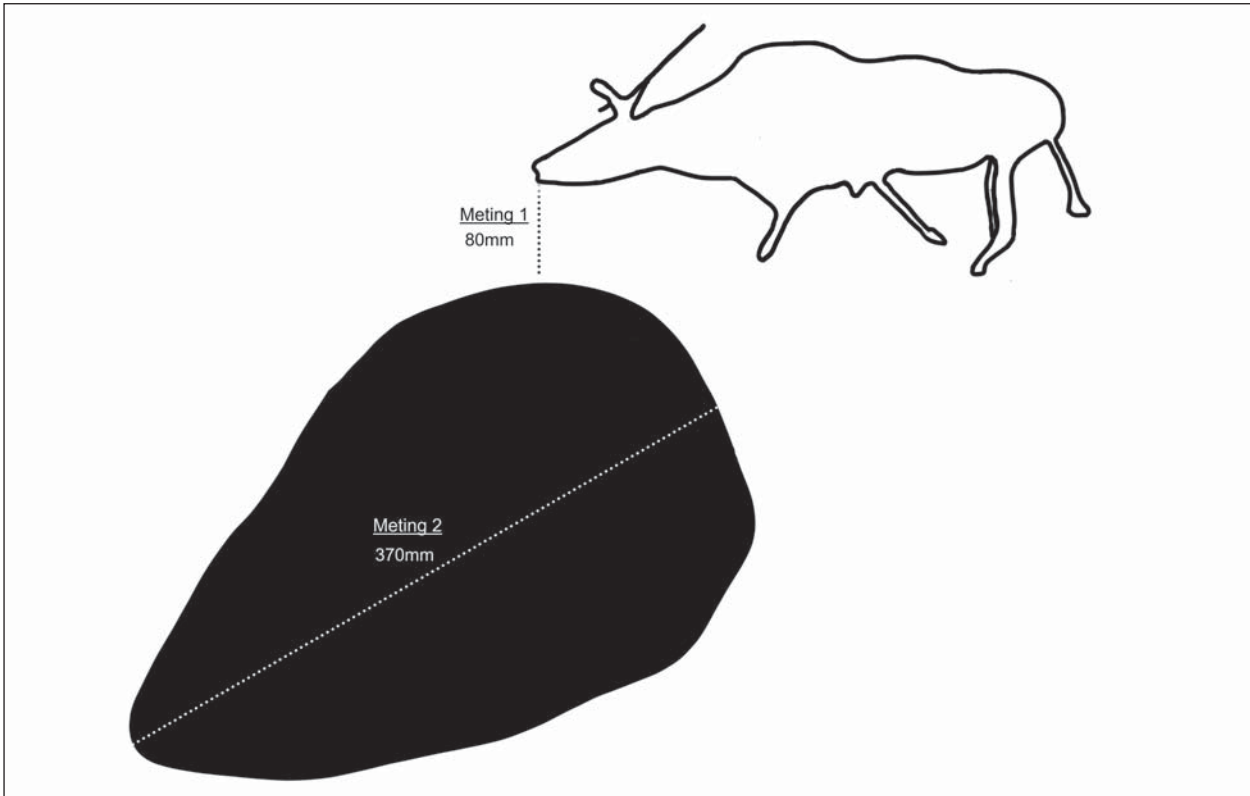
Om die afmetings in die veld te neem om gevolglik die akkuraatheid van die 3D-modelle te bepaal nadat die fotodatastelle verwerk is, is 'n maatband gebruik. Vir die onderskeie afmetings moes areas op die panele geïdentifiseer word wat digitaal maklik herkenbaar is en waarvan die afstande se begin- en eindpunte duidelik bepaal kon word sodat daar sekerheid kon bestaan dat die fisiese en digitale afmetings dieselfde is.

Vir Paneel 1 is *Meting 1* (80 mm) geneem vanaf die onderkant van die eland se bek, op die verste punt daarvan, tot die naaste punt aan die water. *Meting 2* (370 mm) is diagonaal geneem beginnende links onder, op die verste punt van die water, teen 'n 45°-hoek tot waar die wateroppervlak die rots aan die teenoorgestelde kant ontmoet (Figuur 7).

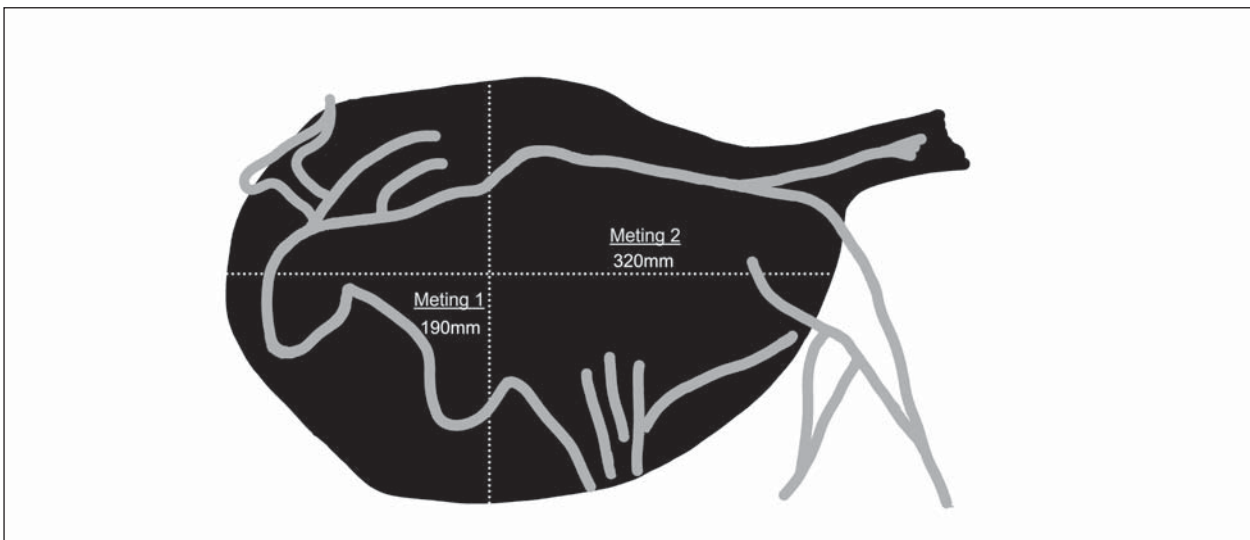
Aangesien Paneel 2 se rotstopografie so ongelyk is, is daar besluit om slegs die mates van die water in die natuurlike holte te neem. *Meting 1* (190 mm) is daarom van bo na onder ten opsigte van die oriëntasie van die petroglief in Figuur 8 geneem, terwyl *Meting 2* (320 mm) horisontaal van links na regs geneem is. Verskillende kleurpatrone wat natuurlik op die rots voorkom, het as merkers vir die bepaling van spesifieke begin- en eindpunte van die afmetings gedien.



**Figuur 6:** Terrestriële fotogrammetrie (TF) van die onderskeie panele



**Figuur 7:** Afmetings geneem van Paneel 1 (Figuur 3 is as basis gebruik vir die digitale natrektekening)



**Figuur 8:** Afmetings geneem van Paneel 2 (Figuur 5 is as basis gebruik vir die digitale natrektekening)

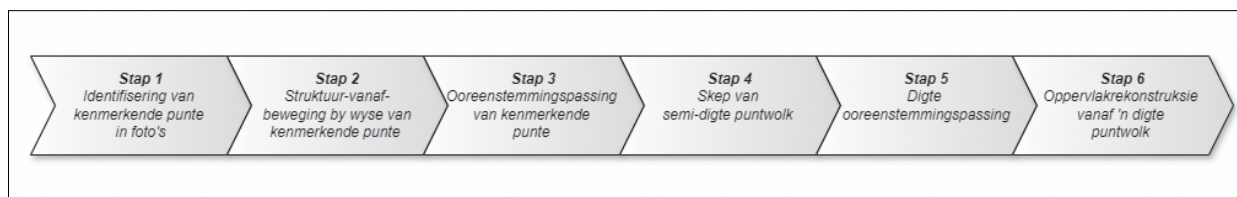
### 3D-modellering van fotodastel

Na afloop van die veldwerk is die foto's deurgegaan en is dié wat nie duidelik in fokus was nie uit die fotodastelle verwyder. Gevolglik het 62 foto's goeie gehalte van Paneel 1 oorgebly, en 64 van Paneel 2. Hierdie hoeveelheid foto's was voldoende, in ag genome die besonderhede van die panele wat daardeur verkry is.

Met TF is die foto's in RAW-formaat geneem en is dit daarom na PNG-formaat omgeskakel, aangesien die sagteware slegs data

in JPG- of PNG-formaat met die skep van 'n 3D-model kan verwerk.

*Colmap 3.9* is die fotogrammetriese sagtewarepakket en weergawe wat vir die 3D-modellering van die twee panele gekies is. Dis 'n gratis en oopbron sagtewarebiblioteek wat 'n verskeidenheid van funksies bied vir die rekonstruksie van gerangskikte sowel as ongerangskikte foto's (Colmap, 2020). Verskeie studies het getoon dat die resultate wat met *Colmap* verkry word, soortgelyk is aan ander fotogrammetriese sagtewarepakkette en in sommige gevalle selfs beter resultate lewer



Figuur 9: Vloeiagram van 3D-modellering nadat 'n stel foto's ingevoer is

(Boardman & De Klerk, 2022; Bianco *et al.*, 2018). In Figuur 9 word die stappe aangedui wat só 'n sagtewarepakket tydens modellering volg.

#### Stap 1: Identifisering van kenmerkende punte in foto's

'n Stel kenmerkende punte word deur die sagteware in die onderskeie foto's binne die datastel van die paneel geïdentifiseer. Die identifisering hiervan verminder dan ook die aantal punte wat later deur *Colmap* tydens ooreenstemmingspassing in Stap 3 vergelyk moet word (Maiti & Chakravarty, 2016). Die *SIFT* (*Scale-Invariant Feature Transform*-) algoritme word vir hierdie identifisering van die kenmerkende punte op die foto's gebruik. *SIFT* kan kenmerke identifiseer en bymekaar pas ten spyte van wisseling in skaal en oriëntering van die onderskeie foto's. Hierdie stap kan 'n kragtige rekenaar vereis en ook heelwat tyd in beslag neem omrede al die foto's in die datastel met mekaar vergelyk moet word. Hierbenewens neem die aantal vergelykings wat uitgevoer word eksponensieel toe met elke foto wat bygevoeg word (McCarthy, 2014).

#### Stap 2: Struktuur-vanaf-beweging (*structure-from-motion*) by wyse van kenmerkende punte

Struktuur-vanaf-beweging is 'n iteratiewe proses waartydens die 3D-posisies van die ooreenstemmingspassingpunte saam met die parameters van die kamera vanaf 'n stel gepaste punte in 'n fotodatastel bereken word. Die sukses van hierdie proses word bepaal tydens die skep van die semidigte puntwolk (*point cloud*) in Stap 4.

#### Stap 3: Ooreenstemmingspassing van kenmerkende punte

Die eerste funksie in die struktuur-vanaf-beweging-proses is om die ooreenstemmingspassings vir die *SIFT*-geïdentifiseerde punte in die volledige fotodatastel te bepaal. Hier word 'n benaderde-naaste-bure-soektoeg toegepas om vas te stel watter punte pas, en die 3D-kd-boom-datastruktuur word dan gebruik om die ooreenstemmingspassing te implementeer.

Die proses om die kenmerke bymekaar te pas, is soos volg:

1. 'n Fotopaar wat 'n oorvleuelende gedeelte van die paneel tussen hulle het, word uit die fotodatastel gekies.
2. Al die kenmerkende punte van een van hierdie foto's word in die blare van die kd-boom ingevoer. Die punte in die tweede foto van die paar word dan gebruik as basis om met die eerste foto se punte te vergelyk.
3. Vervolgens word die kd-boom gebruik om die K-naaste-bure aan 'n kenmerkende punt vas te stel. Die drempelafstand word bepaal na aanleiding van die resoluusie van die foto.

4. Hierdie sifting deur die blare van die kd-boom lei tot die ooreenstemmingspassing van die kenmerkende punte in die fotopaar.
5. Die akkuraatheid van die gepaste punte word dan getoets met behulp van die *RANSAC*-gebaseerde raming van die fundamentele matriks. Die gepaste punte wat nie aan die fundamentele matriksvergelyking voldoen nie, word as wanpassings verwerp. (Maiti & Chakravarty, 2016)

#### Stap 4: Skep van semidigte puntwolk

Nadat die onderskeie gepaste punte van die volledige fotodatastel geïdentifiseer is, word alle stellinge gepaste punte daarbinne getrianguleer om die 3D-posisie van die punte in die objek te verkry. Hierdie triangulasieproses bou 'n 3D-puntwolk in die ruimte waar elke punt deel uitmaak van 'n komponent van die objek wat gerekonstrueer word. Die uitvoer daarvan geskied met behulp van die bondelaanpassingsmetode.

Bondelaanpassing word gebruik om getrianguleerde 3D-punte in 'n iteratiewe benadering by te voeg en te verfyn deur die raming van die oriëntasies van die kamera en relatiewe beweging tussen die fotorame. Tydens hierdie proses word 'n kostefunksie toegepas om die herprojekteringsfout tussen die 3D-punt wat deur struktuur-vanaf-beweging getrianguleer is en die waargenome ligging van die 3D-punt te minimaliseer.

Nadat 'n 3D-punt van 'n ooreenstemmende puntepaar getrianguleer is, word verskeie ander foto's met dieselfde stellinge ooreenstemmende punte by die stelsel gevoeg. Al die gepaste punte word iteratief by die triangulering gevoeg. Die fout wat deur triangulering gepropageer word, word geminimaliseer namate meer gepaste punte gebruik word om 'n 3D-punt te trianguleer (Maiti & Chakravarty, 2016).

#### Stap 5: Digte ooreenstemmingspassing

'n Semidigte puntwolk wat by wyse van struktuur-vanaf-beweging geskep word, bevat slegs die 3D-koördinate van die *SIFT*-geïdentifiseerde kenmerkende punte. Die gevormde puntwolk se digtheid is dus laag en nie geskik vir rekonstruksie nie, aangesien dit nie die fyner besonderhede van die objek wat gerekonstrueer word, bevat nie. Daarom is digte ooreenstemmingspassing nodig om 'n digte puntwolk te vorm (Maiti & Chakravarty, 2016).

Hoewel interpolasie van die semidigte puntwolk gebruik kan word om 'n digte puntwolk te bou, gaan verskeie fyner besonderhede van die objek tydens die proses verlore, en ook kan die geometrie van die objek nie presies deur inter-

polasiemetodes behou word nie. In digte ooreenstemmingspassing word alle punte in die foto's heranaliseer vir ooreenstemmende punte oor die hele fotodastel heen (McCarthy, 2014; Maiti & Chakravarty, 2016). Hierdie digte ooreenstemmingspassingproses, soos beskryf deur Alcantarilla *et al.* (2013), skep 'n digte 3D-puntwolk uit groot fotodastelle wat die geometrie van die objek wat rekonstrueer word, akkuraat weergee.

#### Stap 6: Oppervlakrekonstruksie vanaf 'n digte puntwolk

Hierdie stap behels die interpolering van die puntwolk na 'n aaneenlopende oppervlak, bekend as 'n 3D-maas (*mesh*) met tekstuur wat van die bronfoto's afkomstig is (McCarthy, 2014). Vir hierdie oppervlakrekonstruksie bied *Colmap* 'n keuse tussen óf die *Delaunay*-algoritme óf die *Poisson*-algoritme vir triangulasie (Fisher *et al.*, 2021; ProgrammerSought, 2024). *Poisson* oppervlakrekonstruksie bied in die reël 'n gladder resultaat as die *Delaunay*-triangulasie vanweë die groter getal punte wat in die oppervlakdata van eersgenoemde vervat is (Kazhdan *et al.*, 2006). Om hierdie rede is die *Poisson*-algoritme vir die studie gekies. *Poisson* skep 'n 3D-maas vanaf 'n digte puntwolk deur die verskil tussen die normale rigtings van die gerekonstrueerde oppervlak en die 3D-punte in die puntwolk te minimaliseer. Hierdie algoritme word in meer besonderhede beskryf in Kazhdan *et al.* (2006). Daar word dan ook na hierdie geskepte 3D-maas verwys as 'n "3D-model".

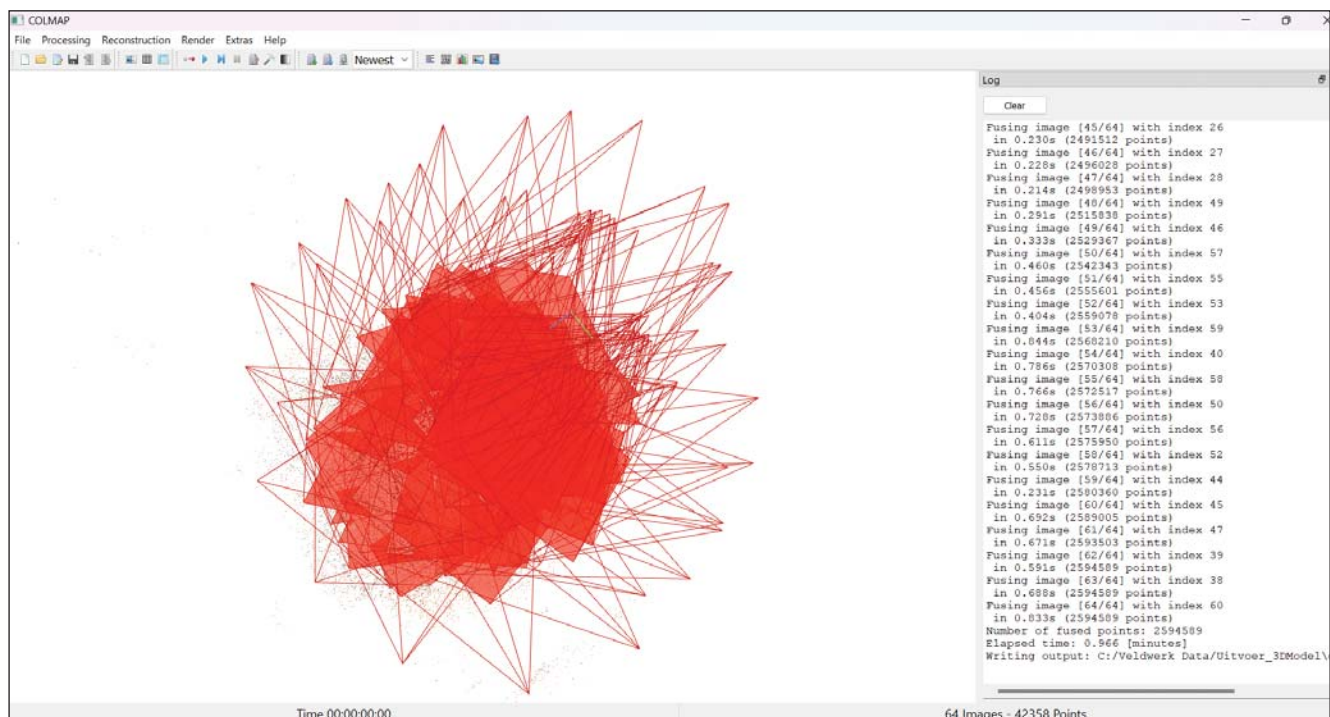
Vir die verwerkingstappe van die fotodastelle in die studie is 'n skootrekenaar gebruik met *Intel® Core(TM) i7-14650HX CPU (2.20GHz)*, met *64 Gb ETG (Engels RAM)* en 'n *NVIDIA GeForce RTX 4050* grafiese kaart. Die panele se fotodastelle het onderskeidelik 65 minute (Paneel 1) en 55 minute (Paneel 2) geneem om deur die ses stappe te werk en 'n 3D-model te lewer.

In Figuur 10 kan die eindresultaat van *Colmap* se verwerking van Paneel 2 gesien word. Die hoeke waaruit die foto's geneem is, asook die areas wat deur die onderskeie foto's gedek is, word hierin aangetoon. Ook word in die sagteware se opsomming, regs onder in die venster, aangedui dat 42 358 ooreenstemmende punte in die 64 ingevoerde foto's geïdentifiseer is. Die geskepte 3D-model en metadata is uitgevoer en in die vooraf aangeduide uitvoerlêer gestoor.

Die uitvoerformaat van *Colmap* is die *PLY*-poligoonlêerformaat wat algemeen gebruik word sedert die bekendstelling daarvan in die middel 1990s. Die formaat is aanvanklik hoofsaaklik toegepas in die uitvoer en stoor van 3D-modelle van artefakte nadat dit geskandeer is (Library of Congress, 2020).

Hierna is die twee panele se 3D-modelle om die beurt in *Meshlab*, 'n gratis en oopbron sagtewaresuite vir die verwerking en redigering van 3D-modelle, ingevoer. Wanneer lig (natuurlike lig in hierdie geval) tydens fotogrammetrie vanaf die rotsoppervlakte weerkaats, kan dit daartoe lei dat die finale 3D-model se oppervlakte 'n karteleffek toon. In *Meshlab* is die *Laplacian Smooth*-filtreerder gebruik om beide panele se oppervlakte meer egalig te maak om hierdie karteleffek in die modelle teen te werk en sodoende so na as moontlik aan 'n lewensgetroue oppervlakrekonstruksie te kom (Hedman, 2016).

In die laaste fase van verwerking en afronding van die 3D-modelle is elke paneel in *Blender* ingevoer om die relevante gedeelte van die model netjies uit te sny. *Blender*, weereens gratis en oopbronsagteware, is 'n 3D-skeppingsuiting wat ondersteuning bied vir 'n totale 3D-modelleringspyplyn. Dit sluit funksies soos modellering en die redigering van elemente



Figuur 10: Paneel 2 se verwerking in *Colmap*

in 3D-modelle in (Blender Institute, 2024). Die doel van hierdie stap is tweërlei van aard, naamlik dat die model:

- i) Minder spasie opneem met die stoor daarvan; en
- ii) bestudeer kan word sonder die ongewenste data, soos plantegroei en oormatige ruimtes rondom die relevante paneel, wat onvermydelik ingesluit word tydens die bou van die model.

## Evaluering van resultate en bespreking

Vir optimale potensiaal in begripsvorming by wyse van 'n 3D-verteenvoording is dit noodsaaklik dat die kwaliteit van die geskepte model voldoende is en die geometriese oppervlak so akkuraat moontlik aangebied word. Die taksonomie van faktore wat 'n rol speel hierin, is:

- Toerusting (soos kwaliteit van kamera se sensor).
- Tipe oppervlak ('n baie donker/lichte oppervlak weerkaats skerp, direkte sonlig) en topografie van die rots (met 'n hoë mate van ongelykheid moet seker gemaak word dat elke gedeelte van die oppervlak opgeneem word).
- Omgewingsfaktore (natuurlike beligting, plantegroei, ens).
- Menslike faktore (vaardigheid in dokumentering en verwerking).
- 3D-modelleringsagteware (daar is 'n verskeidenheid wat almal resultate van hoë gehalte lewer om van te kies).

Hoewel skaduwees van die plantegroei en die hoek van die vroeë oggendson se lig oor die panele problematies was, kon dit maklik oorkom word met beplande tydsbestuur en het dit daarom nie 'n invloed gehad op die kwaliteit van die eindproduk (3D-model) nie. 'n Groter uitdaging was die bewegende takkies en los gras in die water in die holte van Paneel 1, waarna dit vir 'n tweede maal gefotografeer moes word op 'n tydstip toe die wind nie so sterk gewaai het nie. Uiteindelik was daar dus geen impakdraende faktore wat die kwaliteit of akkuraatheid van die finale 3D-paneel nadelig beïnvloed het nie.

Om 'n standaard te bereik om die kwaliteit van so 'n geskepte 3D-model te bepaal, is in ag geneem dat verskeie dokumenteringsprojekte van petrogliewe getoon het dat die minimum getal poligone (driehoeke) wat in 'n triangulasienetwerk van 'n 3D-model nodig is vir voldoende oppervlakanalise, ten minste 2 000/cm<sup>2</sup> is. In sommige gevalle waar die petrogliewe baie vlak is of reeds in 'n groot mate verdof het, kan hierdie vereiste minimum getal poligone vermeerder tot 5 000/cm<sup>2</sup>. Daar is

gevind dat 'n verhoging bó hierdie getal poligone in die reël nie 'n verbetering in die resoluasie van die model meebring nie, omrede die kamera se vermoë om fyn besonderhede op te neem, bereik is (Devlet *et al.*, 2018). In Paneel 1 was daar dus 3 067 poligone per 1 cm<sup>2</sup>, terwyl Paneel 2 saamgestel is uit 4 566 poligone per 1 cm<sup>2</sup>.

Om andersyds die akkuraatheid van die konstruksie van die 3D-modelle te bereken, moes die digitale skaal van die panele eers bepaal word:

$$\text{Skaalfaktor} = \frac{\text{Digitale meting (Meting 1)}}{\text{Fisiese meting (Meting 1)}}$$

Vir hierdie doel is *Meting 1* van elke model as die kontrole gebruik om die skaalfaktor te bepaal, waarna die gemiddelde afwyking (akkuraatheid) by wyse van *Meting 2* bereken kon word (Tabel 1).

$$\text{Gemiddelde afwyking (\%)} = \frac{\text{Digitale meting (Meting 2) / Skaalfaktor}}{\text{Fisiese meting (Meting 1)}}$$

Uit Tabel 1 kan afgelei word dat die persentasie gemiddelde afwyking baie laag is (1,1%-1,3%) en dus ideaal is vir oppervlakanalise en begripsvorming<sup>2</sup>. Kennis moet wel geneem word dat die gemiddelde afwyking groter kan wees na gelang daar verder van die kontrolemeting wegbeweeg word, wat binne die fotograaf se fokusarea van die paneel gedoen is. Die rede hiervoor is dat die hoeveelheid kenmerkende punte in die fotodatastel in die reël afneem hoe verder daar van die fokuspunt wegbeweeg word, siende dat minder van die area in die geneemde foto's gedek word. Die persentasie afwyking wat in só 'n geval van toepassing sal wees, wissel na aanleiding van die hoeveelheid kenmerkende punte wat *Colmap* in die fotodatastel verder van die fokuspunt af identifiseer (kyk **Stap 1: Identifisering van kenmerkende punte in foto's**). Aangesien die gefotografeerde area van hierdie twee panele nie groot is nie en hoofsaaklik rondom die verlangde fokusareas gesentreer is (kyk Figuur 7 en 8), is dit onwaarskynlik dat die afwyking drasties op enige gegewe punt daarvan sal verhoog.

Die vergelykende resultate van die 3D-modelle van Paneel 1 en Paneel 2 word soos volg in Figuur 11 geïllustreer:

**Tabel 1:** Berekening van skaalfaktor en afwyking in die digitale panele

	Meting 1 (kontrole)			Meting 2 (na skaal-aanpassing)		Gemiddelde afwyking
	Fisies	Digitaal	Skaalfaktor	Fisies	Digitaal	
Paneel 1	80 mm	452 mm	1 : 5,7	370 mm	375 mm	1,1%
Paneel 2	190 mm	1 294 mm	1 : 6,8	320 mm	324 mm	1,3%

2. In hierdie studie is die persentasie gemiddelde afwyking vir slegs twee rotspaneel bereken. Daar kan verwag word dat die persentasie sal varieer wanneer dit op ander rotspaneel toegepas word, na gelang van die getal en kwaliteit van die foto's wat geneem is, asook die akkuraatheid van die gekose fotogrammetriese sagtewarepakket wat die verwerking van die data hanteer.

In Figuur 11 kan waargeneem word dat daar 'n parallelle verband is tussen die verhoging in kwaliteit (getal poligone) van 'n 3D-model en die grootte van die model in megagrepe (mb). Dit blyk dat die persentasie afwyking onafhanklik van die ander twee elemente fluktureer.

Die visualisering van die eindresultaat van beide panele in 3D is in *Blender* ingevoer en bestudeer by wyse van funksionaliteite wat reeds in hierdie sagteware beskikbaar is, naamlik:

- 'n Model wat in enige rigting 360° roteer kan word.
- In- en uitsoem op 'n model.
- Virtuele beligting wat uit verskeie hoeke oor die model gewerp kan word.
- Die opsie om tussen verskillende oppervlaktebeeldings soos spekulêr, mat en dan ook sônder tekstuur wat oor die model gedrapeer is te wissel.

Die toepassing van hierdie funksionaliteite op die panele het die volgende resultate opgelewer:

### Paneel 1

Met die virtuele beligting in *Blender* en rotering van die model kan die rotstopografie van die paneel baie duidelik waargeneem word (Figuur 12). Die elandpetroglief se morfologie is ook meer identifiseerbaar as op die 2D-foto's (Figuur 2 en 3).

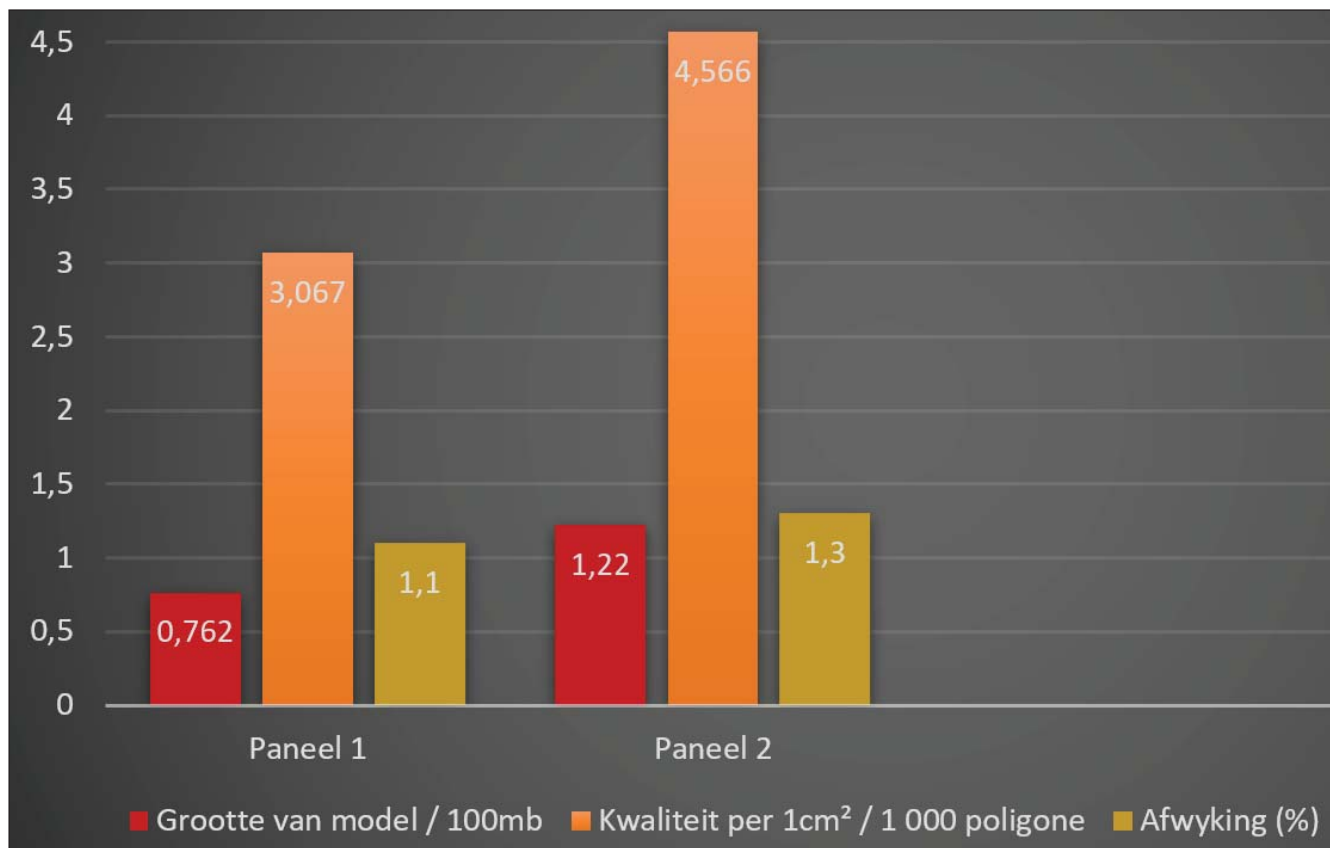
Met verdere rotasieproefnemings, virtuele beligting en met die tekstuur (kleur) afgeskakel, was die wyse waarop die kunstenaar die eland se kop pertinent oor die rand, nader aan die "watergat"

gegraveer het, opvallend (Figuur 13). Hoewel dit reeds 'n groter uitdaging moes wees om oor die ongelyke rotstopografie die eland proporsioneel korrek uit te beeld, het die kunstenaar spesifiek gepoog om te toon dat die dier se kop geboë is tot naby aan die "watergat", om sodoende 'n drinkende posisie voor te stel. Vir dié doel moes die kunstenaar die kop gedeeltelik oor 'n helling graveer.

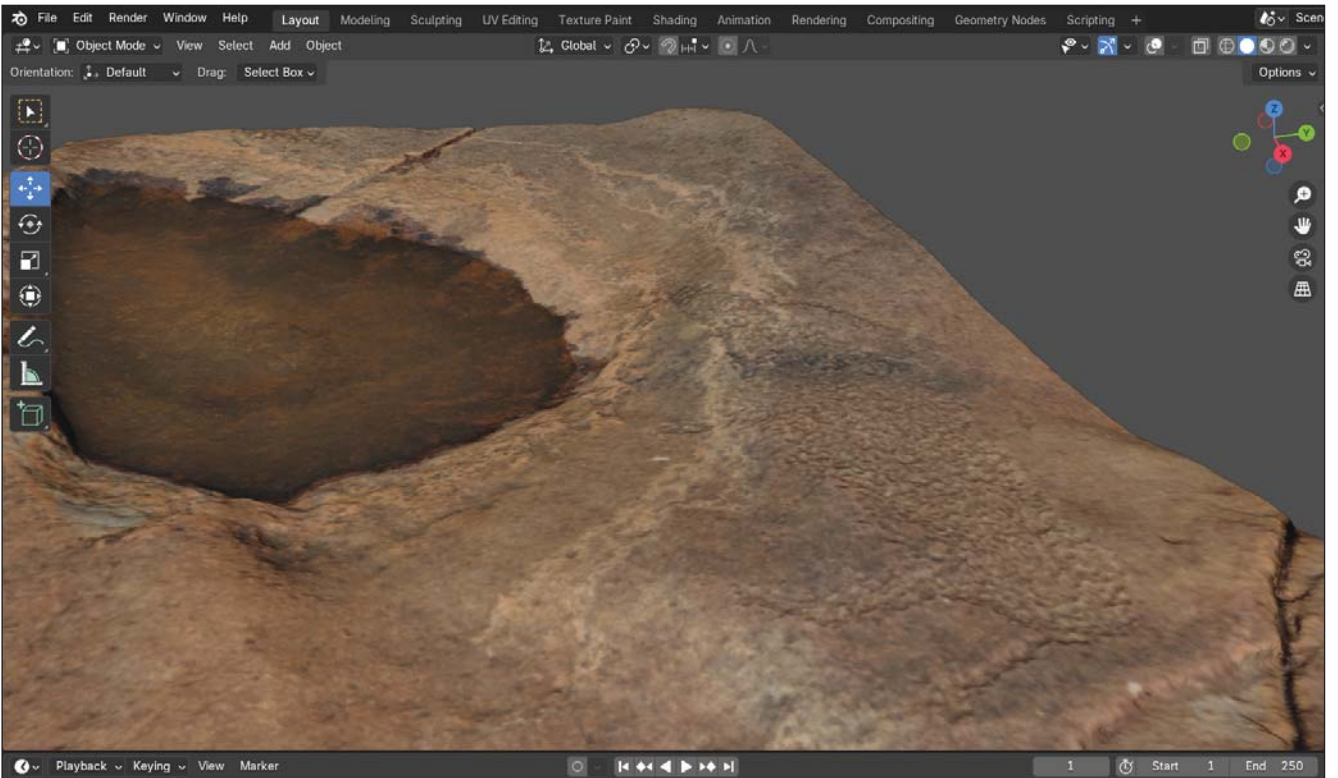
In Figuur 1 en 2 is slegs die platvlakgeometrie, lengte en breedte van die paneel sigbaar vir bestudering. Die moontlike begrip van die topografiese konteks van die petroglief op die paneel is uiters beperk en bemoeilik die navorser en leser se vorming van hipoteses rakende die moontlike betekenis van die "toneel". Sou die petroglief in so 'n geval in isolasie bestudeer word, is daar nie meer sprake van die begripsvorming van 'n "toneel" wat heel moontlik in die skepper se denkwêreld afgespeel het nie. Die 3D-model bied egter lengte, breedte én hoogte (of diepte) in die visualisering, wat 'n meer holistiese bestudering daarvan moontlik maak.

### Paneel 2

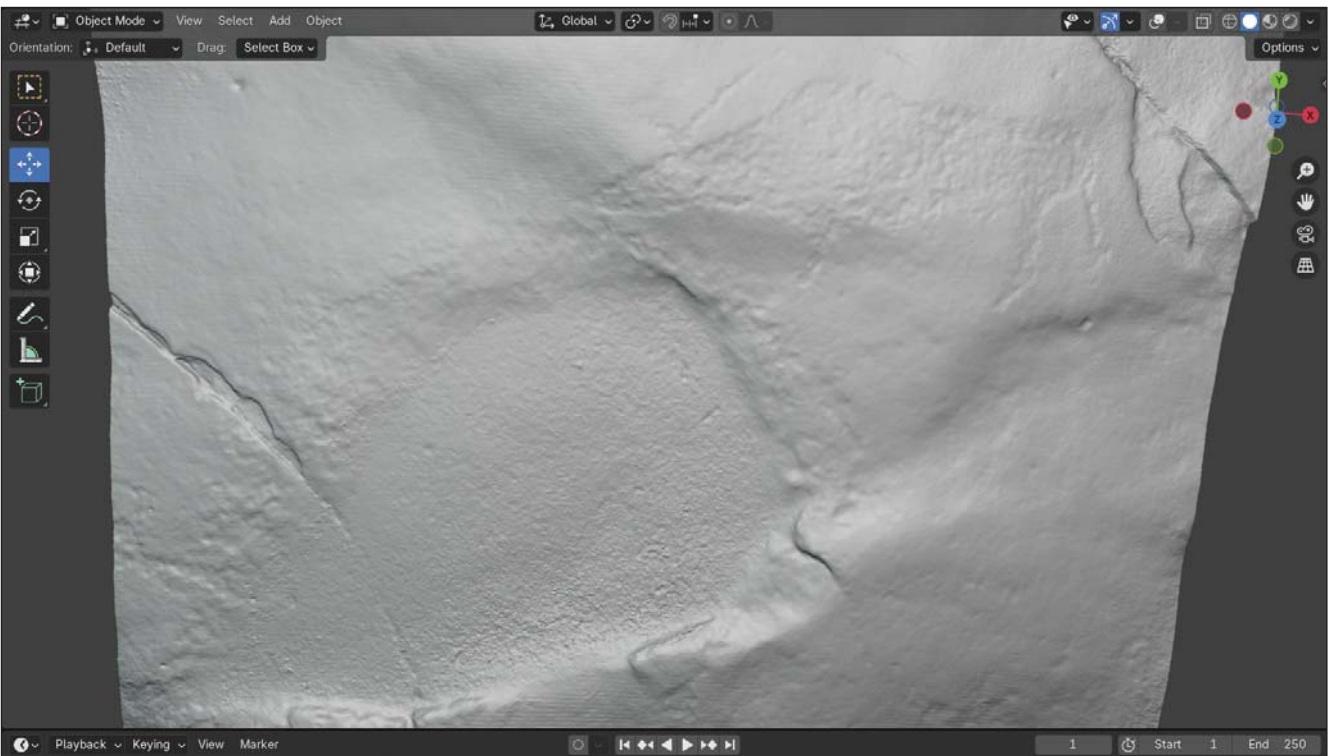
Met die toepassing van die virtuele beligting en 'n byna 90°-rotasie kan in Figuur 14 gemerk word hoe steil die inwaartse helling in hierdie paneel werklik daar uitsien. Die kunstenaar moes die betrokke petroglief goed beplan deur veral daarop te let hoe die reënwater in 'n bepaalde vlak en rigting begin uitloop. Daarom het die kunstenaar die grootste gedeelte van die eland binne die spesifieke ruimte geskep om die beoogde effek van "onder die water wees" te verkry.



Figuur 11: Vergelykende resultate van die 3D-modelle van Paneel 1 en Paneel 2



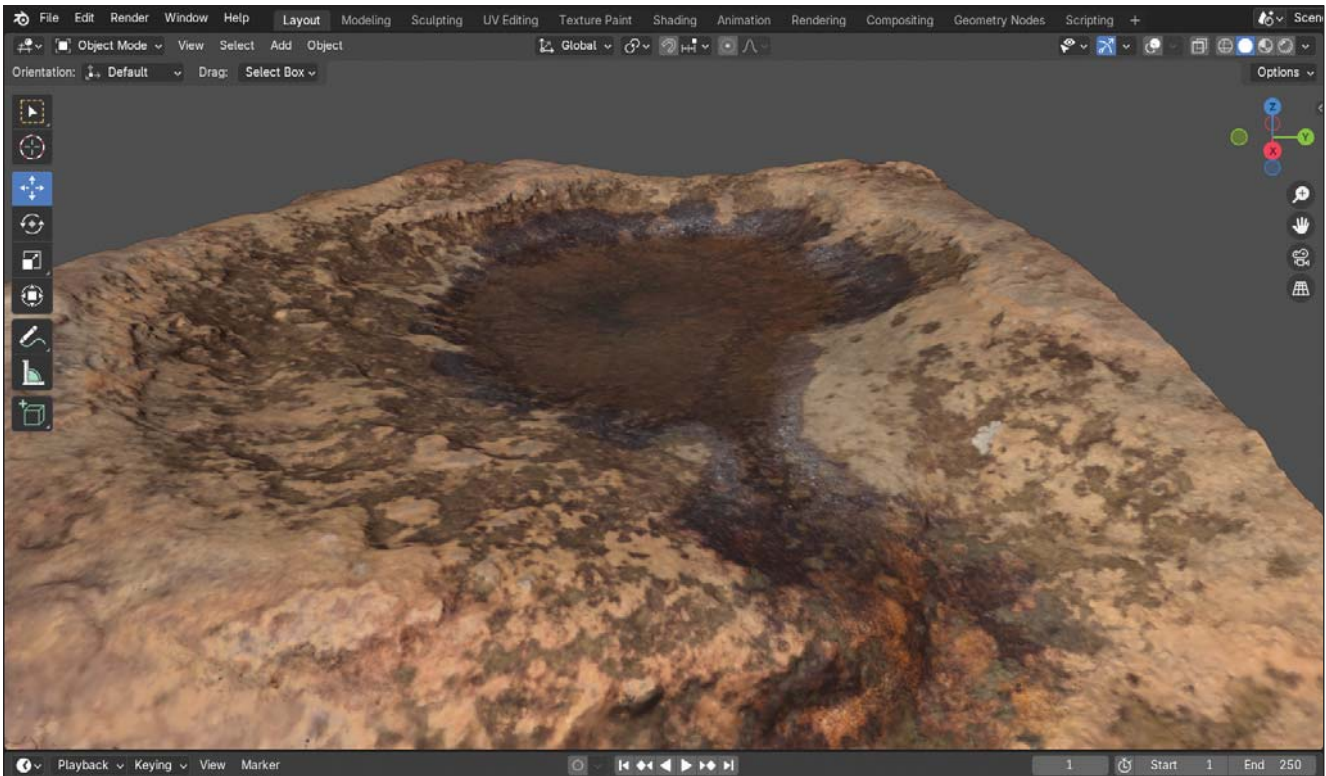
Figuur 12: Paneel 1 geroteer en met virtuele beligting



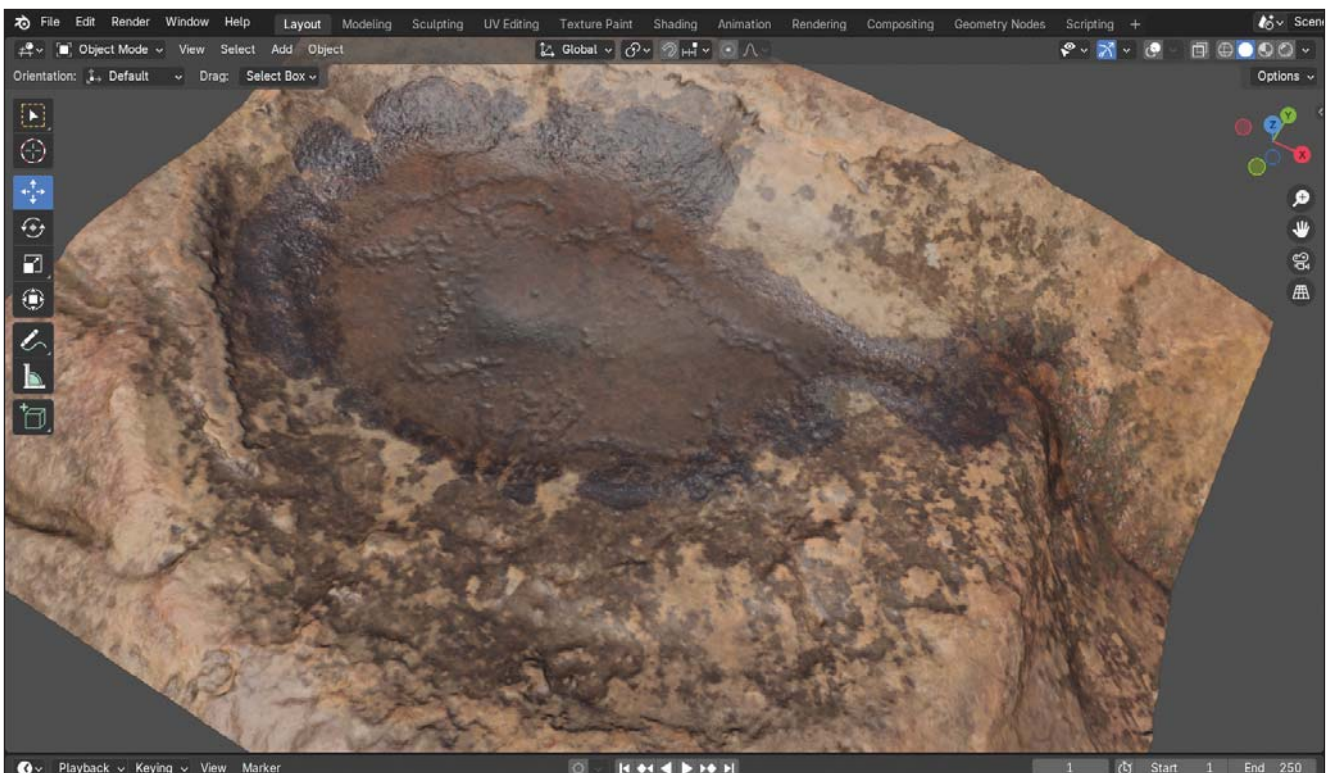
Figuur 13: Paneel 1 effens geroteer en sonder tekstuur

In die skermgreep van die paneel teen 'n meer vertikale skuinshoek geneem en op spekulêre oppervlaktuitbeelding gestel, kan selfs die graving wat onder water is, duidelik waargeneem word (Figuur 15). Met spekulêre beligting word virtuele lig uit verskeie rigtings deur die sagteware op die

digitale oppervlak gewerp, en die glans wat die refleksie daarvan meebring, laat die oppervlak blink vertoon. Die water in die model reflekteer nie die beligting in die foto's op dieselfde wyse nie en daarom, in hierdie geval, laat dit die gedeelte van die petroglief wat onder die water is, duideliker vertoon.



Figuur 14: Paneel 2 getoet om die topografie van die rotsoppervlak duideliker waar te neem



Figuur 15: Paneel 2 met spekulêre oppervlaktuitbeelding in Blender

In Figuur 16 kan die kunstenaar se noukeurige beplanning weereens gemerk word deurdat die eland se stert geskep is in die ruimte waar die water uitloop as dit 'n sekere vlak in die holte bereik. Die water vloei dan verder teen die rots af tot op die grond.

Ter illustrasie van die eindresultate met die genoemde funksies van *Blender* toegepas, kan die volgende skakel besoek word: <https://www.youtube.com/watch?v=AK3vQZ5blpk>



**Figuur 16:** Die rots waarop Paneel 2 is. Water vloei tot op die grond wanneer die holte oorloop

## Gevolgtrekking

Alhoewel 3D-modellering met ope arms verwelkom is op die gebied van kulturele erfenis en met die hoogste graad van entoesiasme geïmplementeer is, ook op petrogliewe, is die studiepotensiaal wat dit meebring nog in 'n groot mate 'n "ongeslypte diamant". In hierdie studie is slegs die punt van die ysberg aangeraak ten opsigte van moontlikhede wat met hierdie tegniek ontsluit kan word, spesifiek van toepassing op kleiner areas. Aangesien die interpretasie van petrogliewe veronderstel is om binne 'n datavakuum te geskied nie, is die konteks van (veral) die onmiddellike omgewing onontbeerlik vir 'n holistiese begripvorming van die kunstenaar se oogmerk. Die studie het getoon dat, hoewel hierdie onmiddellike konteks van die twee panele in beide die 2D-foto's én 3D-modelle geïnkorporeer is, dit onwaarskynlik is dat 'n persoon op grond van die visuele potensiaal wat die 2D-verteenvoordingings bied, die topografiese uniekheid van die betrokke panele sou kon sien en dieselfde hipoteses vorm. Dit is daarom duidelik dat 3D-modellering van petrogliewe relevante konteks bied aan die analiseerder op 'n wyse wat 'n 2D-verteenvoording nie kan nie.

Die grondslag van hierdie metodologie is die TF-tegniek, wat eenvoudig en koste-effektief is om toe te pas om sodoende die nodige konteksdata in te samel. Hierdie metodologiese voorbeeld kan op dieselfde wyse op ander rotskunsterreine toegepas word indien dit blyk dat natuurlike holtes in die rotsoppervlak moontlik gebruik is om deel te vorm van die betrokke kunstenaars se uitbeeldings (Van Riet Lowe, 1937; Fock, 1979). Hierbenewens bied aanlyn platforms soos *Sketchfab* ook die geleentheid om die 3D-modelle gratis vir besigtiging en bestudering te publiseer. Ten slotte kan daar gesê word dat, op dieselfde wyse wat klem gelê word op die konteks wat die omliggende landskap se integrasie met rotskuns bied, die topografie van die rots waarop dit geskep is ook met die betrokke rotskunswerke se betekenis verweef is (Martinez, 2001).

## Befondsing

Befondsing vir hierdie navorsing is verskaf deur die SAAWK (Suid-Afrikaanse Akademie vir Wetenskap en Kuns) en die noordelike tak van die Argeologiese Vereniging van Suid-Afrika.



- University of the Witwatersrand, Johannesburg. 2020. Ancient Southern African rock engravings finally find a fitting home. Besikbaar by: <https://www.wits.ac.za/news/latest-news/opinion/2020/2020-01/ancient-southern-african-rock-engravings-finally-find-a-fitting-home.html>. Toegang verkry: 20 Nov. 2024.
- Valdez-Tullett, J., Figueiredo-Persson, S., 2023, Digital rock art: Beyond 'pretty pictures', *F1000Research* 12, 523. <https://doi.org/10.12688/f1000research.127249.1>.
- Van Riet Lowe, C., 1937, Prehistoric rock engravings in the Vaal River Basin. Cape Town: Royal Society of SA. <https://doi.org/10.1080/00359193709518919>.
- Willcox, A.R., 1963, The rock art of South Africa. Johannesburg: Nelson and Sons.
- Willcox, A.R., 1984, The Rock Art of Africa. Johannesburg: Macmillan.
- Wojcicki, P., Kotga, S., Milosz, M., 2022, Preliminary application of the algorithm highlighting petroglyph patterns, *Applied Sciences* 12(3), art. #e1660. <https://doi.org/10.3390/app12031660>.