



Ministerie van Verkeer en Waterstaat

Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat

RIZA Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling

De nauwkeurigheid bij het ruimtelijk interpoleren (met SURFIS)

Van bodemhoogten in het Spijkerboor

RIZA rapport 2000.003

Dit rapport is te bestellen à f 25,- per stuk bij Cabri Mailservice, Postbus 431, 8200 AK Lelystad,
Tel. 0320-285333, Fax. 0320-241121, E-mail riza@cabri.nl

Betaling na levering; een acceptgiro wordt bijgevoegd.

Het rapport is gratis voor dienstonderdelen van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat.

This publication can be ordered at DFL 25,- per copy through Cabri Mailservice, PO Box 431,
8200 AK Lelystad, The Netherlands, Tel. +31 320 285333, Fax. +31 320 241121, E-mail riza@cabri.nl
Payment on delivery.



Ministerie van Verkeer en Waterstaat

Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat

RIZA Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling

De nauwkeurigheid bij het ruimtelijk interpoleren (met SURFIS)

van bodemhoogten in het Spijkerboor

RIZA rapport 2000.003

ISBN 90 3695 298 0

auteur: A. Fioole

RIZA

Dordrecht, januari 2000

1 Inleiding 7

2 Ruimtelijke interpolatie 11

2.1 Inleiding 11

2.2 Interpolatie van alle meetgegevens in het Spijkerboor uit 1993 11

2.2.1 SPLINE 12

2.2.2 INVERSE DISTANCE 12

2.2.3 TRIANGULATIE (lineair) 13

2.2.4 DIGIPOL 13

2.3 Interpolatie van de meetgegevens in het Spijkerboor op locaties van 1969 14

2.3.1 SPLINE 14

2.3.2 INVERSE DISTANCE 15

2.3.3 TRIANGULATIE (lineair) 15

2.3.4 DIGIPOL 16

2.3.5 INVERSE DISTANCE MET ZOEKELLIPS 16

3 SURFIS 17

3.1 Inleiding 17

3.2 Achtergrond 17

3.3 De nauwkeurigheid van het ruimtelijk interpoleren 19

4 Mogelijke toepassingen van het programma SURFIS 25

4.1 Bepalen van de optimale bemonsteringsafstand 25

4.1.1 Lodingen 25

4.1.2 Bodembemonstering 28

4.2 Inzet bij saneringen 31

4.2.1 Ontwerpen van een DTM met ontgravings-/stortingsprofielen 32

4.2.2 Toetsen van de bagger-/stortgegevens 32

4.2.3 Toetsen van eventuele sedimentatie-erosie in het gebied 33

4.2.4 Uitvoeren van kuberingen 34

5 Conclusies 37

Lijst van figuren

- Figuur 1.1 Het Spijkerboor in de Brabantse Biesbosch. 8
- Figuur 2.1 Locatie en bodemhoogte van lodingen in 1993. 11
- Figuur 2.2 DTM van de bodemhoogte in 1993 na interpolatie met SPLINE. 12
- Figuur 2.3 DTM van de bodemhoogte in 1993 na interpolatie met INVERSE DISTANCE. 12
- Figuur 2.4 DTM van de bodemhoogte in 1993 na interpolatie met TRIANGULATIE LINEAIR. 13
- Figuur 2.5 DTM van de bodemhoogte in 1993 na interpolatie met DIGIPOL. 13
- Figuur 2.6 Locaties van lodingen in 1969. 14
- Figuur 2.7 DTM van de bodemhoogte in 1993, berekend met SPLINE (met gegevens uit figuur 2.4 op locaties in figuur 2.6). 14
- Figuur 2.8 DTM van de bodemhoogte in 1993, berekend met INVERSE DISTANCE (met gegevens uit figuur 2.4 op locaties in figuur 2.6). 15
- Figuur 2.9 DTM van de bodemhoogte in 1993, berekend met TRIANGULATIE LINEAIR (met gegevens uit figuur 2.4 op locaties in figuur 2.6). 15
- Figuur 2.10 DTM van de bodemhoogte in 1993, berekend met DIGIPOL (met gegevens uit figuur 2.4 op locaties in figuur 2.6). 16
- Figuur 2.11 DTM van de bodemhoogte in 1993, berekend met INVERSE DISTANCE MET ZOEKELLIPS (met gegevens uit figuur 2.4 op locaties in figuur 2.6). 16
- Figuur 3.1 Zoekgebied bij interpoleren met zoekrichting. 18
- Figuur 3.2 Vierhoek gevormd door de geselecteerde punten. 18
- Figuur 3.3 Berekening oppervlak door de z-waarden van de vierhoek (meervoudige lineair regressiemodel). 18
- Figuur 3.4 DTM van de bodemhoogte in 1993, berekend met SURFIS (met gegevens uit figuur 2.4 op locaties in figuur 2.6). 19
- Figuur 3.5 Verloop van de gemeten waarde van het 95%-voorspellingsinterval (berekend met de residuele standaardafwijking) van de berekende waarde. 20
- Figuur 3.6 Frequentieverdeling van de afwijking bij lineaire interpolatie. 20
- Figuur 3.7 Oppervlak berekend door de vier omliggende toevallige fouten. 21
- Figuur 3.8 Relatie voorspelfout (SRES) - toevallige fout (SPRED). 22
- Figuur 3.9 Verloop van de gemeten waarde van het 95%-voorspellingsinterval (berekend met de voorspelfout volgens SURFIS) van de berekende waarde. 22
- Figuur 3.10 Voorspelfout (ber.-gem.) en lopend gemiddelde (gem.-ber.) 23
- Figuur 4.1 DTM van de bodemhoogte in 1993 berekend met lodingen op een afstand van 200 m. 26
- Figuur 4.2 Voorspelfout in de DTM te zien in figuur 4.1. 26
- Figuur 4.3 DTM van de bodemhoogte in 1993 berekend uit lodingen op een afstand van 100 m. 26
- Figuur 4.4 Voorspelfout in de DTM van figuur 4.3. 26
- Figuur 4.5 DTM van de bodemhoogte in 1993 berekend met lodingen op een afstand van 50 m. 27
- Figuur 4.6 Voorspelfout in de DTM van figuur 4.5. 27
- Figuur 4.7 DTM van de bodemhoogte in 1993 berekend met lodingen op een afstand van 25 m. 27
- Figuur 4.8 Voorspelfout in de DTM van figuur 4.7. 27
- Figuur 4.9 DTM van de bodemhoogte in 1993 berekend uit lodingen op een afstand van 10 m. 28
- Figuur 4.10 Voorspelfout in de DTM van figuur 4.9. 28
- Figuur 4.11 DTM van de slibdikte berekend uit boringen op een afstand van 200 m. 29
- Figuur 4.12 Voorspelfout van de DTM van figuur 4.11. 29
- Figuur 4.13 DTM van de slibdikte berekend uit boringen op een afstand van 150 m. 29
- Figuur 4.14 Voorspelfout in de DTM van figuur 4.13. 29
- Figuur 4.15 DTM van de slibdikte berekend uit boringen op een afstand van 100 m. 30
- Figuur 4.16 Voorspelfout in de DTM van figuur 4.15. 30
- Figuur 4.17 DTM van de slibdikte berekend uit boringen op een afstand van 50 m. 30
- Figuur 4.18 Voorspelfout in de DTM van figuur 4.17. 30
- Figuur 4.19 DTM van de slibdikte berekend uit boringen op een afstand van 25 m. 31
- Figuur 4.20 Voorspelfout in de DTM van figuur 4.19. 31
- Figuur 4.21 DTM met ontwerpdiepte berekend uit de knippunten van de ontwerpprofielen. 32
- Figuur 4.22 De ontwerpdiepte en de berekende diepte afgezet tegen het 95%-voorspellingsinterval. 32
- Figuur 4.23 Locaties waar significant te ondiep gebaggerd is. 33
- Figuur 4.24 Locaties waar significant te diep gebaggerd is. 33
- Figuur 4.25 Ontwerpdiepte, berekende diepte en 95%-betrouwbaarheidsinterval. 34
- Figuur 4.26 Verschil in bodemhoogte in juni en juli 1996. 34
- Figuur 4.27 Significant verschil in bodemhoogte. 34

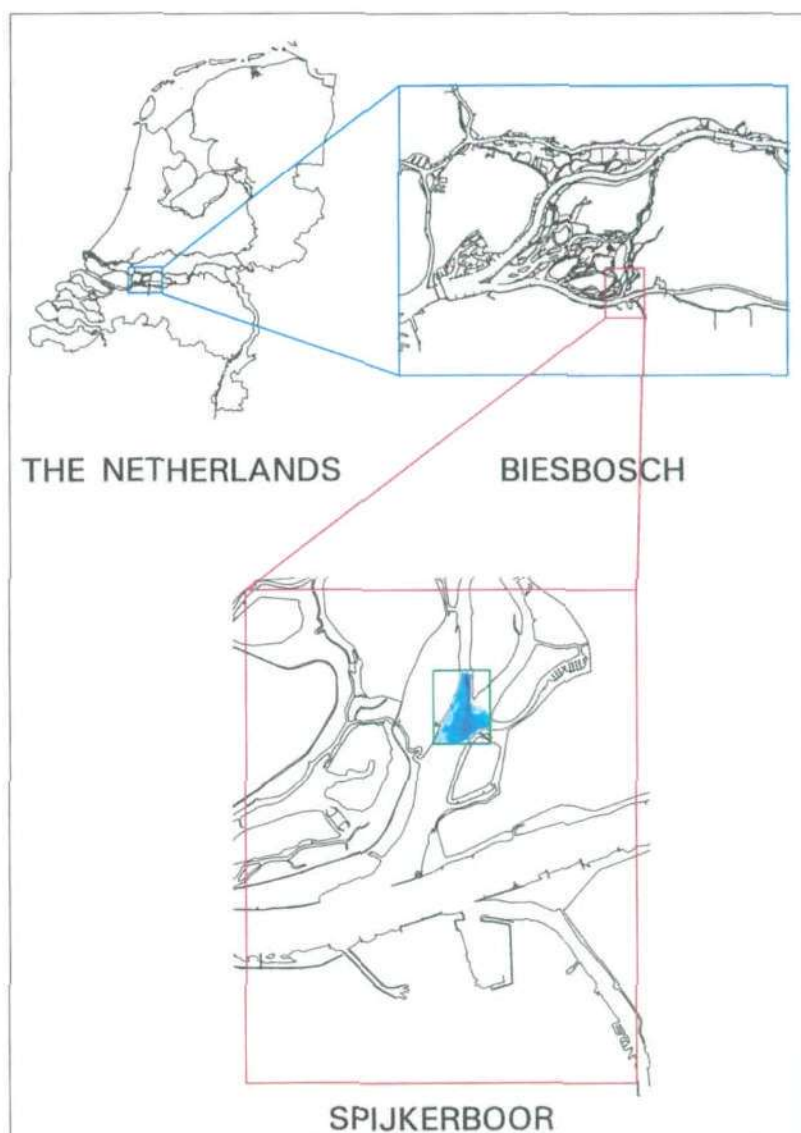
Om de ligging van de waterbodem en eventuele omvang en aard van verontreinigingen in kaart te brengen is het nodig over gebiedsdekkende informatie (zowel horizontaal als verticaal) te beschikken. Vanuit financieel oogpunt is het echter ondoenlijk om op iedere m^2 bijvoorbeeld de verontreiniging van de waterbodem te bepalen. Hierdoor moet middels een beperkt aantal boringen de waterbodem gekarakteriseerd worden. Monsters uit deze boringen kunnen, na analyse, ruimtelijk geïnterpoleerd worden tot gebiedsdekkende informatie. Bij het vaststellen van de omvang van de verontreiniging zijn dieptegegevens onontbeerlijk. Deze dieptegegevens worden middels lodingen verzameld. Deze (meestal raaisgewijze ingewonnen) gegevens moeten eveneens ruimtelijk geïnterpoleerd worden. Voor dit interpoleren zijn veel methoden beschikbaar. Welke methode het best gebruikt kan worden is afhankelijk van onder andere de intensiteit van meten (afstand tussen de raaien en in de raaien), de ligging van de meetraaien ten opzichte van de rivieras (loodrecht of onder een hoek van bijvoorbeeld 45 graden) en de variatie in bodemhoogte op korte afstand (wel of geen geul enz.). In dit onderzoek zijn in eerste instantie 5 verschillende interpolatiemethoden vergeleken. Het resultaat van deze vergelijking was dat er eigenlijk geen geschikte methode was om de lodingsgegevens van 1969 in het Spijkerboor (op een verantwoorde manier) ruimtelijk te interpoleren. De oorzaak hiervan kan gezocht worden in het feit dat de afstand tussen de meetraaien vrij groot was (100 – 200 m) en dat de ligging van de raaien op de meeste plaatsen niet loodrecht op de stroomrichting van de rivier was. Verder bleek dat met behulp van de onderzochte programma's geen schatting van de mogelijke fout van de geïnterpoleerde waarden kon worden berekend. Omdat het toch wenselijk was over een geïnterpoleerde bodemhoogte van 1969 met foutenschatting op ieder willekeurig punt te kunnen beschikken, is het computerprogramma SURFIS ontwikkeld. Met SURFIS kunnen meetgegevens, die raaisgewijs of random verspreid in het gebied liggen, ruimtelijk geïnterpoleerd worden tot een DTM (digitaal terrein model) met geïnterpoleerde (meet)waarden en een DTM met een schatting van de bijbehorende toevallige fout(en). De interpolatiemethode is een **lokale** methode die middels meervoudige lineaire regressie een vlak berekent door de (meest) nabijgelegen getransformeerde meetgegevens. Bij de transformatie van de meetgegevens maakt SURFIS gebruik van de vorm en stroomrichting van het watersysteem. Door SURFIS wordt bij iedere geïnterpoleerde waarde een (toevallige) fout geschat. Deze fout wordt, na kruisvalidatie van de meetgegevens, omgerekend naar een totale toevallige fout. Met deze fout is het bijvoorbeeld mogelijk om aanvullende bemonsteringslocaties te bepalen en om betrouwbaarheidsintervallen van de geïnterpoleerde waarden te berekenen.

1 Inleiding

Het rapport gaat over het ruimtelijk interpoleren en de daarbij optredende onnauwkeurigheden. Om het ruimtelijk interpoleren van bijv. lodings- of boorgegevens mogelijk te maken heeft het RIZA/WST SURFIS ontwikkeld. In dit rapport wordt daarop met name ingegaan. Daarbij wordt Spijkerboor als voorbeeld gebruikt.

Het saneren van waterbodems is één van de toepassingsmogelijkheden. Het verwijderen van ernstig verontreinigd slib wordt vaak bemoeilijkt door het grillige verloop van de dikte van de sliblaag. Bijvoorbeeld voor de afsluiting van het Haringvliet in 1970 was in de Biesbosch een getij aanwezig. Door de getijdewerking ontstonden diepe getijdegeulen en ondiepe platen. De verschillen in bodemligging werden door menselijke ingrepen, zoals zandwinning, nog eens versterkt. Na de aanleg van de Haringvlietssluisen is het getij bijna volledig uit dit gebied verdwenen en werd de Biesbosch een sedimentatiegebied. Vanaf dit moment zijn in eerste instantie de geulen opgevuld met veelal sterk verontreinigd slib. Op dit moment is de gehele waterbodem van de Biesbosch met verontreinigd slib bedekt. De dikte van de sliblaag is variabel en volgt voornamelijk het grillige verloop van de bodem zoals die voor de afsluiting van het Haringvliet erbij lag. Deze sterk vervuilde waterbodem heeft negatieve effecten op het ecosysteem, zoals de afname van het aantal soorten planten en dieren en een vermindering van het broedsucces bij diverse vogelsoorten. De in de loop der tijd afgenomen belasting van oppervlaktewateren heeft er daarnaast toe geleid, dat de waterbodemkwaliteit in de Biesbosch niet meer in overeenstemming is met de huidige oppervlaktewaterkwaliteit. De effecten van de (in verhouding tot de oppervlaktewaterkwaliteit) relatief slechte waterbodemkwaliteit op het functioneren van de daarvan afhankelijke ecosystemen maakt saneren zinvol. Om ervaring op te doen met de specifieke aspecten van sanering van de Biesbosch, zowel organisatorisch als technisch gezien, is Rijkswaterstaat begonnen met een proefsanering van het Spijkerboor (zie figuur 1.1). Dit gedeelte van de Biesbosch staat onder invloed van de Maas.

Figuur 1.1 Het Spijkerboor
in de Brabantse
Biesbosch.



Saneren van een verontreinigde waterbodem is pas zinvol indien de gehele verontreinigde laag is verwijderd. Juist de toplaag van de waterbodem is voor organismen van belang. Bij onvolledige sanering kan verspreiding van het achtergebleven deel van de verontreiniging het milieu-rendement ernstig aantasten. Het vervuilde sediment moet dus zo volledig mogelijk worden verwijderd. In de Biesbosch vraagt dit, gegeven het grillige verloop van de ondergrens van de sliblaag, ofwel tot een relatief uitgebreide bodembemonstering om de saneringsgrens zo nauwkeurig mogelijk te bepalen, of tot een zeer ruime ontgraving. Deze laatste optie is vanwege de kosten van verwerking, transport en storten van de baggerspecie ongewenst (in de Biesbosch voor een groot deel klasse 3 en 4). De nauwkeurigheid waarmee de ondergrens van de vervuilde bodem (saneringsgrens) in kaart kan worden gebracht is afhankelijk van de meettechniek en de naverwerking van de data.

De gangbare methode om de bodemligging ("diepte") te meten is het uitvoeren van lodingen vanaf een raaisgewijs varend schip. Per punt is de nauwkeurigheid ongeveer 1 m in x,y-richting en 5 cm in z-richting. Tussen de gevaren raaien en de punten op de raaien kan de diepte door middel van interpolatie worden bepaald. De nauwkeurigheid van deze interpolatie hangt af van de kwaliteit van de interpolatiemethode en van de afstand waarover geïnterpoleerd moet worden.

Bij het bepalen van de saneringsgrens gaat het voornamelijk om de chemische kwaliteit van het slib. De relatief gemakkelijk te bepalen scheiding tussen slib en zand (in dit voorbeeld van het Spijkerboor) levert slechts een aanwijzing voor het te verwachten ontgraven volume. Veel meer dan bij de relatief eenvoudige dieptemetingen is het bij het bepalen van de werkelijke saneringsgrens wenselijk het aantal meetpunten tot een minimum te beperken. De kosten van chemische analyses zijn hoog en de monsternametechniek is veelal bewerkelijk (de saneringsgrens zal vaak te ver onder het bodemoppervlak liggen om eenvoudige apparatuur als een valbom te kunnen gebruiken waardoor boringen nodig zijn).

De ruimtelijke dichtheid van monsternamen en daarmee de nauwkeurigheid van door interpolatie verkregen waarden moet worden afgestemd op de maximale onzekerheidsmarge die men wil accepteren. In eerste instantie kan de benodigde dichtheid geschat worden, maar het grillige verloop van de grens vuil-schoon in de Biesbosch maakt zo'n schatting moeilijk en niet betrouwbaar. Een mathematische berekening lijkt dan ook de voorkeur te hebben.

Van de standaardmethoden voor ruimtelijke interpolatie, die in het volgende hoofdstuk worden besproken, is *Kriging* de enige waarmee ook mathematische nauwkeurighedsanalyse mogelijk is. *Kriging* heeft echter een aantal belangrijke nadelen. Dit betreft vooral de inzichtelijkheid en gebruikersvriendelijkheid. Het gebruik van *Kriging* is vaak een tijdrovende kwestie en noopt gebruikers tot grote kennis van geostatistische technieken. Het RIZA heeft een nieuw programma (*SURFIS*) ontwikkeld, waarmee ook niet specialisten op het gebied van geostatistiek zeer snel variabelen ruimtelijk kunnen interpoleren en waarmee saneringsgrenzen met een betrouwbaarheidsband kunnen worden aangegeven. In dit rapport wordt met name ingegaan op de nauwkeurigheid van verschillende interpolatiemethoden. Daarbij wordt gebruikgemaakt van gegevens van het Spijkerboor. Tevens worden in dit rapport de behoefte waarin *SURFIS* voorziet, de werking en de mogelijkheden van het programma, uiteengezet.

2 Ruimtelijke interpolatie

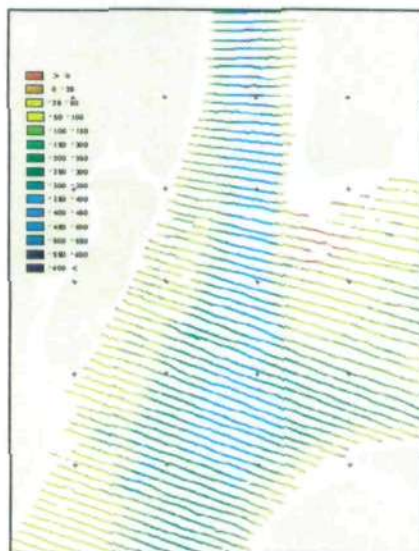
2.1 Inleiding

Voor saneringen is het nodig om een gebiedsdekkende kaart te hebben, waarin de dikte van de te verwijderen laag staat aangegeven. Deze dikte moet door middel van boringen (en monsters uit deze boringen) vastgesteld worden. Omdat het financieel gezien niet mogelijk is om op iedere m² een boring uit te voeren, moet er een steekproef genomen worden. Door ruimtelijke interpolatie van de gevonden dikten uit deze steekproef kan vervolgens de dikte geschat worden op die plaatsen waar niet gemeten is. Ruimtelijke interpolatie is een goed hulpmiddel, maar vereist wel dat de steekproef zo genomen is, dat de variatie in de te meten grootte (bijv. dikte) ook werkelijk gemeten wordt. Dit houdt in dat de afstanden tussen de meetpunten (in de steekproef) zodanig moeten zijn, dat iedere verhoging/verlaging gemeten wordt.

Voor ruimtelijke interpolatie bestaan diverse methoden. De meeste methoden hebben als tekortkoming dat ze geen mathematische nauwkeurigheidsanalyse bieden. Niettemin worden ze hier toch kort behandeld om enkele typische interpolatietechnieken en -fouten te illustreren. Voor alle methoden worden de lodingen die zijn uitgevoerd in het Spijkerboor in de Brabantsche Biesbosch in 1993 als basis gebruikt.

2.2 Interpolatie van alle meetgegevens in het Spijkerboor uit 1993

Figuur 2.1 Locatie en bodemhoogte van lodingen in 1993.

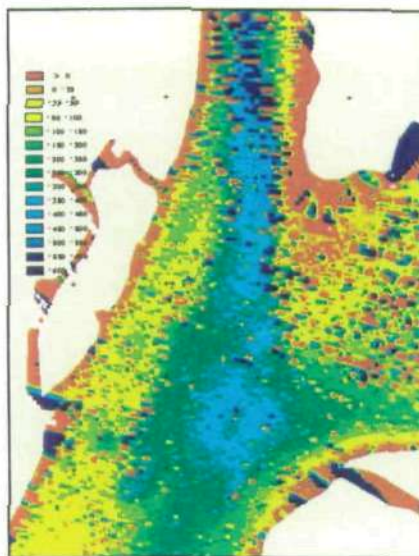


In figuur 2.1 zijn de posities en de bijbehorende gemeten diepten van lodingen uit 1993 weergegeven. De meetraaien liggen op een onderlinge afstand van ongeveer 10 m, terwijl de afstand tussen de meetpunten in de raai circa 1 m bedraagt.

Door de gemeten punten te interpoleren kan een gebiedsdekkende dieptekaart worden verkregen. Deze kaart kan als digitaal terrein model (DTM) verder worden gebruikt.

2.2.1 SPLINE

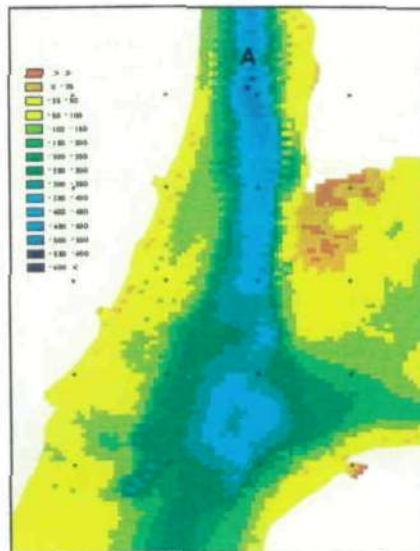
Figuur 2.2 DTM van de bodemhoogte in 1993 na interpolatie met SPLINE.



Figuur 2.2 toont een DTM zoals die met de methode SPLINE, dat kromlijnige vlakken door de meetpunten berekent, wordt verkregen. Ondanks de zeer geringe afstand tussen de meettraaien blijkt SPLINE "putten" te berekenen die er in werkelijkheid (hoogstwaarschijnlijk) niet zijn (zie de donkere paarse plekken).

2.2.2 INVERSE DISTANCE

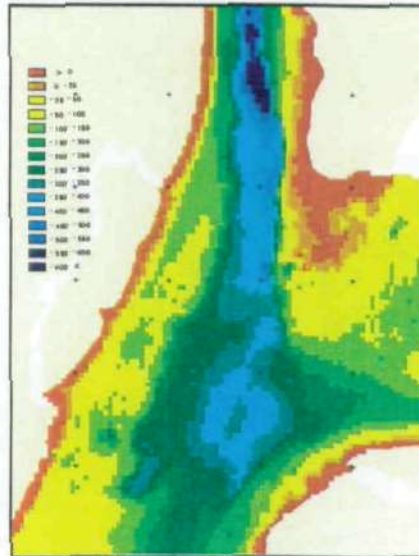
Figuur 2.3 DTM van de bodemhoogte in 1993 na interpolatie met INVERSE DISTANCE.



Interpolatie van de meetwaarden met behulp van de INVERSE DISTANCE-methode lijkt op het eerste gezicht tot een beter resultaat te leiden (figuur 2.3). Deze methode interpoleert door het gewogen gemiddelde te bepalen van de waarden op de meetpunten binnen een cirkel met een van te voren bepaalde straal. Omdat het gewogen gemiddelde afhankelijk is van de grootte van de afstand tussen de meetwaarde en de te berekenen waarde, is INVERSE DISTANCE erg gevoelig voor de grootte van deze gekozen zoekstraal. Daarnaast blijkt dat de waarden op de oorspronkelijke meetpunten niet gereproduceerd kunnen worden. Verder is in figuur 2.3 te zien dat de geul (bij A) minder diep wordt berekend dan de lodingen in figuur 2.1 aangeven.

2.2.3 TRIANGULATIE (lineair)

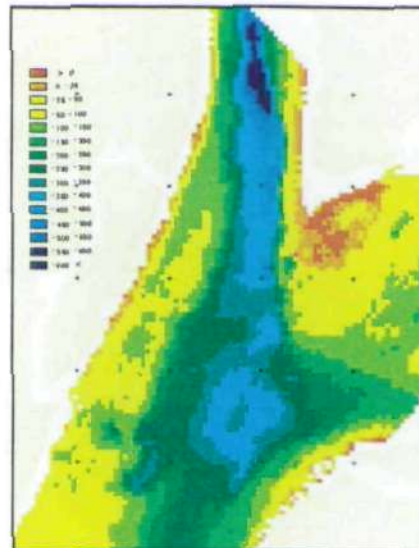
Figuur 2.4 DTM van de bodemhoogte in 1993 na interpolatie met TRIANGULATIE LINEAIR.



Figuur 2.4 toont een DTM, waarbij de diepte geïnterpoleerd is met de methode TRIANGULATIE (LINEAIR). De waarde van de te interpoleren punten wordt hier met behulp van een stelsel van driehoeken berekend, waarvan de hoekpunten samenvallen met meetpunten (triangulair). Bij deze methode wordt de geul een stuk beter geïnterpoleerd.

2.2.4 DIGIPOL

Figuur 2.5 DTM van de bodemhoogte in 1993 na interpolatie met DIGIPOL.

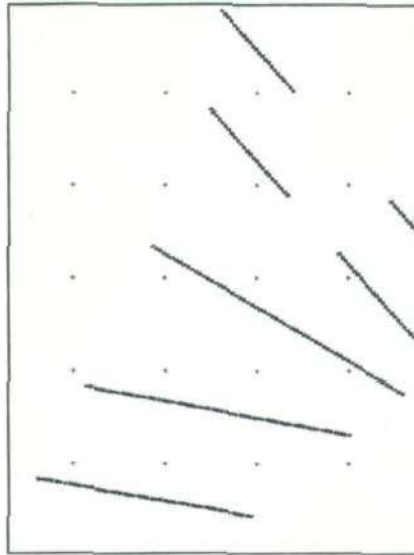


De geïnterpoleerde diepten in figuur 2.5 zijn berekend met het programma DIGIPOL [1]. DIGIPOL maakt ook gebruik van de triangulatiemethode, waardoor de verkregen resultaten nagenoeg aan die van TRIANGULATIE LINEAIR gelijk zijn (vergelijk de figuren 2.4 en 2.5).

Het voordeel van DIGIPOL is, dat de zoekrichting berekend wordt uit de resultaten van de vorige interpolatie, waardoor de afstand geoptimaliseerd kan worden.

Uit de figuren 2.2 t/m 2.5 kan worden geconcludeerd dat ruimtelijke interpolatie van zeer intensief uitgevoerde lodingen met de diverse methoden, uitzonderd SPLINE, vergelijkbare resultaten oplevert.

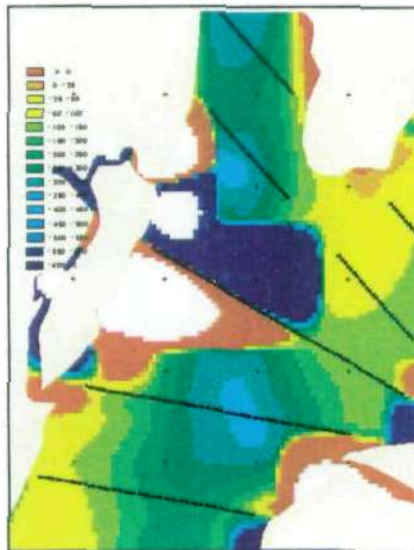
Figuur 2.6 Locaties van lodingen in 1969.



Veelal zullen de beschikbare lodingen een grotere onderlinge afstand hebben. Zo waren in 1969 in het Spijkerboor slechts 5 meetraaien beschikbaar (figuur 2.6). De diepteligging van de bodem uit 1969 is van belang, omdat dit de vermoedelijke grens tussen het verontreinigde slib en de schone oorspronkelijke zandbodembodem vormt. De besproken interpolatiemethoden worden nu op het aantal lodingen uit figuur 2.6 toe-gepast. Om de resultaten onderling te kunnen vergelijken worden als meetgegevens de diepten uit figuur 2.4 op locaties in figuur 2.6 gebruikt. De resultaten van deze nieuwe interpolatie kunnen vergeleken worden met figuur 2.4 (= "de werkelijkheid").

2.3.1 SPLINE

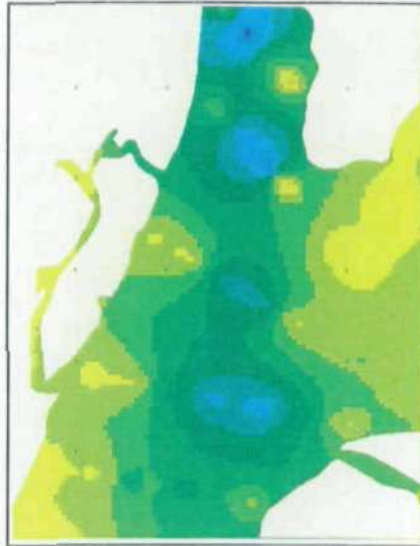
Figuur 2.7 DTM van de bodemhoogte in 1993, berekend met SPLINE (met gegevens uit figuur 2.4 op locaties in figuur 2.6).



In figuur 2.7 is te zien dat interpolatie met de SPLINE-methode een volstrekt irreëel beeld met grote "putten" en "bergen" oplevert. Het verschil met figuur 2.4 is duidelijk.

2.3.2 INVERSE DISTANCE

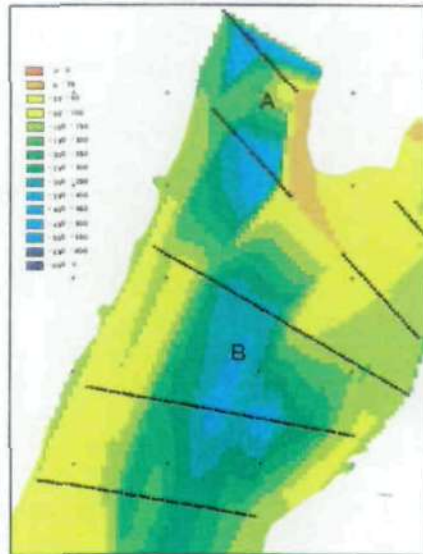
Figuur 2.8 DTM van de bodemhoogte in 1993, berekend met INVERSE DISTANCE (met gegevens uit figuur 2.4 op locaties in figuur 2.6).



Bij interpolatie met de INVERSE DISTANCE-methode is het resultaat beter (figuur 2.8), maar nog sterk afwijkend van de "werkelijkheid" zoals gepresenteerd in figuur 2.4. In figuur 2.8 valt met name het verdwijnen van een groot deel van de geul op.

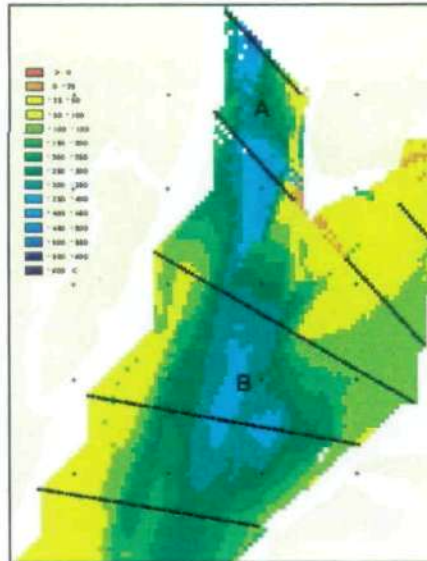
2.3.3 TRIANGULATIE (lineair)

Figuur 2.9 DTM van de bodemhoogte in 1993, berekend met TRIANGULATIE LINEAIR (met gegevens uit figuur 2.4 op locaties in figuur 2.6).



Dit laatste euvel doet zich ook, zij het in mindere mate, voor bij interpolatie met de methode TRIANGULATIE LINEAIR, zie figuur 2.9. Ook hier vallen diepteverschillen weg en worden grote gebieden vereffend (vergelijk figuur 2.4). Het wegvallen van de diepteverschillen na het gebruik van de triangulatiemethode wordt voornamelijk veroorzaakt doordat de meetraaien niet loodrecht op de stroomrichting liggen. De driehoeken die worden gevormd zijn langgerekt en liggen ongeveer loodrecht op de raai. Dit betekent dat bij de interpolatie van bijvoorbeeld een punt in de geul (ter hoogte van A) gerekend wordt met de punten die in de oeverzone liggen. Daar waar de meetraaien ongeveer loodrecht op de stroomrichting liggen, (bij punt B) is het resultaat van de interpolatie (op het oog) al veel beter.

Figuur 2.10 DTM van de bodemhoogte in 1993, berekend met DIGIPOL (met gegevens uit figuur 2.4 op locaties in figuur 2.6).

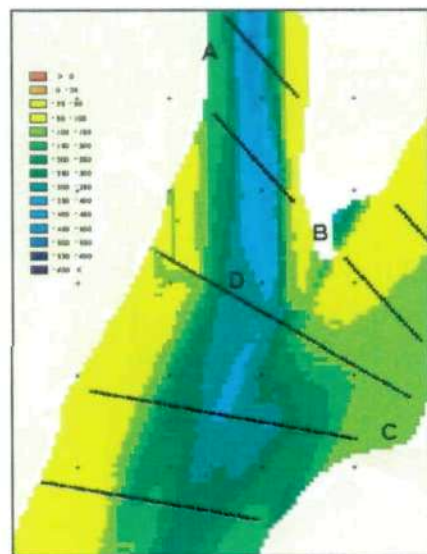


Het verdwijnen van de geul is minder indien wordt gewerkt met het programma DIGIPOL, dat de richting van de triangulatie door middel van iteratie optimaliseert. De in figuur 2.10 getoonde resultaten zijn verkregen door het gebied viermaal door te rekenen. De zo bereikte verbetering kostte echter zeer veel rekentijd (ongeveer 2 uur op een werkstation).

2.3.5 INVERSE DISTANCE MET ZOEKELLIPS

Figuur 2.11 toont de dieptekaart berekend met een door de Universiteit van Utrecht ontwikkeld programma dat gebaseerd is op de INVERSE DISTANCE-methode. In plaats van een cirkel gebruikt het programma een ellips als zoekgebied, waarbij de richting, de lengte en de breedte opgegeven kunnen worden. Figuur 2.11 stemt duidelijk het beste overeen met figuur 2.4. Tegenover de hogere nauwkeurigheid van de methode staat een grotere moeilijkheidsgraad. De opgegeven zoekrichting geldt voor de gehele berekening. Omdat bijvoorbeeld de richting van de geul in het gebied varieert zal een gebied veelal in stukken opgedeeld moeten worden die elk een eigen zoekrichting krijgen. Dit vereist de nodige ervaring en zal tijd kosten. Door het gebied in stukken op te delen en daarbij verschillende zoekrichtingen vast te stellen kan er een knik in de geïnterpoleerde gegevens ontstaan (zie figuur 2.11, punt D).

Figuur 2.11 DTM van de bodemhoogte in 1993, berekend met INVERSE DISTANCE MET ZOEKELLIPS (met gegevens uit figuur 2.4 op locaties in figuur 2.6).



Een ander nadeel van het programma is dat waarden geëxtrapoleerd worden, wat vooral aan de oevers veel te grote diepten zal opleveren (zie figuur 2.11, punten A, B en C).

3 SURFIS

3.1 Inleiding

Om bijvoorbeeld saneringen te kunnen beoordelen is het noodzakelijk over goede DTM's te beschikken, waarbij ook nauwkeurigheden worden aangegeven. Deze nauwkeurigheden zijn nodig omdat de fout in de berekende (geïnterpoleerde) diepte niet alleen bepaald wordt door de meetfout maar ook door de interpolatie zelf.

De enige (beschikbare) interpolatiemethode die deze fouten kan schatten is Kriging. De bewerkelijkheid en complexiteit van interpolatie, zoals die in het vorige hoofdstuk is beschreven, geldt voor de methode Kriging in nog sterkere mate. Eén van de (belangrijkste) voorwaarden om Kriging goed toe te kunnen passen is dat de ligging van de meetpunten willekeurig moet zijn (in zowel de x- als de y-richting). Omdat lodingen meestal raaisgewijs (dus niet willekeurig) zijn ingewonnen, is Kriging eigenlijk niet geschikt voor de ruimtelijke interpolatie van op deze manier ingewonnen gegevens. Een ander probleem is dat Kriging de variantie, die tussen de meetpunten wordt gemeten, als een toevallige fout interpreteert terwijl feitelijk sprake kan zijn van reële (hoogte)verschillen. Om toch dieptegegevens met behulp van Kriging ruimtelijk te kunnen interpoleren zal het gebied eerst opgesplitst moeten worden in homogene gebieden die eenzelfde ruimtelijk variantie vertonen. In ons voorbeeld van het Spijkerboor zijn dat gebieden met een geul, gebieden met oevers, gebieden met verondiepingen etc. De vele handelingen die hierbij verricht moeten worden maakt het gebruik van Kriging erg arbeidsintensief en vereist veel (voor-)kennis van het te interpoleren gebied en deskundigheid in het gebruik van Kriging.

In 1995 is door het RIZA het programma SURFIS ontwikkeld, waarmee op een relatief eenvoudige manier meetgegevens ruimtelijk geïnterpoleerd kunnen worden en waarbij de nauwkeurigheid wordt bepaald.

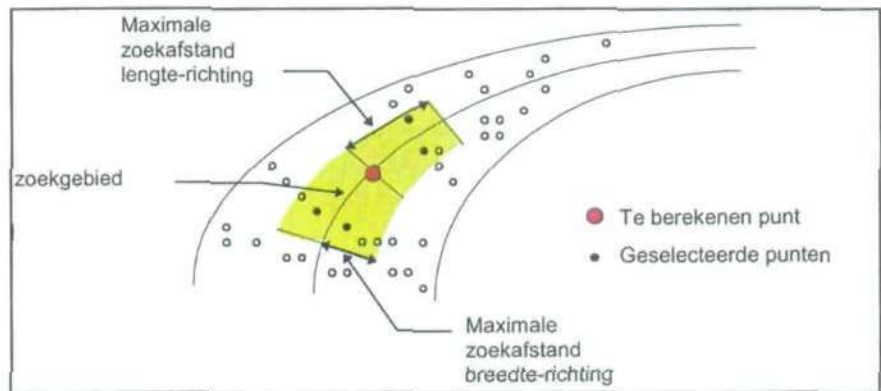
In § 3.2 en 3.3 is in het kort de werking van SURFIS beschreven. Een meer uitgebreide beschrijving is te vinden in [Fioole, A., De achtergronden van het computerprogramma SURFIS, deel d: SURFIS40].

3.2 Achtergrond

Het programma SURFIS is een meervoudig lineair interpolatieprogramma, waarmee digitale waarden in een gebied ruimtelijk kunnen worden geïnterpoleerd tot een regelmatig grid met z-waarden.

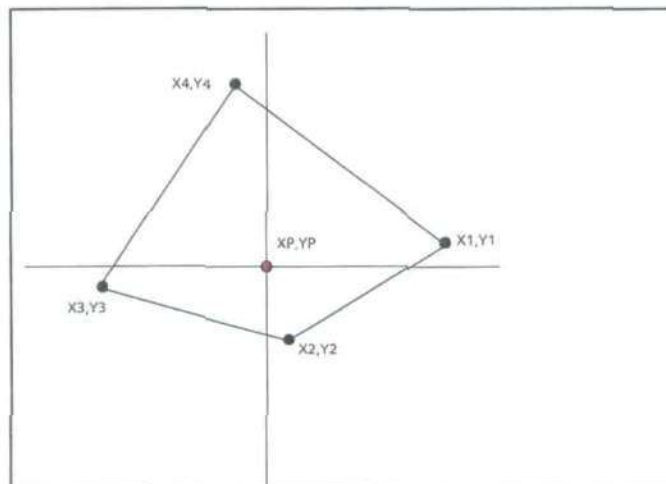
Aan de positie van de digitale (x,y,z-) waarden in het gebied worden geen eisen gesteld. Voordat een z-waarde in een bepaald punt berekend kan worden, wordt eerst aan de hand van de maximale zoekafstanden (in de lengte- en breedterichting van de rivier) een zoekgebied vastgesteld (zie figuur 3.1). Als maximale zoekafstand in een bepaalde richting kan die afstand gebruikt worden waarbij nog juist sprake is van een significante afhankelijkheid tussen de gemeten z-waarden. Deze afstanden zullen meestal, als gevolg van verschillende variantie in lengte- en breedterichting verschillend zijn.

Figuur 3.1 Zoekgebied bij interpoleren met zoekrichting.

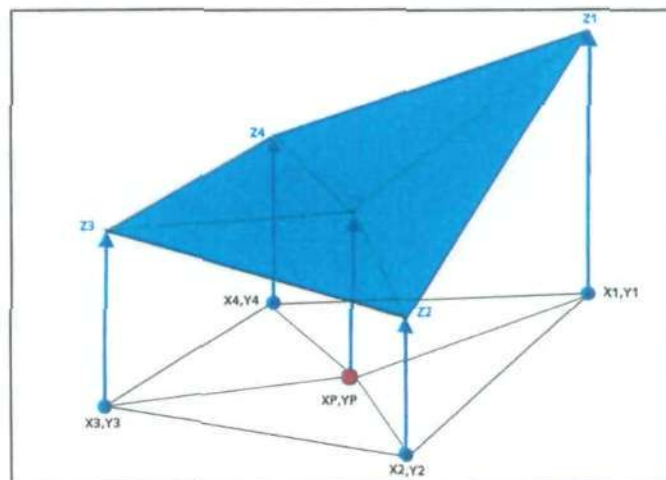


Het zoekgebied wordt relatief gemaakt aan de hand van het verloop van de grenzen van het gebied. Deze grenzen kunnen oevers of dijken zijn, maar kunnen ook door de uiterste punten van een meetraai gevormd worden. Als het zoekgebied bekend is, wordt dit vervolgens in 4 kwadranten verdeeld. In ieder kwadrant wordt dat punt geselecteerd dat de kleinste afstand (in verhouding tot het zoekgebied) heeft tot het te berekenen punt. Door de x,y-waarden van deze punten (zie figuur 3.2) wordt een vierhoek gevormd zodra in ieder kwadrant een punt gevonden is. Door de z-waarden van deze vierhoek (z_1 t/m z_4) wordt vervolgens een oppervlak (meervoudig lineair regressiemodel) berekend (zie figuur 3.3).

Figuur 3.2 Vierhoek gevormd door de geselecteerde punten.

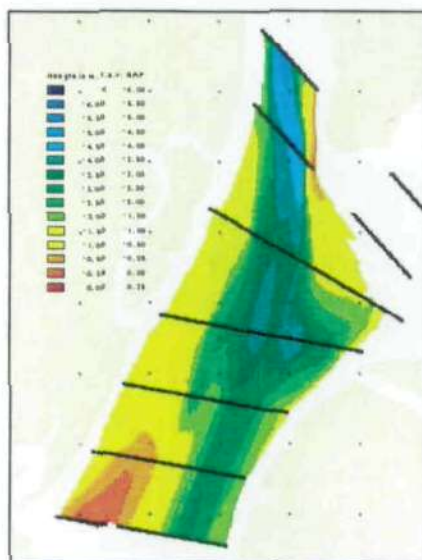


Figuur 3.3 Berekening oppervlak door de z-waarden van de vierhoek (meervoudige lineair regressiemodel).



Met het gevonden regressiemodel is het mogelijk met de x,y -waarde van het te berekenen punt (x_p, y_p) de z -waarde (z_p) te bepalen.

Figuur 3.4 DTM van de bodemhoogte in 1993, berekend met SURFIS (met gegevens uit figuur 2.4 op locaties in figuur 2.6).



Figuur 3.4 toont het resultaat van interpolatie van de dieptegegevens uit figuur 2.4 op locaties in figuur 2.6. Ook deze geïnterpoleerde diepten zijn met figuur 2.4 vergeleken. De resultaten in deze figuur laten vooral nabij de oevers verschillen zien met die van figuur 2.11. Dit is een gevolg van het feit dat SURFIS niet naar de oevers toe extrapoleert, maar de waarde weet te interpoleren. Omdat bij SURFIS het gebied niet opgedeeld hoeft te worden is ook de knik (zoals deze te zien is in figuur 2.11) verdwenen. Verder is te zien dat "de geul" ook aanwezig is.

3.3 De nauwkeurigheid van het ruimtelijk interpoleren

In hoofdstuk 2 zijn de resultaten van de verschillende interpolatiemethoden "op het oog" beoordeeld. Omdat de werkelijke waarde van een geïnterpoleerd punt (meestal) niet bekend is, kan per punt niet aangegeven worden hoe goed of hoe fout deze waarde is. Alleen na het uitvoeren van controlemetingen is het mogelijk om een schatting te maken van de betrouwbaarheid van de ruimtelijke interpolatie. Deze controlemetingen zijn meestal niet representatief voor het gehele gebied. Gevonden verschillen tussen gemeten en berekende waarden gelden in dat geval alleen voor die locaties waar de controlemeting daadwerkelijk heeft plaatsgevonden.

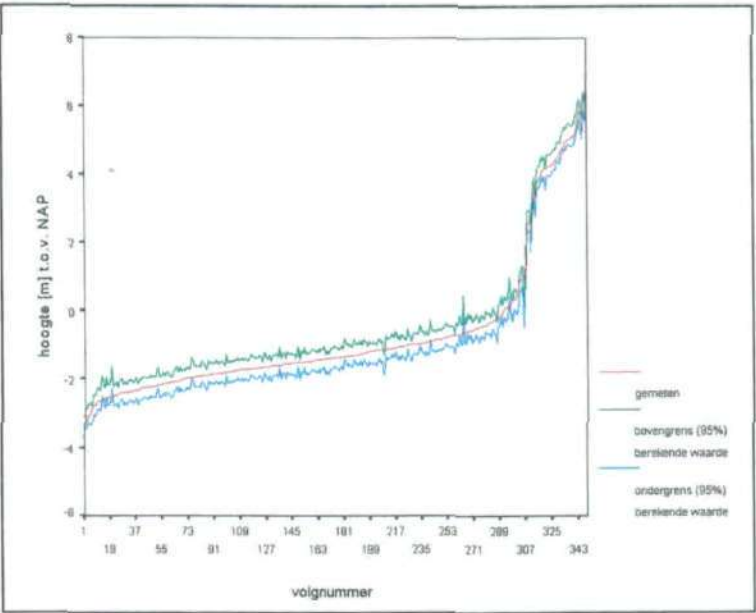
Om toch een schatting te kunnen maken van de mogelijke interpolatiefout (de fout die door het interpoleren kan ontstaan en die direct afhankelijk is van de methode die wordt gebruikt), kan beter gebruik worden gemaakt van delen van het gegevensbestand die niet direct voor de interpolatie zijn gebruikt.

Validatie van de interpolatie geschiedt hierbij door het gemiddelde en de standaardafwijking van de verschillen te berekenen tussen de geïnterpoleerde waarden en de werkelijke meetwaarden die bij de oorspronkelijke interpolatie niet zijn meegenomen.

Met de berekende waarde, het gemiddelde verschil en de standaardafwijking van de verschillen (= residuele standaardafwijking) kan op iedere x,y -locatie een betrouwbaarheidsinterval voor een incidentele waarde (= voorspellingsinterval) opgesteld worden.

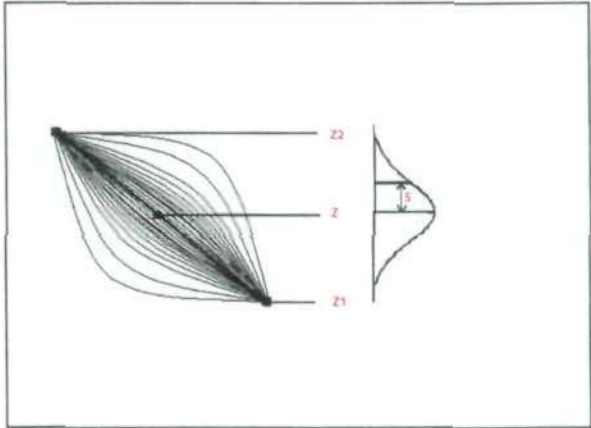
Een probleem dat hierbij ontstaat is dat het berekende voorspellingsinterval voor heel het gebied even breed is (zie figuur 3.5).

Figuur 3.5 Verloop van de gemeten waarde van het 95%-voorspellingsinterval (berekend met de residuele standaardafwijking) van de berekende waarde.



Dit betekent dat op een locatie waar nauwelijks variatie in de diepte is (bijv. ter hoogte van een zandplaat) het voorspellingsinterval even groot is als daar waar de variatie in diepte wel groot is (bijv. langs de helling van een geul). Het gevolg hiervan is, dat op die plaatsen waar geen of nauwelijks een interpolatiefout is (bijv. op de meetlocaties of in gebieden met geen ruimtelijke variatie), een te breed voorspellingsinterval wordt gegeven. Om er voor te zorgen dat het betrouwbaarheidsinterval beter aansluit aan de lokale variatie in de bodemhoogte, moet niet de residuele standaardafwijking maar een lokale toevallige fout gebruikt worden.

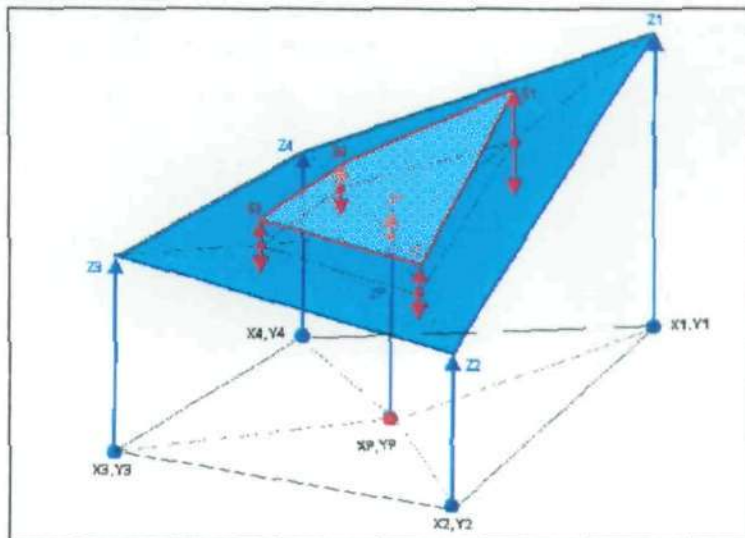
Figuur 3.6 Frequentieverdeling van de afwijking bij lineaire interpolatie.



Met het programma SURFIS40 is het mogelijk om op iedere afzonderlijke locatie zo'n toevallige fout te berekenen. De toevallige fout (die zowel positief als negatief kan zijn) in z ontstaat doordat er lineair (tussen 2 punten, bijv. z_1 en z_2) geïnterpoleerd wordt (zie figuur 3.6). Als het verloop tussen twee waarden niet exact lineair is ontstaan er afwijkingen.

Deze afwijking ten opzichte van de rechte lijn (in het midden van de lijn) wordt verondersteld normaal verdeeld te zien met een gemiddelde van 0 en een standaardafwijking van s . Om de toevallige fout in het geïnterpoleerde punt x_p, y_p te kunnen berekenen moeten eerst de toevallige fouten van de vier punten in de omgeving (s_1 t/m s_4) bekend zijn (zie figuur 3.7). Deze 4 toevallige fouten (berekend uit de z -waarden van de vier hoekpunten en de z -waarde van het berekende punt) worden toegekend aan de gemiddelde x, y -posities van de punten waaruit s berekend is. Met behulp van meervoudige lineaire regressie wordt, op dezelfde manier als de z -waarde, een s -waarde (s_p) berekend.

Figuur 3.7 Oppervlak berekend door de vier omliggende toevallige fouten.

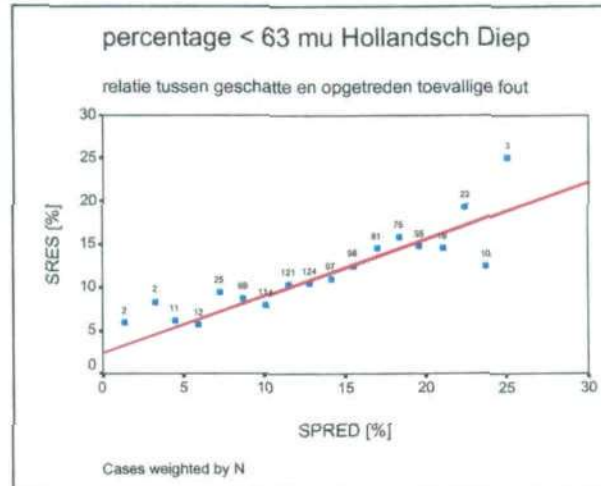


Naast de toevallige fout (veroorzaakt door de interpolatie) bestaat er ook een meetfout. De interpolatie- en de meetfout samen zorgen ervoor dat een berekende waarde af kan wijken van een eventuele gemeten waarde. Deze (totale) toevallige fout (verder voorspelfout genoemd) kan zowel positief als negatief zijn. Omdat de meetfout meestal niet bekend is, en omdat er ook nog andere fouten in de meetgegevens kunnen zitten (plaatsbepaling enz), kan de voorspelfout niet zonder meer berekend worden uit de toevallige fout. Bovendien is het niet zeker dat een grote toevallige fout ook leidt tot een grote voorspelfout. Bovendien, als de toevallige fout nul is, houdt dat nog niet in dat de voorspelfout ook nul zal zijn. In de meeste gevallen zal er ook een meetfout zijn die er voor zorgt dat de voorspelfout groter dan nul is. Om de toevallige fout om te kunnen rekenen naar voorspelfout is eerst de relatie tussen toevallige fout en voorspelfout berekend. Deze berekening is als volgt uitgevoerd:

Ten eerste zijn op dezelfde manier als reeds eerder beschreven is, de z-waarden van alle meetpunten teruggerekend uit de z-waarden van de omliggende meetpunten. Bij deze berekening is (op de manier zoals reeds eerder beschreven is) tevens de daarbij horende toevallige fout bepaald.

Voor ieder meetpunt is er dus een berekende waarde, een gemeten waarde en een toevallige fout te bepalen. Nadat de (berekende) toevallige fouten in (20) klassen ingedeeld zijn kan voor iedere klasse de residuele standaardafwijking (= standaardafwijking van de verschillen tussen berekend en gemeten) berekend worden. Deze standaardafwijking is een maat voor de totale toevallige fout.

Figuur 3.8 Relatie voorspelfout (SRES) - toevallige fout (SPRED).

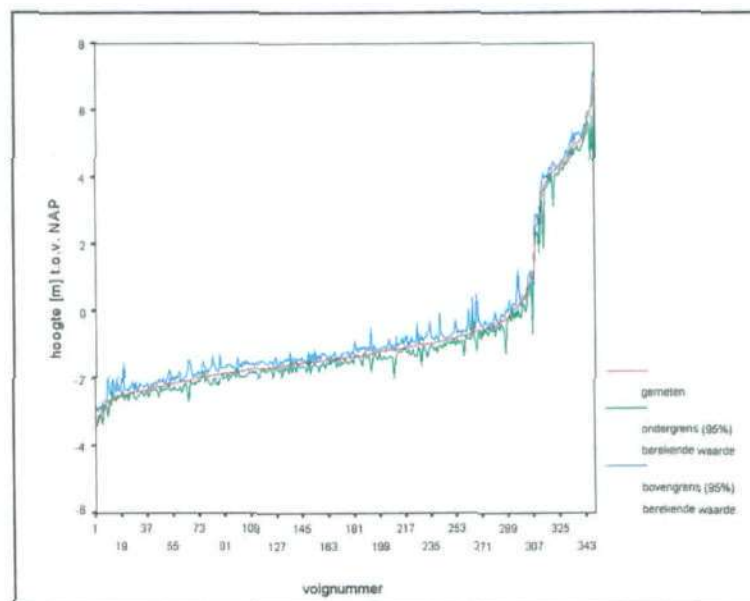


Als voorbeeld zijn in figuur 3.8 de voorspelfouten in het percentage < 63 mu in het Hollandsch Diep (SRES) uitgezet als functie van de berekende toevallige fouten (SPRED). In deze figuur is tevens de (middels gewogen regressie) berekende lineaire relatie weergegeven. Het gewicht bij deze berekening was het aantal waarnemingen waarmee de residuele standaardafwijkingen berekend zijn. Met een relatie als hier beschreven, wordt in SURFIS de geschatte (berekende) toevallige fout omgerekend naar voorspelfout.

Voor ieder geïnterpoleerd gebied kan met behulp van de berekende waarde en de bijbehorende voorspelfout een voorspellingsinterval voor de werkelijke waarde opgesteld worden. Deze voorspellingsintervallen zijn op iedere locatie verschillend van breedte. Daar waar een kleine voorspelfout is (op plaatsen waar gemeten is of waar weinig variatie in de waarden is) zal het interval smaller zijn dan waar de voorspelfout groter is (bij grote onderlinge afstand van meetgegevens of op plaatsen waar veel variatie in meetwaarden aanwezig is).

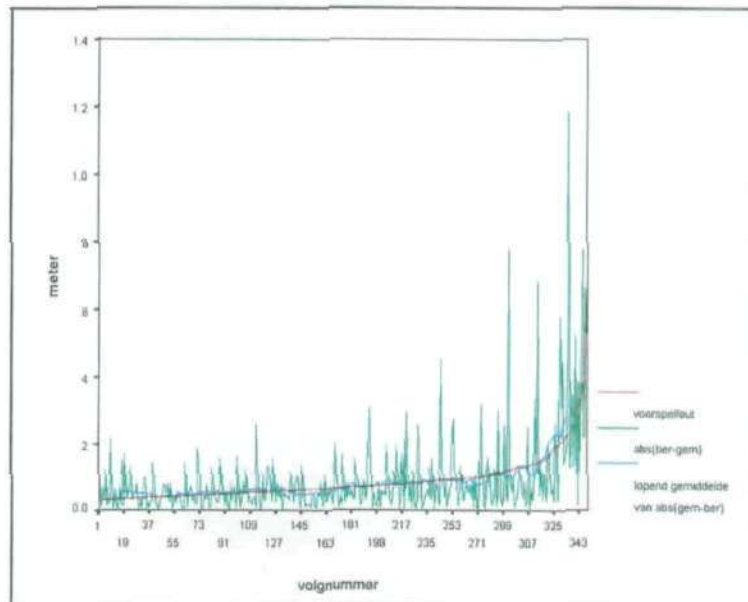
In figuur 3.9 zijn de gemeten waarden en het 95%-voorspellingsinterval van de berekende waarden uitgezet. Vergelijking van de figuren 3.5 en 3.9 laat zien dat in figuur 3.9 het voorspellingsinterval op de meeste plaatsen smaller (daar waar weinig variatie in meetwaarden aanwezig is) en op sommige plaatsen breder is dan in figuur 3.5. In beide figuren is verder te zien dat de gemeten waarden in de meeste gevallen binnen het voorspellingsinterval liggen.

Figuur 3.9 Verloop van de gemeten waarde van het 95%-voorspellingsinterval (berekend met de voorspelfout volgens SURFIS) van de berekende waarde.



Om een indruk te krijgen hoe goed de voorspelfout bij de (kruis)validatie overeenkomt met de residuen zijn in figuur 3.10 de voorspelfouten, de absolute verschillen tussen berekende en gemeten waarden en het lopende gemiddelde (vloeiende lijn) door de absolute verschillen, door elkaar getekend. In deze figuur is te zien dat de voorspelfout een goede schatter is voor de absolute verschillen tussen berekend en gemeten.

Figuur 3.10 Voorspelfout (ber.-gem.) en lopend gemiddelde (gem.-ber.)



4 Mogelijke toepassingen van het programma SURFIS

4.1 Bepalen van de optimale bemonsteringsafstand

Met het programma SURFIS is het mogelijk om meetgegevens zoals lodingen, slibdiktes, concentraties enz. ruimtelijk te interpoleren, waarbij ook voorspelfouten kunnen worden berekend. Met deze voorspelfout kan een optimale bemonsteringsstrategie samengesteld worden en kunnen er toetsen op niveauverschil, enz. uitgevoerd worden. In de volgende paragrafen worden hierop een aantal toepassingen van SURFIS gegeven.

4.1.1 Lodingen

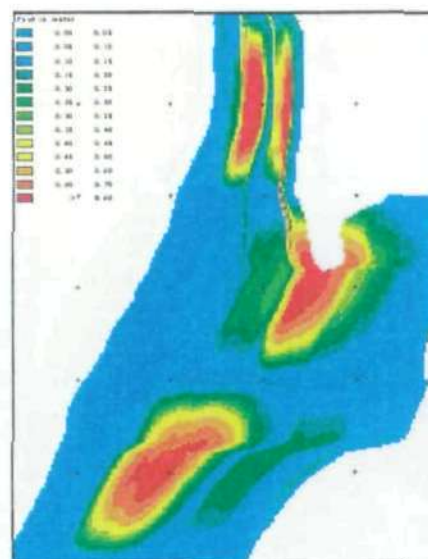
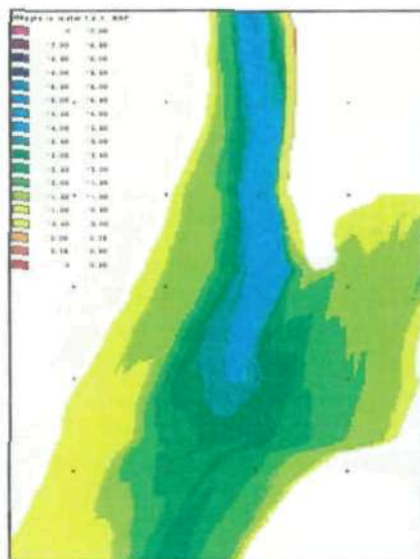
Een Digitaal Terrein Model (DTM), geconstrueerd uit dieptelodingen, moet zo nauwkeurig mogelijk de werkelijkheid weergeven. In het ene gebied waar weinig hoogteverschil is, volstaat een grotere raai afstand dan in een ander gebied waar op korte afstand een groot hoogteverschil aanwezig is.

Met behulp van SURFIS is het mogelijk om tijdens het loden een optimale afstand (minimaal aantal meetpunten) te bereiken die nodig is om na interpolatie een voorafgestelde nauwkeurigheid te bereiken.

Om de optimale bemonsteringsstrategie te benadrukken wordt als voorbeeld het deel van het Spijkerboor genomen zoals dat in de vorige hoofdstukken is behandeld. Als eerste worden lodingsraaien met een onderlinge afstand van 200 m gegenereerd. De meetgegevens voor deze raaien zijn afgeleid uit de DTM welke in figuur 2.4 te zien is. Interpolatie van de diepte in de gesimuleerde meetraaien moet dan eigenlijk een DTM overeenkomstig figuur 2.4 opleveren. Met behulp van deze gegevens wordt het gehele gebied ruimtelijk geïnterpoleerd, waarbij tevens de bijbehorende voorspelfouten worden berekend.

Figuur 4.1 laat zien dat ondanks de grote raaiafstanden de diepten redelijk geschat worden. Figuur 4.2 laat zien dat op locaties waar op korte afstand de variatie in diepte groot is (overgangen geul-oever), de voorspelfouten groot zijn (> 60 cm). Op deze plaatsen zijn extra lodingsgegevens nodig.

Figuur 4.1 DTM van de bodemhoogte in 1993 berekend met lodingen op een afstand van 200 m.

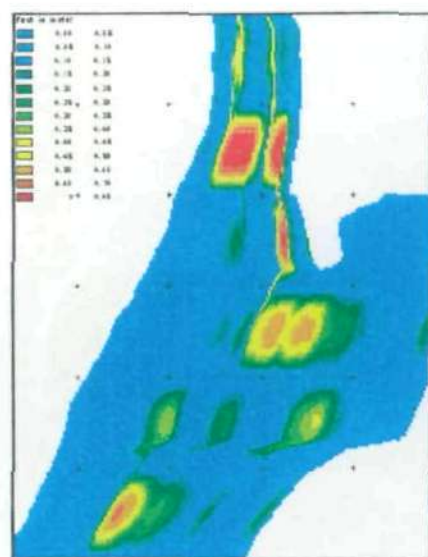
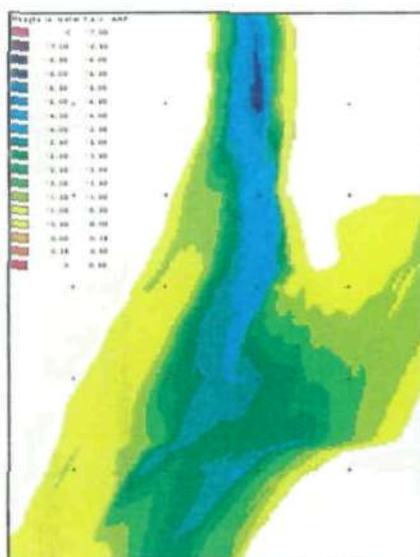


Figuur 4.2 Voorspelfout in de DTM te zien in figuur 4.1.

Dat het toevoegen van extra gegevens een beter resultaat oplevert, wordt door de figuren 4.3 en 4.4 weergegeven. Hier is de onderlinge afstand tussen de meetraaien tot 100 m verkleind.

In figuur 4.4 is te zien, dat de gebieden waar de voorspelfout groter dan 60 cm is, flink zijn afgenomen.

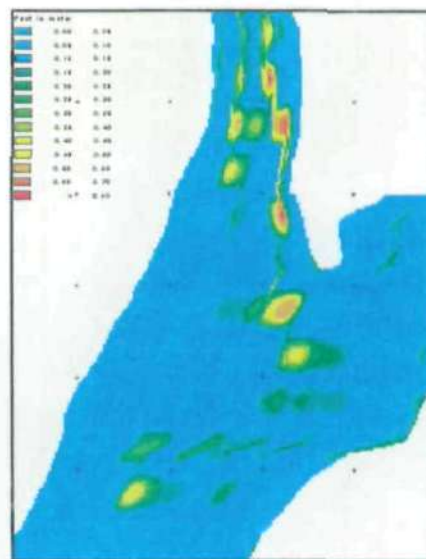
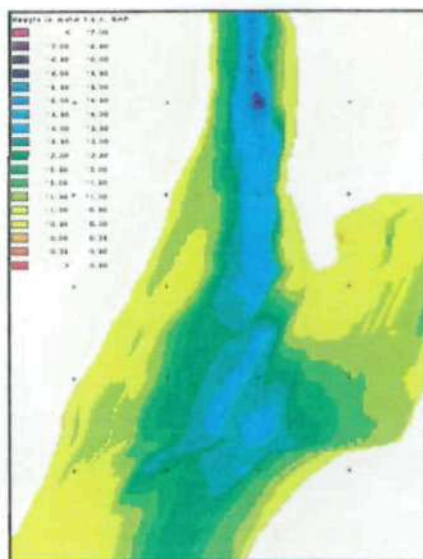
Figuur 4.3 DTM van de bodemhoogte in 1993 berekend uit lodingen op een afstand van 100 m.



Figuur 4.4 Voorspelfout in de DTM van figuur 4.3.

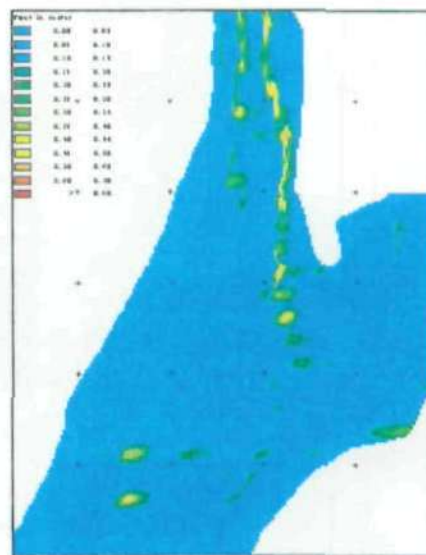
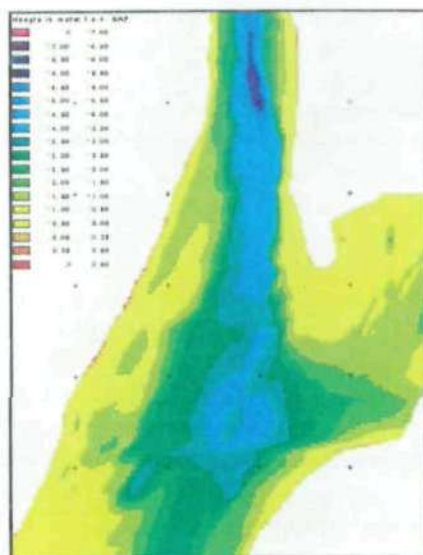
Als de afstand tussen meettraaien verkleind wordt tot 50 m, dan is de voorspelfout op bijna alle locaties kleiner dan 60 cm (figuur 4.6). Bij verdere verkleining tot 25 m is de voorspelfout in de meeste gevallen kleiner dan 20 cm.

Figuur 4.5 DTM van de bodemhoogte in 1993 berekend met lodingen op een afstand van 50 m.



Figuur 4.6 Voorspelfout in de DTM van figuur 4.5.

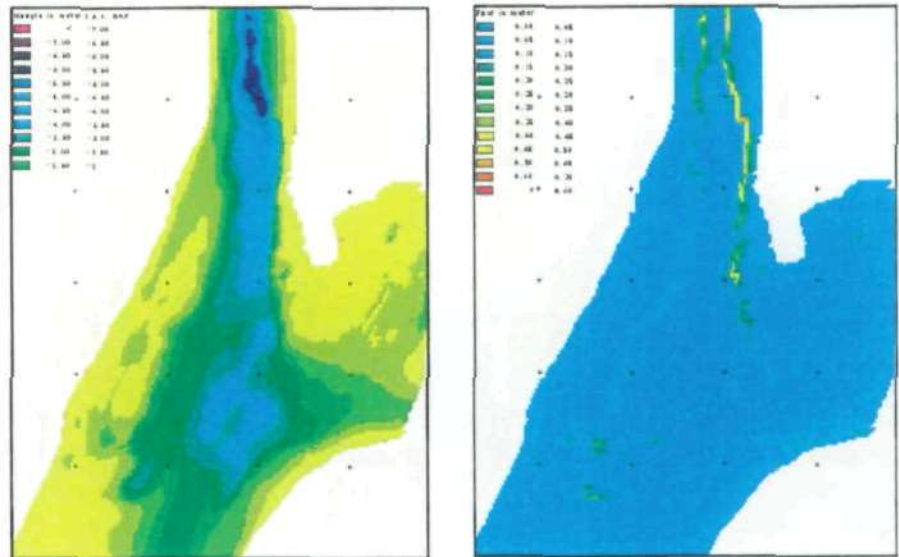
Figuur 4.7 DTM van de bodemhoogte in 1993 berekend met lodingen op een afstand van 25 m.



Figuur 4.8 Voorspelfout in de DTM van figuur 4.7.

Bij een verkleining tot 10 m, is de voorspelfout op bijna alle locaties kleiner dan 10 cm (figuur 4.10).

Figuur 4.9 DTM van de bodemhoogte in 1993 berekend uit lodingen op een afstand van 10 m.



Figuur 4.10 Voorspelfout in de DTM van figuur 4.9

De verkleining van de afstand tussen de meetraaien zal vanwege het tijdsaspect en de kosten die ermee gemoeid zijn, tot die gebieden beperkt moeten worden waar de voorspelfout (te) groot is. Dit betekent dat op locaties waar de variatie erg klein is (platen e.d.) aanvullende lodingen niet nodig zijn. Verder kan er overwogen worden een aantal langsraaien te varen.

4.1.2 Bodembemonstering

Voor het construeren van bijvoorbeeld een slibdiktekaart moeten boringen verricht worden. Het is van te voren niet bekend waar en hoeveel boringen geplaatst moeten worden om een zo nauwkeurig mogelijke DTM met slibdiktekaart te krijgen. De afstand waarop boringen zullen worden geplaatst is afhankelijk van de variatie van de onderlinge meetwaarde.

Zoals gedemonstreerd in de vorige paragraaf kan ook hier met behulp van SURFIS de optimale bemonsteringsafstand gevonden worden.

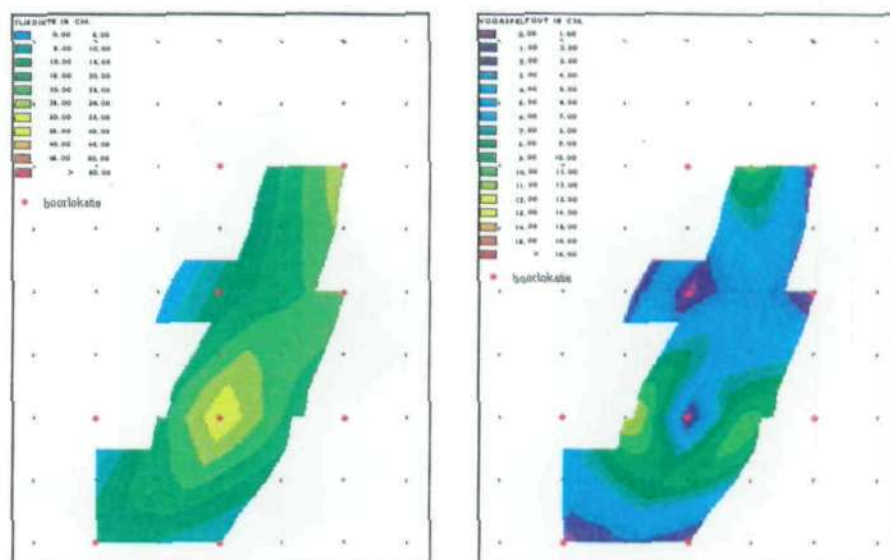
Als voorbeeld wordt hier een verdieping in de bodem gesimuleerd die met slib is opgevuld. Dit voorbeeld richt zich op de vraag wat de maximale afstand tussen de boringen mag zijn, waarbij de voorspelfout niet groter wordt dan 5 cm.

In figuur 4.19 wordt de werkelijke vorm van het gebied weergegeven. De slibdiktes variëren tussen de 0 en 50 cm.

Bij het gebruik van SURFIS is het niet nodig dat de locaties van de boringen op willekeurige afstanden liggen. Wel moet er voor gezorgd worden dat de afstand tussen twee boringen in beginsel niet te groot is. Als er tussen twee naast elkaar liggende boringen weinig of geen verschil, in bijvoorbeeld slibdikte geconstateerd wordt, dan zal SURFIS tussen deze twee boringen ook een kleine voorspelfout berekenen. Eventueel aanwezige grote veranderingen in slibdiktes worden niet gevonden.

Allereerst zijn er boringen gesimuleerd met een onderlinge afstand van 200 m. De geïnterpoleerde slibdiktes uit deze boringen zijn in figuur 4.11 te zien.

Figuur 4.11 DTM van de slibdikte berekend uit boringen op een afstand van 200 m.



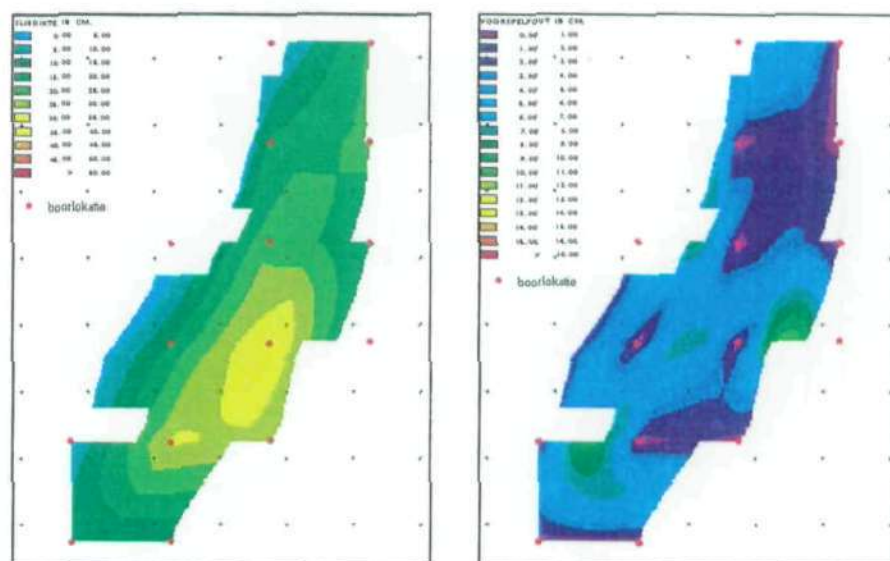
Figuur 4.12 Voorspelfout van de DTM van figuur 4.11.

In figuur 4.11 is te zien dat niet het gehele gebied goed wordt geïnterpoleerd (vergelijk met figuur 4.19). Dit komt doordat er geen boringen aan de randen van het gebied liggen. Omdat SURFIS niet kan extrapoleren worden er aan de randen geen slibdiktes berekend.

In figuur 4.12 is te zien dat de voorspelfout rond een boring het kleinst (< 1 cm) is. Bij het toenemen van de afstand tot de boring neemt de voorspelfout ook toe (tot meer dan 10 cm). Bij het verkleinen van de afstand tussen de boringen zal de voorspelfout op de meeste locaties afnemen.

In figuur 4.13 is de slibdikte weergegeven zoals die uit interpolatie is verkregen met boringen met een onderlinge afstand van 150 m. De voorspelfout is zoals verwacht kleiner (figuur 4.14).

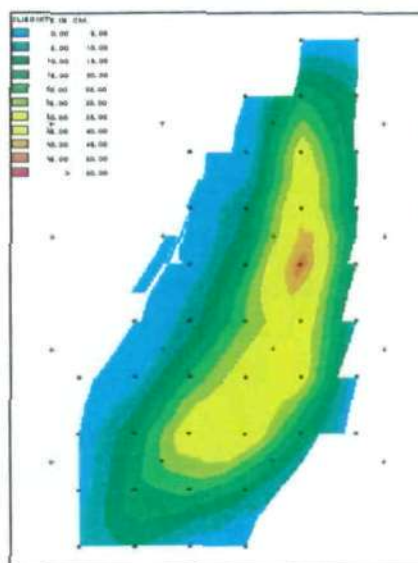
Figuur 4.13 DTM van de slibdikte berekend uit boringen op een afstand van 150 m.



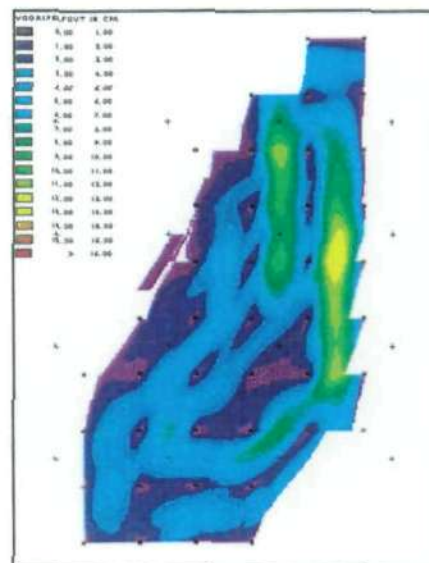
Figuur 4.14 Voorspelfout in de DTM van figuur 4.13.

In figuur 4.16 is de voorspelfout te zien zoals deze is berekend bij boringen met een onderlinge afstand van 100 m. Opvallend is dat de fout op sommige plaatsen toeneemt. Dit wordt veroorzaakt doordat bij het verkleinen van de boorafstand nieuwe variaties in slibdikte zichtbaar worden die hiervoor nooit gedetecteerd konden worden (zie figuur 4.15).

Figuur 4.15 DTM van de slibdikte berekend uit boringen op een afstand van 100 m.

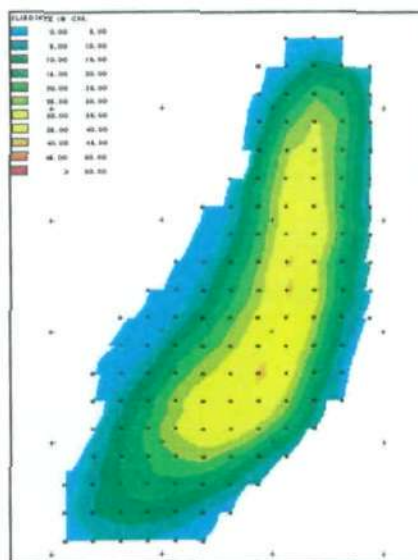


Figuur 4.16 Voorspelfout in de DTM van figuur 4.15.

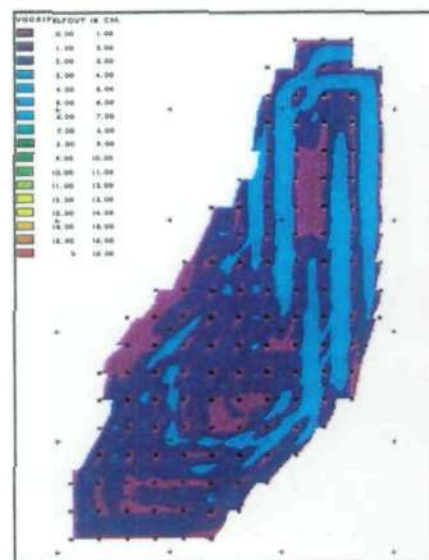


Bij het verkleinen van de onderlinge boorafstand tot 50 m, is de voorspelfout op bijna alle locaties kleiner dan 7 cm (figuur 4.17). Bij verdere verkleining tot 25 m neemt de voorspelfout af tot kleiner dan 2 cm (figuur 4.20).

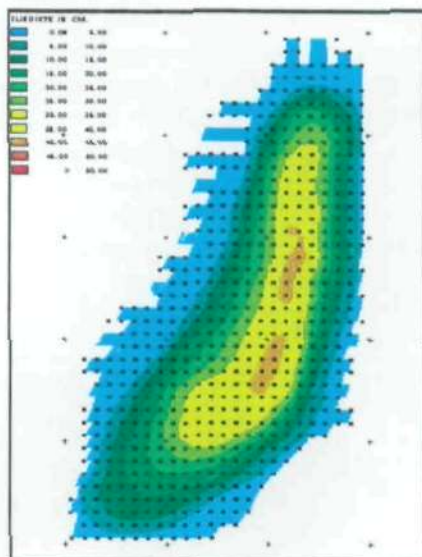
Figuur 4.17 DTM van de slibdikte berekend uit boringen op een afstand van 50 m.



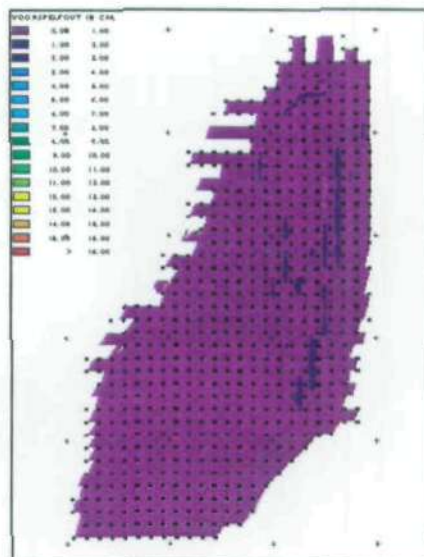
Figuur 4.18 Voorspelfout in de DTM van figuur 4.17.



Figuur 4.19 DTM van de slibdikte berekend uit boringen op een afstand van 25 m.



Figuur 4.20 Voorspelfout in de DTM van figuur 4.19.



Zoals ook in het voorbeeld van de bodemhoogte te zien was, heeft verkleining van de boorafstanden alleen daar nut waar de variatie in de gemeten waarden het grootst is.

4.2 Inzet bij saneringen

In de vorige hoofdstukken is aangegeven hoe een DTM (grid) met een diepte en een DTM met de dikte van een laag (slib, zand, enz.) met behulp van SURFIS uit lodingen en boringen geconstrueerd kan worden. Door eenvoudig de laagdikte van de bodemhoogte af te trekken kan uit beide DTM's voor iedere gridcel de hoogteligging van de laag (in bijv. m t.o.v. NAP) berekend worden. De nauwkeurigheid (voorspelfout) die bij deze waarde hoort is afhankelijk van de fout in de diepte (bodemhoogte) en de fout in de laagdikte. Als we veronderstellen dat de diepte op locatie x,y normaal verdeeld is met een voorspelfout 'F_diep' en dat de laagdikte op dezelfde locatie x,y normaal verdeeld is met als voorspelfout 'F_dikte', dan zal de hoogteligging van de laag (= diepte - dikte) eveneens normaal verdeeld zijn met een voorspelfout 'F_hoogte' die de wortel is uit de som van de kwadraten van 'F_diep' en 'F_dikte'. Met de berekende hoogteligging van de laag en de bijbehorende voorspelfout kan bijvoorbeeld een 95%-voorspellingsinterval voor de werkelijke hoogteligging vastgesteld worden. De ondergrens van dit 95%-betrouwbaarheidsinterval kan berekend worden door van de berekende hoogteligging $1,96 \cdot 'F_hoogte'$ af te trekken. De bovengrens wordt berekend door bij de berekende hoogteligging $1,96 \cdot 'F_hoogte'$ op te tellen.

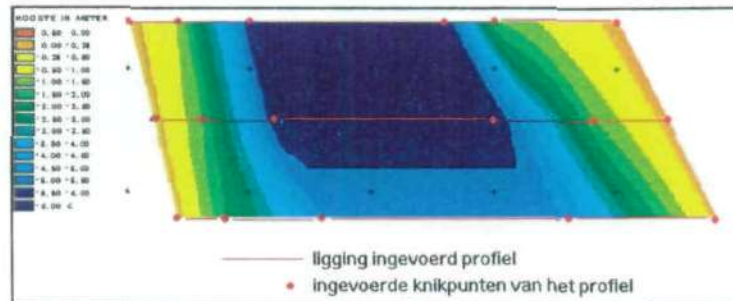
Voor het saneren van een verontreinigde laag is het belangrijk de juiste (diepte)ligging van die laag te weten. Met behulp van SURFIS wordt deze laag in beeld gebracht met een 95%-ondergrens. Van deze laag wordt vervolgens de inhoud bepaald. Als blijkt dat de kosten van afgraven te hoog zijn kunnen er extra boringen uitgevoerd worden. Door de laagdiktegegevens van deze boringen toe te voegen aan de bestaande dataset zal de fout in de geïnterpoleerde laagdikte en dus ook de fout in de hoogteligging van de laag, kleiner worden. Hierdoor zal de 95%-ondergrens van de af te graven laag hoger komen te liggen. Het gevolg is dat er (bij eenzelfde betrouwbaarheid) minder afgegraven hoeft te worden. Door het één tegen het ander af te wegen kan een optimum bepaald worden tussen de kosten van het aantal boringen en de kosten van het met een bepaalde nauwkeurigheid afgraven van de verontreinigde laag.

4.2.1 Ontwerpen van een DTM met ontgravings-/stortingsprofielen

Een probleem bij het ruimtelijk interpoleren van theoretische ontwerpprofielen is, dat de meeste interpolatiemethoden geen platte vlakken kunnen produceren. Met behulp van SURFIS is het mogelijk om profielen (met bijvoorbeeld vlakke bodems) ruimtelijk te interpoleren tot een grid met platte vlakken.

In figuur 4.21 is een voorbeeld gegeven van het ruimtelijk interpoleren van 3 ontgravingsprofielen tot een ontgravingsgrid. In SURFIS zijn de aangegeven knikpunten (x,y,z-waarden) ingevoerd als data. Bij de proefsanering van het Spijkerboor is SURFIS met succes gebruikt om het ontgravingsprofiel ruimtelijk te interpoleren tot een 1 meter-grid met ontgravingsdiepten.

Figuur 4.21 DTM met ontwerpdiepte berekend uit de knikpunten van de ontwerpprofielen.

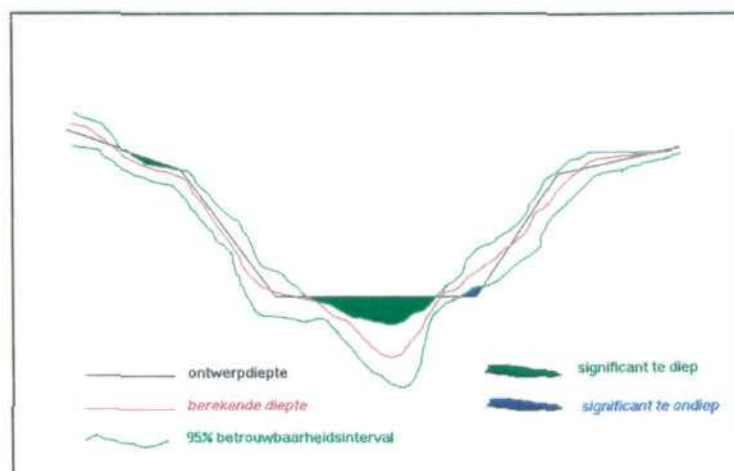


4.2.2 Toetsen van de bagger-/stortgegevens

Met behulp van SURFIS kan getoetst worden of er tot een opgegeven diepte gebaggerd of gestort is. Door de lodingen na handeling te vergelijken met de ontwerpdiepten, kan gezegd worden of de ontwerpdiepte (behoudens een eventuele tolerantie) gehaald wordt. Met de door SURFIS berekende diepte en voorspelfout kan op iedere locatie x,y op de manier zoals in § 4.2 is beschreven een 95%-voorspellingsinterval voor de diepte (tussen de meetraaien) opgesteld worden. Door nu dit voorspellingsinterval te vergelijken met de ontwerpdiepte kan voor iedere locatie x,y getoetst worden of de huidige diepte significant te hoog of te laag is.

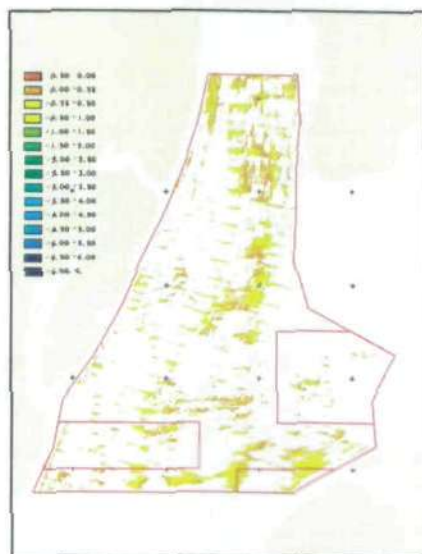
Een bodemhoogte is significant te ondiep, als de ondergrens van het 95%-voorspellingsinterval van de hoogte hoger is dan de ontwerpdiepte (zie figuur 4.22). Een bodemhoogte is significant te diep, als de bovengrens van het 95%-betrouwbaarheidsinterval van de berekende diepte lager is dan de ontwerpdiepte. Als bekend is waar te diep gebaggerd is, kan (voor eventuele verrekening met de aannemer) ook de hoeveelheid te veel gebaggerd materiaal berekend worden.

Figuur 4.22 De ontwerpdiepte en de berekende diepte afgezet tegen het 95%-voorspellingsinterval.

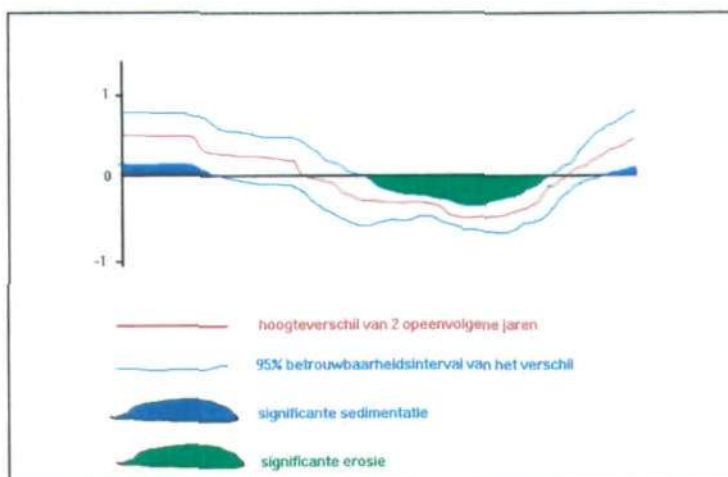


Resultaten van deze toets op diepte, welke toegepast is bij de proefsanering van het Spijkerboor, zijn te zien in de figuren 4.23 en 4.24. Opvallend in deze figuren is dat de punten waar met 95%-zekerheid gezegd kan worden of er te diep/ te ondiep gebaggerd is, vooral op en nabij de locaties van de meetraaien liggen. Dit is een logisch gevolg van het feit dat ter hoogte van de meetraaien het betrouwbaarheidsinterval het kleinst is, omdat de voorspelfout daar nage-noe-gelijk is aan de meetfout (er is haast geen interpolatiefout).

Figuur 4.23 Locaties waar significant te ondiep gebaggerd is.

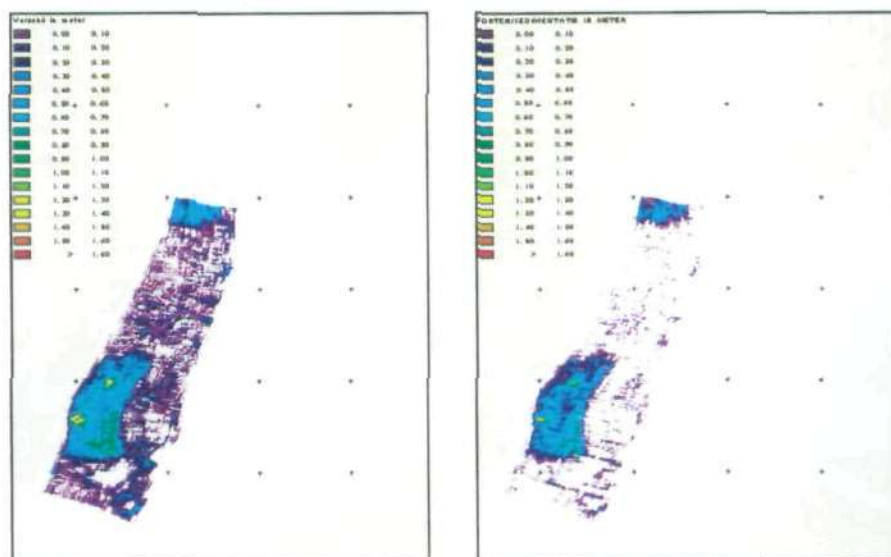


Figuur 4.25 Ontwerpdiepte, berekende diepte en 95%-betrouwbaarheidsinterval.



Als er geen verschil tussen de jaren is, dan zal de waarde 0 (nul) binnen het betrouwbaarheidsinterval liggen. Als de ondergrens van het interval groter is dan 0, dan kan er gesproken worden over significante sedimentatie. Als de bovengrens van het interval kleiner is dan 0, dan is er sprake van significante erosie. Ter illustratie is in figuur 4.26 een verschilkaart weergegeven tussen de diepte in het Spijkerboor in juni 1996 en de diepte (na het storten van zand) in juli 1996.

Figuur 4.26 Verschil in bodemhoogte in juni en juli 1996.



Figuur 4.27 Significants verschil in bodemhoogte.

In figuur 4.27 is de ondergrens van de verschillen te zien. Als de ondergrens groter is dan 0, dan is er sprake van significante sedimentatie. Duidelijk is in figuur 4.27 te zien dat de sedimentatie, zoals deze in figuur 4.26 te zien is, niet overall significant is.

4.2.4 Uitvoeren van kuberingen

Kuberingen kunnen om diverse redenen uitgevoerd worden. Een voorbeeld hiervan is: hoeveel m^3 is er in een bepaald gebied gesedimenteerd in de periode 1976-1987 en wat is het 95%-betrouwbaarheidsinterval voor deze hoeveelheid?

De hoeveelheid gesedimenteerd materiaal in een bepaald gebied kan berekend worden door voor iedere gridcel in het gebied de positieve verschillen tussen de DTM's van de jaren 1976 en 1987 te sommeren en te vermenigvuldigen met de oppervlakte van de gridcel. De fout in deze hoeveelheid kan berekend worden door de fout van alle gridcellen waar het verschil positief is, samen te voegen en te vermenigvuldigen met de oppervlakte van de gridcel. Omdat het verschil in iedere cel afzonderlijk verondersteld wordt normaal verdeeld te zijn met een bepaalde voorspelfout, zal de som van de verschillen ook normaal verdeeld zijn. De voorspelfout van deze som is gelijk aan de wortel uit de som van de kwadraten van de voorspelfouten in de afzonderlijke cellen (waar het verschil positief is). Met de berekende hoeveelheid en de voorspelfout daarvan een (bijv. 95%-) betrouwbaarheidsinterval van de werkelijke hoeveelheid gesedimenteerd materiaal berekend worden.

5 Conclusies

1. Ruimtelijk interpoleren van de bodemhoogte waarbij de meetraaien op zeer korte afstand (max. 10 m) van elkaar liggen, kan slecht met de methode SPLINE (grote bergen en dalen), redelijk met de IDW-methode (alleen een geringe afvlakking van de meetgegevens) en goed met de methoden die gebruik maken van triangulatie (DIGIPOL en triangulatie lineair).
2. Ruimtelijk interpoleren van de bodemhoogte waarbij de meetraaien op grote afstand (min. 100 m) van elkaar liggen en waarbij de richting van de meetraaien loodrecht op de stroomrichting liggen kan slecht met de methode SPLINE en IDW en redelijk met de methoden die gebruikmaken van triangulatie en goed met SURFIS.
3. Ruimtelijk interpoleren van de bodemhoogte waarbij de meetraaien op grote afstand (min. 100 m) van elkaar liggen en waarbij de richting van de meetraaien niet loodrecht op de stroomrichting liggen kan slecht met de methode SPLINE, IDW en triangulatie lineair. Iets beter met DIGIPOL en goed met SURFIS-en de IDW-methode met zoekellips (behalve bij de randen).
4. Behalve met SURFIS zijn er geen interpolatiemethoden bekend waarmee ruimtelijk geïnterpoleerd kan worden met een foutenanalyse, zonder dat eerst het gebied opgedeeld moet worden in homogene delen (zonder trend).
5. Met SURFIS is het mogelijk om, op basis van de berekende toevallige fouten, eenvoudig aanvullende bemonsteringslocaties te bepalen waarmee de totale fout verkleind kan worden.
6. SURFIS kan bij saneringen ingezet worden om bijvoorbeeld ontgraving- en ontwerpprofielen ruimtelijk te interpoleren, om kuberingen met een foutenmarge uit te voeren en om te toetsen of er tot de juiste diepte gebaggerd is.
7. Bij morfologisch onderzoek kan SURFIS dienen als basis om te toetsen of er sprake is van een significante erosie of sedimentatie.

- (1) Munster, R.J., Antwerpen, G. van (1994), Concept handleiding DIGIPOL.
- (2) Fioole, A. De achtergronden van het computerprogramma SURFIS, deel d: SURFIS40 (concept).

