



*When the Glacier Left the Volcano: Behaviour and Fate of Glaciovolcanic Glass
in Different Planetary Environments*

S.J. de Vet

Samenvatting in het Nederlands

In steekwoorden: glaciovulkanisme · hyaloklastiet (vulkanisch glas) · granulaire lawines · korrelgrootte analyse · porositeit · ijs · versplintering · wind · deflatie · atmosfeer dynamica · grenslaag · rollen · zandkorrels · Mars' oppervlakte milieu · object-gebaseerde beeldanalyse · imbricatie · windrichting

Vulkaanijsinteracties worden al bestudeerd sinds het jaar 1900. De stapsgewijze verbetering van ons begrip van subglaciale vulkaanuitbarstingen in relatie tot de bovenliggende ijsmassa laat zien dat de complexe dynamiek belangrijke gevolgen heeft voor de materiaaleigenschappen van het gevormde materiaal. IJsland is een belangrijke locatie waar relatief jonge landschapsvormen zoals *tuyas* en *tindars* in het landschap voorkomen. Tuyas zijn kenmerkende tafelvormige bergen, die ontstaan doordat een subglaciale vulkaanuitbarsting door de gletsjer omhoog is gesmolten, terwijl tindars dit maar deels gedaan hebben en daardoor nu als heuvels herkenbaar zijn. Deze landschapsvormen bestaan voor een groot deel uit glasrijke breccias die 'hyaloklastiet' worden genoemd. Dit glaciovulkanische glas wordt tijdens subglaciale vulkaanuitbarstingen gevormd waardoor het diagnostisch is voor dit unieke vormingsmilieu. Op de planeet Mars zijn vergelijkbare landschapsvormen waargenomen die veel kenmerken delen met de IJslandse tuyas en tindars. Recente spectrale meting van het Marsoppervlakte laten zien dat zandafzettingen rondom het Noordpoolgebied en zandzeeën in de noordelijke laaglanden op Mars voor een groot gedeelte bestaan uit glaciovulkanisch glas. Uitvoerig onderzoek naar de erosie van deze glasrijke zandafzettingen, transport van korrels en verandering van het materiaal ontbreekt. Deze karakterisering is belangrijk om te begrijpen hoe vulkanisch glas zich in het afwijkende oppervlaktemilieu van de planeet Mars gedraagt. Een interessant gegeven is dat de uitbarstingen op IJsland en Mars plaatsvonden onder vergelijkbare omstandigheden qua glaciostatische druk (de druk van de bovenliggende ijsmassa) en afkoeling van het magma door smeltwater van gletsjerijs. Deze parallellen maken het mogelijk om het vulkanische glas in IJsland als substituut voor het glas op Mars te gebruiken aangezien het vergelijkbare fysisch-mechanische eigenschappen heeft. Veldstudies en experimenten met dit aardse materiaal kunnen daarom nieuwe en potentieel belangrijke inzichten geven in het gedrag van vulkanisch glas op Mars.

Het doel van dit proefschrift is om dit gat in kennis aan te vullen, vooral daar waar nog weinig bekend is over de fysische verwerking alsmede de drempelwaarden die het transport van dit type materiaal bepalen. Daarbij stelt dit proefschrift zich ook ten doel om de invloeden van de lage luchtdruk en lage zwaartekracht op Mars te karakteriseren in relevante geomorfologische processen. Hiertoe is eerst een glas op IJsland geselecteerd op basis van fysisch-mechanische eigenschappen die afkomstig en gedomineerd zijn door een subglaciale vulkaanuitbarsting (in tegenstelling tot een geochemisch- of mineralogisch georiënteerde selectie). Het geselecteerde rhyolitisch glas werd gevormd in de laatste ijstijd tijdens de uitbarsting van de Bláhnúkur vulkaan die gelegen is in het Torfajökull gebied in de zuidelijke centrale hooglanden in IJsland. Deze vulkaan is wereldwijd de best bestudeerde locatie van zijn soort en dit betekent dat de gekarakteriseerde vormings- en materiaaleigenschappen een goede uitgangspunt geven aan het procesonderzoek in dit proefschrift.

De erosie-eigenschappen van een subglaciale vulkaan die is opgebouwd uit glasrijke

afzettingen wordt bestudeerd in hoofdstuk 2. Alhoewel de erosie van de hellingen in de Grænagilkloof het gevolg is van verschillende processen, zijn er slechts een paar processen die hierbij een dominante rol vervullen. De flux van sediment die sedimentaire landschapseenheden vormt, bijvoorbeeld puinhellingen, bestaat vooral uit materiaal dat losgemaakt wordt tijdens vries-dooicycli en door deflatie (winderosie) van materiaal op de bovenliggende hellingen. Het transport van dit materiaal is vooral beperkt tot droge en koude omstandigheden waardoor individuele lawines van sediment zorgen voor een karakteristieke gelaagdheid en hoge rusthoeken van het sediment in de puinhellingen. Deflatie van fijnstof door de wind en de effecten van vries-dooi cycli zijn de belangrijkste mechanismen ten aanzien van de erosie van deze glasrijke en tevens slecht gecompacteerd hellingen.

De voorgaande inzichten op landschappelijke schaal worden in hoofdstuk 3 aangevuld met een studie naar de effecten van deze processen op de schaal van de zandkorrels zelf. Monsters van het Bláhnúkur hyaloklastiet zijn daarom gebruikt in experimenten om de schurende werking tussen korrels tijdens transport te meten. Transport door wind en zwaartekracht werd gesimuleerd door het materiaal gedurende vijftien weken continu te laten rondrollen in draaiende trommels; met een equivalente transportafstand van 500-715 km. Daarnaast werden fysisch mechanische eigenschappen van grotere brokstukken glas bepaald. Oppervlakteporiën van de glasbrokken werden gemeten aan de hand van kwikintrusie onder hoge druk en de breeksterkte werd bepaald op een trekbank. Hiermee was het mogelijk om de te begrijpen welke processen ten grondslag lagen aan de versplintering die werden gemeten in vries-dooi experimenten waaraan vergelijkbare brokstukken werden blootgesteld. De schade aan het materiaal was bijzonder laag na het gesimuleerde wind- en zwaartekrachttransport terwijl de gevolgen van vries-dooicycli aanzienlijk groter waren. Beide processen leiden in verschillende mate tot de vorming van nieuw sediment waaronder een fijnstoffractie ($<10 \mu\text{m}$, of PM_{10}). Dit fijne materiaal kan bij inademing schadelijke gevolgen hebben voor de gezondheid.

In hoofdstukken 4 en 5 wordt de overstap gemaakt naar de planeet Mars om te begrijpen welke rol de waargenomen processen op IJsland spelen in het transport en de modificatie van vulkanisch glas op Mars. Daar lijkt vooral een belangrijke rol te zijn weggelegd voor eolische (windgedreven) processen. Zandtransport door de wind is op Mars echter paradoxaal; de atmosfeer is te ijl om grootschalig zandtransport bij de gemiddelde dagelijkse windsnelheden toe te staan, terwijl er zandduinen worden waargenomen die migreren met snelheden die vergelijkbaar zijn met aardse zandduinen. De meest voorkomende en laagdrempeligste transportvorm van korrels door de wind is in de vorm van rollen. In hoofdstuk 4 worden windtunnelexperimenten gebruikt om realistisch drempelwaarden te bepalen waarbij vulkanisch glas door de wind op Mars in beweging gezet kan worden. Experimenten onder verschillende luchtdrukken maakten het mogelijk om een semi-empirisch model te ontwikkelen dat het weggrollen van korrels beschrijft. Per korreldiameter werden hiertoe verschillende korreleigenschappen gemeten zoals vorm, specifiek oppervlak en dichtheid om te bepalen hoe de nauwkeurigheid van het model werd beïnvloed door de natuurlijke variatie in deze korreleigenschappen. Deze gevoeligheidsanalyse bevestigde dat alleen de massadichtheid en diameter van de korrel de drempelwaarden voor het weggrollen beïnvloeden, en hiermee kon het model gevalideerd worden om zo het gedrag van rollende korrels op Mars te bepalen. Het model toont aan dat het zeer hoekige vulkanische glas op Mars onder de hedendaagse windsnelheden verplaatst kan worden. Dit rollen lijkt bovendien versterkt te worden door de structuur van de turbulente grenslaag van de ijle Marsatmosfeer.

Wegrollen van zand is daarom op Mars een belangrijke vorm van sedimenttransport. Het draagt bovendien bij aan het verlagen van de drempelwaarden waarbij het roltransport overgaat in de saltatieprocessen die zandduinen laten migreren.

Ondanks de detectie van vulkanisch glas op Mars is er weinig bekend over de exacte eigenschappen van vulkanische glaskorrels en daarmee ook de mate waarin het materiaal fysisch is veranderd door de blootstelling aan het heersende milieu. Het van oorspronghoekige glas kan op geologische tijdschalen langzaam ververen naar afgeronde korrels als gevolg van de herhaaldelijke inslagen van zandkorrels tijdens windtransport. Veel zandkorrels die door Marsrovers zijn waargenomen in zandduinen hebben inderdaad dergelijke afgeronde vormen. Deze gestroomlijnde vorm leidt tot een bijzonder fenomeen; korrels kunnen zich met de langere lengteas oriënteren langs de richting van de locale windstroming. Dit zorgt ervoor dat eolisch sediment de lokale windrichting vastlegt in een meetbare eigenschap. In hoofdstuk 5 is een nieuwe methode ontwikkeld waarmee het mogelijk is om deze oriëntaties te meten aan de hand van Object-Gebaseerde BeeldAnalyse (afgekort 'OBIA' in het Engels). In dit proces wordt een foto onderverdeeld in kleine beeldsegmenten. Deze beeldsegmenten kunnen vervolgens aan de hand van strikte regels geïdentificeerd worden om de individuele zandkorrels te herkennen. Na het samenvoegen van de geïdentificeerde segmenten ontstaan polygonen van de korrelomtrek waarmee de oriëntatie van de korrel kan worden berekend. Deze strategie werd eerste toegepast op slijpplaatjes (~30 µm dikke microscooppreparaten) van zandafzettingen in Duitsland waar andere studies met oudere microscooptechnieken de paleowindrichtingen al eerder bepaald hadden. De OBIA techniek leverde vergelijkbare korreloriëntaties en windrichtingen op, waarmee de techniek breder toepasbaar wordt in andere omgevingen. De methode werd vervolgens ook toegepast op beeldmateriaal van zandkorrels dat door de Mars Exploration Rover 'Spirit' werd gemaakt tijdens de doorkruising van de Columbia Hills. De windrichtingen in deze regio zijn erg variabel als gevolg van topografische effecten, maar de metingen met de OBIA methode geven een nieuwe kijk op de atmosferische stroming die de zandafzettingen in dit gebied gevormd heeft. De afgeleide windrichtingen met de nieuwe methode kwamen goed overeen met de richtingen die afgeleid zijn uit de grootschalige oriëntatie van eolische landschapsvormen zoals duinen en windribbels. Doordat zandkorrels op Mars zich net als op aarde oriënteren naar de wind, is het mogelijk om met deze oriëntatie de windrichting van de meest recente stormen af te leiden. De oriëntatie van korrels maakt het daarom mogelijk om op de kleinste mogelijke schaal van het Marslandschap de windrichtingen te meten.

Hoofdstuk 6 geeft een synthese van de verschillende hoofdstukken in deze dissertatie om het gedrag van glas op Mars verder te karakteriseren. 'Droge' processen reguleren de erosie van glasafzettingen op IJsland en Mars. Het opvriezen van sediment rond de polen op Mars vindt echter plaats met CO₂-ijs. Doordat dit ijs niet dezelfde expansie-eigenschappen als water heeft, zal vorstverwerking op Mars zeer gering zijn. Hierdoor heeft de wind op Mars een belangrijk aandeel in de erosie en modificatie van vulkanisch glas. De fysisch-mechanische eigenschappen zorgen er weliswaar voor dat de drempelwaarden voor transport en erosie boven die van goed afgerond zand zullen liggen, maar beide extremen kunnen tijdens stormen of thermische vortexen ('dust devils') verplaatst worden. De cryogene (ijsgedomineerde) oppervlakteverharding van duinen rond de polen zorgt voor een drastische reductie van windgedreven mobilisatie van dit sediment. Dit beperkt de modificatie van het glas door eolische processen tot een zeer korte ijsvrije periode in het Marsjaar. Fysische verwerking is zodoende sterk breedtegraadafhankelijk. De mogelijke

aanwezigheid van geologisch jong glaciovulkanisch glas dat geassocieerd is met de vorming van recentere tuyas suggereert dat deze korrels hun oorspronkelijke materiaaleigenschappen deels hebben behouden. Dit is het gevolg van de langdurige immobilisatie die ontstaat door seizoenmatige variaties in ijsbedekking en als gevolg daarvan een veel lagere modificatie door de wind dan op breedtegraden waar geen ijs voorkomt. Geochemische metingen van dit glas door toekomstige Marslanders kunnen deze glassoorten daarom gebruiken voor reconstructies van gletsjers om zo de uitbarstingsomstandigheden ten tijde van de vorming van het glas af te leiden.

Dit proefschrift richt zich vooral op het beantwoorden van een aantal vragen om het gedrag van vulkanisch glas op twee contrasterende planeetoppervlakten nader te karakteriseren. Tegelijkertijd zijn er een aantal nieuwe onderzoeksniches te definiëren om het glas op Mars verder te karakteriseren. Uit de eolische studies in hoofdstuk 4 en 5 blijkt dat meer kennis nodig is om beter te begrijpen wat de rol is van de krachten tussen individuele korrels in transportprocessen en de daaruit voortvloeiende modificatie van het glas. Windtunnelexperimenten onder gereduceerde zwaartekracht kunnen daarom belangrijke inzichten geven in deze processen en daarmee het gedrag van zandkorrels op Mars.