

AFBEELDING BOVEN. | *Nogahabara Sand Dunes, Alaska.*  
 Stock bron: *alamy.com*  
 AFBEELDING 1 RECHTS. | *Verbreiding eolische afzettingen in Alaska.*  
 Bron: *Wolfe et al., 2011 en Koster, 1992.*



# ‘Cold-climate’ duinvorming op Aarde en Mars

EDUARD KOSTER  
 WARD-KOSTER@PLANET.NL

Moderne waarnemingen en analyses van extra-terrestrische duinvorming, waaronder die op de planeet Mars, hebben geleid tot hernieuwde belangstelling voor vergelijkend duinonderzoek in koude, periglaciale gebieden op Aarde (Craddock, 2011). Uitzonderlijk koude en aride, (Sub)Arctische duingebieden, die hiervoor bij uitstek geschikt lijken te zijn, komen voor in Noordwest Alaska (de *Great Kobuk Sand Dunes, GKSD*) en de *Nogahabara Sand Dunes, NSD*) en in de staat Saskatchewan, Canada (o.a. de *Athabasca Sand Dunes*). Daarnaast vormen de duinvelden in de ‘hyper arid cold desert’ van de *McMurdo Dry Valleys* van West-Antarctica waarschijnlijk de beste potentiële analogieën voor het verloop van eolische (door wind gedreven)





processen op Mars. In aansluiting op mijn artikel over duin- en dekzandvorming in 'koude woestijnen' (G&H 1992, pp. 81-92) worden in dit artikel nieuwe onderzoeksresultaten besproken over de vorming en ouderdom van de GKSD en NSD en over de opmerkelijke overeenkomsten van eolische processen in deze koude zandwoestijnen in Alaska en vergelijkbare fenomenen op het Marsoppervlak. Een onderwerp dat onder andere door recente Marslanders sterk in de publieke belangstelling is komen te staan.

## Locaties

Door vegetatie vastgelegde duincomplexen met een omvang van meer dan 30.000 km<sup>2</sup> komen voor in centraal en noordelijk Alaska, vooral gelegen langs de grote rivieren en in de 'Arctic Coastal Plain Dunes' (ACPD). Een tweetal resterende nog actief bewegende, onbegroeide duinvelden liggen in de brede riviervlaktes van de Kobuk rivier en de Koyukuk rivier, resp. de *Great en Little Kobuk Sand Dunes* (iets ten noorden van de poolcirkel) en de *Nogahabara Sand Dunes* (iets ten zuiden van de poolcirkel) (Afb. 1).

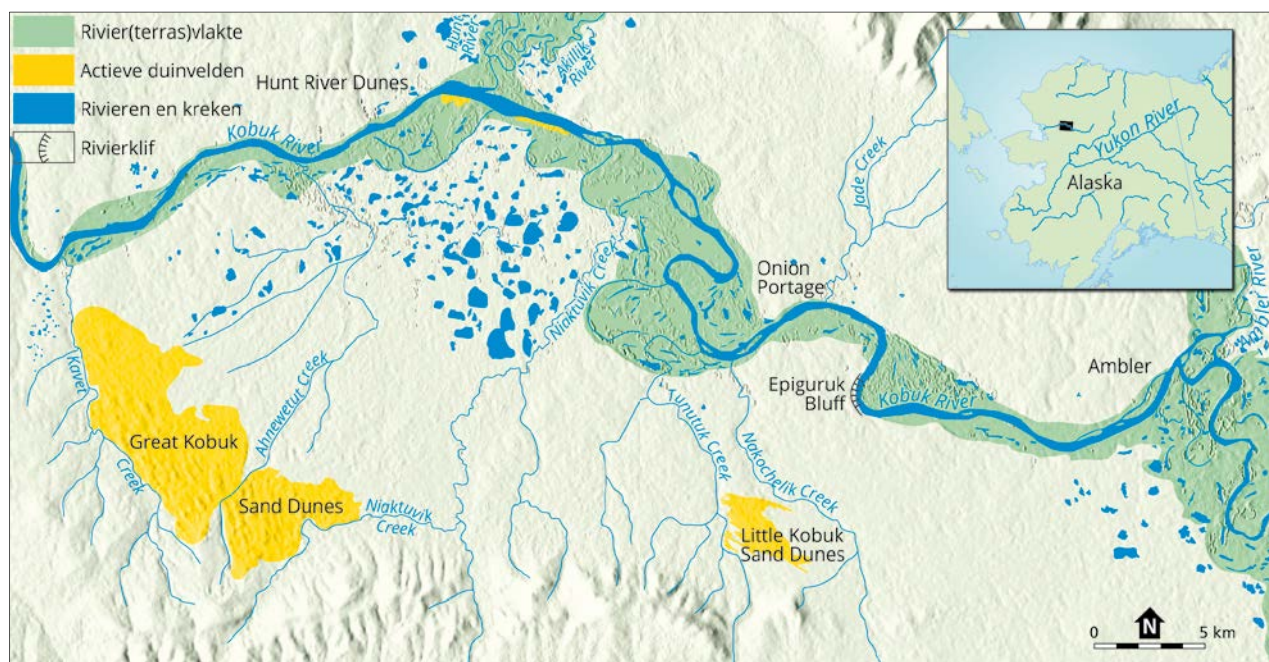
De *Great Kobuk Sand Dunes* (GKSD, oppervlakte ca. 65 km<sup>2</sup>) vormen het restant van een ongeveer 650 km<sup>2</sup> groot dekzand- en duingebied, dat op een afstand van enkele km ten zuiden van het centrale deel van de huidige, meanderende Kobuk rivier ligt. Een groot deel van het stroomgebied van de Kobuk rivier met inbegrip van de duinvelden vormt sinds 1980 onderdeel van het Kobuk Valley National Park (opp. 6700 km<sup>2</sup>).

Het actieve deel van de *Nogahabara Sand Dunes* (NSD), bestaat uit een min of meer cirkelvormig, door vegetatie scherp begrensd zandlichaam van ca. 45 km<sup>2</sup> grootte. Het is een restant van een ongeveer 3200 km<sup>2</sup> groot, begroeid dekzand- en duingebied, dat zich uitstrekt voornamelijk ten westen van de benedenloop van de Koyukuk rivier op een afstand van ca. 45 km ten westen van het plaatsje Huslia. Met uitzondering van het bovenstroomse gedeelte ligt de Koyukuk rivier ten zuiden van de poolcirkel. Het gebied heeft een beschermde status als onderdeel van de Koyukuk National Wildlife Refuge.

## Voorafgaand vergelijkend onderzoek

De verbreiding, ontstaanscondities, geomorfologie en ouderdom van de duinen en dekzanden van de 'European Eolian Sand Belt', die een omvangrijk deel van het Noordwest Europese Laagland beslaat, zijn veelvuldig onderzocht. Deze

duin- en dekzandgebieden, voornamelijk ontwikkeld in de laatste ijstijd (Weichselien), beslaan een oppervlakte van vele tienduizenden vierkante kilometers, die zich uitstrekt van Engeland via Nederland, Duitsland, Polen tot ver in Europees Rusland. Teneinde een beter begrip te krijgen van de milieucondities (transport en sedimentatie) waaronder deze 'fossiele' duin- en dekzandvorming in Noordwest Europa plaatsvond, zijn vergelijkende studies uitgevoerd door medewerkers van de universiteiten van Amsterdam (UvA) en Utrecht (UU) in samenwerking met de Geologische Dienst van de Verenigde Staten (USGS) in de hiervoor genoemde actieve duinvelden in de stroomgebieden van de Kobuk en Koyukuk rivieren. Voor deze vergelijking is het natuurlijk van belang dat de huidige landschappelijke (reliëf en sedimentherkomst) en klimatologische (periglaciale) omstandigheden in NW-Alaska zoveel mogelijk lijken op die welke tijdens het Weichselien in Noordwest Europa, inclusief Nederland, heersten. De geomorfologie en specifieke fenomenen van eolisch transport in de riviervlaktes van de Kobuk en Koyukuk rivieren zijn onderzocht en gekarteerd. Resultaten van dit werk zijn besproken onder andere in Koster & Dijkmans (1988) en Dijkmans & Koster (1990) en samengevat in G&H (Koster, 1992, 81-92).



AFBEELDING 2. | Stroomgebied van een deel van de Kobuk rivier en locatie van de GKSD.  
Bron: Dijkmans & Koster, 1990.



## Het stroomgebied van de Kobuk en Koyukuk rivieren

Om goed te kunnen inschatten over wat voor gebied we spreken, wordt eerst de landschappelijke context van de omvangrijke eolische complexen in de Kobuk en Koyukuk stroomgebieden geschetst.

De ca. 450 km lange Kobuk rivier ontspringt in de Brooks Range op een hoogte ca 200 m en mondt uit in een brede delta in de Bering Straat nabij Kotzebue. Het stroomgebied omvat ca. 32 000 km<sup>2</sup> en is dus ongeveer net zo groot als Nederland. Dit grotendeels lege rivierlandschap met enkele kleine dorpen langs de rivier, wordt bewoond door ongeveer 5000 inwoners, die overwegend behoren tot het volk van de 'Inupiat' of 'Kobuk River eskimo's'. De Kobuk rivier heeft een gering verval en wordt gekenmerkt door een overwegend sterk meanderend patroon, dat stroomafwaarts overgaat in een anastomoserend (vlechtend) systeem. De 10-15 km brede overstromingsvlakte vormt het brongebied van de grote duinvelden. Het stroomgebied wordt aan de noordzijde begrensd door de uitlopers van de Brooks Range en aan de zuidzijde door de Waring Mountains (Afb. 2). Het plaatsje Ambler (N 67° 51' 6<sup>11</sup>, W 157° 51' 37<sup>11</sup>) nabij de GKSD, was onze standplaats tijdens het veldwerk. Het gemiddelde jaarlijkse rivierdebiet nabij Ambler varieert van 200 à 400 m<sup>3</sup>/sec. (vergelijkbaar

Zo'n 14 km stroomafwaarts van Ambler ligt de *Epiguruk rivierklif*, die beroemd is geworden vanwege een belangrijke prehistorische Inuit opgravingslocatie, genaamd *Onion Portage*. De naam *Onion Portage* slaat op het feit dat op deze locatie al duizenden jaren lang – en thans nog steeds – kariboe kudde tijdens hun jaarlijkse trek de Kobuk rivier oversteken en aldaar bejaagd worden. De oudste artefacten en de daarop volgende bewoningsniveau, ingesloten in voor een deel eolische afzettingen, wijzen uit dat op deze plaats al menselijke activiteit plaatsvond vanaf ca. 8450 jaar geleden, hetgeen voor Alaska een bijzonder vroege datering is. Deze belangrijke archeologische locatie is in 1940 gevonden door de beroemde Amerikaanse archeoloog J. Louis Giddings, die waarschijnlijk als eerste onderzoeker het gebied te voet heeft bereikt.



AFBEELDING 3. | Luchtfoto van het noordwestelijke deel van de Great Kobuk Sand Dunes. Bron: US Geol. Surv. opname 1951.

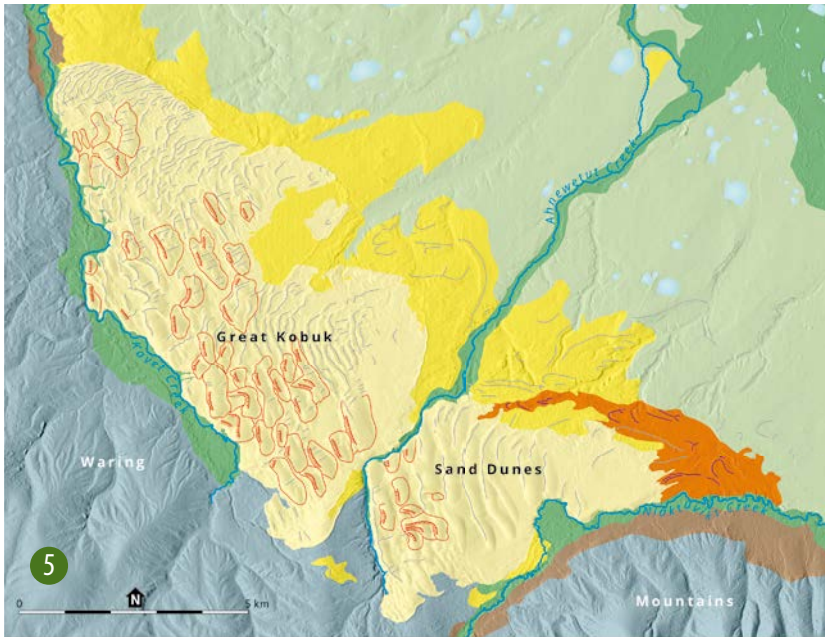
AFBEELDING 4. | 'False-color infrared' luchtfoto van de Great Kobuk Sand Dunes. Bron: NASA JSC 386 Jul 78 Alaska CIR 60.

met de Maas), terwijl het maximale debiet tijdens de voorjaarsmelt varieert van 850-2700 m<sup>3</sup>/sec.

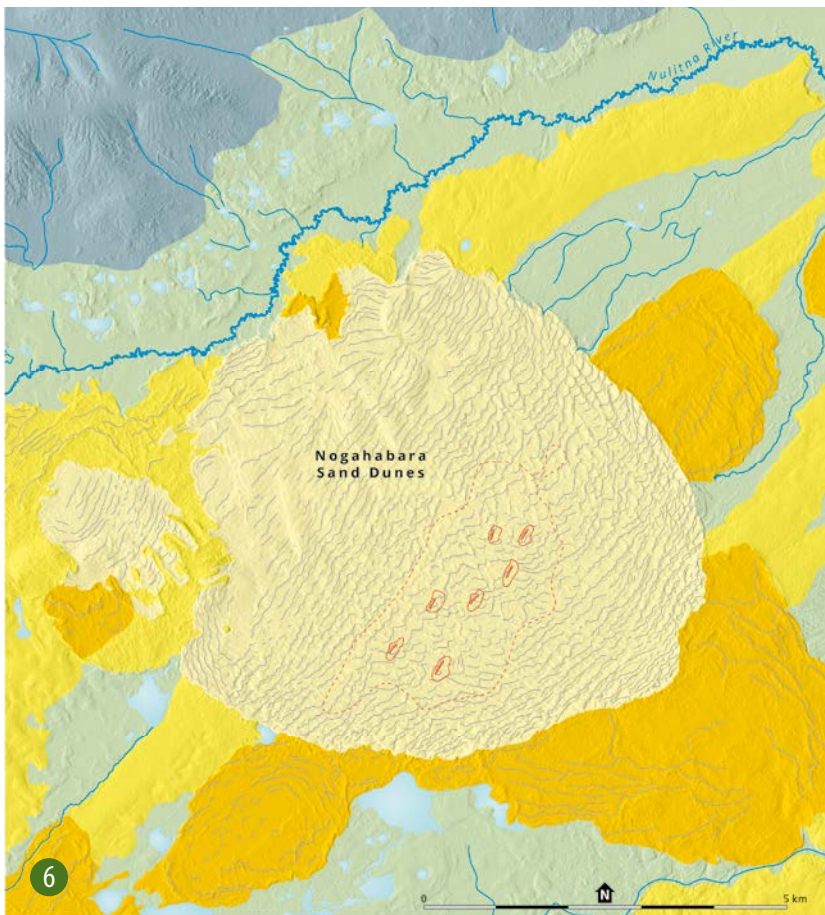
Het subarctische, semi-aride klimaat heeft een lang koud winterseizoen en een korte, relatief warme zomer. In Ambler bereiken februari resp. juli temperaturen gemiddelde waarden van -23.0 °C resp. + 15.2 °C; de gemiddelde jaartemperatuur is -5.6 °C. Als gevolg van deze laatst genoemde waarde wordt het noordelijk deel van het stroomgebied gekenmerkt door continue en in de riviervlakte discontinue permafrost. De neerslaghoeveelheden gedurende de wintermaanden zijn gering; orde van grootte 15-40 mm p/m, waarvan een flink deel valt in de vorm van sneeuw. De meeste neerslag valt in de periode juni-september; het jaargemiddelde bedraagt 500 à 600 mm.







De ongeveer 800 km lange Koyukuk rivier ontspringt eveneens in de Brooks Range en mondt uit nabij het plaatsje Koyukuk in de grote rivier de Yukon, die dwars door Alaska loopt. Het stroomgebied ligt overwegend ten zuiden van de poolcirkel en is ca. 83.000 km<sup>2</sup> groot. Langs de rivier liggen een paar kleine plaatsjes, waarvan Huslia (N 65° 42' 03<sup>11</sup>, W 156° 23' 25<sup>11</sup>) de grootste is met ongeveer 250 inwoners, die voornamelijk behoren tot het volk van de 'Koyukon Athabascan indianen'. De (sub)recente meandervlakte in de nabijheid van Huslia bereikt een breedte van wel 25 à 30 km, terwijl de duinvelden van de NSD op een afstand van 45 à 55 km ten westen van Huslia liggen. Het gemiddelde jaardebiet van de rivier is ongeveer gelijk aan dat van de Kobuk rivier, maar het maximale debiet tijdens de voorjaarsmelt kan oplopen tot 9300 m<sup>3</sup>/sec. Het klimaat is ongeveer hetzelfde als in de Kobuk vallei: de gemiddelde jaartemperatuur in Huslia is -5 °C, met als gevolg hiervan matig dikke, discontinue permafrost. De gemiddelde jan./febr. temperaturen bedragen -20 tot -23 °C resp. +14 à 15 °C.



### Duinvorming van de GKSD en NSD

De geomorfologie van beide nog actief bewegende, niet door vegetatie

AFBEELDING 5. | Geomorfologische schetskaart van de Great Kobuk Sand Dunes. Bron: Luchtfoto-interpretatiekaart van de Kobuk duinen en Kobuk rivierlakte (K.F. Kuhri-Helmens, E.A. Koster & J.P. Galloway, US Geol. Surv. Open-file Report 85-242, 1985).

AFBEELDING 6. | Geomorfologische schetskaart van de Nogahabara Sand Dunes. Bron: Luchtfoto-interpretatiekaart van de Nogahabara duinen en de Kuyukuk rivierlakte (E.A. Koster, J.P. Galloway & T. Pronk, US Geol. Surv. Open-File Report 84-10, 1984).

#### Zandige eolische sedimenten

- Actief stuivende duinen
- Gestabiliseerde duinen en 'sand sheets'
- Gestabiliseerde roset-vormige duinen
- Gestabiliseerde kano-vormige, 'blow out' duinen

#### Fluviatiele sedimenten

- Alluviale vlakten
- Ongedifferentieerde sedimenten**
- Vlak tot flauw hellende, laag gelegen gebieden, lokaal met duinmorphologie
- Colluviale hellingen

#### Vast gesteente

- Gebergten

#### Symbolen

- Rivieren
- Thermokarstmeer
- Terrasand
- Transversale duinen
- Parabool-vormige duinen
- Barchanoïde duinen



vastgelegde duincomplexen en hun omgeving is door analyse en interpretatie van zwart-wit (Afb. 3) en zgn. 'false-color infrared' luchtfoto's (Afb. 4), aangevuld met veldwaarnemingen, gekarteerd op een schaal van ca. 1:60.000 voor de USGS. In sterk verkleinde en vereenvoudigde vorm zijn uitsneden van deze kaarten weergegeven in afbeelding 5 en 6. De GKSD en NSD maken onderdeel uit van uitgestrekte duinvelden en dekzandvlaktes in diverse stadia van stabilisatie. De 'false-color infrared' luchtfoto's maken het mogelijk de groeikracht en dichtheid van de vegetatie op het duinoppervlak, als reflectie van de relatieve ouderdom en mate van stabilisatie van het duinoppervlak te bepalen. Op grond van de luchtfoto interpretatie is aldus een onderscheid gemaakt in jongere, matig gestabiliseerde en oudere, sterk gestabiliseerde duin- en dekzandoppervlakten. Bovendien kan een relatief onderscheid in ouderdom van de door vegetatie bedekte gebieden duinvelden en zandvlakten gemaakt worden op grond van de mate van fluviaatiele versnijding van het terrein en het voorkomen van veel of weinig thermokarstmeren of de langzamerhand dichtgegroeide restanten daarvan.

Het patroon van de kamlijnen zowel in de GKSD als in de NSD laat zien dat het duinoppervlak overwegend bestaat uit min of meer parallelle reeksen van transversale en barchanoïde duinen, die door zuid- tot noordoostelijke winden werden en worden getransporteerd. Barchanoïde duinen zijn op barchanen gelijkende duinen, die echter in tegenstelling tot 'typische' (of geïsoleerde) barchanen nog aan elkaar vastzitten en daarmee lijken op transversale, dwars op de windrichting geörienteerde duinreeksen. Zowel barchaanduinen als transversale duinen zijn het resultaat van een min of meer unimodaal windregime, maar verschillen in de mate van 'sand supply' (de beschikbaarheid van zand voor transport) van laag resp. hoog. De barchanoïde duinen in de GKSD bereiken hoogtes tot 40 meter. De duinreeksen worden gescheiden door tamelijk vlakke, 50-200 m brede, al dan niet tot op de onderliggende, grove riviersedimenten uitgestoven laagtes. Het windregime is zwak bimodaal; het dominerende windtransport vindt plaats door relatief sterke



AFBEELDING 7. | *Secundaire duinvorming op de kamlijn van grote transversale duinen.*



AFBEELDING 8. | *Ahnewetut Creek doorsnijdt de GKSD met een door de grote sedimentlast veroorzaakt vlechtend rivierpatroon (als schaal, zie ons helikopter transport). Foto: Koster.*

oostelijke winden (gem. windsnelheden > 6m/sec.) gedurende de wintermaanden, terwijl in de zomermaanden relatief zwakke westenwinden zorgen voor een secundaire, tegenovergestelde transportrichting, zoals goed te zien is aan het voorkomen van kleine secundaire duintjes met een oostwaarts gerichte lijzijde ('slip faces') boven op de kamlijnen van hoge barchanoïde duinen (Afb. 7). De Kavet Creek en de Niaktuvik Creek begrenzen het duinveld aan de zuidwestelijke rand, terwijl de Ahnewetut Creek zijn loop dwars door de Kobuk duinen heeft gehandhaafd ondanks de grote toevoer van eolisch materiaal voornamelijk tijdens de wintermaanden over het al dan niet bevroren rivieroppervlak (Afb. 8). Deze uitzonderlijk grote sedimentlast veroorzaakt een overgang van een meanderend naar een lokaal vlechtend (of anastomoserend) rivierpatroon, zoals dat ook wordt aangetroffen bij de William rivier, die de Athabasca Sand Dunes (Canada) in tweeën snijdt.

Duinhoogtes in de NSD bereiken hoogtes tussen de 5 en 28 meter. Het patroon van kamlijnen in de NSD is minder eenduidig dan gesuggereerd wordt in afbeelding 6, wat er op wijst dat de variatie in zandtransporterende windrichtingen groter is dan in de GKSD. In de meer of minder gestabiliseerde duincomplexen,

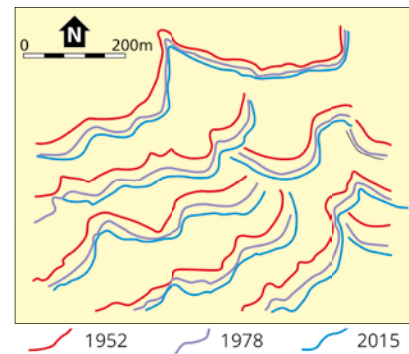




die het actieve duinveld van de NSD omringen, zijn tevens longitudinale duinen en opmerkelijke rosetvormige duinvelden aangetroffen (zie Afb. 5 en 6 en Baughman *et al.*, 2018). Dergelijke rosetvormige duinen zijn veelvuldig in andere gestabiliseerde duincomplexen in Alaska aangetroffen en worden beschouwd als het resultaat van sterk variërende windrichtingen.

De actieve duinvelden ontvangen geen nieuwe toevoer van sediment dankzij de volledige vegetatiebedekking van de omringende gestabiliseerde terreinen. Door veel neerslag in de zomermaanden en een beperkte sneeuwbedekking en een bevroren ondergrond in de wintermaanden zijn de migratiesnelheden van de duinen gering. Ook het zwak bimodale of sterker variabele karakter van het windregime draagt hieraan bij. Door middel van gedetailleerde analyse van Landsat en andere satelliet datasets zijn geringe migratiesnelheden van de transversale duinkammen in de GKSD vastgesteld in de orde van grootte van 0.5-1.5 m/j. (Necsoiu *et al.*, 2009). Een recente studie van Baughman *et al.* (2018) gebaseerd op zwart-wit luchtfoto's (uit 1952), 'color infrared' opnames (uit 1978), en LIDAR data (uit 2015) bevestigt de in de GKSD vastgestelde geringe migratiesnelheden en vermeldt een gemiddelde migratie van de transversale duinkammen in de NSD van ca. 0.6 m/j, gemeten over een periode van ca. 60 jaar (Afb. 9).

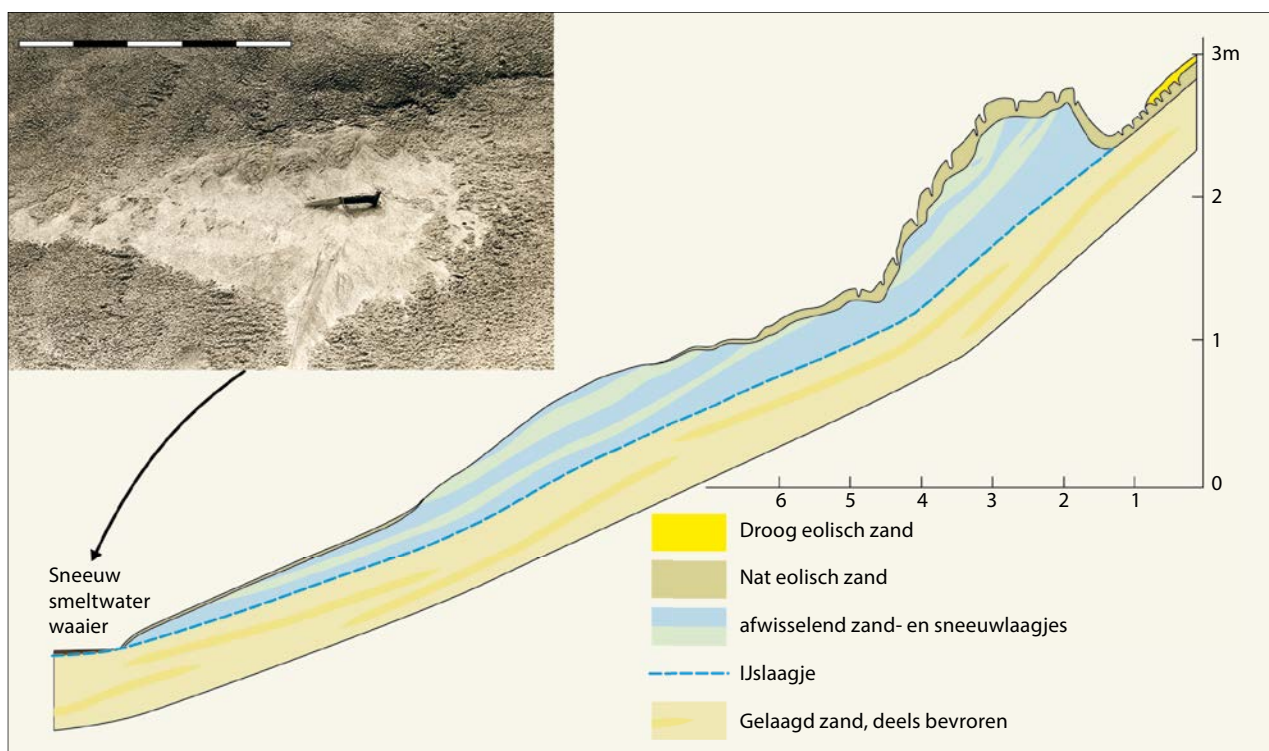
Als gevolg van afwisselende depositie van sneeuw en zand tijdens de wintermaanden zijn veelvuldig *niveo-eolische afzettingen* aangetroffen. Tijdens en na de voorjaarsmelt verdwijnen deze gelaagde afzettingen grotendeels weer door het afvloeien van sneeuwmeltwater (Afb. 10), winderosie van het oppervlak en of de afzetting van nieuwe zandlagen door de wind (Koster & Dijkmans, 1988). Dit laatste proces wordt *denivatie* genoemd. De resulterende gelaagdheid aan de lijzijde van een migrerend, onbegroeid duin wordt geïllustreerd in afbeelding 11. Deze fenomenen worden in nog meer detail beschreven door Hugenholtz *et al.* (2007) en Hooper & Dinwiddie (2014). Deze auteurs spreken in dit geval over 'sand-water flows' resp. 'debris flows', die eveneens het resultaat zijn van geconcentreerde afvoer van een mix van zand en sneeuwmeltwater op een al dan niet tijdelijk bevroren ondergrond in cold-climate duinen in ZW-Saskatchewan (Canada) resp. in de GKSD. 'Debris flows', worden formeel gedefinieerd als een meer of minder vervormbare ('viscoplastische' of 'dilatente') afstroming van een water en sediment mengsel, waarbij de sediment gewichtsconcentratie 70 à 90 % bedraagt. Het is evident dat niveo-eolische debris flows en andere



AFBEELDING 9. | Schets van de migratiesnelheid van duinkammen in een stukje van de NSD. Bron: Baughman *et al.*, 2018.

denivatie processen bij uitstek in 'cold-climate' duingebieden voorkomen.

De actieve duinvelden worden over het algemeen scherp begrensd door volledig gestabiliseerde terreinen overwegend bestaande uit droge of natte, lage toendravegetatie met ondiepe permafrost en of boreale bossen, zoals aan de zuidwest flank van de GKSD (Afb. 12). Daar waar het zandtransport vastloopt in de vegetatie zijn duinruggen ('randwallen' of 'precipitation ridges') gevormd. De bosvegetatie bestaat vooral uit witte en zwarte spar (*Picea glauca* en *Picea mariana*), witte berk en papierberk (*Betula pubescens* en *Betula papyrifera*), populier



AFBEELDING 10. | Sneeuwmeltwater waaier aan de voet van de duinhelling. Bron: Koster & Dijkmans, 1988.



(*Populus tremuloides*) en witte els (*Alnus crispa*). Op lager gelegen, nattere gebieden groeit Arctische wilg (*Salix arctica*) en dwergberk (*Betula nana*) en lage toendravegetatie (mossen en grassen). Hierdoor ontvangen de duinvelden op dit moment geen aanvoer van sediment uit de omgeving; windtransport vindt uitsluitend plaats door re-sedimentatie binnen de duinvelden zelf.

## Ouderdom

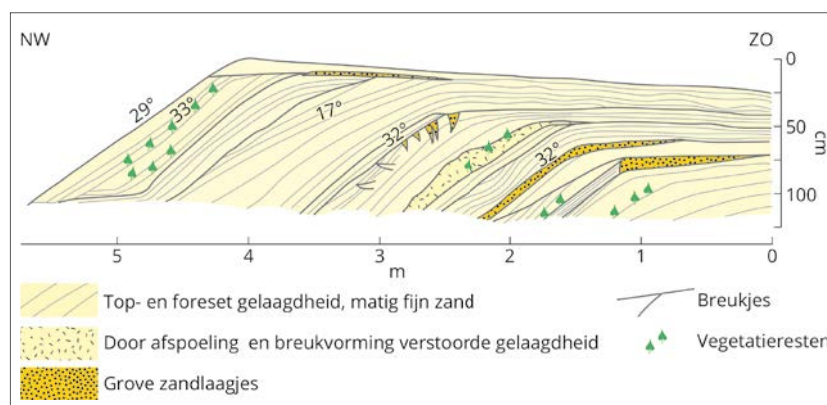
De Kobuk vallei was tijdens de Illinoian ('Saalien') glaciatie grotendeels met landijs bedekt, waardoor tot wel 50 m dikke fluvio-glaciale sedimentpakketten zijn afgezet. De oudste nu nog herkenbare duinvormen in de Kobuk vallei stammen waarschijnlijk uit het laat Wisconsinan ('Weichselien') en bestaan uit geresedimenteerde fluviale en fluvio-glaciale sedimenten. Tijdens de laatste glaciatie was het Kobuk rivierstroomgebied nauwelijks door ijs bedekt; de ijskap van de Brooks Range en Baird Mountains reikte toen niet verder dan de zijdalen van de Kobuk rivier in het noordoostelijke deel van het stroomgebied. Iets stroomopwaarts van het plaatsje Ambler is de laat-Wisconsinan ijsgrens gereconstrueerd op grond van de ligging van morene afzettingen. Tegen het einde van de laatste ijsuitbreiding lag de alluviale riviervlakte zo'n 30-35 m boven het huidige rivierniveau nabij de samenvloeiing van de Ambler en Kobuk rivieren, waarna vanaf ca. 24 000 jaar B.P. insnijding van de rivier volgde (Mann *et al.*, 2002). Door de insnijding van de rivier kwamen grote delen van de voormalige riviervlakte droog te liggen en bij afwezigheid van vegetatie ten gevolge van de extreme periglaciale ('aride poolwoestijn') condities vond eolisch transport van rivierzanden op grote schaal plaats. Deze periode valt samen met de zogenaamde Laat-Wisconsinan Itkillik II glaciatie van de centrale Brooks Range. Iets soortgelijks is aangetroffen bij het terrasniveau nabij Epiguruk, dat gelegen is op een hoogte van 19 m boven de huidige rivier, alwaar is vastgesteld dat de insnijding van de rivier 18 000 à 16 000 jaar geleden begon tegelijkertijd met omvangrijke duinvorming in de riviervlakte (Dijkmans & Koster, 1990; Mann *et al.*, 2002).

De studie van Mann *et al.* (2002) heeft door middel van een groot aantal

AMS C<sup>14</sup> dateringen van stratigrafische secties in de GKSD een nauwkeurige reconstructie van fasen van eolische activiteit gedurende het Holoceen geproduceerd. Deze secties zijn ontsloten in rivieroeveren langs de randen van de GLSD en omvatten tevens de eolische sedimentopvulling van enkele kleine meren, die gelegen zijn aan de noordwestelijke flank van het duinveld. Het blijkt dat een vroeg-Holocene fase van duinstabilisatie gevolgd werd door een viertal opeenvolgende fasen van actieve duinvorming omstreeks 4800-4200, 3300-2600, 1300-700 en 300-100 jaar geleden. In tegenstelling tot de Kobuk vallei werd het Kojukuk stroomgebied niet door landijs bedekt gedurende het Kwartair (midden Alaska was veel te droog voor landijsvorming). Over de ouderdom van de duincomplexen in de Kojukuk riviervlakte is weinig bekend. Dijkmans *et al.* (1986) en Baughman *et al.* (2018) vermelden dat koolstof-14 dateringen van kalkkorsten in de GKSD en NSD hebben aangetoond dat de vorming van deze duincomplex minstens 8.000-10 000 jaar geleden is aangevangen.

## Extraterrestrische duinvorming op Mars

Het belang van eolische processen op het Marsoppervlak is al ruim een eeuw bekend (Craddock, 2011). Al in de vijftiger jaren van de vorige eeuw werd gespeculeerd dat telescopisch waargenomen periodieke veranderingen in albedo waarden op Mars zouden kunnen wijzen op het optreden van grote stofstormen oftewel grootschalig eolisch transport. Latere satelliet waarnemingen (o.a. diverse Mariner satellieten) in de zestiger jaren en observaties door Viking 'Marslanders' in de zeventiger jaren brachten een doorbraak in de kennis van eolische fenomenen aan het Marsoppervlak. In de laatste twee decennia zijn door Marslanders (o.a. Phoenix, 2008, Curiosity, 2012 en Perseverance, 2021)



AFBEELDING 11. | Deformatie van de gelaagdheid op de lijzijde van een migrerend duin ('foreset slip-face strata'). Bron: Dijkmans, 1990.



AFBEELDING 12. | De migratie van het steile duinfront over de toendra-vegetatie aan de zuidwest zijde van de GKSD. Foto: Koster.



de eerder gecatalogiseerde, duizenden opnames van eolische sedimenten en landvormen in meer detail bestudeerd. Zij vormden de basis voor vele honderden wetenschappelijke studies waarin het optreden van atmosferische stof- of zandstormen en wind-hozen en de daaruit resulterende duintypen werden bediscussieerd. Windtransport blijkt een prominent mechanisme te zijn op het Marsoppervlak. Bourke *et al.* (2010) schatten dat de totale oppervlakte van duinvelden op Mars ongeveer 900 000 km<sup>2</sup> zal omvatten. Zo wordt de noordelijke poolkap op Mars omringd door gigantische duinvelden ('circumpolaire erg'), veelal bestaande uit lineaire, barchanoïde en transversale duinvormen, die unimodale of beperkt bimodale transportrichtingen representeren. Daarnaast komen op naar schatting 4000 plaatsen duincomplexen voor (Titus, *et al.*, 2021), in het bijzonder op die plaatsen waar sediment gemakkelijk ingevangen wordt door het reliëf, zoals in grote kraters. Een voorbeeld hiervan is de Proctor krater met een diameter van ca 150 km en een geschatte, deels eolische sedimentopvulling van 450 m dikte, beschreven in de dissertatie van Lori Fenton (2003). Vanwege de afwezigheid van vegetatie zijn paraboolvormige duinen uiteraard afwezig.

Voor zover het eolische processen op Mars betreft is veel recente informatie samengevat in verslagen en artikelen van de 'Planetary Dunes Workshop: a record of Climate Change', die plaatsvond in Alamogordo, New Mexico (nr. 1, 2008) en van de opeenvolgende 'International Planetary Workshops' in Alamosa, Colorado (nr. 2, 2010), Flagstaff, Arizona (nr. 3, 2012), Boise, Idaho (nr. 4, 2015), St. George, Utah (nr. 5, 2017), Alamosa, Colorado (nr. 6, 'virtual meeting' 2020, Alamosa, Colorado (nr. 7, 2022, 'postponed from' 2020).



AFBEELDING 13. | A. Denivatie verschijnselen op de lijzijde van een groot transversaal duin in de GKSD. B. Detailopname van het denivatie oppervlak (schaallint rechts op de voorgrond 1.5 m), Foto's: Koster.

Nader onderzoek – in vervolg op ons onderzoek in de periode 1980-1990 – naar specifieke *niveo-eolische en denivatie processen* onder huidige periglaciaire (sub-Arctische) condities in de resterende actieve duinvelden van de GKSD en NSD in Alaska (Nessoiu *et al.*, 2009; Dinwiddie, *et al.*, 2012, 2013; Fenton *et al.*, 2013; Hooper & Dinwiddie, 2014; Baughman *et al.*, 2018) heeft de veronderstelling versterkt dat soortgelijke processen van betekenis zijn (geweest) voor duinvorming op Mars.

## Kenmerken van de atmosfeer op Mars

Ondanks intensieve studie in de laatste tientallen jaren, zijn nog steeds veel aspecten van transport en sediment karakteristieken, ouderdom en herkomst van extraterrestrische duinen onder voormalige of huidige klimatologische condities onbekend (Fenton, *et al.*, 2010 en 2013). Dit kan vooral toegeschreven worden aan het feit dat de atmosferische condities op Mars totaal anders zijn dan die op Aarde. De atmosfeer van Mars bestaat voornamelijk uit kooldioxide (95.2 %) en lage percentages stikstof, argon en zuurstof, en zeer geringe hoeveelheden koolmonoxide en waterdamp. De atmosferische dichtheid van Mars is slechts een fractie van die op Aarde (gemiddelde oppervlaktedruk < 1%). Dit heeft volgens de meeste onderzoekers als gevolg dat vloeibaar water nabij het oppervlak niet kan voorkomen. De zwaartekracht op Mars is 62 % zwakker dan die op Aarde (3,7 m/s<sup>2</sup> versus 9.8 m/s<sup>2</sup>). Door de grotere afstand tot de zon en de samenstelling van de atmosfeer is de temperatuur op Mars bovendien veel lager dan die op Aarde, variërend van + 20° C tot -140° C. (gemiddelde waarde ongeveer -60 °C), waarbij komt dat de dagelijkse temperatuuramplitude vanwege de lage thermische inertie zeer sterk varieert (tot wel -75° C). Al de bovengenoemde factoren maken vergelijking met de aardse aerodynamische opname-, transport- en afzettingscondities moeilijk.

Zoals al eerder is beschreven, komen stofstormen en windhozen ('stofduivels'), die zelfs vanaf de Aarde met telescopen kunnen worden waargenomen, veel voor op Mars. Bij hoge windsnelheden (> 30 m/sec) kunnen zand- en stofdeeltjes opgetild en





verplaatst worden over zeer grote afstanden. Aangenomen wordt dat spronghoogtes en –lengtes van salterende zandkorrels wel een factor 10 tot 100 groter kunnen zijn dan op Aarde met als gevolg het ontstaan van uitzonderlijk grote duinen met veel grotere golfhoogtes (tot wel 500 à 600 m) in vergelijking tot de situatie op Aarde (Bourke *et al.*, 2010). Afgezien van het voorkomen van extreem hoge windsnelheden resulteert de hogere kinetische energie van salterende zandkorrels op Mars in een toename van de transportcapaciteit en mogelijk ook in de fysieke verwerking van het eolische materiaal. Wat betreft de korrelgrootteverdeling van eolisch getransporteerd sediment zijn grote verschillen geconstateerd. Duincomplexen overwegend bestaande uit stof (siltgrootte, < 50 µm) of zeer fijn zand (<50 à 100 µm) of grof zand (variërend van 300–600 µm) of uit stof bestaande aggregaten van zandgrootte zijn op allerlei plaatsen waargenomen. Bourke *et al.* (2010) concluderen overigens dat ondanks de grote verschillen in atmosferische condities er opmerkelijke overeenkomsten bestaan tussen extra-terrestrische en aardse duinvormen.

## Samenstelling en herkomst eolisch materiaal

In tegenstelling tot op Aarde bestaan windafzettingen op Mars voornamelijk uit door erosie en transport fijngemaakt pyroklastisch materiaal, zoals fijnverdeelde glaseeltjes en hoge percentages ijzerhoudende vulkanische mineralen (hematiet). Sterk verweerde zanden worden dientengevolge gekenmerkt door hoge percentages olivijn, pyroxeen, veldspaat en niet door mineralogisch arme kwartzanden, zoals op Aarde het geval is. Naast donkere zanden van basaltische, pyroklastische origine komen overigens ook lichter gekleurde eolische sedimenten van andesitische herkomst voor, die naar men verondersteld ook ontstaan zijn door explosieve erupties (Fenton *et al.*, 2010 & 2013). In de noordelijke polaire duinzanden zijn overigens ook significante hoeveelheden gehydrateerde calcium sulfaten (vermoedelijk gips) aangetroffen, hetgeen zou kunnen betekenen dat water een rol heeft gespeeld bij de vorming van mineralen. Dit alles betekent dat de samenstelling van duinzanden op Mars in verreweg de meeste gevallen sterk afwijkt van die op Aarde.

## Vergelijking niveo-eolisch transport en denivatie op Aarde en Mars

De meest grondige studie waarin een vergelijking gemaakt wordt van morfologische en sedimentologische kenmerken van niveo-eolische en denivatie processen op Aarde en op Mars is gepubliceerd door Hooper & Dinwiddie (2014). Door de periodieke afwisseling van condensatie en sublimatie processen in ijs/vorst cycli en de syngenetische afzetting van eolisch sediment kunnen in circumpolaire gebieden op Mars gelaagde sedimenten van CO<sub>2</sub> ijslaagjes en (misschien in zeer geringe mate H<sub>2</sub>O ijslaagjes) en zandlaagjes ontstaan.

Duinvorming op hoge breedtegraden op Mars wordt gekenmerkt door een relatief lage mobiliteit als gevolg van het optreden van deze CO<sub>2</sub> ijs/vorstcycli en of de aanwezigheid van permafrost nabij het oppervlak gedurende het winter seizoen (Bourke *et al.*, 2008). Door de seizoensale bedekking (tot 70% van het Marsjaar) met vorstlagen op de polaire duinen van Mars wordt bovendien de beschikbare tijd voor sedimenttransport gereduceerd. Een logisch gevolg hiervan is dat de migratie van de duinlijzen door denivatie processen beperkt blijft tot



AFBEELDING 14. | A. Detailopname van 'denivatie' verschijnselen ('frost-dust avalanches on steep dune scarps')

Bron: [http://viewer.mars.asu.edu/viewer/hirise#P=ESP\\_017138\\_2650\\_COLOR&T=2](http://viewer.mars.asu.edu/viewer/hirise#P=ESP_017138_2650_COLOR&T=2) B. Opname van een groot duinveld met barchanoïde duinen in de noordelijke circumpolaire erg op Mars, gemaakt door de HiRISE Reconnaissance Orbiter. Bron: [http://viewer.mars.asu.edu/viewer/hirise#P=ESP\\_017138\\_2650\\_RED&T=2](http://viewer.mars.asu.edu/viewer/hirise#P=ESP_017138_2650_RED&T=2)



minder dan 0.5 m/j, net zoals het geval is in (sub)Arctische duingebieden, zoals bij voorbeeld vastgesteld is in de Nogahabara duinen (Baughman *et al.*, 2018).

In de poolgebieden kan de oppervlaktetemperatuur lager zijn dan het vriespunt van kooldioxide (< -70° C), waardoor CO<sub>2</sub> gas kan condenseren, in extreme gevallen tot wel 1 à 2 m dik, vast droogijs. Bij stijging van de temperatuur wordt het droogijs via sublimatie weer aan de atmosfeer afgegeven. Bourke *et al.* (2008 en 2010) en Hooper & Dinwiddie (2014) bespreken uitvoerig de in de GKSD in Alaska en in de Victoria Valley duinen (Antarctica) voorkomende niveo-eolische afzettingen en aanverwante denivatie vormen (eerder waargenomen door Koster & Dijkmans, 1988, Afb. 13A & B) en wijzen op mogelijk overeenkomstige fenomenen, die zijn waargenomen op de lijzijden van duinen op Mars. Maar hierbij moet wel bedacht worden dat de door Hugenholtz *et al.* (2007) en Hooper & Dinwiddie (2014) besproken denivatievormen als 'sand-water flows' resp. 'debris flows' vanwege de vrijwel totale afwezigheid van water strikt genomen op het Marsoppervlak niet kunnen voorkomen. Of en onder welke condities hellingprocessen op Mars ten gevolge van vooral smelt van CO<sub>2</sub> ijs tot vergelijkbare fenomenen leidt, blijft voorlopig speculatie.

Tot slot, Dinwiddie (2012) en Titus *et al.* (2021) tonen afbeeldingen van het afglijden of afstorten van materiaal op de lijzijden van polaire duinen op Mars gedurende het vroege voorjaar wanneer de CO<sub>2</sub> vorstlaagjes opwarmen en vervolgens sublimeren (of afsmelten). Dit lijkt volgens de auteurs op verschijnselen die zijn waargenomen in de GKSD. Deze hoge resolutie (HiRISE) camera opnames zijn door de Mars Reconnaissance Orbiter (sinds 2006) gemaakt van

de duinkammen en lijzijden van barcanoïde duinen op Mars, die geaccentueerd worden door vorst-dooi verschijnselen (Afb. 14A & B). Echter, aangezien de procesgang van 'cold-climate' duinvorming op Mars tot nog toe uiteraard alleen gebaseerd is op louter indirecte waarnemingen, concluderen Hooper & Dinwiddie (2014) dat niveo-eolische sedimentatie en denivatie processen op Mars 'still poorly understood' zijn.

## Dankwoord

Dank ben ik verschuldigd aan Maarten Kleinhans en Lonneke Roelofs (Fac. Geowetenschappen, UU) voor hun adviezen over de geologie en atmosferische condities op de planeet Mars. Ton Markus (kartograaf Fac. Geowetenschappen, UU) heeft zoals in voorgaande jaren alle afbeeldingen voor mijn artikel getekend en/of opgepoetst, waarvoor veel dank.

## LITERATUUR

- Baughman *et al.*, 2018. *Remotely Sensing the Morphometrics and Dynamics of a Cold Region Dune Field Using Historical Aerial Photography and Airborne LiDAR Data. Remote Sensing*, vol. 10/5, 792 (1-19).
- Bourke, M.C. *et al.*, 2008. *Recent aeolian dune change on Mars. Geomorphology* 94, 247-255.
- Bourke, M.C. *et al.*, 2010. *Extra-terrestrial dunes: an introduction to the issue on planetary dune systems. Geomorphology* 121, 1-14.
- Craddock, R.A., 2011. *Aeolian processes on the terrestrial planets: Recent observations and future focus. Progress in Physical Geography* 36/1, 110-124.
- Dinwiddie, C. L., 2012. *The Great Kobuk Sand Dunes in Alaska provide an Earth analog for martian geology. Technology Today Winter 2012, Southwest Research Institute, San Antonio, Texas*, 2-5.
- Dinwiddie, *et al.*, 2013. *Satellite data constrain interpretations of geophysical data from the Great Kobuk Sand Dunes, Alaska. SEG/AGU Joint Workshop 6-8 Jan. 2013, Boise State University, Idaho*, 1-4.
- Dijkmans, J.W.A. *et al.*, 1986. *Characteristics and origin of calcretes in a subarctic environment, Great Kobuk Sand Dunes, Northwestern Alaska, U.S.A. Arctic and Alpine Research* 18/4, 377-387.
- Dijkmans, J.W.A., 1990. *Niveo-aeolian sedimentation and resulting sedimentary structures; Søndre Strømfjord area, western Greenland. Permafrost and Periglacial Processes* 1, 83-96.
- Dijkmans, J.W.A. & E.A. Koster, 1990. *Morphological development of dunes in a subarctic environment, Central Kobuk Valley, North-western Alaska. Geografiska Annaler* 72A, nr. 1, 93-109.
- Fenton, L.K. *et al.*, 2010. *Summary of the Second International Planetary Dunes Workshop: Planetary analogs – Integrating models, remote sensing and field data, Alamosa, Colorado, USA, May 18-21, 2010. Aeolian Research* 2, 173-178.
- Fenton, L.K. *et al.*, 2013. *Summary of the Third International Planetary Dunes Workshop: Remote sensing and image analysis of planetary dunes, Flagstaff, Arizona, USA, June 12-15, 2012. Aeolian Research* 8, 29-38.
- Hooper, D.M. & C.L. Dinwiddie, 2014. *Debris flows on the Great Kobuk Sand Dunes, Alaska: Implications for analogous processes on Mars. Icarus* 230, 15-28.
- Hugenholtz, C.H. *et al.*, 2007. *Sand-water flows on cold-climate eolian dunes: environmental analogs for the eolian rock record and martian sand dunes. J. Sedim. Res.* 77, 607-614.
- Koster, E.A. & J.W.A. Dijkmans, 1988. *Niveo-aeolian deposits and denivation forms, with special reference to the Great Kobuk Sand Dunes, north-western Alaska. Earth Surface Processes and Landforms* 13, 153-170.
- Koster, E.A., 1992. *Duin- en dekzandvorming in 'koude woestijnen'. Grondboor & Hamer 1992, 4/5/6, pp. 81-92.*
- Mann, D.H. *et al.*, 2002. *Holocene history of the Great Kobuk Sand Dunes, Northwestern Alaska. Quaternary Science Reviews* 21, 709-731.
- Necsoiu, M. *et al.*, 2009. *Monitoring migration rates of an active subarctic dune field using optical imagery. Remote Sensing of Environment* 113, 2441-2447.
- Titus, T.N., Diniega, S., Fenton, L.K., Neakrase, L. & J. Zimbelman, 2021. *Planetary dunes tell of otherworldly winds. EOS* 102, <https://doi.org/10.1029/2021EO210684>.
- Wolfe, S. *et al.*, 2011. *Dune stabilization in central and southern Yukon in relation to early Holocene environmental change, northwestern North America. Quaternary Science Reviews* 30, 324-334.

