

Algemeen Rapport

Geostatistische analyse spijkermetingen

EP Document Nummer.:	EP200904215756	Owner:	S Kampshoff
Revision No.:			
Document Date:	22-04-2009	Security:	Restricted

The copyright of this document is vested in Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., Assen, The Netherlands. All rights reserved. Neither the whole, nor any part of this document may be reproduced, stored in any retrieval system or transmitted in any form or by any means (electronic, mechanical, reprographic, recording or otherwise) without the prior written consent of the copyright owner.

Inhoudsopgave

Motivatie	3
Geostatistische Analyse en kriging	5
Basisbegrippen	5
Meetnet Ameland	6
Variogram analyse.....	7
Kriging / Predictie	9
Discussie	9
Conclusies	10
Uitzicht	11
Bijlagen	14
Histogrammen en variogrammen	14
Temporele analyse per meetpunt (linear fit)	15

Motivatie

Ten behoeve van de uitwerking van de sedimentatie- en erosiemetingen in de Waddenzee is nader onderzoek gedaan naar de toepasbaarheid van Geostatistiek, met name kriging, op deze data. Kriging is een geostatistische interpolatiemethode die gebruik maakt van zogeheten variogrammen. Een variogram beschrijft de ruimtelijke (niet-)overeenkomst binnen de waargenomen data als functie van de afstand van de meetlocaties. Als er een ruimtelijke structuur uit de variogram analyse zichtbaar wordt, dan kan deze gebruikt worden om een vlakdekkende voorspelling/predictie kaart van de sedimentatie (incl. onzekerheid) binnen het meetgebied te creëren.

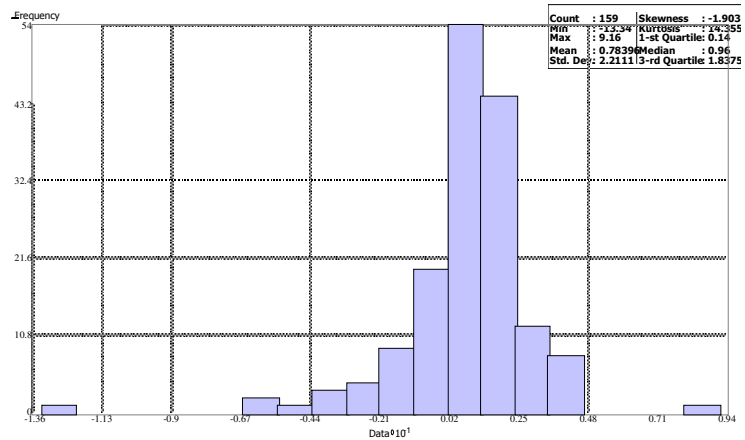
De kernvragen die wij benaderen zijn:

1. Hoe groot is de meetruis van de spijkermetingen (nugget effect)?
2. Is er een ruimtelijke structuur en afhankelijkheid in de data die het mogelijk maken om een uitspraak te doen over
 - a. sedimentatie en erosie in het gehele gebied, dus een uitspraak over elk willekeurig punt tussen de gemeten stations,
 - b. de meerwaarde van geostatistiek ten opzichte van het gebruik maken van de aritmetische gemiddelden van de puntmetingen,
 - c. een theoretisch optimale, ruimtelijke verdeling van meetstations om de aanwezige ruimtelijke structuur (autocorrelatie) waar te nemen,
 - d. de aanwezigheid van een significante (identificeerbare) grootschalige (lage frequentie) component in de metingen, die gekoppeld kan worden aan de eveneens grootschalige bodemdaling door gaswinning.

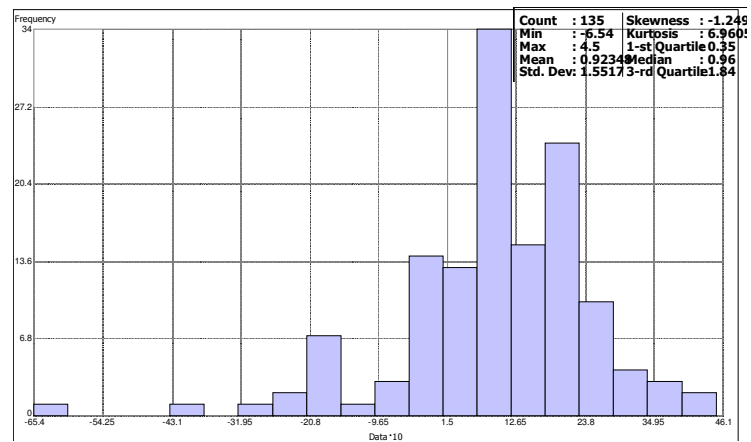
Ter beantwoording van deze vragen is een geostatistische aanpak gekozen, die wisselwerkingen tussen ruimtelijke en tijdelijke dimensies buiten beschouwing laat. Om de ongetwijfeld aanwezige tijdsafhankelijkheid wel mee te nemen, is een lineaire trend per spijkerpunt bepaalt (sedimentatie/erosiesnelheid in cm per jaar). Van de totale hoeveelheid spijkerpunten (159) zijn alleen de punten met een tijdreeks langer dan 12 maanden (135) in de analyse meegenomen.

De geostatistische analyse wordt uiteindelijk op basis van de sedimentatie-snelheden uitgevoerd. Door deze aanpak wordt verondersteld dat de ruimtelijke structuur/correlatielengte van de data niet verandert in de loop van de tijd. Voordeel van deze aanpak is dat geen vermenging van correlaties tussen de dimensies ruimte en tijd kan optreden.

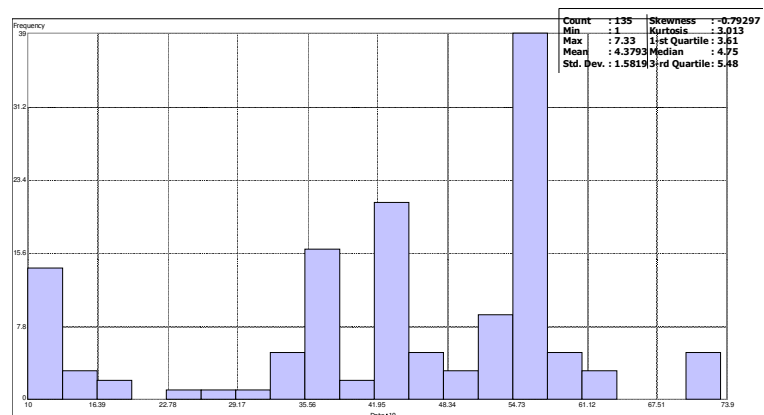
Het resultaat van de trendanalyse wordt in bijlage 1 weergegeven. Het histogram van de snelheden over alle meetpunten ziet als volgt uit:



**Figuur 1, Histogram sedimentatie / erosiesnelheden alle punten,
x-as: sedimentatiesnelheid in cm per jaar * 10^{-1}**



**Figuur 2 Histogram selectie punten >12 maanden
x-as: sedimentatiesnelheid in cm per jaar * 10**



**Figuur 3 Histogram waarnemingsperiode punten>12 maanden
x-as: waarnemingsperiode in jaren * 10**

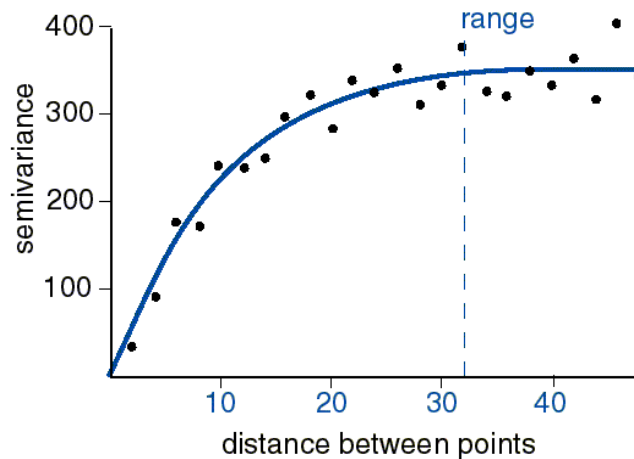
Geostatistische Analyse en kriging

Basisbegrippen

Er dient aan een aantal voorwaarden voldaan te worden voordat Kriging toegepast mag worden. Voornaamste criteria zijn 1) dat de data geen willekeurige selectie is van metingen (dus in hetzelfde soort gebied), 2) dat de meetstations zo verspreid mogelijk over het gebied liggen en 3) dat alle meetstations onder invloed staan van dezelfde processen. Ook is het van belang dat de ruimtelijke dichtheid van de meetstations dusdanig is dat het signaal voldoende bemonsterd wordt. In het ideale geval bestaat het empirische variogram uit een puntenwolk die een bepaald afstandsafhankelijk patroon vertoont. De definitie van het empirisch variogram is als volgt:

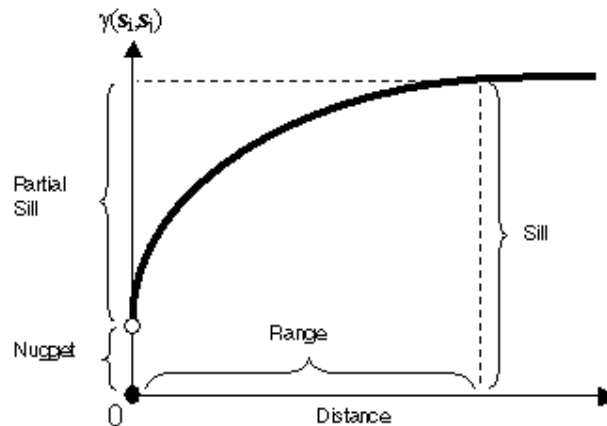
$$\gamma(\mathbf{s}_i, \mathbf{s}_j) = \frac{1}{2} \text{var}(Z(\mathbf{s}_i) - Z(\mathbf{s}_j))$$

Hierdoor kan vervolgens een lijn gefit worden (het theoretische variogram) die vervolgens de basis is voor alle predicties in het gebied. Onderstaand Figuur 4 geeft een 'mooi' variogram van een dataset met een duidelijke autocorrelatie weer.



Figuur 4 Voorbeeld variogram fit

Op de x-as staat de afstand tussen de punten en op de y-as de variantie. Vervolgens zijn er een aantal parameters te definiëren, te weten de range, de (partial) sill en de nugget, hieronder grafisch weergegeven



Figuur 5 Basisbegrippen variogram, nugget, sill, range

- De range is het interval (op x-as) waarbinnen het variogram een continue toename laat zien. De ruimtelijke covariantie neemt parallel hiermee af en bereikt op de range de waarde nul.
- De sill is de verwachte maximale variantie van de data (op y-as) en geeft de variatie aan op afstanden waar het signaal niet meer ruimtelijk gecorreleerd is.
- De partial sill is de differentie van sill en nugget, en representeert de ruimtelijk gecorreleerde component in het signaal.
- De nugget is het interval tussen de nulpunt en het punt waar het variogram de y-as zal kruisen. De nugget is de afstandonafhankelijke variatie in de gemeten sedimentatie/erosie. Dit zal een combinatie zijn van de meetruis, de mogelijke beweging van de spijkers in de ondergrond, de idealisatie precisie waarmee erosie/sedimentatie gemeten kan worden, en microvariatie van het signaal.

De formele samenhang tussen het semivariogram en de covariantie functie is als volgt:

$$Y(s_i, s_j) = \text{sill} - C(s_i, s_j)$$

Meetnet Ameland

De Ameland metingen komen als volgt overeen met de boven genoemde voorwaarden voor de toepassing van een geostatistische analyse:

Criterium	Spijkermetingen	Analyse
fysiotoop	Allen op wadplaat	Bewust allemaal op wadplaat gestationeerd.
spreiding	Random	Liggen vrij verspreid over gebied van +/- 2.5x7.5km
Invloeden buitenaf	Zelfde soort metingen	Alle meetstations worden beïnvloed door dezelfde processen
Tijd	elke 2 maanden	Geen tijdsrestrictie

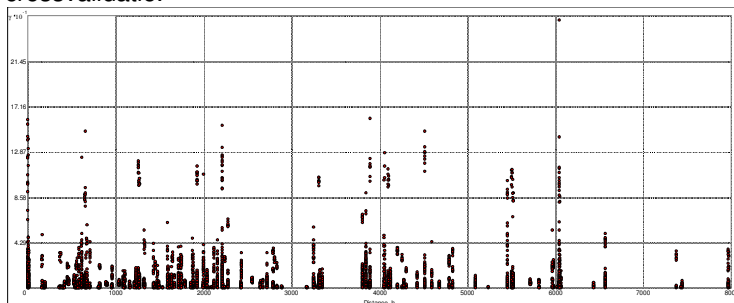
Tabel 1 Voorwaarden toepassing geostatistiek



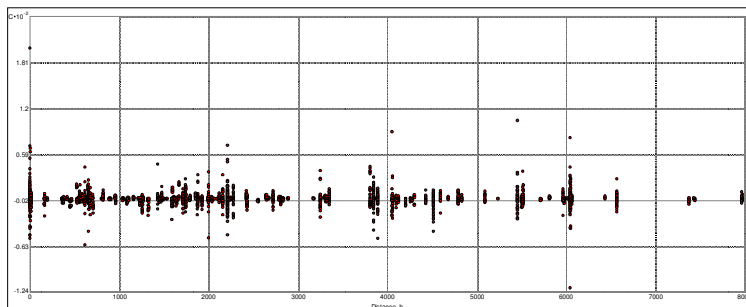
Figuur 6 Overzicht spijkerpunten

Variogram analyse

Voor de variogram analyse is de geostatistical analyst uit ArcGIS (ESRI, Redlands) toegepast. Dit pakket biedt de mogelijkheid om een theoretisch variogram voor de waargenomen data te fitten (least squares fit). Hierbij worden optimale waarden voor de boven beschreven nugget en range parameters geschat. Verder biedt dit pakket de mogelijkheid om een mogelijke richtingsafhankelijkheid in het variogram te bepalen (anisotropie). Een validatie van de kwaliteit van een gekozen variogram vindt vervolgens plaats middels crossvalidatie.

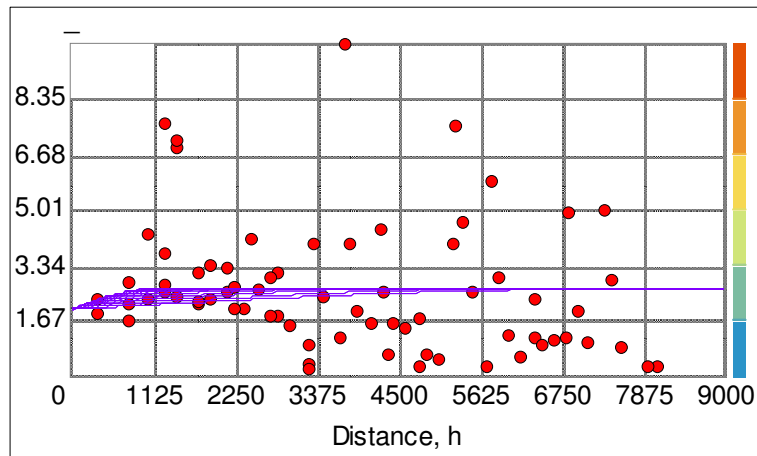


Figuur 7 Semivariogram sedimentatie / erosie sneleden



Figuur 8 Covariance cloud

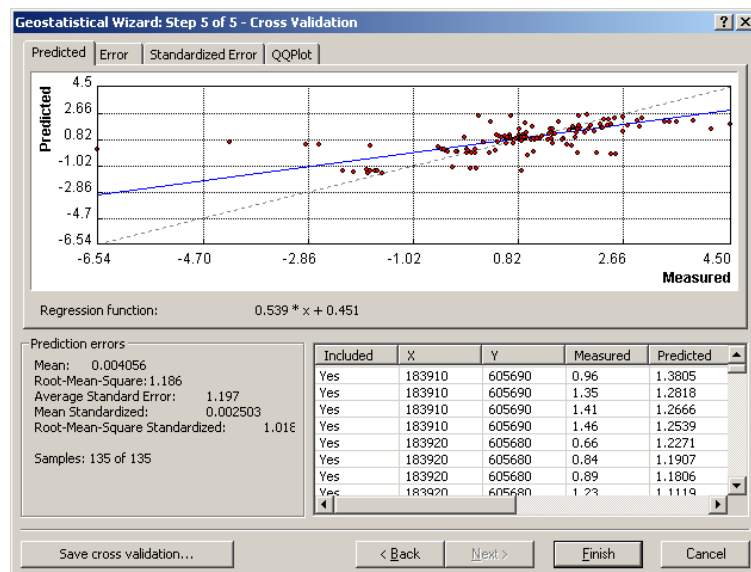
De variogram fit van verschillende analytische variogrammen met de gemeten sedimentatie en erosiesnelheden leid tot het volgende anisotropische analytische variogram (lag size=500m):



Figuur 9 Resultaat variogram fit

$$0.61924 * \text{Spherical}(7747.8, 1125.2, 67.4) + 1.9872 * \text{Nugget}$$

Het best fittende spherische variogram voor Universal Kriging met een constante trend laat dus een nugget effect van 2 (cm/jaar)^2 , een range van 7750/1125 m met een richting van 67.4 graden en een partial sill van 0.62 (cm/jaar)^2 zien. De nugget bestaat volgens de fouten modellering uit een meetfout component van 1.3 (cm/jaar)^2 en een micro structuur component van 0.7 (cm/jaar)^2 (zie ook Figuur 17).



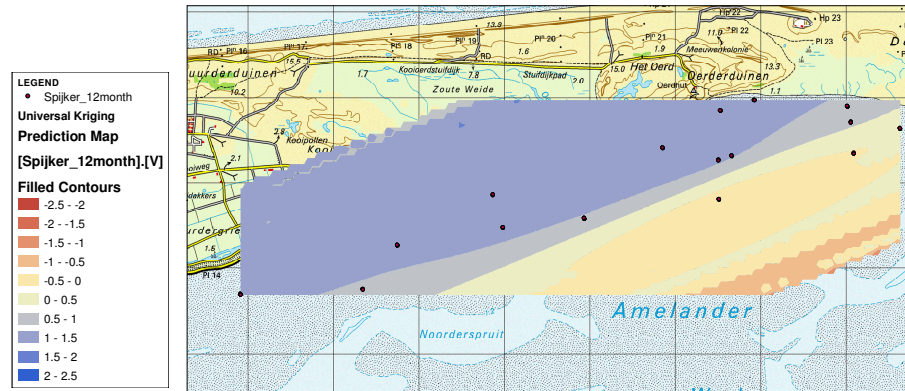
Figuur 10 Crossvalidation

Citaat handleiding ArcGIS Geostatistical Analyst:

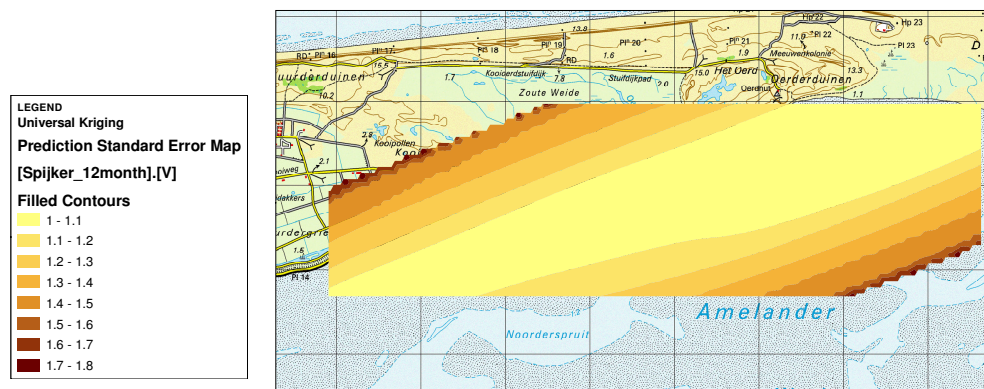
“In the Predicted plot the fitted line through the scattered points is given in blue with the equation given just below the

plot. The plot helps to show how well the kriging model makes predictions. **If all the data were independent (no autocorrelation), all predictions would be the same (every prediction would be the mean of the measured data), so the blue line would be horizontal.** With autocorrelation and a good kriging model, the blue line should be closer to the 1:1 (black dashed) line. “

Kriging / Predictie



Figuur 11 Predictie kaart snelheden cm/jaar



Figuur 12 Predictie fout (1-sigma) kaart snelheden cm/jaar

Discussie

Tijdens het onderzoek naar de variogrammen van de data in Ameland kwamen een aantal punten naar voren:

- De variatie in het empirisch variogram is groot, en de sill en range is niet goed te bepalen.
- De nugget effect is met $2(\text{cm/jaar})^2$ meer dan drie keer zo hoog als de partial sill van $0.6 (\text{cm/jaar})^2$. In verhouding met de meetruis $(1.3 (\text{cm/jaar})^2)$ en microstructuur 0.7

(cm/jaar)²) is de aanwezige ruimtelijk gecorreleerde component klein.

- De range ligt tussen 1.5 en 7 km, maar is gezien de kleine partial sill niet significant bepaald.
- De kleine hoeveelheid autocorrelatie wordt ook door de cross-validatie bevestigd. De plot van de predictie tegen de metingen resulteert in een lijn met een stijging van 0.5. Dit is typisch voor datasets met weinig autocorrelatie. De crossvalidatie laat verder een RMS van 1.2 cm/jaar zien. Dit is niet significant beter dan de absolute variatie van de snelheden t.o.v. het aritmetische gemiddelde (1.5 cm/jaar, zie Figuur 2).
- De predictiekaart laat binnen het meetgebied gemiddeld een sedimentatie van -0.5 – 1.5cm/jaar zien.
- De predictie fout ligt met 1cm/jaar op een niveau met het geprediceerd signaal.

Conclusies

Op basis van de uitgevoerde geostatistische analyse kunnen wij als volgt op de boven gestelde vragen antwoorden.

1. Hoe groot is de meetruis van de spijkermetingen (nugget effect)?

De meetruis van de spijkermetingen met een meetreeks van minimaal 12 maanden ligt bij 1.1cm/jaar. Uit de 'linear fits' per meetpunt resulteert een gemiddelde standaardafwijking van circa 1.6 cm voor een enkele aflezing/meting¹.

2. Is er een ruimtelijke structuur en afhankelijkheid in de data die het mogelijk maakt om een uitspraak te doen over
 - a. sedimentatie en erosie in het gehele gebied, dus een predictie ook op elk willekeurig punt tussen de gemeten stations,

Er is geen significante ruimtelijke structuur in de data, die door een cross-validatie bevestigd kan worden. Dit wordt ook duidelijk in de verhouding van de geschatte nugget en partial sill parameters. De toevallige variatie in de data is meer dan een factor 3 hoger dan de ruimtelijk gecorreleerde component.

- b. de meerwaarde van geostatistiek ten opzichte van het gebruik maken van de aritmetische gemiddelde van de puntmetingen,

Gezien de argumenten onder a. heeft de toepassing van een geostatistische analyse methodiek geen meerwaarde ten opzichte van een puur temporele analyse per meetpunt.

- c. een theoretisch optimale, ruimtelijke verdeling van meetstations om de aanwezige ruimtelijke structuur (autocorrelatie) waar te nemen,

Wij vermoeden dat het geomorphologisch signaal in

¹ Dit is een benadering, de standaardafwijking moet eigenlijk via een gezamenlijke vereffening van alle 'linear fits' bepaald worden.

de Waddenzee twee componenten heeft met a) een korte golflengte van enkele decimeters en een relatief grote magnitude van enkele cm/jaar, en b) een lange golflengte van enkele km en een kleine magnitude die voor de korte termijn niet groter is dan de korte golflengte component.

Wij vermoeden daarom, dat het nodig is om een zeer hoge sampling rate in ruimte toe te passen, om de hoge magnitude korte golflengte effecten (dus korte termijn lokale effecten) van een grootschalig effect met een kleinere magnitude (lange termijn meegroeivermogen) te kunnen scheiden.

De toepassing van spijkermetingen lijkt ons hiervoor in principe niet geschikt.

- d. de aanwezigheid van een significante (identificeerbare) grootschalige (lage frequentie) component, die gekoppeld kan worden aan de eveneens grootschalige bodemdaling door gaswinning.

Gelet op het feit, dat de lage frequentie ruimtelijke component van de gemeten sedimentatiesnelheden twee tot drie keer kleiner is dan de meetruis van de toegepaste meetmethode, en de predictie fout van de geostatistische analyse even groot is als de predictie zelf, kan er geen sprake zijn van een significante grootschalige component op basis van deze metingen.

Uitzicht

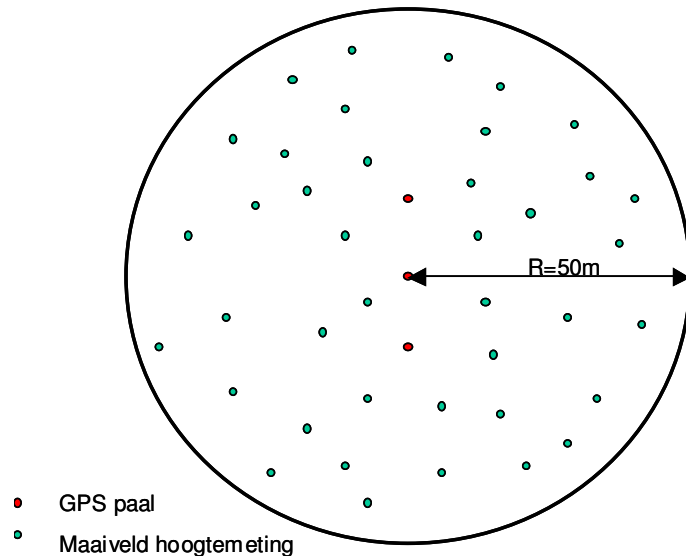
De uitgevoerde analyse veronderstelt een lineair gedrag van de sedimentatie en erosie in de loop van de tijd en werkt verder niet integraal maar sequentieel. Dit kan verbeterd worden door toepassing van een integrale anisotrope 3D (2D in ruimte, 1D in tijd) geostatistische analyse. In deze zin kan de toegepaste methodiek geoptimaliseerd worden.

Gebaseerd op de huidige analyse maken wij drie alternatieve suggesties ter vervanging van de spijkermetingen. De eerste suggestie is een terrestrische methode, die gebruik maakt van de bestaande diep gefundeerde GPS punten. Deze methode is in staat om korte golflengte effecten met een correlatielengte tot 50m te filteren. De twee andere mogelijke alternatieven zijn voor deze toepassing nog van experimentele aard en werken vlakdekkend binnen bepaalde gebieden (enkele kombergingen) middels actieve remote sensing. Hiervoor komen laser scanning (LIDAR) en radar-interferometrie (InSAR) in aanmerking.

1. Terrestrische maaiveldmetingen

Binnen een straal van circa 50m om de bestaande GPS punten worden 'pseudo-random' gelijkmatig verdeelde maaiveldhoogten gemeten. De diep gefundeerde GPS punten zijn gegroepeerd in clusters van drie palen en zijn met een afstand van 2km over de wadplaten verdeeld. De maaiveldhoogtemeting gebeurt middels waterpassing vanuit het centrale GPS punt, de horizontale ligging van de punten wordt middels GPS RTK bepaald. De verdeling van de punten is

toevallig per kwadrant (b.v. 10 punten 'random stratified' per kwadrant, zie Figuur 13). In vergelijking met de spijkermetingen hebben deze metingen a) een stabielere, diep gefundeerde referentie b) een meetprecisie van enkele mm (aflezing waterpas) c) een lokaal vlakdekkende verdeling, waardoor effecten met een golflengte < 50m uitgemiddeld kunnen worden.



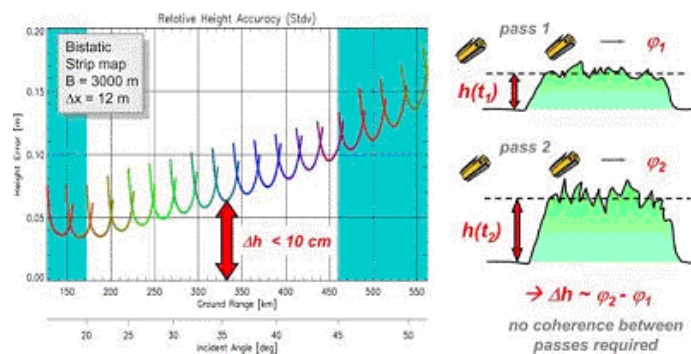
Figuur 13 Hoogtemetingen maaiveld rond om bestaande GPS punten

2. Met laser scanning (LIDAR) kunnen aan land ruimtelijke frequenties van 10 punten/m² en een verticale resolutie van circa 3cm bereikt worden (->informatie b.v. Fugro flymap). Het feit, dat het wad een gladde oppervlakte heeft, kan tijdens de verwerking voor een verdere verhoging van de nauwkeurigheid benut worden. De uitdaging ligt bij dit type metingen in het beheersen van het getij (lage waterstand), de opnamebreedte in verband met de natheid van het gebied (spiegelreflectie) en de vliegoperaties incl. de nodige vergunningen. Het operationele gedeelte is principieel een stuk makkelijker op te lossen dan bij gewone (optische) vliegfoto's, omdat laser metingen ook bij nacht kunnen worden uitgevoerd. Standaard LIDAR is niet in staat om door water heen te meten. Dit kan wel met een speciale apparatuur (groene laser), echter met een factor 4-5 lagere nauwkeurigheid.
3. De toepassing van PS-InSAR voor de bepaling van verticale deformaties is beperkt tot gebieden met een voldoende hoge bedekking van natuurlijke reflectoren ('persistent scatterers' met hoge tijdelijke coherentie). De natuurlijke variatie binnen de Waddenzee in combinatie met de beperkte hoeveelheid opnames bij een voldoende lage waterstand, maakt het onmogelijk om PS-InSAR op het wad uit te voeren. Het plaatsen van hoekreflectoren is geen alternatief, omdat met dit type diep gefundeerde peilmerken de compactie uit de diepe ondergrond bepaald wordt (dus geen sedimentatie).

Een mogelijk alternatieve (beperkt toepasbare) methode die in de toekomst wel in staat is om de relatieve verandering in de

hoogteligging op het wad vlakdekkend te bepalen is double difference InSAR. Deze techniek maakt gebruik van twee radar satellieten die als een tandem in hun orbit vliegen.

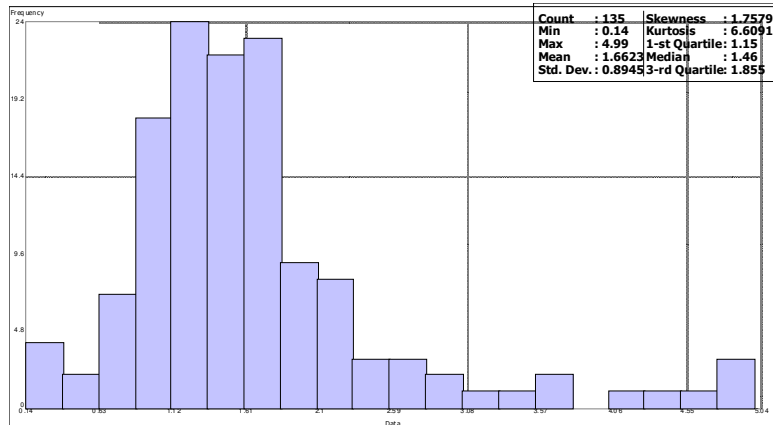
Door een double difference analyse van de tandemdata kan de relatieve verandering in de hoogteligging integraal met een nauwkeurigheid van < 5cm worden bepaald. Het wereldwijd eerste tandemsysteem – tandem-X van EADS / infoterra GmbH – wordt naar alle waarschijnlijkheid eind 2009 operationeel. Deel een van de tandem – de terrasars-X satelliet – is sinds begin 2008 operationeel. NAM heeft al in 2007 eerste foto's van terrasars-X voor de gebieden Waddenzee en Groningen ontvangen en zal deze techniek volgen op toepasbaarheid voor het beoogde doel.



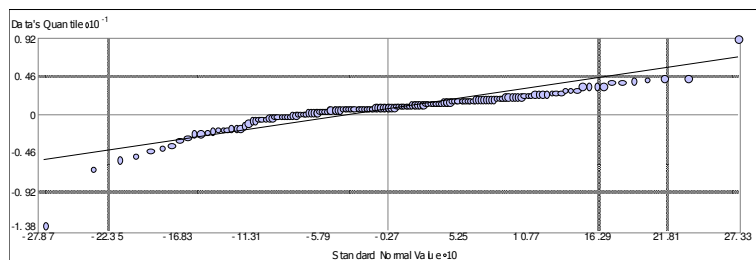
Figuur 14 Double differential InSAR [Krieger et al.: TanDEM-X: A Satellite Formation for High-Resolution SAR Interferometry. IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL. 45, NO. 11, NOVEMBER 2007]

Bijlagen

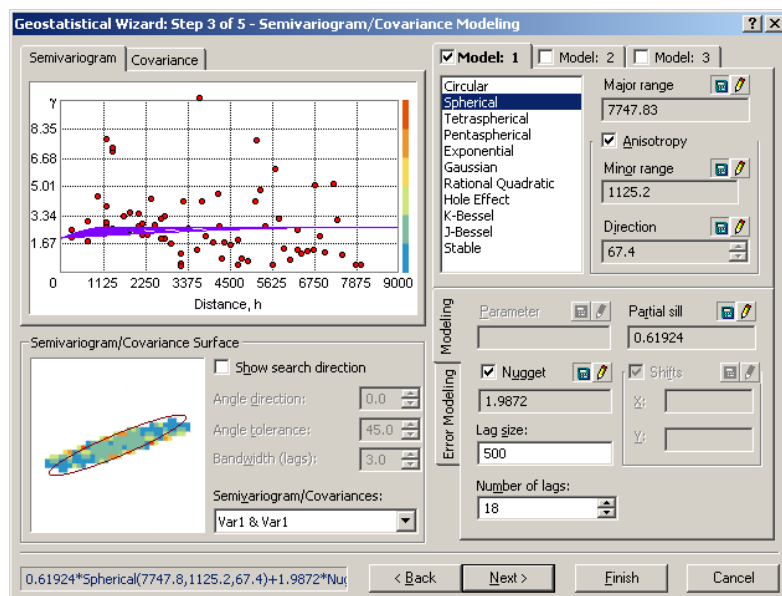
Histogrammen en variogrammen



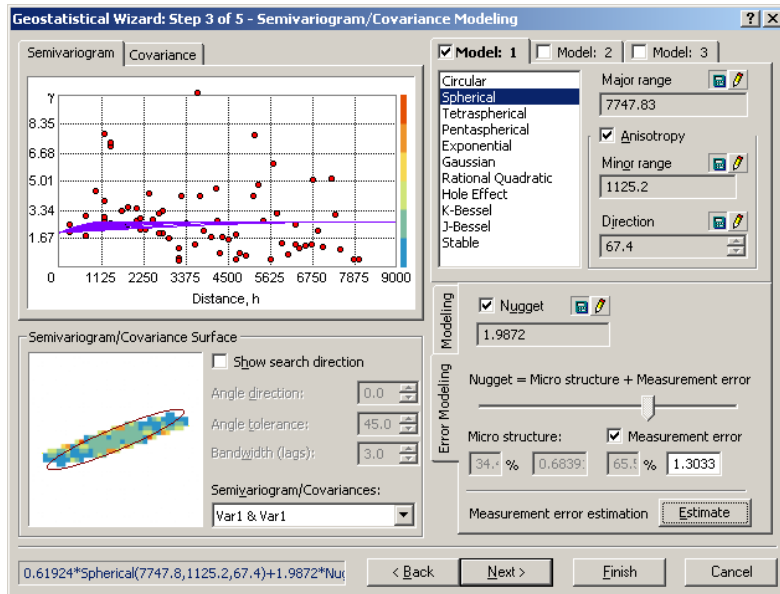
Figuur 15 Histogram standard deviatie van de linear fits



Figuur 16 QQ Plot sedimentatie/erosie snelheden



Figuur 17 Anisotropic spherical variogram fit



Figuur 18 Error modelling: analysis of nugget into micro structure and measurement error

Temporele analyse per meetpunt (linear fit)

