

Modellering van extreme waterstanden veroorzaakt door opwaaiing toegepast op het Slotermeer

*Een toetsing van het model voor overschrijdingswaterstanden in
Friesland met een berekening van opwaaiing op het Slotermeer*



Begeleider
Dhr. H.J. Verhagen

Maart 2006

Gijs Bosman
9108399
Bob Maaskant
1025821

Voorwoord

Voor u ligt het minor afstudeerproject dat in het kader van de studie Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft is volbracht. Een minor afstudeerproject is te omschrijven als een afstudeeronderzoek op kleinere schaal dat in twee maanden wordt afgerond. Het onderwerp van dit project is de normalisatie van de boezemkades in Friesland.

Voor de totstandkoming van dit rapport willen wij, dhr. H.J. Verhagen van de Technische Universiteit Delft, dhr. W.S. de Vries en dhr. L.P. Zijlstra van het Wetterskip Fryslân en dhr. H.J. Regeling van Rijkswaterstaat hartelijk danken voor de ter beschikking gestelde informatie.

Gijs Bosman
Bob Maaskant
Delft, maart 2006

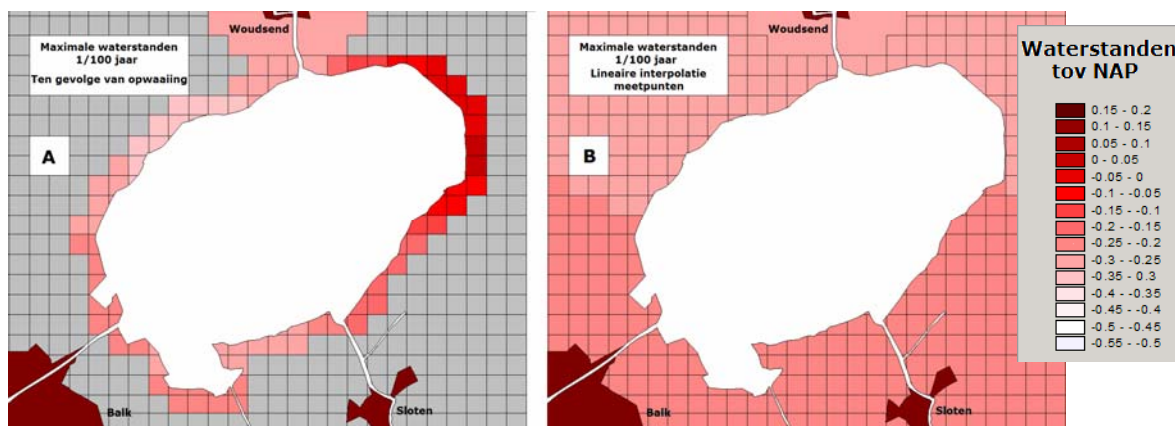
Samenvatting

De provincie Friesland wil een meer gestructureerde aanpak voor de bepaling van de hoogtes van boezemkades. Om goed te kunnen dimensioneren is een gedetailleerd model nodig met maatgevende waterstanden. Het huidige model, gemaakt door het Wetterskip Fryslân, is gebaseerd op 37 meetpunten verspreid over Friesland. Met de metingen zijn voor de meetpunten de overschrijdingswaterstanden bepaald van eens in de 10, 30, 100 en 300 jaar. Vervolgens is er tussen deze bekende punten lineair geïnterpoleerd, waarbij gebruik is gemaakt van een raster over Friesland. Deze methode roept echter een aantal vragen op: voldoet een lineaire interpolatie wel? Zal door windopzet de waterstand in een boezemmeer niet sterk afwijken van de gemeten waterstand in een meetpunt dat gesitueerd is in een kanaal?

Om deze lineaire methode te toetsen worden in dit rapport waterstandberekeningen op een boezemmeer uitgevoerd enkel en alleen als gevolg van windopzet en niet op basis van gemeten waterstanden, die in de lineaire methode gebruikt worden. Uitgangspunt van de berekeningen is het streefpeil van NAP -0,52m.

Voor het berekenen van de windopzet moet er een maatgevende wind voor verschillende windrichtingen worden berekend. Per windrichting zullen de waterstanden op het meer worden bepaald en kunnen de resultaten van de berekening worden vergeleken met de gemeten waterstanden van het oorspronkelijk model.

Gekozen is de berekening toe te passen op het Slotermeer omdat er over dit boezemmeer veel informatie beschikbaar is. Naast de beschikbaarheid van een zeer gedetailleerde bodemkaart, worden sinds 2000 door het Ministerie van Verkeer en Waterstaat ook golven en windsnelheden gemeten. Daarnaast heeft het Slotermeer een interessante geografische ligging, zo ligt de grootste strijklengte in het verlengde van de overheersende windrichting.



A: Waterstanden berekend met het opwaaiing model op het Slotermeer

B: waterstanden berekend met het lineair geïnterpoleerde model op het Slotermeer

In de twee bovenstaande afbeeldingen is het Slotermeer te zien met rondom het boezemmeer ingekleurde vakjes die de eens in de 100 jaar voorkomende waterstand aangeven.

Afbeelding A:

Op het Slotermeer is, vanuit het streefpeil van NAP -0,52m, voor acht verschillende windrichtingen de opwaaiing berekend. Ieder vakje heeft bij elk van de acht windrichtingen een waterstand toegekend gekregen. Vervolgens is per vakje rond het Slotermeer gekeken naar de maximaal optredende waterstand. Die maximale waarden zijn in afbeelding A weergegeven.

Afbeelding B:

Hier zijn de overschrijdingswaterstanden weergegeven, berekend met het lineair geïnterpoleerde model.

Bij vergelijking van afbeelding A en B valt op dat langs de westkant van het meer en in het kanaaltje richting Woudsend de waterstanden overeenkomen. Maar kijkt men naar de Oostkant van het meer dan komen op afbeelding A veel hogere waterstanden voor dan op afbeelding B. Op één plek loopt het verschil zelfs op tot 25cm.

Het oorspronkelijk model voor de overschrijdingswaterstanden blijkt een goede indicatie te geven van voorkomende waterstanden in Friesland. Problemen dienen zich echter aan bij boezemmeren met een grote strijklengte van zuidwestelijke naar noordoostelijke richting (de overheersende windrichting). Het is hierbij doorslaggevend waar het dichtstbijzijnde meetpunt is gelegen. Bij het Slotermeer bijvoorbeeld blijken bepaalde waterstanden hoger uit te vallen doordat het meetpunt zich in Woudsend bevindt. Wanneer bij een boezemmeer de waterstanden aan de noordoostelijke zijde zouden worden gemeten, kunnen wellicht lagere waterstanden worden verwacht aan de zuidwestelijke zijde dan het lineaire model zou aangeven. Dit kan men berekenen met het opwaaiing model.

Om uiteindelijk tot een goed model voor maatgevende waterstanden in Friesland te komen is het aan te bevelen waterstanden van boezemmeren en vaarwegen met een grote strijklengte in de overheersende windrichting opnieuw te kwantificeren. Het opwaaiing model, dat in dit rapport wordt beschreven, kan hiervoor worden gebruikt. De uitkomsten van de berekening kunnen vervolgens gekalibreerd worden met de overschrijdingswaterstanden, berekend uit de bekende meetpunten. De meetpunten worden dan gebruikt als controle van het opwaaiing model. Met het combineren van beide modellen komt men tot een beter en gedetailleerder model voor de overschrijdingswaterstanden in Friesland. Op basis hiervan kunnen de boezemkades worden gedimensioneerd.

Inhoudsopgave

Voorwoord	i
Samenvatting	ii
1 Inleiding	1
1.1 Situatiebeschrijving	1
1.2 Probleembeschrijving	3
1.3 Probleemstelling	4
1.4 Doelstelling	4
1.5 Aanpak	4
2 Windopzet rekenmethode	5
2.1 Algemene formule	5
2.2 Invloed diepte en breedte	6
2.3 Gesloten boezem	6
2.4 Benadering verhang en windopzet	7
2.5 Beperkingen	8
2.5.1 <i>Aanname gesloten boezem</i>	8
2.5.2 <i>Verwaarlozing bodemwrijving</i>	8
2.5.3 <i>Stromingen als gevolg van verschillen in het verhang</i>	8
2.5.4 <i>Neerslag en bemaling</i>	9
2.5.5 <i>Wrijvingscoëfficiënt</i>	9
3 Windopzet Slotermeer	11
3.1 Parameters	11
3.2 Geometrie Slotermeer	11
3.3 Verbindingen Slotermeer	14
3.3.1 <i>De Ee</i>	14
3.3.2 <i>De Slotervaart</i>	14
3.3.3 <i>De Luts</i>	15
3.4 Windanalyse	16
3.4.1 <i>Inleiding</i>	16
3.4.2 <i>Methode</i>	16
3.4.3 <i>Overschrijdingskans</i>	16
3.4.4 <i>Vier uur gemiddelden</i>	17
3.4.5 <i>Windrichtingen</i>	17
3.4.6 <i>Windsnelheid boven land en water</i>	18
3.4.7 <i>Maatgevende windsnelheid Slotermeer</i>	19
4 Resultaten windopzet Slotermeer	21
4.1 Hoofdwindrichtingen	21
4.2 Overige windrichtingen	23
4.3 Vergelijking van de waterstanden	24

5 Beperkingen Model.....	27
5.1 Gesloten boezem	27
5.2 Verwaarlozing bodemwrijving	29
5.3 Stromingen als gevolg van verschillen in het verhang	29
5.4 Neerslag en bemaling	29
5.5 Weerstandscoefficiënt	30
5.6 Invloed windsnelheid	30
5.7 Conclusie	30
6 Conclusies en aanbevelingen	31
6.1 Conclusie	31
6.2 Aanbevelingen	32
Literatuurlijst.....	34
Appendix A Winddata analyse	I
A.1 Gumbel en Exponentiële verdeling over de volledige dataset	I
A.1.1 <i>Gumbel verdeling</i>	<i>I</i>
A.1.2 <i>Exponentiële verdeling</i>	<i>II</i>
A.2 Jaarlijkse maxima verdeling	III
A.3 Gumbel & Weibull verdeling Peak over Threshold	IV
A.4 Keuze	V
Appendix B Windopzet	IX
B.1 Wind uit richting 200°	IX
B.2 Wind uit richting 250°	XII
B.3 Wind uit richting 300°	XV
B.4 Wind uit richting 345°	XIX
Appendix C Matlab scripts	XXIII
C.1 Jaarlijkse maxima verdeling, Gumbel	XXIII
C.2 Gumbel verdeling over volledige dataset.....	XXVI
C.3 Exponentiele verdeling over volledige dataset.....	XXVIII
C.4 Windopzetberekening in Matlab	XXX

1 Inleiding

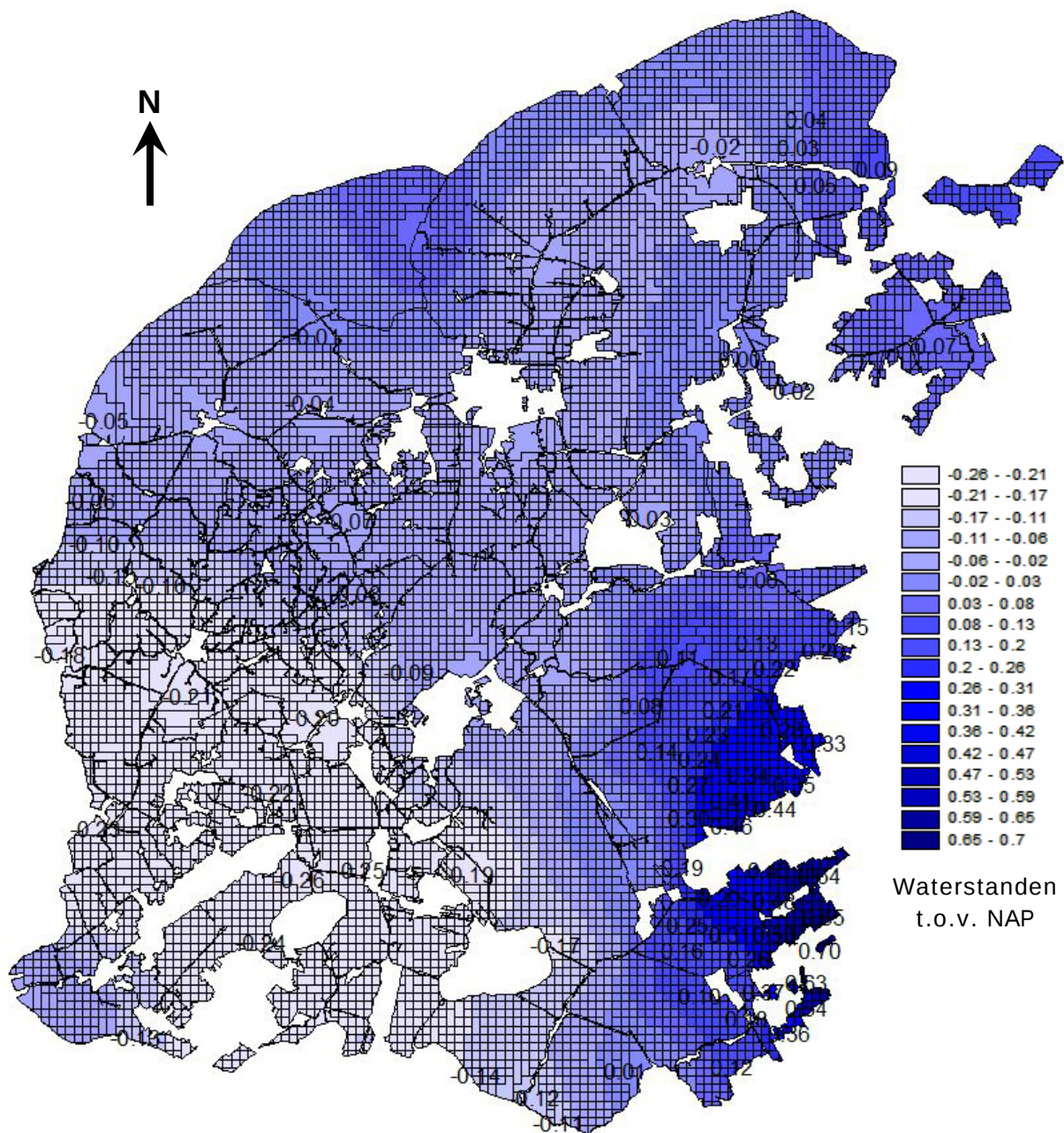
Het Wetterskip Fryslân gaat de komende jaren de hoogte van haar boezemkades normaliseren. Dit gaat gebeuren naar aanleiding van de wateroverlast in 1992, toen bleek dat een aantal kades niet voldeed.

1.1 Situatiebeschrijving

De boezem van Friesland is een aaneenschakeling van diverse meren en kanalen, die een gezamenlijk wateroppervlak hebben van ongeveer 15.000 ha. Om bij extreme windsnelheden grote waterstandverschillen en grote stroomsnelheden te voorkomen kan de boezem opgedeeld worden in verschillende segmenten door de aanwezige sluizen te sluiten. Het sluiten van de sluizen gebeurt pas wanneer een bepaalde maximale stroomsnelheid, ter plaatse van de sluis, wordt overschreden.

Ook wordt bij een aantal van deze sluizen, en op een aantal andere plekken, de waterstand gemeten en deze worden per uurgemiddelde in een dataset opgeslagen. Om dan de boezemkades in Friesland te normaliseren is voor elk meetpunt een overschrijdingswaterstand van eens in de 10, 30, 100 en 300 jaar berekend. Vervolgens is er tussen deze meetpunten geïnterpoleerd waarbij gebruik is gemaakt van een lineair model. Voor het dimensioneren van boezemkades gebruikt het Wetterskip Fryslân een overschrijdingswaterstand van eens in de honderd jaar en een streefpeil van de boezem van NAP - 0,52m.

In figuur 1.1 is de provincie Friesland weergegeven met de geïnterpoleerde overschrijdingswaterstand van eens in de honderd jaar. Deze situatie zal zich alleen voordoen bij een zuidwesterstorm. Het lichtgekleurde gebied geeft de laagste overschrijdingswaterstanden weer. Bij een zuidwesterstorm wordt het water richting het noordoosten gestuwd, waarbij verwacht zou worden dat in het zuidwesten de laagste waterstand op zal treden. In figuur 1.1 is te zien dat dit niet het geval is omdat bij Stavoren, bij een beginnende storm, water wordt ingelaten ten behoeve van de scheepvaart.



Figuur 1.1: Geïnterpoleerde overschrijdingwaterstanden eens in de 100 jaar

Om meer inzicht in deze lineaire interpolatie te krijgen wordt gekeken naar één specifieke locatie. Het Slotermeer is hiervoor gekozen omdat hier sinds een aantal jaar wind en golven gemeten wordt, daarnaast is een gedetailleerde bodemkaart beschikbaar die de waterstandberekeningen vergemakkelijkt.

1.2 Probleembeschrijving

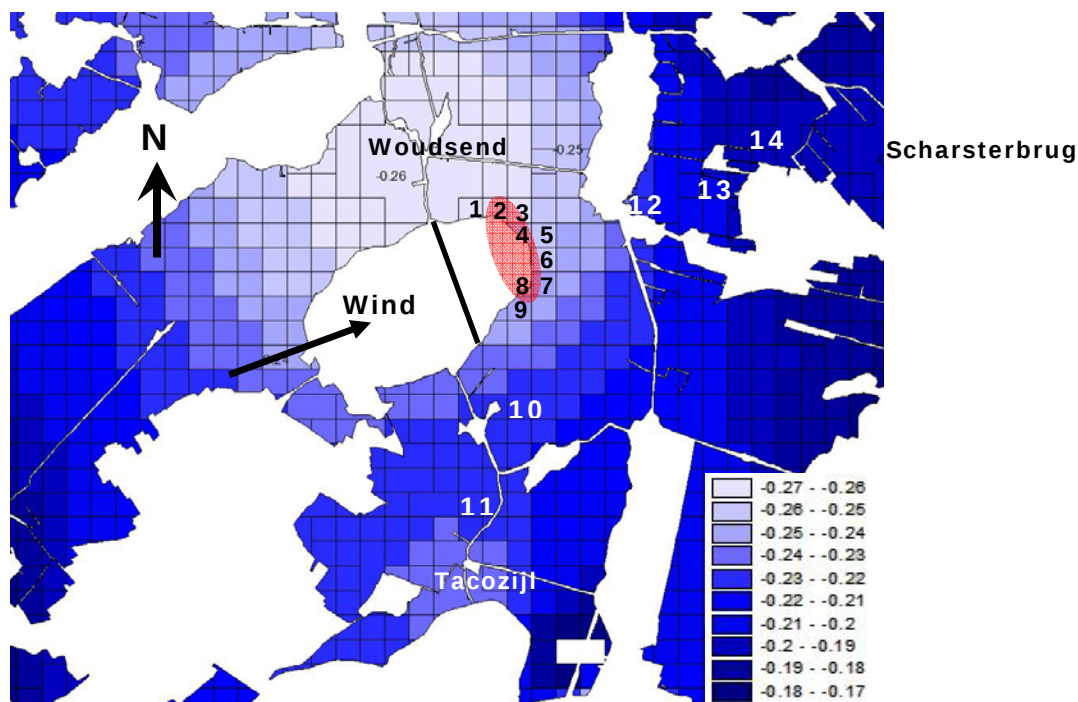
Het nadeel van de lineaire methode is dat op bepaalde punten, zeker langs randen van de meren, weinig tot geen rekening is gehouden met windopzet. Bijvoorbeeld bij het meetpunt 'Woudsend' ten noorden van het Slotermeer. Dit meetpunt ligt in een kanaal op enige afstand van het meer. Door omliggende gebouwen en bebossing ondervindt dit kanaal minder invloed van de wind waardoor er een waterhoogte gemeten wordt die niet lineair is toe te passen op de waterhoogte in het meer. In het meer zal dan waarschijnlijk een hogere waterstand aanwezig zijn.

Als de wind vanuit de aangegeven richting komt (zie figuur 1.2), dan wordt er in Woudsend een waterstand gemeten waar de windopzet tot aan de zwarte lijn in zit. De windopzet over het verdere gedeelte van het meer wordt hier niet gemeten. Als er dan lineair naar een ander punt wordt geïnterpoleerd, dan is de berekende waterstand langs de oostkant van het boezemmeer waarschijnlijk te laag.

In onderstaand tabel 1.1 is de uitkomst te zien van de lineair berekende waarden.

Tabel 1.1: Lineair geïnterpoleerde waterstanden tussen meetpunten

Meetpunt	Lineair geïnterpoleerde punten			Meetpunt
Woudsend	Punt 12	Punt 13	Punt 14	Scharsterbrug
-0,26m	-0,22	-0,20	-0,19	-0,19
Woudsend	Punt 6	Punt 10	Punt 11	Tacozijsl
-0,26m	-0,25	-0,22	-0,22	-0,23



Figuur 1.2: Detail Slotermeer

De overschrijdingswaterstanden, die met de waarschijnlijk te lage waterstanden zijn berekend, vallen dan ook te laag uit. Het meetpunt aan het Slotermeer heeft een eens in de honderd jaar overschrijdingswaterstand van -0,26m, maar de overschrijdingswaterstanden langs de oostkant van het meer zullen waarschijnlijk hoger zijn.

Het Wetterskip Fryslân heeft met behulp van een 'log-normal' verdeling de waterstanden berekend met een overschrijdingskans van eens in de 100 jaar. In onderstaand tabel 1.2 staan deze waterstanden langs de oostkant van het meer, de nummers corresponderen met figuur 1.2.

Tabel 1.2: Overschrijdingswaterstanden eens in de 100 jaar t.o.v. NAP

Meetpunt Woudsend	-0,26m
Berekende waterstand 1	-0,26m
Berekende waterstand 2	-0,26m
Berekende waterstand 3	-0,26m
Berekende waterstand 4	-0,25m
Berekende waterstand 5	-0,25m
Berekende waterstand 6	-0,25m
Berekende waterstand 7	-0,24m
Berekende waterstand 8	-0,25m
Berekende waterstand 9	-0,24m

1.3 Probleemstelling

Het huidige model voor de overschrijdingswaterstanden in Friesland is niet toereikend. De statistische berekeningen met de verschillende meetwaarden zijn goed uitgevoerd, alleen de lineaire interpolatie zal op verschillende punten sterk afwijken van de werkelijk optredende waterstanden. Dit zal vooral aan de oostelijke kant van de boezems het geval zijn.

1.4 Doelstelling

Verbeteren van het inzicht in de overschrijdingswaterstanden in Friesland en toetsing van de lineaire interpolatie die, door het Wetterskip Fryslân, tussen de verschillende meetpunten is toegepast.

1.5 Aanpak

Momenteel wordt door het Wetterskip Fryslân overschrijdingswaterstanden vastgesteld op basis van de gemeten waterstanden in verschillende meetpunten. Hiermee wordt een statistische benadering gegeven.

In dit rapport zal een andere werkwijze worden gehanteerd. Er wordt gekeken naar optredende windsnelheden en richtingen en van daaruit zal met verschillende statistische methoden een maatgevende windsnelheid berekend worden. Met behulp van deze windsnelheden zal voor de verschillende richtingen vervolgens een maatgevende waterstand berekend worden. Deze waterstanden kunnen dan vergeleken worden met de door het Wetterskip berekende waterstanden.

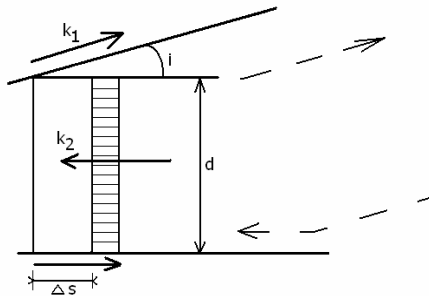
Om het model te vereenvoudigen wordt de neerslag, die in de Wetterskip methode wel aanwezig is, niet meegenomen in de berekeningen. Wanneer de neerslag wel als parameter wordt toegevoegd moet ook de bemaling worden meegenomen, wat de hele berekening veel ingewikkelder maakt.

2 Windopzet rekenmethode

Om bij het Slotermeer een goede berekening van de windopzet te kunnen maken zal de hieronder beschreven methode worden gebruikt. Hierbij zullen bepaalde aannamen worden gehanteerd, welke bij de resultaten behandeld worden.

2.1 Algemene formule

Wanneer wind over een wateroppervlakte strijkt, wordt een schuifkracht uitgeoefend op de onderliggende watermassa. Het gevolg is een verplaatsing van het water met de wind mee. Hierdoor ontstaat een waterspiegelverhang zoals is weergegeven in figuur 2.1. Indien de tijdsduur van de wind voldoende lang is, kan zich een evenwichttoestand instellen. In het bovenste deel van de watermassa stroomt het water met de wind mee, in het onderste gedeelte vindt terugstroming plaats.



$$\text{Schuifkracht: } k_1 = c_1 \cdot \rho_{\text{lucht}} \cdot U_{\text{wind}}^2 \cdot \Delta s$$

$$\text{Verhangkracht: } k_2 = \rho_{\text{water}} \cdot g \cdot d \cdot i \cdot \Delta s$$

Figuur 2.1: Verhang als gevolg van opwaaiing

Bij verwaarlozing van de bodemwrijving kunnen k_1 en k_2 aan elkaar gelijk gesteld worden. Hieruit volgt:

$$i = \frac{c_1 \cdot \rho_{\text{lucht}} \cdot U_{\text{wind}}^2}{\rho_{\text{water}} \cdot g \cdot d} \quad (2.1)$$

$$W = \int_0^F c \frac{U_{\text{wind}}^2}{g \cdot d} dF \quad (2.2)$$

Waarin:

C_1 = wrijvingscoëfficiënt [-]

ρ_{lucht} = dichtheid van lucht (1,20 [kg/m³])

ρ_{water} = dichtheid van water (1000 [kg/m³])

d = waterdiepte

i = verhang [-]

$c = \frac{c_1 \cdot \rho_{\text{lucht}}}{\rho_{\text{water}}} = \text{empirisch bepaalde coëfficiënt } (=3,5 \text{ à } 4,0 \cdot 10^{-6} \text{ [-] bij } U > 20 \text{ m/s})$

U = windsnelheid op +10m boven het maaiveld [m/s]

W = windopzet [m]

F = strijklengte [m]

Deze formules kunnen worden vertaald naar een numeriek schema:

$$\sum_{n=1}^z i(n) = c \frac{U_{wind}^2}{g \cdot d(n)} \quad (2.3)$$

$$\sum_{n=1}^z W(n+1) = W(n) + i(n) \cdot dx \quad (2.4)$$

Waarin:

$z = F/dx$ (is het aantal stappen) [-]

Op deze manier wordt de diepte per stapgrootte bepaald en heeft de diepte ook invloed op het lokale verhang en uiteindelijk op de totale windopzet.

2.2 Invloed diepte en breedte

Een probleem dat hierdoor ontstaat, is dat een verandering in diepte optreedt wanneer de berekende windopzet bij de originele waterstand wordt opgeteld. Dit betekent dat aan de kant van opwaaiing de waterstand aanzienlijk hoger is (en dus ook de waterdiepte) terwijl aan de kant van afwaaiing het water een stuk lager staat dan in eerste instantie mee gerekend wordt. Dit betekent dat bij het berekenen van het lokale verhang, de lokale windopzet opgeteld (of afgetrokken) moet worden bij de lokale diepte.

Ook de breedte heeft invloed op de windopzet. Het is gemakkelijk voor te stellen dat wanneer in de richting van de wind een versmalling optreedt, een hogere windopzet te verwachten valt. Bij een verbreding geldt uiteraard het omgekeerde.

Aan het numerieke schema zijn daarom extra termen toegevoegd om de lokale breedte en (veranderende) diepte in de berekening mee te kunnen nemen:

$$\sum_{n=1}^z i(n+1) = c \frac{U_{wind}^2}{g \cdot (d(n+1) + w(n))} \quad (2.5)$$

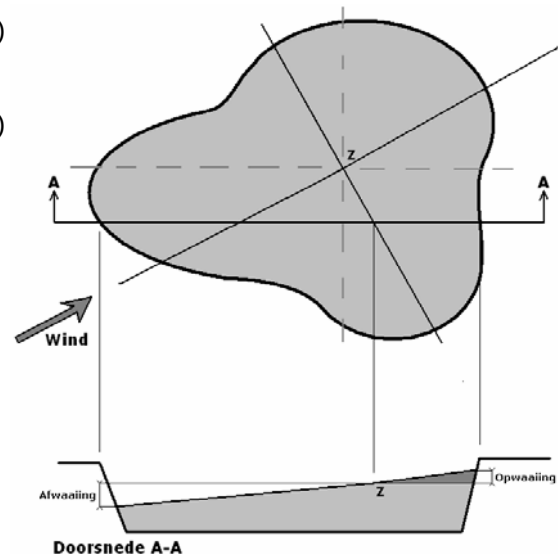
$$\sum_{n=1}^z W(n+1) = W(n) + (i(n) \cdot dx \cdot \frac{B(n-1)}{B(n)}) \quad (2.6)$$

Waarin:

B = breedte van het meer [m]

2.3 Gesloten boezem

Indien er sprake is van een gesloten boezem blijft het totale watervolume gelijk. De waterspiegel zal bij benadering gaan kantelen rondom de zwaartelijns van het boezemoppervlak, loodrecht op de windrichting. Aan de tegenovergestelde zijde van de windopzet zal dan sprake zijn van afwaaiing, zie figuur 2.2.



Figuur 2.2: opwaaiing gesloten bekken

2.4 Benadering verhang en windopzet

Om de windopzet van een gesloten boezem te berekenen, waarbij de invloed van de lokale windopzet meegerekend wordt met de lokale diepte, is een referentiepunt nodig. Dit referentiepunt is het zwaartepunt van de boezem. Bekend is dat de waterstandverandering in het zwaartepunt nul is (de watermassa kantelt immers om het zwaartepunt, zie paragraaf 2.3). Voor de berekening wordt dan ook gestart in het zwaartepunt en twee kanten op gerekend:

1. Met de wind mee: het verhang is positief en vanuit het zwaartepunt kan de windopzet worden opgeteld bij de lokale diepte.
2. Tegen de wind in: het verhang is negatief en de lokale afwaaiing wordt afgetrokken van de lokale diepte.

Numeriek ziet dat er bij benadering als volgt uit (zie ook figuur 2.3):

Vanuit het zwaartepunt met de wind mee (opwaaiing):

$$W(m) = 0$$

$$i(m) = c \frac{U_{wind}^2}{g \cdot d(m)}$$

$$\sum_{n=M}^z i(n+1) = c \frac{U_{wind}^2}{g \cdot (d(n+1) + w(n))}$$

$$\sum_{n=M}^z W(n+1) = W(n) + (i(n) \cdot dx \cdot \frac{B(n-1)}{B(n)})$$

Daarna vanuit het zwaartepunt tegen de wind in (afwaaiing):

$$W(m) = 0$$

$$i(m) = -c \frac{U_{wind}^2}{g \cdot d(m)}$$

$$\sum_{n=M}^1 i(n-1) = -c \frac{U_{wind}^2}{g \cdot (d(n-1) + w(n))}$$

$$\sum_{n=M}^1 W(n-1) = W(n) + (i(n) \cdot dx \cdot \frac{B(n+1)}{B(n)})$$

Waarin:

z = totaal aantal stappen

m = X coördinaat van het zwaartepunt

$I(m)$ = het verhang in het zwaartepunt

"Matlab"
Berekening windopzet gesloten boezem

```
%c = weerstandscoefficiënt
%Uwind = windsnelheid
%g = 9,81 m/s^2
%M = X-coördinaat zwaartepunt
%d(n) = diepte per 10 meter
%B(n) = lokale breedte
%i(n) = lokaal verhang
%W(n) = lokale windopzet

i(M) = (c*Uwind^2) / (g*d(M));
for n = M:z;
    i(n+1) = (c*Uwind^2) / (g*(d(n+1)+W(n)));
    W(n+1) = W(n) + (i(n)*dx*(B(n-1)/B(n)));
end

%fliplr = commando dat de rijvectoren
van de variabelen spiegelt (Matlab kan
niet achteruit rekenen)

d = fliplr(d);
B = fliplr(B);
i = fliplr(i);
W = fliplr(W);

i(M) = -((c*Uwind^2) / (g*d(M)));
for n = M:z;
    i(n+1) = -((c*Uwind^2) / (g*(d(n+1)+W(n))));
    W(n+1) = W(n) + (i(n)*dx*(B(n-1)/B(n)));
end

%Rijvectoren kunnen weer terug
gespiegeld worden om het resultaat te
kunnen plotten

d = fliplr(d);
B = fliplr(B);
i = fliplr(i);
w = fliplr(w);
```

Figuur 2.3: Matlab script voor de berekening van de windopzet

2.5 Beperkingen

De uiteindelijke rekenmethode van de windopzet, beschreven in de vorige paragraaf, is gebaseerd op een aantal aannamen. De invloed van deze aannamen zal in hoofdstuk 5 worden onderzocht. Te denken valt aan het volgende:

2.5.1 Aanname gesloten boezem

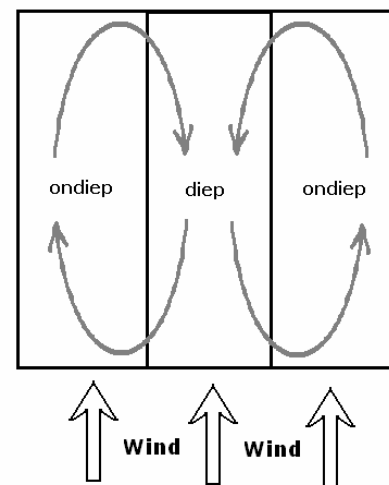
Aangenomen wordt dat de boezem gesloten is. In werkelijkheid komen er altijd kleine of grotere kanalen op uit. Onderzocht moet worden in hoeverre deze invloed uitoefenen op de waterstanden. Wanneer zich bijvoorbeeld een waterstandverlaging voordoet van meer dan een halve meter op de plek waar een kanaal in verbinding staat met de boezem, dan zal wel degelijk water gaan stromen in de richting van de boezem. Zo zal de waterstandverlaging lokaal, maar wellicht ook voor een veel groter oppervlak, beïnvloed worden. De kanalen hebben waarschijnlijk een nivellerende werking op de waterstanden.

2.5.2 Verwaarlozing bodemwrijving

In paragraaf 2.1 wordt in de formules 2.1 en 2.2 de bodemwrijving verwaarloosd om de verhangkracht en de schuifkracht aan elkaar gelijk te kunnen stellen. Wanneer deze niet te verwaarlozen is, zou dat betekenen dat het water minder snel terugstroomt dan het met de wind mee stroomt. Een mogelijk gevolg is dan een hogere windopzet. De vraag is of de wrijving te verwaarlozen valt.

2.5.3 Stromingen als gevolg van verschillen in het verhang

Als wind over een wateroppervlak met verschillende dieptes waait, zal als gevolg van die diepte water gaan stromen. Stel men heeft een boezem met aan de zijkanten ondiepe gedeelten en in het midden een dieper stuk. Het verhang aan de zijkanten zal groter zijn dan in het midden (zie formule 2.1). Er zal dan water gaan stromen zoals weergegeven in figuur 2.4. Dit zal zich waarschijnlijk ook in meer of mindere mate voordoen in het Slotermeer. Bij een bepaalde windrichting zal namelijk, parallel aan die windrichting, het verhang worden bepaald (bij verschillende doorsneden). Onderling zullen die verhanglijnen verschillen en zal zich een evenwicht instellen, welke gepaard zal gaan met bepaalde horizontale stromingen. Onderzocht moet worden welke invloeden dit heeft op de waterstanden.



Figuur 2.4: Stromingen bij wind als gevolg van diepteverschillen.

2.5.4 Neerslag en bemaling

De neerslag en bemaling zullen niet worden meegenomen in de berekening. Beide hebben invloed op de diepte en dus ook op de windopzet. Bekeken zal moeten worden wat deze invloed op de windopzet is.

2.5.5 Wrijvingscoëfficiënt

De wrijvingscoëfficiënt is aangenomen op $3,5 \text{ à } 4,0 \cdot 10^{-6}$. Wanneer er golven aan het oppervlak van het water zijn hebben die invloed op de ruwheid van het wateroppervlak en waarschijnlijk ook op de wrijvingscoëfficiënt. Variatie van de coëfficiënt zal een verandering in waterstanden veroorzaken.

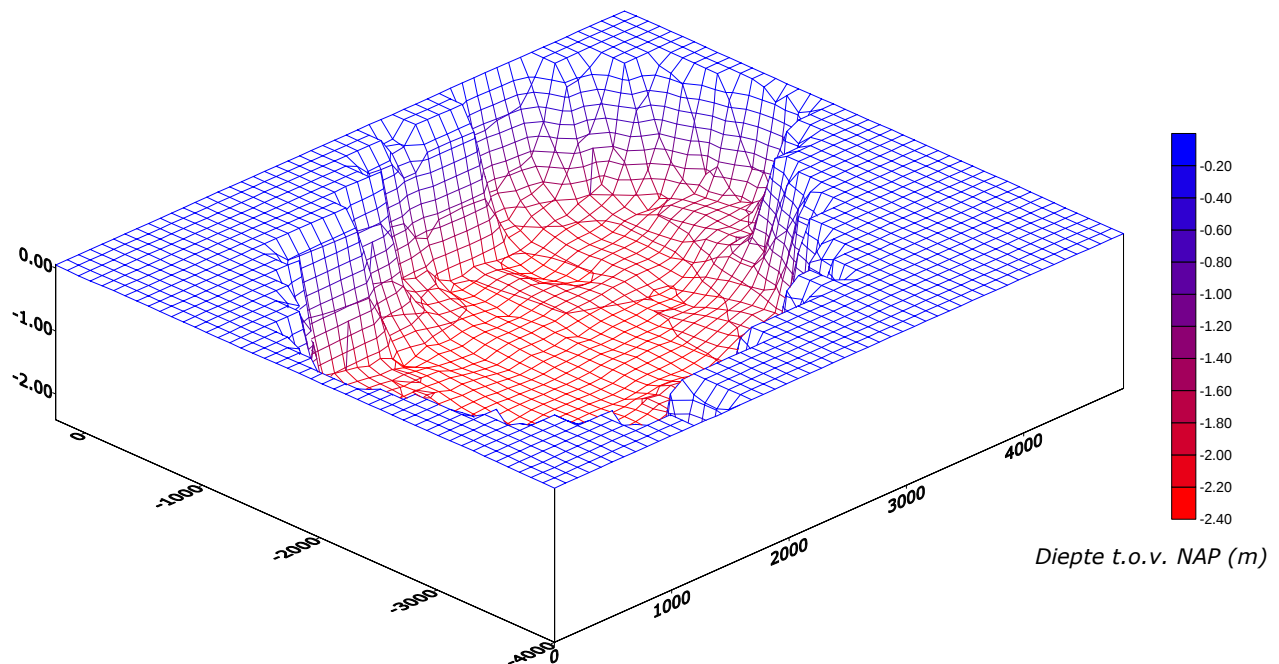
3 Windopzet Slotermeer

3.1 Parameters

Voor de berekening van de windopzet specifiek op het Slotermeer is een aantal parameters nodig: de windsnelheid en de geometrie van het meer (breedtes, strijklengtes en dieptes).

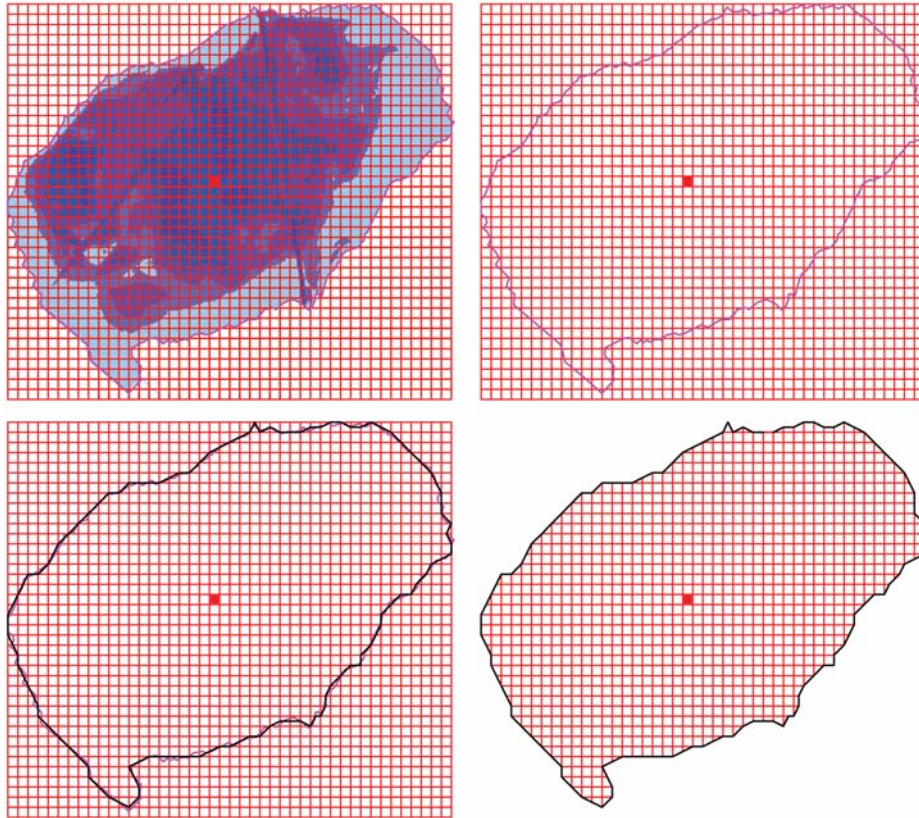
3.2 Geometrie Slotermeer

Het totale oppervlak van het Slotermeer is ongeveer $11,6 \text{ km}^2$. Met een gemiddelde diepte van NAP $-2,08\text{m}$ en een gemiddelde hoogte van het maaiveld van NAP $-0,5\text{m}$ kan de bergingscapaciteit worden geschat op $17,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.



Figuur 3.1: Diepteprofiel Slotermeer

Het Wetterskip Fryslân streeft een boezempeil na van NAP $-0,52\text{m}$. Deze waterstand is de uitgangswaarde van waaruit de windopzet wordt berekend. In hoofdstuk twee is de theorie behandeld over hoe de windopzet benaderd gaat worden door middel van het kantelen van de waterspiegel om een zwaartepunt. Het zwaartepunt van het Slotermeer is bepaald met behulp van een raster dat over het meer is gelegd (zie figuur 3.2).



Figuur 3.2: Raster Slotermeer voor de bepaling van het zwaartepunt

Voor ieder vakje uit dit raster is een diepte toegekend. Vervolgens is voor de x-richting het zwaartepunt vastgesteld met behulp van de volgende formules:

$$q_x = \sum_{n=1}^n \frac{(A \cdot d \cdot z_x)_n}{(A \cdot d)_n}, \text{ en voor de y richting: } q_y = \sum_{n=1}^n \frac{(A \cdot d \cdot z_y)_n}{(A \cdot d)_n}$$

Waarin:

q_x = afstand van het zwaartepunt over de x-as.

A = oppervlakte gebied met index n .

d = diepte gebied met index n .

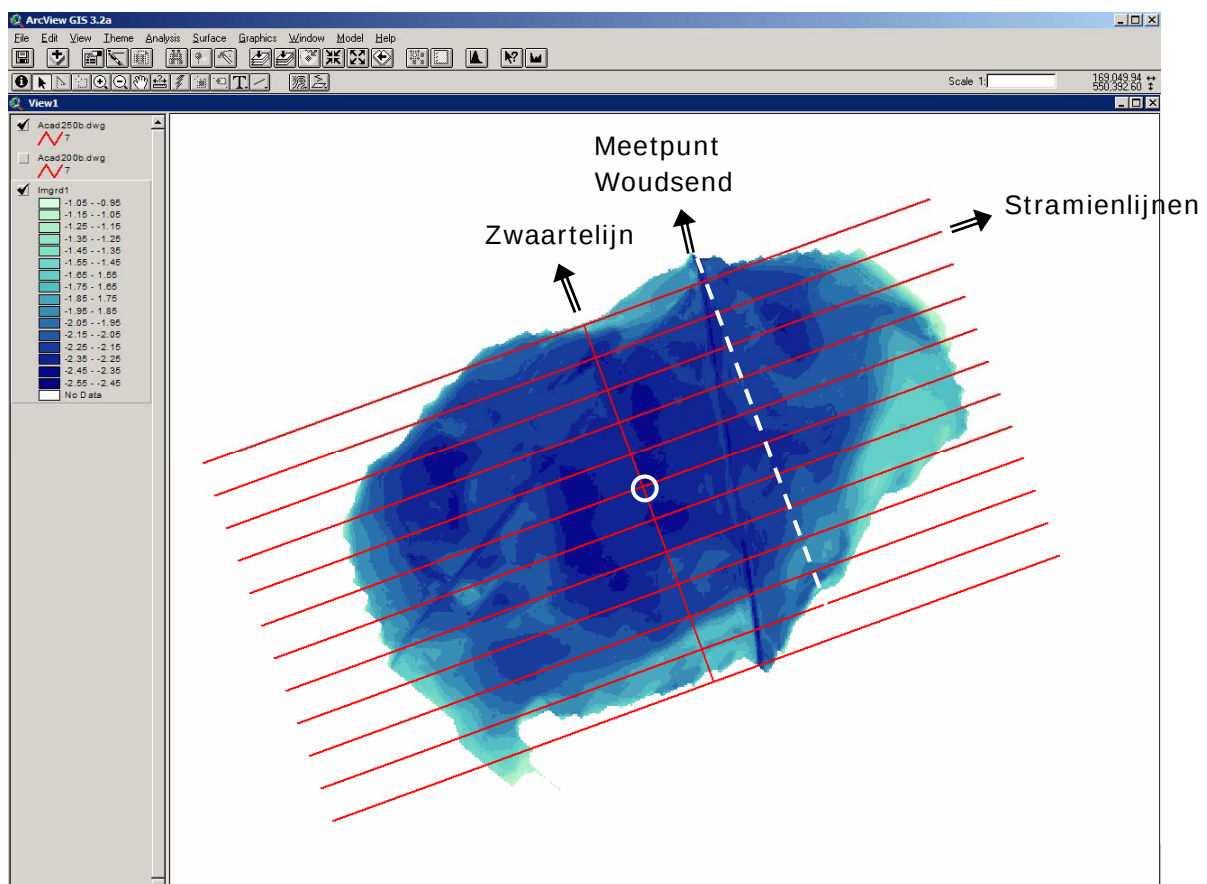
z_x = x-coördinaat zwaartepunt gebied met index n .

n = aantal gebieden

Het ingekleurde vakje in figuur 3.2 geeft het zwaartepunt weer. Deze ligt iets links van het midden vanwege een flinke ondiepte aan de rechterkant van het boezemmeer.

Om de windopzet op verschillende plekken langs het meer te kunnen berekenen zijn er stramienlijnen, met een onderlinge afstand van 250 meter, over het meer gelegd (zie figuur 3.3). Wanneer deze afstand van 250 meter verkleind wordt, tot bijvoorbeeld 100 meter, is het verschil in windopzet van de naast elkaar liggende stramienlijnen nihil. Het uiteindelijke beeld van de waterstanden langs de rand van het meer varieert niet tussen de verschillende onderlinge afstanden. Het extra rekenwerk wat de kleinere afstand met zich meebrengt loont daarom niet.

Bij elk van deze stramienlijnen hoort een dieptedataset. Deze dataset bevat voor iedere tien meter op de stramienlijn de diepte. Per tien meter kan dan een verhang en een windopzet berekend worden, deze windopzet wordt bij de diepte opgeteld. De nieuwe diepte wordt gebruikt om de windopzet over de volgende tien meter te berekenen. Hoe dit precies in zijn werk gaat staat beschreven in paragraaf 2.5.



Figuur 3.3: Stramienen over Slotermeer

Wanneer voor een bepaalde stramienlijn voor iedere tien meter de windopzet bekend is wordt over het geheel een 'polyfit' lijn berekend. In de praktijk zal zich namelijk een vloeiend verloop van het verhang voordoen in plaats van een hoekige. Het uiteindelijke wateroppervlak bestaat dus uit een doorlopende lijn. Voor de polyfit benadering is een keuze gemaakt voor een lijn van de 3^{de} orde (zie ook het Matlab script in appendix C).

3.3 Verbindingen Slotermeer

Indien alle kleine sloten die uitkomen op het Slotermeer worden verwaarloosd is er nog een drietal kanalen dat in verbinding staat met het Slotermeer. Hieronder zullen deze kort beschreven worden. Tevens zullen de verschillende aannamen over breedte, diepte en dergelijke toegelicht worden.

3.3.1 De Ee

De 'Ee' is het kanaal dat het Slotermeer met Woudsend verbindt (zie figuur 3.4). Van Woudsend zijn de waterstanden bekend. Deze worden gemeten onder de brug, aangegeven met een rode cirkel in de figuur. Ook staat het Slotermeer via de Ee in verbinding met het Heegermeer. Het Heegermeer sluit direct aan op de Fluessen en is daarmee het grootste meer van de provincie Friesland met strijklengtes van meer dan 10km. Aan de oostkant zullen dan ook hoge waterstanden worden verwacht. Aangenomen wordt dat de bebouwing van Woudsend een mogelijk windprofiel, komende uit het noorden, blokkeert. Wanneer berekeningen gedaan worden voor een windopzet met wind komend vanuit het noorden, wordt voor de strijklengte de noordelijke rand van het meer genomen.



Figuur 3.4: Woudsend en de Ee

3.3.2 De Slotervaart

De Slotervaart is het kanaal dat via Sloten in verbinding staat met het meetpunt Tacoziyl (zie figuur 3.5). Tacoziyl zelf staat niet in de figuur en ligt ongeveer 5,5 km ten zuiden van het Slotermeer. De Slotervaart staat in verbinding met de Ee via een geul door het Slotermeer. Dit is ten behoeve van de scheepvaart. Ook voor de bebouwing van Sloten wordt aangenomen dat deze een windprofiel vanuit het zuiden blokkeert. Voor de berekening van de windopzet op het Slotermeer wordt voor de Strijklengte de zuidelijke rand genomen en wordt er vanuit gegaan dat de Slotervaart niet meewerkt in het verhang.



Figuur 3.5: Sloten en de Slotervaart

3.3.3 De Luts

De Luts (zie figuur 3.6) is een klein kanaal. Het staat nog wel via een geul door het Slotermeer in verbinding met de Ee, maar die dient slechts voor het bereiken van de haven van Balk. Voorbij Balk verandert de Luts in niets meer dan een simpele en erg smalle sloot. De Luts komt niet uit op een andere grote boezem in de omgeving en veel afvoer van en naar het Slotermeer wordt dan ook niet verwacht. Ze zal toch worden meegenomen in de latere berekeningen omdat de Luts wel, zoals gezegd, in verbinding staat met de stroomgeul in het Slotermeer. Deze geul en dus ook de Luts kunnen dus mogelijk wel van invloed zijn op de windopzet. Verder wordt verwacht dat Balk, net als Sloten en Woudsend, het windprofiel (in dit geval vanuit het zuidwesten) blokkeert. De strijklengte zal dan ook vanaf de rand van het Slotermeer genomen worden.



Figuur 3.6: Balk en de Luts

De aannamen, die voor de drie verschillende kanalen zijn gedaan, staan in tabel 3.2

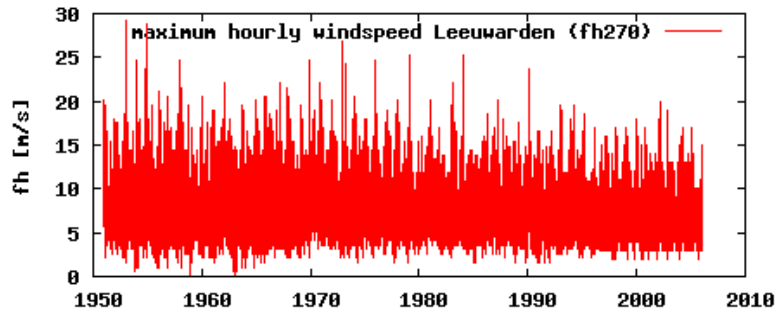
Tabel 3.1: Aannamen kanalen die in verbinding staan met het Slotermeer

	<i>Ee</i>	<i>Slotervaart</i>	<i>Luts</i>
Ligging bodem	NAP -2,0 m	NAP -2,0 m	NAP -2,0 m
Breedte	30 m	30 m	10 m
Talud	1:1	1:1	1:1
Ruwheid (k)	0,035	0,035	0,035
Chezy coëfficiënt	50	50	48

3.4 Windanalyse

3.4.1 Inleiding

In 1983 hebben Wieringa en Rijkoort¹ een uitgebreide studie verricht naar het Nederlandse windklimaat. Dit hebben zij gedaan op basis van winddata uit de jaren 70. Verschillende volgstudies hebben hierna plaatsgevonden, met één van de belangrijkste van A. Smits² in 2000. Hij heeft de parameters van het model van Wieringa en Rijkoort verbeterd en een duidelijk overgangsgebied beschreven tussen wind op zee en op land. Om het mogelijk te maken dat meerdere studies naar het windklimaat kunnen worden verricht heeft het KNMI in samenwerking met het Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA) en het Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ) de gegevens online beschikbaar gesteld. Dit in het kader van het HYDRaproject. Onderstaand figuur 3.7 geeft in grafiekvorm de maximale windsnelheden per uur in Leeuwarden weer. Links in de figuur is de piek van de storm in 1953 nog te herkennen.



Figuur 3.7: Maxima windsnelheden Leeuwarden

3.4.2 Methode

De uurgemiddelden vanaf 1961 tot 2005 zijn op drie manieren geanalyseerd. Allereerst is er een kansberekening over de volledige dataset. Hierbij is vergelijking gemaakt tussen een Gumbel, een Exponentiële en een Weibull verdeling. De tweede methode is een kansverdeling van de jaarlijkse maxima en de laatste is een Peak over Threshold benadering. Voor alle drie de methoden geldt eenzelfde benadering betreffende de duur, richting en de overschrijdingskans van de stormen.

3.4.3 Overschrijdingskans

De overschrijdingsnorm van hoogwater is vastgesteld in de Wet op de Waterkering, de Vierde Nota Waterhuishouding van het Rijk. Hiermee rekening houdend bestaat een tweede Waterhuishouding Plan voor de Provincie Fryslân: de WHP2. In de WHP2 is de overschrijdingskans voor boezemkades vastgesteld op eens in de honderd jaar. In deze wet wordt aangenomen dat voor het ontwerp van de windopzet ook de maatgevende windsnelheid moet worden vastgesteld voor een kans van voorkomen van 1/100 jaar.

¹ Wieringa en Rijkoort, Windklimaat van Nederland, Staatsuitgeverij, Den Haag, the Netherlands, 1983

² Smits, A., Analysis of the Rijkoort-Weibull model. KNMI Technical Report TR-232, Royal Netherlands Meteorological institute, 2001

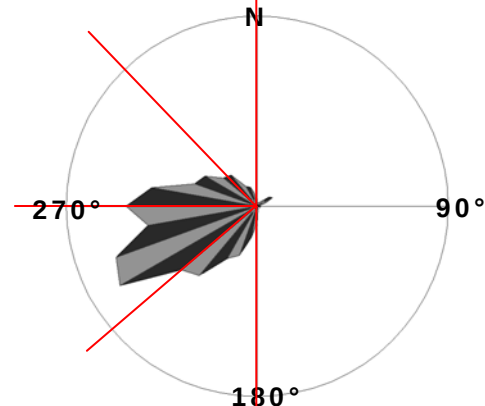
3.4.4 Vier uur gemiddelden

In het Voorschrift Toetsen op Veiligheid (VTV) wordt beschreven dat in het IJsselmeergebied een scheefstand zich als gevolg van wind zich in een tijdsduur van vier uur volledig instelt. Om deze reden wordt gewerkt met vier uur gemiddelden van de winddata.

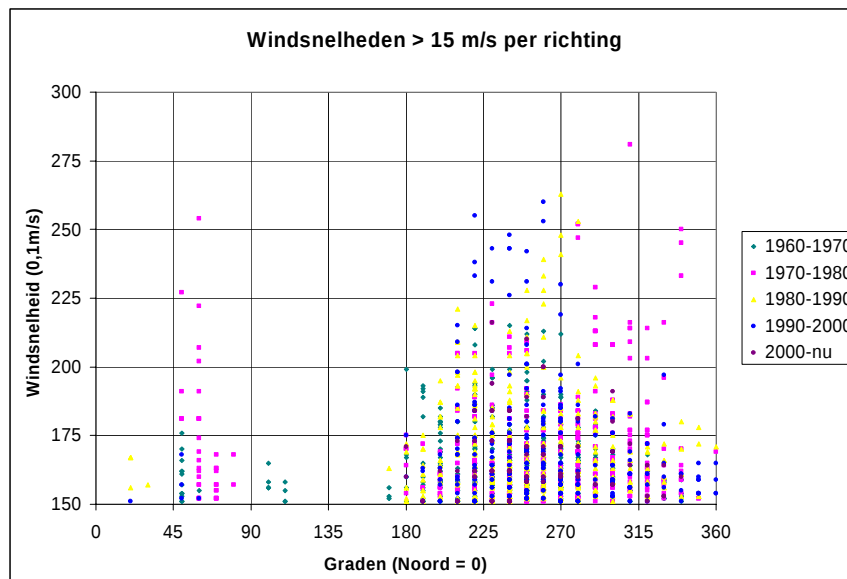
Om een gemiddelde windsnelheid over vier uur uit de wind dataset te krijgen is voor elke vier opeenvolgende uren een gemiddelde genomen. Deze waarden kunnen worden gebruikt om een ontwerpwindnelheid te berekenen

3.4.5 Windrichtingen

Onderstaand figuur 3.9 geeft alle gemeten windsnelheden aan in Leeuwarden van boven de 15 m/s vanaf 1961. Op de x-as is de richting aangegeven waaruit deze wind afkomstig is. Duidelijk is te zien dat de meeste stormen uit het zuidwesten, westen en noordwesten komen. In figuur 3.8 is dit nog eens visueel ondersteund. Gekozen is om in eerste instantie alle winden uit de richting 180° tot 360° in beschouwing te nemen. Dit is in verband met de ligging van het Slotermeer ook het meest interessant. De halve windroos is daarvoor in 4 stukken verdeeld: 180° t/m 220°, 230° t/m 270°, 280° t/m 320° en 330° t/m 360° (in de dataset zijn windsnelheden gegeven met bijbehorende richting in tientallen graden). Het is duidelijk in figuur 3.8 te zien dat de meeste stormen zich in het tweede gebied bevinden (230° t/m 270°). De hevigste storm bevindt zich in het derde gebied (280° t/m 320°), dit zal specifiek op iedere statistische methode zijn invloed hebben.



Figuur 3.8: Windroos Leeuwarden $U > 15 \text{ m/s}$



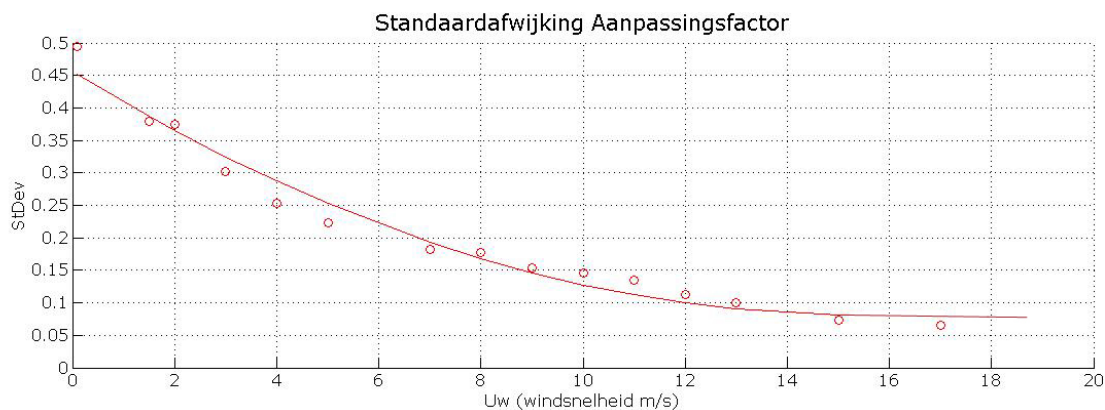
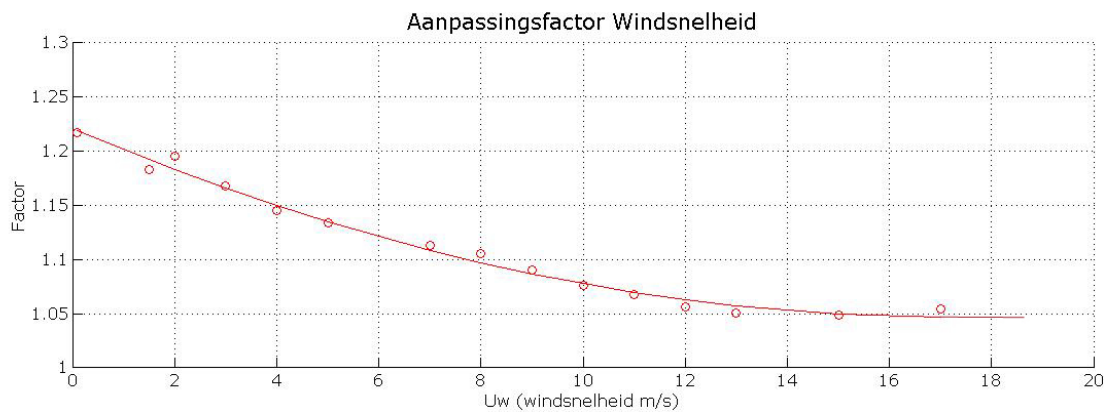
Figuur 3.9: Windsnelheden boven de 15 m/s per windrichting

3.4.6 Windsnelheid boven land en water

De meetpaal in het Slotermeer meet sinds een aantal jaar onder andere de golfhoogte en de windsnelheid. De winddata verkregen via deze paal zijn beschikbaar voor de periode 2001 t/m 2005. De data kan voor deze periode worden vergeleken met de winddata van Leeuwarden om te kijken of er een verschil is tussen deze twee meetpunten.

Voor elke dag vanaf 1 januari 2001 is gekeken naar het verschil in windsnelheid tussen de twee meetstations. Over dit verschil is vervolgens iedere keer een factor berekend. Uit deze berekening bleek al snel dat de gemeten windsnelheid op het Slotermeer hoger ligt dan in Leeuwarden. Indien naar alle data tussen 2001 en 2005 gekeken wordt ligt de windsnelheid op het Slotermeer iets meer dan 20 procent (factor 1,2) hoger dan in Leeuwarden, maar hierbij is de standaardafwijking op de factor 0,45.

Om de kleine lokale winden te verwaarlozen is de data ook bekeken met alleen de winden groter dan 1½, 2, 3 en 4 m/s (zie figuur 3.10). Hieruit kwam naar voren dat indien alleen naar hogere windsnelheden wordt gekeken, zowel de aanpassingsfactor als de standaardafwijking kleiner wordt. Door een trendlijn door deze punten te trekken kan er voor de hogere windsnelheden, waar in deze periode weinig tot geen data beschikbaar is, een aanpassingsfactor bepaald worden. Vanaf een windsnelheid van 15 m/s en hoger is de aanpassingsfactor ongeveer 1,05 (5 procent hoger op het Slotermeer dan in Leeuwarden), met een acceptabele standaardafwijking van 0,06. Dit wil zeggen dat de gebruikte winddata uit Leeuwarden met een factor 1,05 vermenigvuldigd dient te worden.



Figuur 3.10: Aanpassingsfactor

3.4.7 Maatgevende windsnelheid Slotermeer

In appendix A wordt beschreven hoe de verschillende kansverdelingen zijn berekend met de winddata van station Leeuwarden van het KNMI. Aan het eind van deze appendix worden de resultaten vergeleken en wordt geconcludeerd dat er gerekend gaat worden met een maatgevende windsnelheid, verkregen met een Exponentiële verdeling. In Tabel 3.1 staan de waarden nog een keer op een rijtje. In de eerste rij met windsnelheden zijn de waarden van de Exponentiële verdeling te zien samen met de data gemeten bij Leeuwarden in de periode 1961 t/m 2005. Deze winddata zijn vervolgens verhoogd met 5%. Over deze nieuwe dataset is wederom dezelfde Exponentiële verdeling toegepast. In de onderste rij van tabel 3.2 zijn de resultaten zichtbaar.

Tabel 3.2: Maatgevende windsnelheden Leeuwarden en Slotermeer (Exponentiële verdeling)

Richting in graden	180 t/m 220	230 t/m 270	280 t/m 320	330 t/m 360
Windsnelheden Leeuwarden (m/s)	26,0	31,3	30,5	27,0
Windsnelheden Slotermeer (m/s)	26,1	31,5	30,7	27,1

Het scheelt per richting ongeveer 0,2m/s (dat is minder dan 0,7% op alle eindresultaten). Voor de berekening van de windopzet op het Slotermeer zullen de waarden met de omrekeningsfactor gebruikt gaan worden met als hoogste waarde 31,5 m/s in de richting van 230° t/m 270° (onderste rij in tabel 3.2).

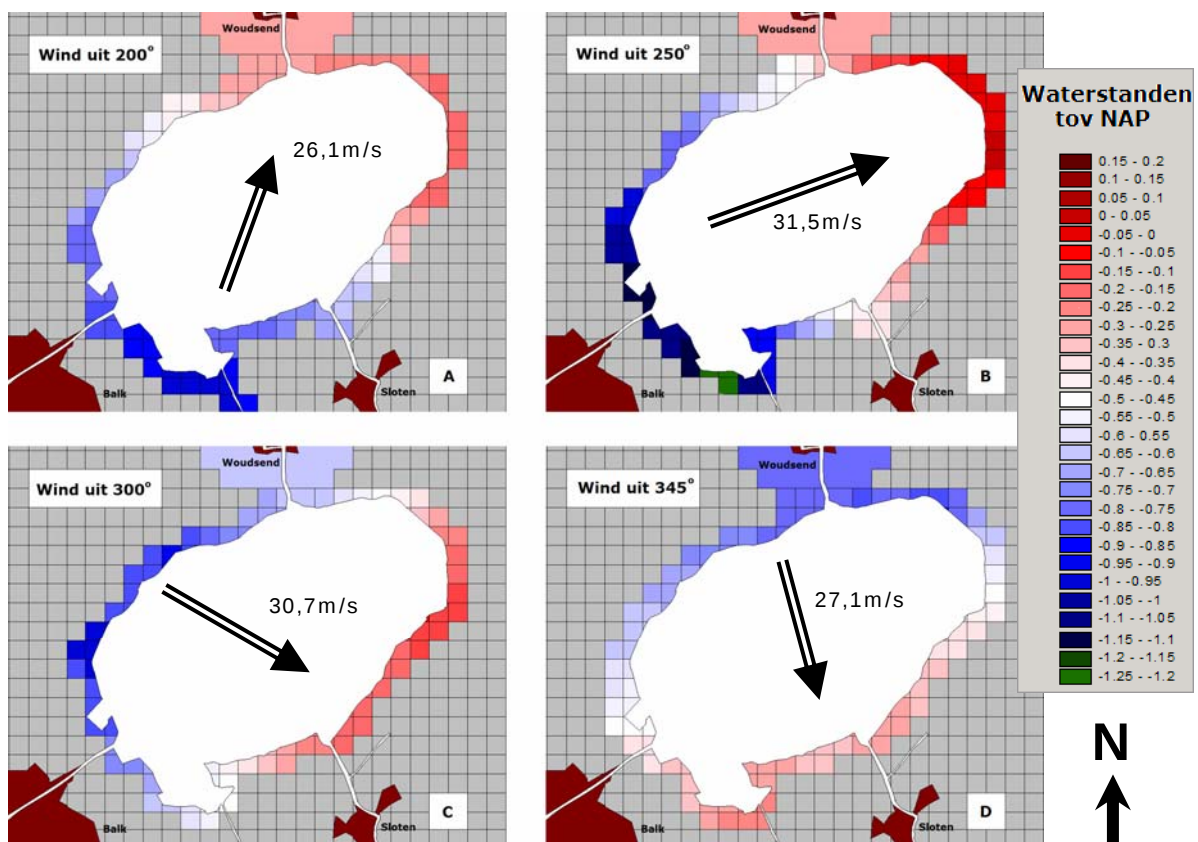
4 Resultaten windopzet Slotermeer

4.1 Hoofdwindrichtingen

In Appendix B zijn, in grafiekvorm, de resultaten te zien van de berekende windopzet van het Slotermeer. Om de resultaten overzichtelijk te maken is onderstaand figuur 4.1 gemaakt. In deze figuur zijn voor de vier hoofdwindrichtingen de verschillende waterstanden aan de randen van het Slotermeer weergegeven.

Bij het bekijken van figuur 4.1 moet het volgende meegenomen worden:

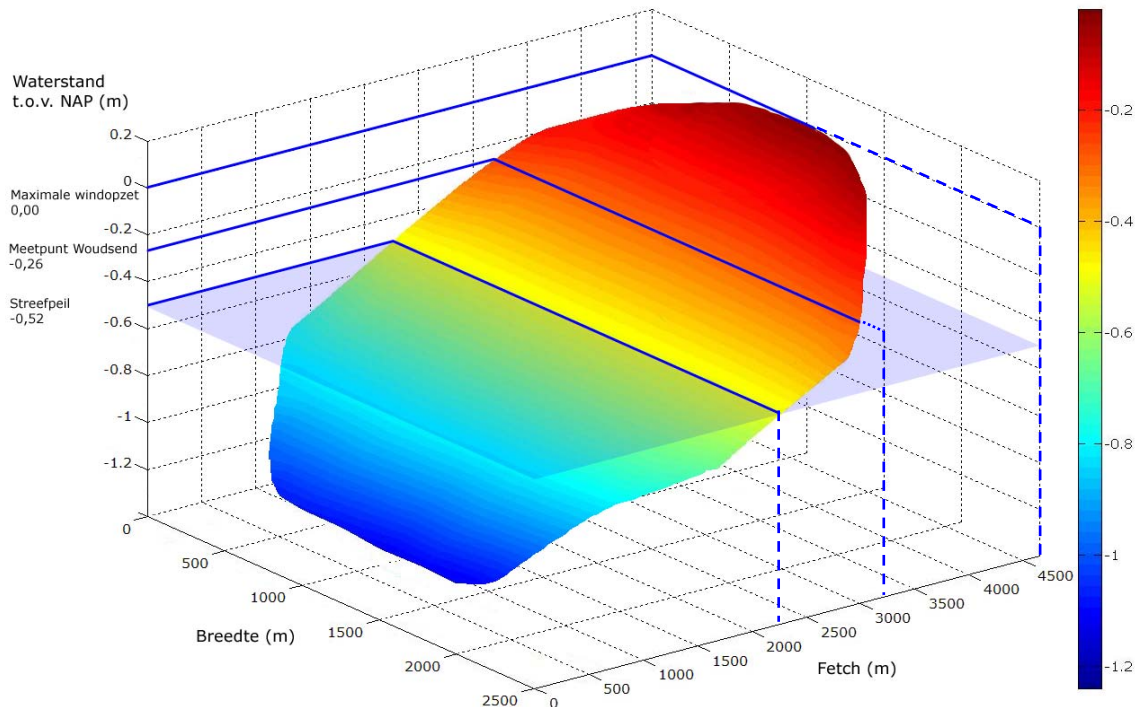
- De pijl geeft steeds de windrichting aan met bijbehorende maatgevende windsnelheid van eens in de 100 jaar.
- Alle waterstanden zijn berekend vanuit een waterstand van NAP -0,52m. Dit betekent dat het zwaartepunt van het Slotermeer, ongeveer in het midden van het meer waar de watermassa omheen kantelt, zich nog steeds op het niveau NAP -0,52m bevindt.
- De omgeving van Woudsend heeft in alle figuren steeds dezelfde waterstand gekregen als de waterstand bij de ingang van de Ee (het kanaal dat Woudsend met het Slotermeer verbindt). Dit is dus de waterstand die in de praktijk door het meetpunt in Woudsend gemeten zal worden bij gegeven windsnelheid en -richting.



Figuur 4.1: Waterstanden ten gevolge van windopzet bij de vier hoofdwindrichtingen
(Bij alle vier afbeeldingen ligt het zwaartepunt van de watermassa op het streefpeil van NAP -0,52m.)

Verder is te zien dat de hoogste waterstanden zich aan de noordoostelijke zijde voordoen bij wind uit de richting 250° (figuur 4.1 B). Dit is niet verwonderlijk omdat deze richting niet alleen de hoogste windsnelheid heeft, maar ook de langste strijklengte. Verder wordt het Slotermeer richting het noordoosten steeds ondieper en smaller wat resulteert in het opstuwen van het water.

In figuur 4.2 is de op- en afwaaiing van het Slotermeer driedimensionaal weergegeven bij een windsnelheid van $31,5\text{ m/s}$ uit de richting 250 .



Figuur 4.2: 3D weergave op- en afwaaiing Slotermeer

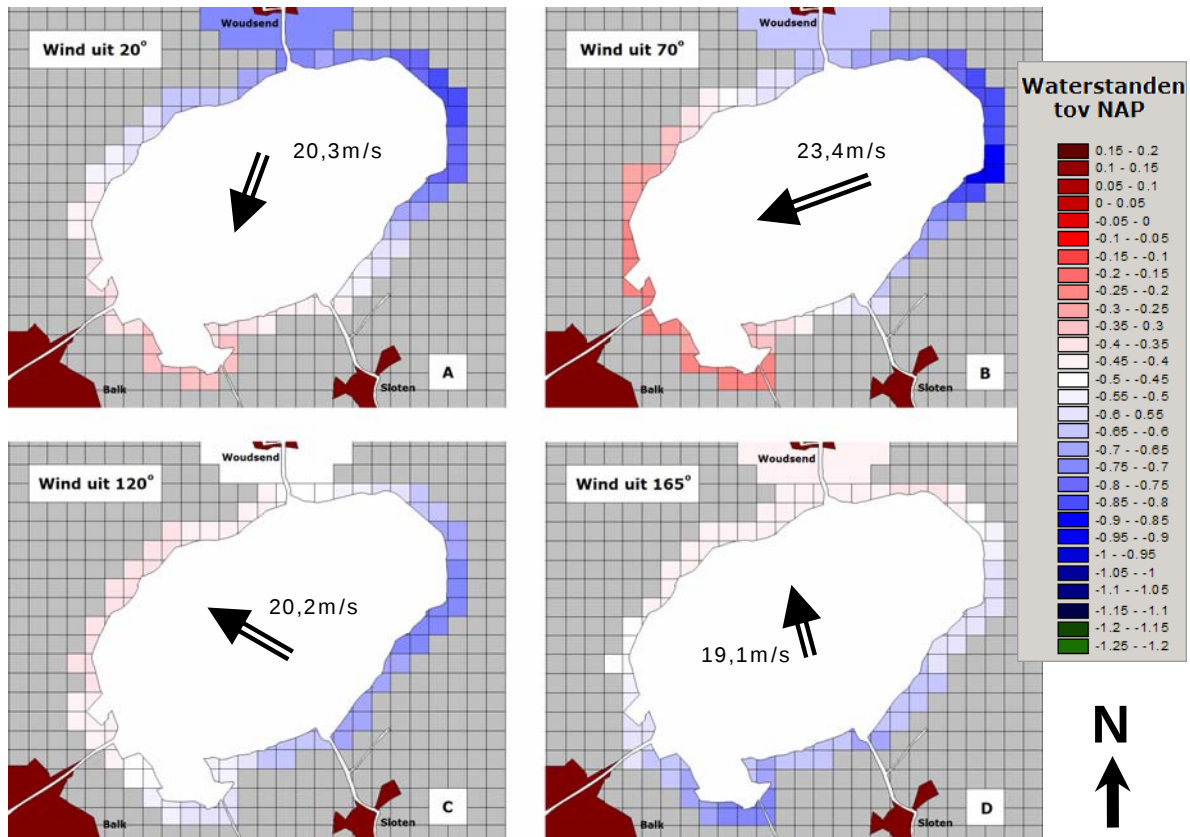
Het lichtblauwe horizontale vlak is het peil van de ongestoorde waterstand van het Slotermeer wanneer er geen windopzet of andere verstoringen aanwezig zijn. Dit streefpeil ligt op NAP $-0,52\text{ m}$.

Op enige afstand van de snijlijn, tussen het horizontale blauwe vlak en het windopzet vlak, ligt het punt Woudsend. In de figuur is te zien dat, in deze extreme situatie, bij Woudsend een waterstand van NAP $-0,26\text{ m}$ wordt gemeten. Deze waterstand is één van de waarden waarmee in het lineaire model wordt geïnterpoleerd. Wat tijdens de lineaire interpolatie vergeten wordt, is de extra windopzet die in figuur 4.2 is weergegeven. De grote van deze extra windopzet is $0,26\text{ m}$.

4.2 Overige windrichtingen

Voor de overige windrichtingen (0° - 180°) is tevens de windopzet berekend volgens het opwaaiing model zoals beschreven in hoofdstuk 3. Deze windopzet valt een stuk lager uit dan die uit de hoofdwindrichtingen (richting 180° - 360°) zijn berekend.

Enkele oorzaken van deze lagere windopzet zijn: de maatgevende windsnelheden uit de richting 0° - 180° liggen een stuk lager, het Slotermeer is aan westelijke zijde dieper dan aan oostelijke zijde en het meer wordt van oost naar west iets breder. De waterstanden aan de randen van het meer bij de overige windrichtingen zijn weergegeven in figuur 4.3.



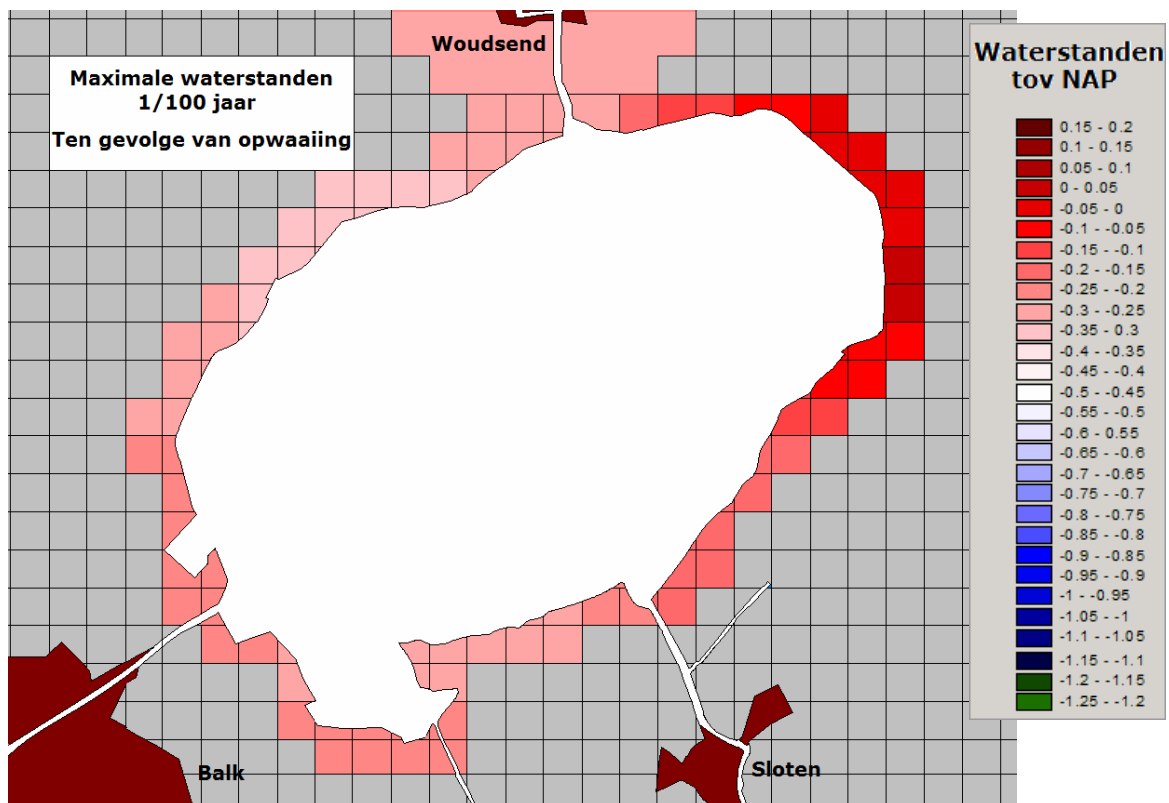
Figuur 4.3: Waterstanden ten gevolge van windopzet bij de overige windrichtingen
(Bij alle vier afbeeldingen ligt het zwaartepunt van de watermassa op het streefpeil van NAP -0,52m.)

4.3 Vergelijking van de waterstanden

In de paragrafen 4.1 en 4.2 zijn voor acht verschillende windrichtingen de waterstanden weergegeven als gevolg van opwaaiing en afwaaiing. Nu is het interessant de gevonden hoge waterstanden als gevolg van wind (de opwaaiing) te vergelijken met de waterstanden die gemeten zijn in Friesland bij de 37 verschillende meetpunten. Met andere woorden:

Hoe verhouden de hoge waterstanden door opwaaiing, berekend vanuit het streefpeil van NAP -0,52m als gevolg van maatgevende windsnelheden van 1/100 jaar, zich tot het model waarbij de overschrijdingswaterstanden van 1/100 jaar zijn berekend door middel van lineaire interpolatie tussen de 37 meetpunten in Friesland?

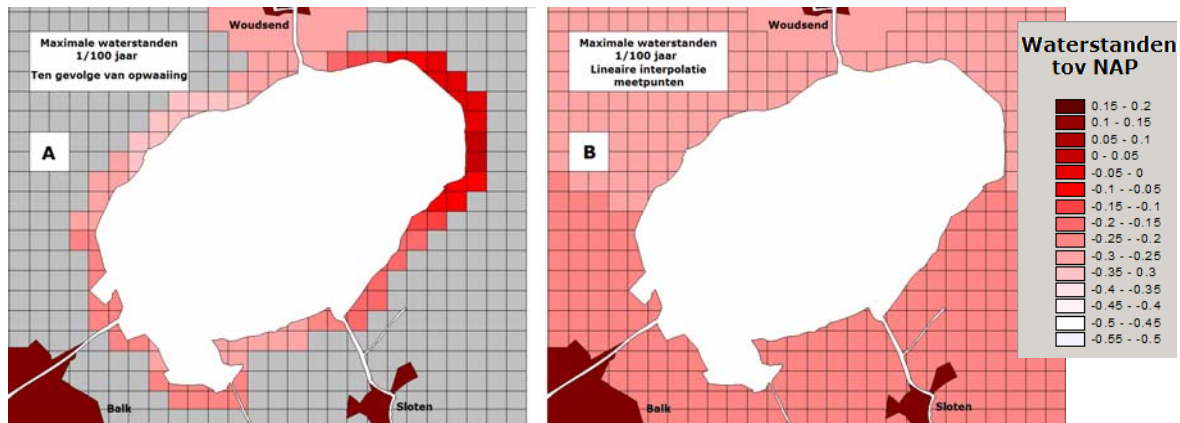
Om deze vergelijking te maken is allereerst figuur 4.4 gemaakt. Figuur 4.4 volgt uit de acht afbeeldingen van de figuren 4.1 en 4.3.



Figuur 4.4: Maximale waterstanden 1/100 jaar ten gevolge van opwaaiing berekend met acht verschillende windrichtingen en snelheden vanuit een toestand in rust van NAP -0,52m (streefpeil)

In de figuur is voor ieder vakje langs de rand van het Slotermeer de hoogst voorkomende waterstand ingevuld. Het blijkt dat de waarden rond het Slotermeer tussen de NAP 0,00m en NAP -0,30m liggen. Volgens het lineair geïnterpoleerde model zijn de waterstanden rond het Slotermeer ongeveer NAP -0,25m (zie tabel 1.1 in hoofdstuk 1). In figuur 4.4 is te zien dat de hoogst voorkomende waterstand als gevolg van opwaaiing in Woudsend tussen NAP -0,30m en NAP -0,25m ligt.

In figuur 4.5 wordt de vergelijking tussen beide modellen verduidelijkt. Hier is goed te zien dat veel waterstanden van beide modellen overeenkomen (veel vakjes hebben dezelfde kleur). Alleen het opwaaiing model (figuur 4.5-A) geeft veel hogere waterstanden aan de noordoostelijke zijde van het Slotermeer dan het lineair geïnterpoleerde model.



Figuur 4.5 A: Waterstanden berekend met het opwaaiing model op het Slotermeer,
B: waterstanden berekend met het lineair geïnterpoleerde model op het Slotermeer

De belangrijkste verschillen tussen beide modellen staan nog een keer op een rij in tabel 4.1.

Tabel 4.1: Verschillen opwaaiing model en lineair geïnterpoleerde model

Model:	Opwaaiing model (Fig. 4.5-A)	Lineair geïnterpoleerde model Fig. (4.5-B)
<i>Uitgangspunt:</i>	Waterstanden berekend met acht maatgevende windsnelheden en richtingen met als uitgangspunt het streefpeil van NAP -0,52m	Waterstanden gemeten op 37 locaties bij een overheersende windrichting en daarna geïnterpoleerd
<i>Waarden:</i>	Waterstanden rond het Slotermeer tussen NAP 0,00m en NAP -0,30m	Waterstanden rond het Slotermeer tussen NAP -0,25m en NAP -0,30m
<i>Diversiteit:</i>	Waterstanden aan oostelijke zijde tot 0,25m hoger dan aan westelijke zijde	Waterstanden aan zuidelijke zijde hoger dan aan noordelijke zijde

Het meest opvallende verschil tussen figuur 4.5-A en 4.5-B:

Bij het opwaaiing model (4.5-A) is per vakje de maximaal optredende waterstand weergegeven. Duidelijk is het verschil te zien tussen de waterstanden aan de oost- en westkant van het Slotermeer.

Bij het lineair geïnterpoleerde model is dit verschil echter niet aanwezig.

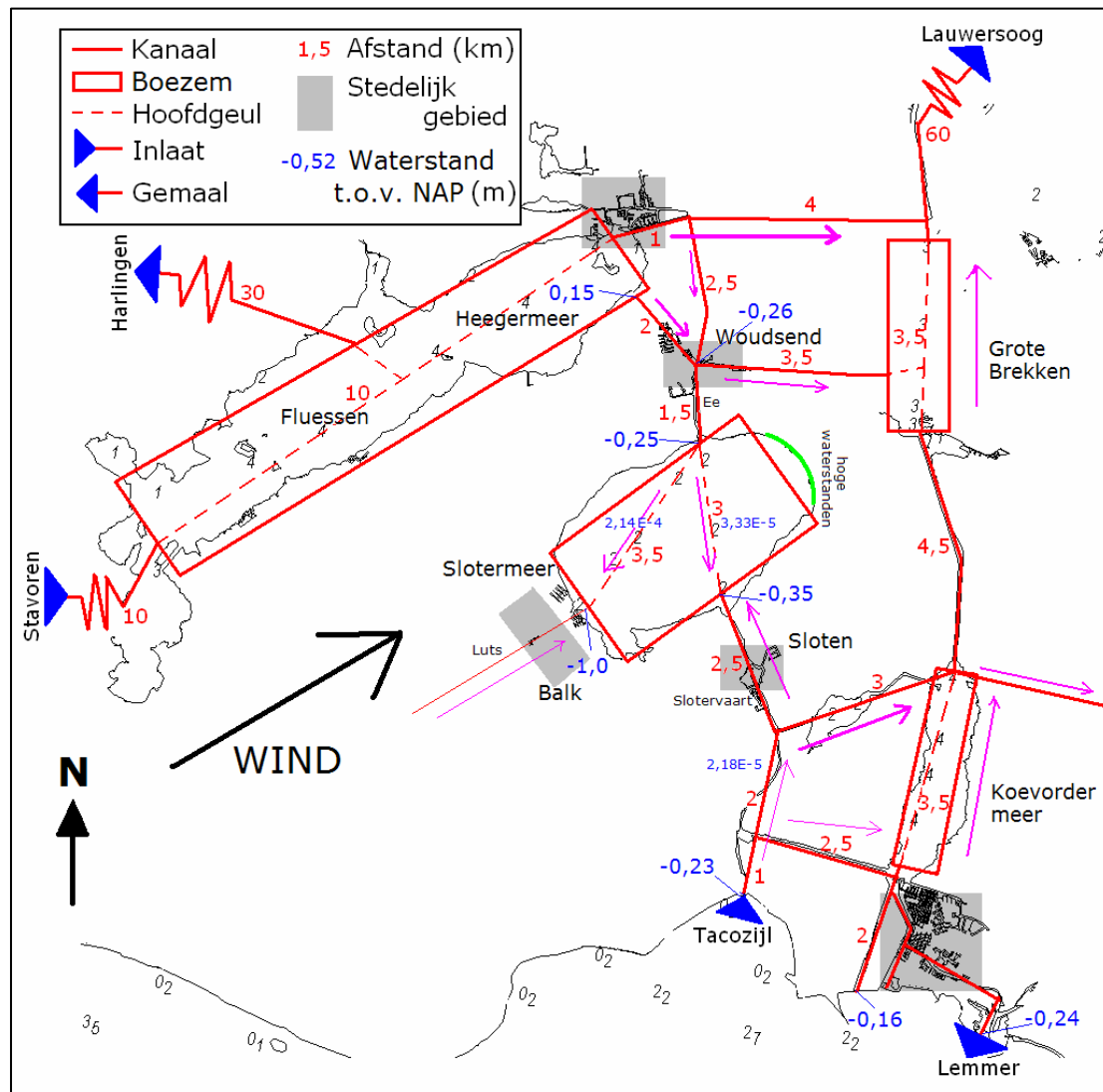
5 Beperkingen Model

Bij de berekening van de opwaaiing bij het Slotermeer zijn een aantal aannamen gedaan en een aantal parameters berekend of geschat (zie paragraaf 2.5). In onderstaande paragrafen wordt gekeken wat de invloed is op het meest extreme punt. De opwaaiing aan het einde van stramienlijn zeven bij een windrichting van 250° is het extreme punt met een hoogte van NAP 0m (appendix B.2).

5.1 Gesloten boezem

Bij een storm in Friesland zal in de gehele boezem een scheefstand van de waterspiegel veroorzaken. Door deze scheefstand gaat water stromen door alle kanalen en sloten van Friesland, op zoek naar een nieuw evenwicht. Het water zal dan ook gaan stromen door de kanalen en sloten rond het Slotermeer. Zoals beschreven in paragraaf 3.4 komen er drie kanalen uit op het Slotermeer. Twee daarvan lijken de meeste invloed te hebben (de Ee en de Slotervaart), want deze staan in verbinding met andere grote meren. Een exacte berekening van de stroming in de kanalen is erg complex en tijdrovend. In dit geval wordt geprobeerd inzicht te krijgen in de omgeving van het Slotermeer om zo een schatting te kunnen maken van een eventuele afwijking op de waterstanden zoals weergegeven in figuur 4.4. Om dit inzicht te krijgen is een schematische weergave gemaakt (zie figuur 5.1). Bij deze schematisatie is een aantal aannamen gedaan:

- Bij de waterstanden in de omgeving is voor de meetpunten (Lemmer, Tacozijsl, Woudsend) uitgegaan van de eens in de 100 jaar overschrijdingswaterstand zoals die is berekend door het Wetterskip Fryslân (Uit de dataset van de waterstanden blijkt dat wanneer hoge waterstanden optreden in bijvoorbeeld Woudsend, dit op dezelfde dag ook gebeurd in Tacozijsl en dus niet op een totaal andere dag, met een andere stormrichting).
- Voor de waterstand in het Heegermeer is een schatting gemaakt op basis van de ervaringen met de berekening van de windopzet op het Slotermeer.
- Alle sloten zijn buiten beschouwing gelaten.
- Met de winddata zijn bepaald dat een storm in Friesland ongeveer vier uur duurt. Daarna zwakt de wind af en zullen de extreme waterstanden zakken.



Figuur 5.1: Schematisatie omgeving Slotermeer zuidwesten wind

In figuur 5.1 is goed te zien dat ten noorden van het Slotermeer het water vanuit het Heegermeer grotendeels doorstroomt naar de Grote Brekken. Hier wordt de instroom in het Slotermeer vanuit de Ee dan ook verwaarloosd. Verder vindt er in het Slotermeer instroming plaats vanuit de Luts en de Slotervaart. In een tijdsbestek van vier uur zal met deze waterstanden door de Luts ongeveer 160.000 m³ en door de Slotervaart ongeveer 250.000 m³ water het Slotermeer instromen. Dat is samen ongeveer 410.000 m³ water. Wanneer water het Slotermeer binnenkomt, zal het allereerst vooral naar de gebieden met een lage waterstand stromen. Via de bodem zal het water richting de westkant van het meer stromen, om daar aan de oppervlakte meegenomen te worden door de windrichting oostkant. Bij deze instroming zal de positie van het zwaartepunt enigszins variëren. Het zal zich iets naar het westen verplaatsen. Deze invloeden zijn erg klein en de rekenmethode die in eerste instantie is opgesteld voor de berekening van de windopzet wordt nog steeds aangenomen als een juiste benadering. In tabel 5.1 is te zien wat de invloed is van de waterstandverhoging op de windopzet in het meest extreme punt.

Tabel 5.1: Toename windopzet bij verhoging waterstanden

Toename watervolume	Toename waterdiepte	Toename windopzet op meest extreme punt
400.000 m ³	0,03 m	+0,03 m
500.000 m ³	0,04 m	+0,03 m
600.000 m ³	0,05 m	+0,04 m
700.000 m ³	0,06 m	+0,04 m
800.000 m ³	0,07 m	+0,05 m
900.000 m ³	0,08 m	+0,06 m
1.000.000 m ³	0,09 m	+0,06 m

In tabel 5.1 is te zien dat een toename van de waterdiepte een verhoging geeft bij het meest extreme punt. Deze verhoging is altijd kleiner dan de toename van de waterdiepte. Dit komt doordat een hogere waterdiepte een kleiner verhang veroorzaakt. Bij de berekening van 400.000 m³ water op basis van de schematisatie van figuur 5.1 kunnen veel vraagtekens gezet worden. Toch is het duidelijk dat eerder een waterstandverhoging dan -verlaging zal optreden in het Slotermeer, bij de gegeven omstandigheden. Verder zal de verhoging ook niet veel meer dan enkele centimeters bedragen op de opwaaiing.

5.2 Verwaarlozing bodemwrijving

Deze aanname is gedaan om de schuifkracht, veroorzaakt door de wind, gelijk te kunnen stellen aan het verhang. Als de bodemwrijving niet wordt verwaarloosd dan valt een lagere opwaaiing te verwachten (zie figuur 2.1).

5.3 Stromingen als gevolg van verschillen in het verhang

De berekende waterstanden van de naast elkaar liggende stramienlijnen verschillen niet veel. Dit komt omdat er in het Slotermeer geen grote verschillen in diepte zijn. Alleen het noordoostelijke deel van het meer is ondieper dan de rest van het meer. In dat deel zullen kleine stromingen ontstaan die weinig tot geen invloed hebben op de berekende waterstanden.

5.4 Neerslag en bemaling

Ook de neerslag is bij de berekeningen verwaarloosd. Om een indicatie te geven van de invloed van de neerslag is dit in onderstaand tabel 5.2 weergegeven. Hierbij moet wel rekening gehouden worden met het feit dat hier niet naar de bemaling is gekeken. De bemaling kan er voor zorgen dat het boezempeil, tijdens een grote hoeveelheid neerslag, niet te veel stijgt.

Tabel 5.2: Invloed neerslag op de windopzet

Waterspiegelstijging door neerslag (in een etmaal)	Toename windopzet op meest extreme punt
0,05 m	+0,04 m
0,10 m	+0,07 m
0,15 m	+0,11 m
0,20 m	+0,15 m

5.5 Weerstandscoefficiënt

Als weerstandscoefficiënt tussen water en lucht is voor alle berekeningen van de windopzet $3,6 \cdot 10^{-6}$ gebruikt. In onderstaand tabel is te zien hoe de windopzet verandert als deze coëfficiënt wordt gevarieerd.

Tabel 5.3: Invloed weerstandscoefficiënt op de windopzet

Weerstandscoefficiënt	Toename / afname windopzet op meest extreme punt
$3,5 \cdot 10^{-6}$	- 0,015 m
$3,7 \cdot 10^{-6}$	+0,015 m
$3,8 \cdot 10^{-6}$	+0,03 m
$3,9 \cdot 10^{-6}$	+0,04 m
$4,0 \cdot 10^{-6}$	+0,05 m

5.6 Invloed windsnelheid

De berekende maximale windsnelheid voor de richting 250 is 31,5 m/s. Wanneer deze wordt gevarieerd heeft dat invloed op de windopzet. In tabel 5.4 staat het verschil in windopzet bij variatie van de windsnelheid.

Tabel 5.4: Invloed windsnelheid op de windopzet

Windsnelheid (m / s)	Toename / afname windopzet op meest extreme punt
30	- 0,040 m
31	- 0,014 m
32	+0,015 m
33	+0,044 m

5.7 Conclusie

Van alle gebruikte parameters en aannamen heeft de neerslag de grootste invloed op het eindresultaat. Toch is er weinig over de neerslag te zeggen doordat er ook bemaald wordt tijdens neerslag. Het model kan dus op een aantal punten nog verbeterd worden, maar één ding komt elke keer naar voren:

De extreme waterstanden aan de oostzijde van het Slotermeer zullen hoger uitvallen dan aan de andere zijden. Het verschil met de lineaire interpolatie zal blijven bestaan.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusie

Voor het Slotermeer zijn, uitgaande van een streefpeil van NAP -0,52m, de volgende resultaten geldig:

De resultaten van de berekening van extreme waterstanden van eens in de 100 jaar, veroorzaakt door een extreem optredende wind, komen voor een groot deel overeen met het lineaire model³ voor extreme waterstanden van het Wetterskip Fryslân.

Grote verschillen ontstaan aan de noordoostelijke zijde van het Slotermeer bij een wind uit het zuidwesten. De waterstanden aan de noordoostzijde blijken ongeveer 25 centimeter hoger uit te vallen dan berekend in het oorspronkelijke lineaire model van het Wetterskip (figuur 4.5).

Men zou kunnen verwachten dat, wanneer de maatgevende wind uit het zuidwesten komt, door afwaaiing de overschrijdingswaterstand aan de zuidwestelijke zijde van het Slotermeer lager komt te liggen dan bepaald met het lineaire model. Dit is echter niet het geval omdat de maatgevende wind uit het noordoosten voor een windopzet zorgt aan de zuidwestelijke zijde, die overeenkomt met de overschrijdingswaterstand bepaald met de lineaire interpolatie.

Daarnaast kan ook worden geconcludeerd dat de kanalen tussen de verschillende boezems, tijdens een storm van minstens vier uur, toereikend zijn om water door te laten stromen en zo de hoge waterstanden ook bij de meetpunten te laten doordringen.

De invloed van lokale windopzet op de, in dit onderzoek bekeken, meetpunten is gering; ze liggen alle in een bebouwd gebied. De metingen zijn dus niet te hoog of te laag, waardoor de (eenvoudige) lineaire interpolatie een goede indicatie van optredende waterstanden geeft. Dit met uitzondering van de oostelijke zijde van het Slotermeer.

Er zijn ook boezemmeren waarbij aan de noordoostelijke zijde wordt gemeten. Bij een lineaire interpolatie geeft dit waarschijnlijk een te hoge overschrijdingswaterstand aan de zuidwestelijke zijde (zie paragraaf 6.2: het Sneekermeer).

Geconcludeerd kan worden dat de lineaire interpolatie van de meetpunten geen rekening houdt met locaties die een grote strijklengte van zuidwestelijke naar noordwestelijke richting hebben. De locatie van de meetpunten is voor de betrouwbaarheid van de lineaire interpolatie doorslaggevend. Het verschil tussen de hoge maatgevende waterstanden langs een boezemmeer kan oplopen tot enkele decimeters. Afhankelijk van de locatie van het meetpunt kan dit een lokale verlaging dan wel verhoging van de overschrijdingswaterstand betekenen.

³ Model gebaseerd op de lineaire interpolatie van meetwaarden van 37 verschillende meetpunten in Friesland, beschreven in hoofdstuk 1.

6.2 Aanbevelingen

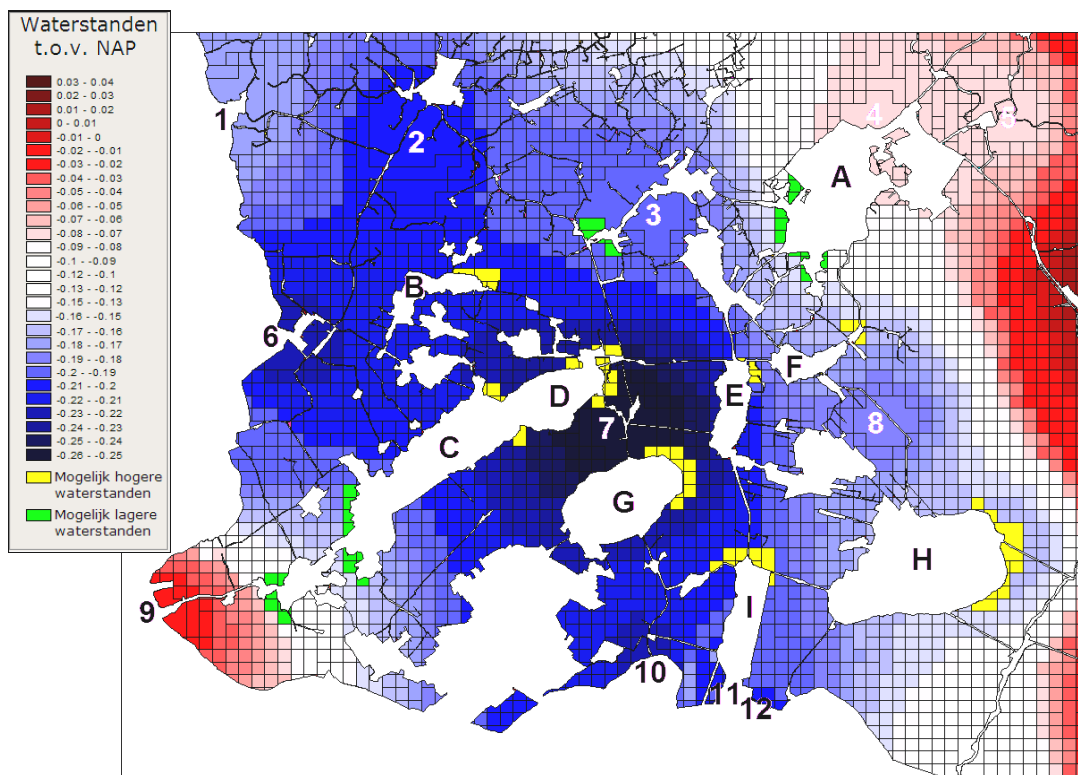
Voor het vaststellen van de juiste hoogte van boezemkades in Friesland kan voor het grootste deel gebruik worden gemaakt van het oorspronkelijke model. Dit model, dat berust op de lineaire interpolatie van de overschrijdingswaterstanden van 37 meetpunten, blijkt toepasbaar voor het grootste gedeelte van de boezemkades. Op punten waar zich grote strijklengtes opdoen is extra aandacht vereist, omdat lokaal de overschrijdingswaterstanden erg kunnen verschillen.

Het lineair geïnterpoleerde model berust op metingen van extreme waterstanden. Deze extreme waterstanden komen veruit het meest voor bij de overheersende zuidwestenwind. Dit betekent dat bij de overschrijdingswaterstanden van het lineaire model uitgegaan kan worden van een situatie waarbij de wind uit het zuidwesten waait (figuur 1.1). Het blijkt dat hoge waterstanden genoeg tijd hebben zich te verspreiden en om zo ook bij de meetpunten aan te komen. De duur van een extreme storm van minimaal vier uur, is hier lang genoeg voor. Alleen kanalen en meren met een grote strijklengte in zuidwestelijke richting zullen extra aandacht moeten krijgen omdat, door windopzet de waterstanden lokaal sterk verschillen. Voor deze kanalen en boezemmeren zal gekeken moeten worden naar de positie van het dichtstbijzijnde meetpunt en of de daarbij horende metingen te hoog of te laag zijn voor een aantal van die kanalen of boezemmeren.

In figuur 6.1 worden enkele belangrijke aandachtsgebieden genoemd. Hierbij is zuidwest Friesland weergegeven met de overschrijdingswaterstanden van eens in de 100 jaar, volgens het huidige lineaire model. In de figuur zijn de aandachtsgebieden groen en geel gemarkeerd.

- *De gele gebieden in figuur 6.1*
De geel gekleurde gebieden geven aan waar hogere overschrijdingswaterstanden kunnen worden verwacht. Bijvoorbeeld in het Tjeukemeer(H). Daar worden waterstanden gemeten bij Scharsterbrug(8) en daarom is, eveneens als bij het Slotermeer, een hogere waterstand aan de oostzijde van het Tjeukemeer te verwachten. Doordat het Tjeukemeer in de richting van het zuidwesten smaller wordt, zullen er waarschijnlijk aan die zijde niet veel lagere waterstanden optreden. Het is aan te bevelen om bij het Tjeukemeer een nieuwe berekening te doen met het opwaaiing model voor de overschrijdingswaterstanden.
- *De groene gebieden in figuur 6.1*
De groene gebieden geven aan waar lagere overschrijdingswaterstanden op kunnen treden, bijvoorbeeld aan de zuidwestelijke zijde van het Sneekermeer(A). Het meetpunt Terherne(4) meet namelijk de waterstanden op het meer aan de noordoostelijke zijde: de hoge kant dus. Bij de lineaire interpolatie in de richting van meetpunt Sneek(3) is de kans groot dat voor de aangegeven groene gebieden bij het meer een lagere overschrijdingswaterstand optreedt. Het wordt aanbevolen met het opwaaiing model de huidige overschrijdingswaterstanden te toetsen.

Verder zijn enkele wit gekleurde gebieden in figuur 6.1 geen boezemmeren, maar ontbrekende waarden in het model. In deze wit gekleurde gebieden staan dan ook geen letters die verwijzen naar de index (tabel 6.1).



Figuur 6.1: Overschrijdingswaterstanden 1/100 jaar volgens lineair geïnterpoleerd model voor Friesland

Tabel 6.1: Index van meetpunten en boezemmeren figuur 6.2

Meetpunten		Boezemmeren	
1	Makkum	A	Sneekermeer
2	Bolsward	B	Oudegaasterbrekken
3	Sneek	C	Fluessen
4	Terherne	D	Heegermeer
5	Nes	E	Koelvordermeer
6	Hindeloopen	F	Langweerderwielen
7	Woudsend	G	Slotermeer
8	Scharsterbrug	H	Tjeukemeer
9	Stavoren	I	Grote Brekken
10	Lemmer (Tacoziyl)		
11	Lemmer (PM-Sluis)		
12	Lemmer (ir. D.F. Woudagemaal)		

Het geheel overziend kan geconcludeerd worden dat voor het vaststellen van de juiste kadehoogte van de boezem in Friesland, gebruik kan worden gemaakt van het oorspronkelijke lineaire model. Dit model lijkt betrouwbaar voor het grootste gedeelte van de boezemkades in Friesland, maar op punten waar men te maken krijgt met een grote strijklengte in zuidwestelijke richting is extra aandacht nodig. Dit omdat lokaal de overschrijdingswaterstanden erg kunnen verschillen. Een oplossing is het in dit rapport beschreven opwaaiing model.

Literatuurlijst

- [1] d'Angremond, K. en Roode, F.C. van, Breakwaters and closure dams, Delft, Delft University Press, 2001
- [2] d'Angremond, K., Bezuijen, K.G., Meulen, T. van der, e.a., Dictaat CT 2320 Inleiding Waterbouw, Delft, TUDelft, 2002
- [3] Battjes, J.A., Dictaat CT 4320 Korte Golven, Delft, TUDelft, 2001
- [4] Battjes, J.A., Dictaat CT 3310 Stroming In Open Waterlopen, Delft, TUDelft 2002
- [5] Dekking, F.M., Kraaikamp, C., Lopuhaä, H.P., Meester L.E., KANSSTAT Probability and Statistics for the 21st Century
- [6] Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rapportage golfmetingen IJsselmeergebied 2003-2004
- [7] Ministerie van Verkeer en Waterstaat, de veiligheid van de primaire waterkeringen in Nederland, Voorschrift Toetsen op Veiligheid voor de tweede toetsronde, 2001-2006 (VTV)
- [8] Schiereck, G.J., Introduction to Bed, bank and shore protection, Delft, Delft University Press, 2001
- [9] Smits, A., Analysis of the Rijkkoord-Weibull model. KNMI Technical Report TR-232, Royal Netherlands Meteorological institute, 2001
- [10] Smits, A., Estimation of extreme return levels of wind speed: a modification of the Rijkkoord-Weibull model. Royal Netherlands Meteorological institute, Climatological Services, 2001
- [11] Wieringa, J., en Rijkooort, P.J., Windklimaat van Nederland, Staatsuitgeverij, Den Haag, the Netherlands, 1983

Websites

- [12] <http://www.knmi.nl/klimatologie/daggegevens/>
- [13] <http://www.knmi.nl/samenw/hydra/>
- [14] <http://www.wetterskipfryslan.nl/>

Appendices

Appendix A Winddata analyse

A.1 Gumbel en Exponentiële verdeling over de volledige dataset

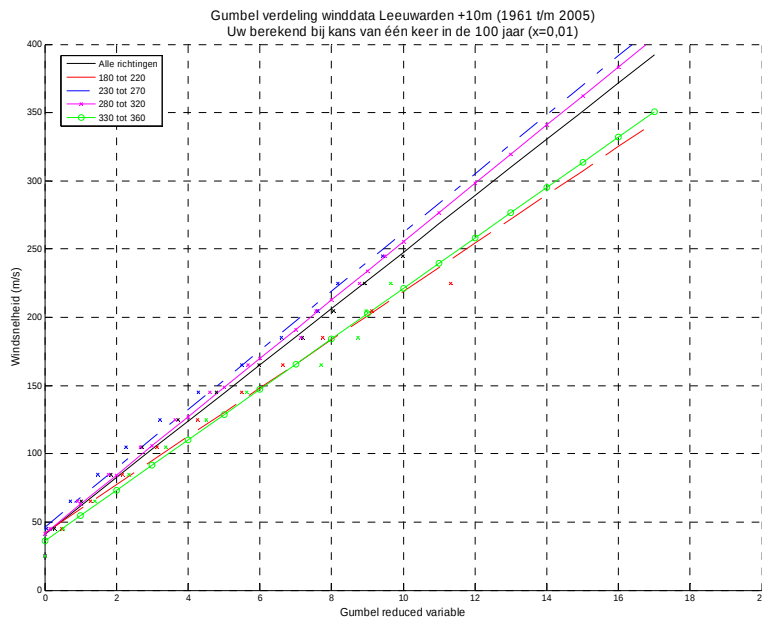
Bij analyse van de complete dataset zijn alle waarden van het vieruurgemiddelde onder de 1,5m/s verwaarloosd, omdat deze winden vaak dwarrelwinden zijn en geen invloed op een windopzet hebben. De overige vieruurgemiddelden zijn ingedeeld naar de vier hoofdrichtingen en de snelheid, zie onderstaand tabel A.1.

Tabel A.1: Aantal metingen per windsnelheid per richting
(Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI))

U _{wind} (m/s)	Richting in graden (360 is N)			
	180-220	230-270	280-320	330-360
1,5-3,4	20098	11688	8823	7809
3,5-5,4	24703	17026	13225	9353
5,5-7,4	17934	16750	13061	7160
7,5-9,4	11246	13696	9070	3931
9,5-11,4	5512	7890	4492	1823
11,5-13,4	2384	4351	2166	690
13,5-15,4	808	1889	822	235
15,5-17,4	235	701	340	96
17,5-19,4	73	206	139	9
19,5-21,4	27	64	14	1
21,5-23,4	8	16	19	2
23,5-25,4	1	15	4	1
25,5-27,4	0	6	4	1

A.1.1 Gumbel verdeling

Met deze waarden is, met behulp van een Gumbel verdeling, voor alle vier de hoofdrichtingen individueel en alle vier richtingen samen een ontwerp windsnelheid bepaalt.



Figuur A.1: Gumbel verdeling winddata Leeuwarden (1961 t/m 2006)

Deze ontwerpwindsnelheden zijn:

Tabel A.2: Resultaten Gumbel verdeling (gebruikmakend van figuur A.3)

Richting in graden	180 t/m 220	230 t/m 270	280 t/m 320	330 t/m 360	Alle richt.
Snelheid (m/s)	30,4	36,9	35,4	30,2	37,3

Uit tabel A.2 is op te maken dat de maatgevende stormen uit de richtingen ZW (zuidwest) en WZW komen.

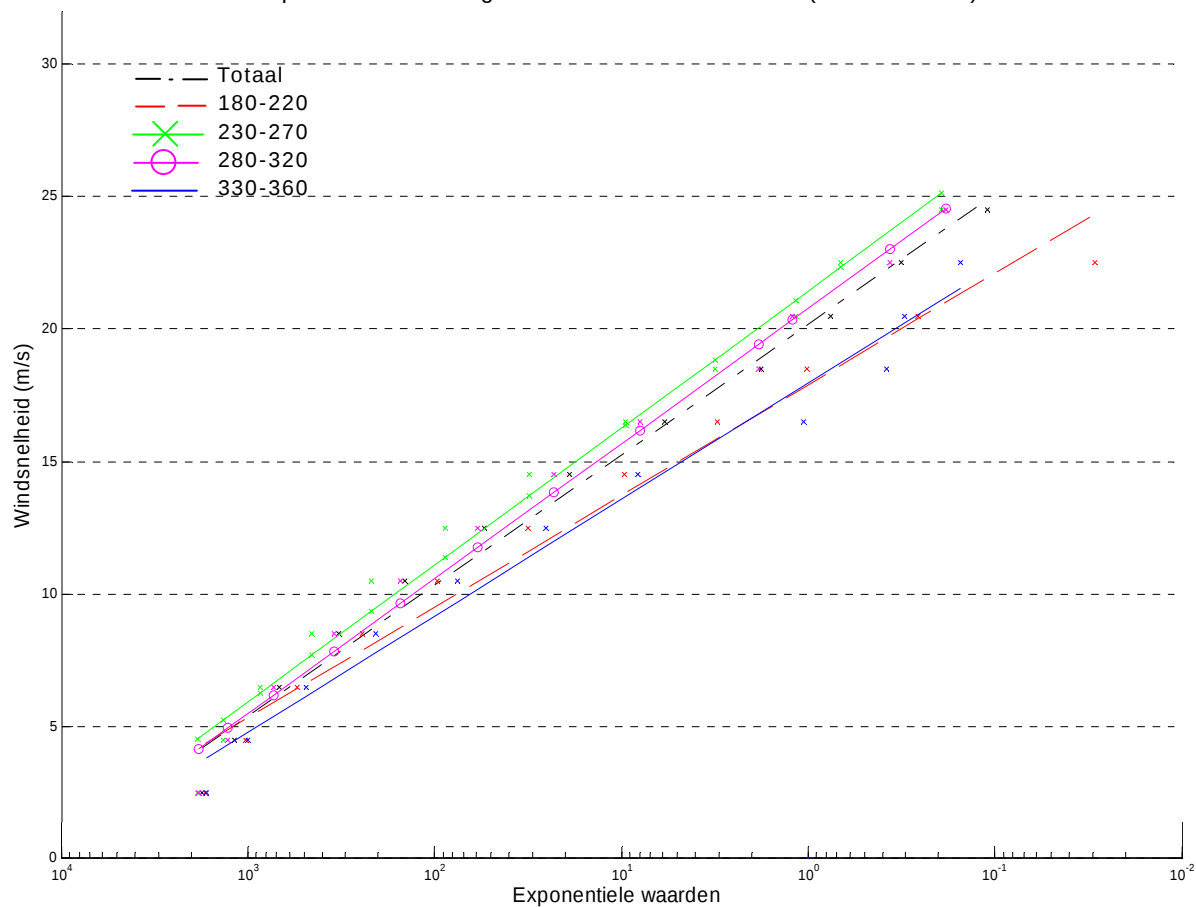
A.1.2 Exponentiële verdeling

Hier is dezelfde data als bij de Gumbel verdeling gebruikt. In onderstaande tabel A.3 en figuur A.2 is de windsnelheid die één keer in de honderd jaar voorkomt af te lezen.

Tabel A.3: Resultaten Exponentiële verdeling

Richting in graden	180 t/m 220	230 t/m 270	280 t/m 320	330 t/m 360	Alle richt.
Snelheid (m/s)	26,0	31,3	30,5	27,0	29,6

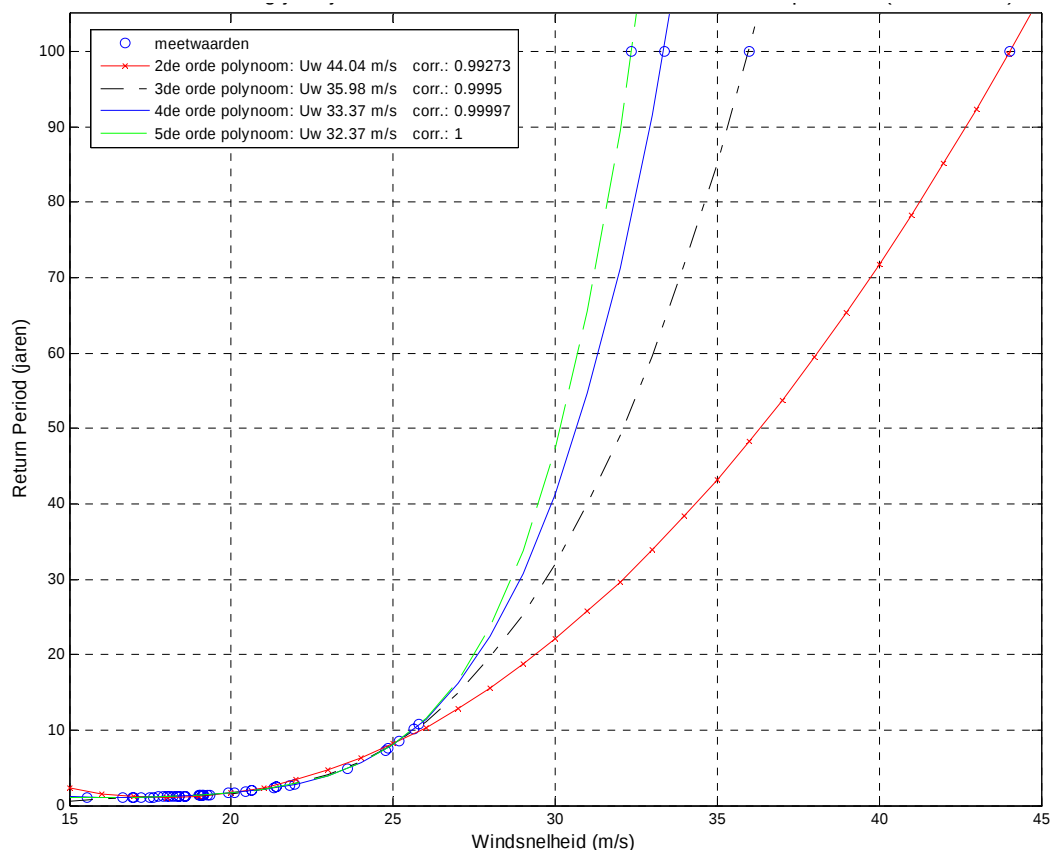
Exponentiële verdeling winddata Leeuwarden +10m (1961 t/m 2005)



Figuur A.2: Exponentiële verdeling winddata Leeuwarden (1961 t/m 2005)

A.2 Jaarlijkse maxima verdeling

Voor deze methode wordt van ieder jaar de maximumwindsnelheid bekeken. Bij deze methode is het vaak moeilijk om genoeg data te verkrijgen. Waarschijnlijk zal de 44 jaar in dit geval, en dus 44 waarden, genoeg moeten zijn om tot een behoorlijk betrouwbare schatting te kunnen komen van de ontwerpwindnelheid. Voor de berekeningen van de maxima is steeds het 2 uurgemiddelde genomen over de gehele dataset (zoals eerder besproken in kader van de later te berekenen windopzet), hieruit is het maximum per jaar bepaald. Het blijkt dat de maxima voor 95% uit westelijke richting (tussen 190° en 320°) komen. De 2 waarden uit de andere richtingen zijn verder buiten beschouwing gelaten. Wanneer wordt gekeken naar de return period van een Gumbel verdeling geeft deze de beste correlatie coëfficiënten en de meest eenvoudige werkwijze. In onderstaande figuur A.3 zijn de resultaten te zien. Een 'best fit' polynoom kan door de waarden worden getrokken om de gegevens te extrapoleren. In onderstaand figuur A.3 zijn de polynomen van de 2^{de} tot en met de 5^{de} orde weergegeven en de bijbehorende correlatie met de berekende waarden van de return period. De figuur geeft duidelijk weer dat er een groot verschil is tussen de polynomen van de 2^{de} en de 3^{de} orde. Zowel in uiteindelijke ontwerpwindnelheid als in correlatie. Aangenomen kan worden dat de polynoom van de derde orde met $U_{\text{wind}} = 36\text{ m/s}$ de 'best fit' is. Wanneer de orde van de polynoom verder wordt verhoogd neemt de correlatie nog wel iets toe maar dit is meer een soort schijnnaauwkeurigheid dan een werkelijke verbetering van de nauwkeurigheid (een correlatie van 1 bij de polynoom van de 5^{de} orde is natuurlijk vrij onrealistisch).



Figuur A.3: Gumbel verdeling jaarlijkse maxima windsnelheden Leeuwarden (1961 – 2005)

A.3 Gumbel & Weibull verdeling Peak over Threshold

Als laatste wordt de Peak over Threshold methode gebruikt. Deze methode is gebaseerd op het kwantificeren van het aantal stormen in een bepaald gebied boven een bepaalde drempel waarde (Threshold). Van iedere storm wordt de maximale windsnelheid genomen. Bij deze methode is de beschouwing van onafhankelijke stormen erg belangrijk. Wanneer bijvoorbeeld de windsnelheid op een bepaald uur boven de drempel waarde komt wordt er van een storm gesproken. Als vervolgens de windsnelheid zakt en een uur lang onder de drempelwaarde blijft en direct daarna weer boven de drempelwaarde komt, moet nog steeds gesproken worden over één storm (die even afgezwakt is). Bij deze kansverdeling is een drempelwaarde van 15m/s toegepast en een periode van 20 uur als minimale tijd tussen twee piek momenten. Alle stormen van 1 uur zijn wederom weggelaten omdat deze niet interessant zijn voor het berekenen van de windopzet. In de onderstaande tabel A.4 is voor 4 (wind)richtingen het aantal stormen weergegeven van minimaal 2 uur in de periode 1961 tot en met 2005. De stormen zijn dus gekwantificeerd op hun maximale snelheid. Te zien is dat wanneer een storm langer dan 2 uur over de drempelwaarde van 15m/s komt, de piek snelheid vaak nog eens 1m/s of meer hoger ligt dan de drempelwaarde.

Tabel A.4: Aantal stormen per windsnelheid per richting.

U _{wind} (m/s)	Richting in graden			
	180 t/m 220	220 t/m 270	280 t/m 320	330 t/m 360
15,1 – 15,5	6	11	4	5
15,6 – 16,0	12	13	5	3
16,1 – 16,5	6	24	9	3
16,6 – 17,0	7	15	8	2
17,1 – 17,5	7	18	9	1
17,6 – 18,0	3	11	9	1
18,1 – 18,5	5	10	11	0
18,6 – 19,0	6	8	4	0
19,1 – 19,5	4	5	3	0
19,6 – 20,0	4	5	1	1
20,1 – 20,5	1	4	1	0
20,6 – 21,0	1	2	0	0
21,1 – 21,5	1	5	1	0
21,6 – 22,0	0	1	0	0
22,1 – 22,5	1	1	0	0
22,6 – 23,0	0	0	0	0
23,1 – 23,5	0	0	0	0
23,6 – 24,0	1	1	0	0
24,1 – 24,5	0	0	0	0
24,6 – 25,0	0	1	0	1
25,1 – 25,5	1	0	2	
25,6 – 26,0		1	0	
26,1 – 26,5		1	0	
26,6 – 27,0			0	
27,1 – 27,5			0	
27,6 – 28,0			0	
28,1 – 28,5			1 *	

Tabel A.5: Resultaten Peak over Threshold Gumbel

	180 - 220	230 - 270	280 - 320	330 - 360	Alle richt.
U_{wind} 1/100 jaar	31,7 m/s	34,0 m/s	35,3 m/s	32,0 m/s	35,6 m/s
Correlatie	0,9889	0,9875	0,9347	0,8697	0,9875

Uit bovenstaand tabel A.5 valt af te lezen dat de verwachte windsnelheid berekend met behulp van de Peak over Threshold methode hoger is uit noordwestelijke richting dan uit zuidwestelijke richting. Dit heeft te maken met de ene storm (met een sterretje weergegeven in tabel A.4) met een piek van boven de 28m/s. Indien deze ter vergelijking uit de data wordt geschrapt, wordt de maatgevende windsnelheid plotseling 31,1m/s in plaats van 35,3. Deze ene storm heeft dus een invloed van 4,2m/s op het eindresultaat. De Peak over Threshold methode wordt in dit geval dan ook als onbetrouwbaar verondersteld.

In onderstaande tabel A.6 zijn de resultaten zichtbaar van de Peak over Threshold benadering door middel van een Weibull verdeling. Wat direct opvalt, zijn de erg lage windsnelheden.

Tabel A.6: Resultaten Peak over Threshold Weibull

	180 - 220	230 - 270	280 - 320	330 - 360	Alle richt.
U_{wind} 1/100 jaar	24,3 m/s	24,6 m/s	25,1 m/s	18,4 m/s	26,7 m/s
Correlatie	0,9919	0,9931	0,9672	0,9192	0,9899

A.4 Keuze

In onderstaand tabel A.7 zijn overzichten te zien van alle kansverdelingen. Het is nu zaak om een geschikte keuze te maken voor een maatgevende windsnelheid. Wat betreft de Peak over Threshold is gebleken dat deze behoorlijk onbetrouwbaar is. Wanneer de stormen op een andere manier worden gekwantificeerd, zullen er totaal andere uitkomsten uitrollen. Dit is ook beschreven in de voorgaande paragraaf, waarbij duidelijk werd dat één storm een invloed had van 4,2m/s op het uiteindelijke resultaat van de Peak over Threshold met een Gumbel verdeling. Wat betreft de Weibull verdeling zijn de waarden wel erg laag uitgevallen ten opzichte van de andere methoden. Dus de Peak over Threshold wordt daarom niet gebruikt.

De methode met alleen de jaarlijkse maxima valt weer erg hoog uit en heeft geen specifieke richtingsverdeling.

De overige methoden zijn dus de Gumbel, Exponentiële en Weibull verdeling over de volledige dataset. De Gumbel verdeling valt ook hier zwaar uit de toon met de andere twee verdelingen. Net zo als bij de Peak over Threshold methode zijn de windsnelheden berekend met de Gumbel verdeling te hoog en daarom worden deze verder buiten beschouwing gelaten. De andere waarden (Exponentiële en Weibull verdeling) kunnen worden vergeleken met de waarden die het KNMI zelf heeft berekend voor station Leeuwarden⁴.

⁴ A. Smits, Estimation of extreme return levels of wind speed (2004)

In tabel A.8 is de waarde 27,9m/s omcirkeld, dit komt overeen met een overschrijdingskans van eens in de 100 jaar in Leeuwarden voor alle richtingen. Deze waarde komt het dichtste bij de Weibull verdeling in tabel A.7 (26,3m/s). Maar deze waarde is lager en daarom waarschijnlijk niet juist en daarom zal gekozen worden voor een Exponentiële verdeling om de volgende twee redenen:

1. In de afgelopen 40 jaar is een windsnelheid gemeten van 28,1m/s op 13-11-1972. Dit is niet die eens in de 100 jaar storm, want op 1 februari 1953 lag de windsnelheid nog hoger. Het is daarom vreemd om een maatgevende windsnelheid te kiezen met een overschrijdingskans van eens in de 100 jaar terwijl die lager ligt dan tenminste twee gemeten waarden in een periode van 45 jaar.
2. De methode met een Exponentiële verdeling is erg eenvoudig. Een hoge correlatie wordt verkregen zonder het afschatten of kiezen van parameters.

Tabel A.7: Overzicht resultaten hoofdrichtingen

	180 - 220	230 - 270	280 - 320	330 - 360	Alle richt.
Volledige dataset (boven 1,5m/s)					
Gumbel	30,4	36,9	35,4	30,2	37,3
Exponentieel	26,0	31,3	30,5	27,0	29,6
Weibull	23,7	25,5	24,0	20,6	26,3
Peak over Threshold					
Gumbel	31,7	34,0	35,3	32,0	35,6
Weibull	24,3 ($\alpha=0,95$)	24,6 ($\alpha=0,95$)	25,1 ($\alpha=0,62$)	18,4 ($\alpha=0,38$)	26,7 ($\alpha=1,1$)
Jaarlijkse maxima					
Gumbel	36,0	36,0	36,0	36,0	

Tabel A.8: Return levels (m/s) by A. Smits with a Conditional Weibull Distribution.

Station	Return period in years														
	0.5	1	2	5	1-10 ¹	2-10 ¹	5-10 ¹	1-10 ²	2-10 ²	5-10 ²	1-10 ³	2-10 ³	5-10 ³	1-10 ⁴	
Valkenburg	18.9	20.3	21.5	22.9	23.8	24.5	25.5	26.3	27.0	27.8	28.4	28.9	29.5	30.0	
L.S. Texel	21.1	22.3	23.3	24.4	25.0	25.5	26.2	26.7	27.3	28.3	29.3	30.2	31.4	32.3	
IJmuiden	19.5	20.8	21.8	23.0	23.7	24.4	25.2	25.8	26.3	27.0	27.4	27.8	28.3	28.7	
Texelhors	20.5	22.0	23.4	25.1	26.3	27.4	28.7	29.6	30.5	31.5	32.3	33.0	33.9	34.6	
De Kooy	19.8	21.3	22.6	24.0	24.9	25.7	26.7	27.6	28.7	30.3	31.6	32.9	34.5	35.7	
Schiphol	18.9	20.4	21.8	23.3	24.4	25.4	26.6	27.5	28.2	29.1	29.7	30.2	30.7	31.1	
Terschelling	20.2	21.5	22.6	24.0	24.8	25.6	26.4	26.9	27.3	27.7	28.0	28.2	28.4	28.6	
K13	22.0	23.3	24.6	26.4	27.7	28.9	30.4	31.4	32.5	33.9	35.1	36.4	38.2	39.7	
Meetpost Noordwijk	21.1	22.1	22.7	23.4	23.9	24.4	25.3	26.3	27.3	28.8	30.1	31.4	33.1	34.4	
De Bilt	14.9	16.2	17.4	18.9	19.9	20.7	21.7	22.4	23.0	23.7	24.2	24.6	25.1	25.4	
Soesterberg	15.5	16.9	18.2	19.8	20.9	22.0	23.4	24.5	25.5	26.7	27.5	28.3	29.2	29.8	
Houtrib	18.3	19.8	21.2	22.8	23.9	24.9	26.1	27.0	27.9	29.4	30.7	31.9	33.5	34.6	
Lelystad	17.4	19.1	20.8	22.9	24.5	26.0	27.8	29.1	30.4	32.0	33.1	34.2	35.5	36.4	
Leeuwarden	18.0	19.6	21.1	22.9	24.2	25.4	26.5	27.9	28.8	29.9	30.7	31.4	32.2	32.7	
Stavoren-Haven	18.5	19.4	20.2	20.9	21.2	21.6	22.0	22.4	22.8	23.7	24.7	25.7	27.0	28.0	
Marknesse	15.9	17.1	18.1	19.3	20.2	21.1	22.1	22.7	23.3	24.0	24.4	24.8	25.3	25.6	
Deelen	16.8	18.2	19.5	21.0	22.0	22.9	24.0	24.9	25.7	26.8	27.6	28.5	30.0	31.3	
Lauwersoog	19.1	20.4	21.7	23.4	24.6	25.8	27.2	28.1	29.0	30.1	30.8	31.5	32.3	32.8	

Voor de overige richtingen zijn ook de maatgevende windsnelheden berekend. Bij deze berekening is al rekening gehouden met de windsnelheidsverhogende factor boven water bepaald in hoofdstuk 3.2.6. In tabel A.9 zijn de uitkomsten van de drie verschillende statistische benaderingen af te lezen. Het is duidelijk te zien dat de windsnelheden veel lager liggen dan de vier hoofdrichtingen (tabel A.7).

Tabel A.9: Overzicht resultaten overige richtingen

	10 - 40	50 - 90	100 - 130	140 - 170	Alle richt.
Volledige dataset (boven 1,5m/s)					
Gumbel	21,3	26,3	21,3	20,0	37,3
Exponentieel	20,3	23,4	20,2	19,1	29,6
Weibull	14,3	19,6	12,1	11,1	26,3

Toegepaste formules bij de verschillende verdelingen:

- Gumbel verdeling:

$$\Pr\{\underline{U}_w \leq U_w\} = \exp\left[-\exp\left(\frac{U_w - \mu}{\sigma}\right)\right]$$

- Exponentiële verdeling:

$$\Pr\{\underline{U}_w \leq U_w\} = \frac{1}{\mu} \left[\exp^{-\frac{U_w}{\mu}} \right]$$

- Weibull verdeling:

$$\Pr\{\underline{U}_w \leq U_w\} = \exp\left\{-\left(-\frac{U_w - \mu}{\sigma}\right)^\alpha\right\}$$

Waarin:

$\Pr\{\underline{U}_w \leq U_w\}$ = de kansdichtheid

μ = de verwachtingswaarde

σ = de standaard deviatie

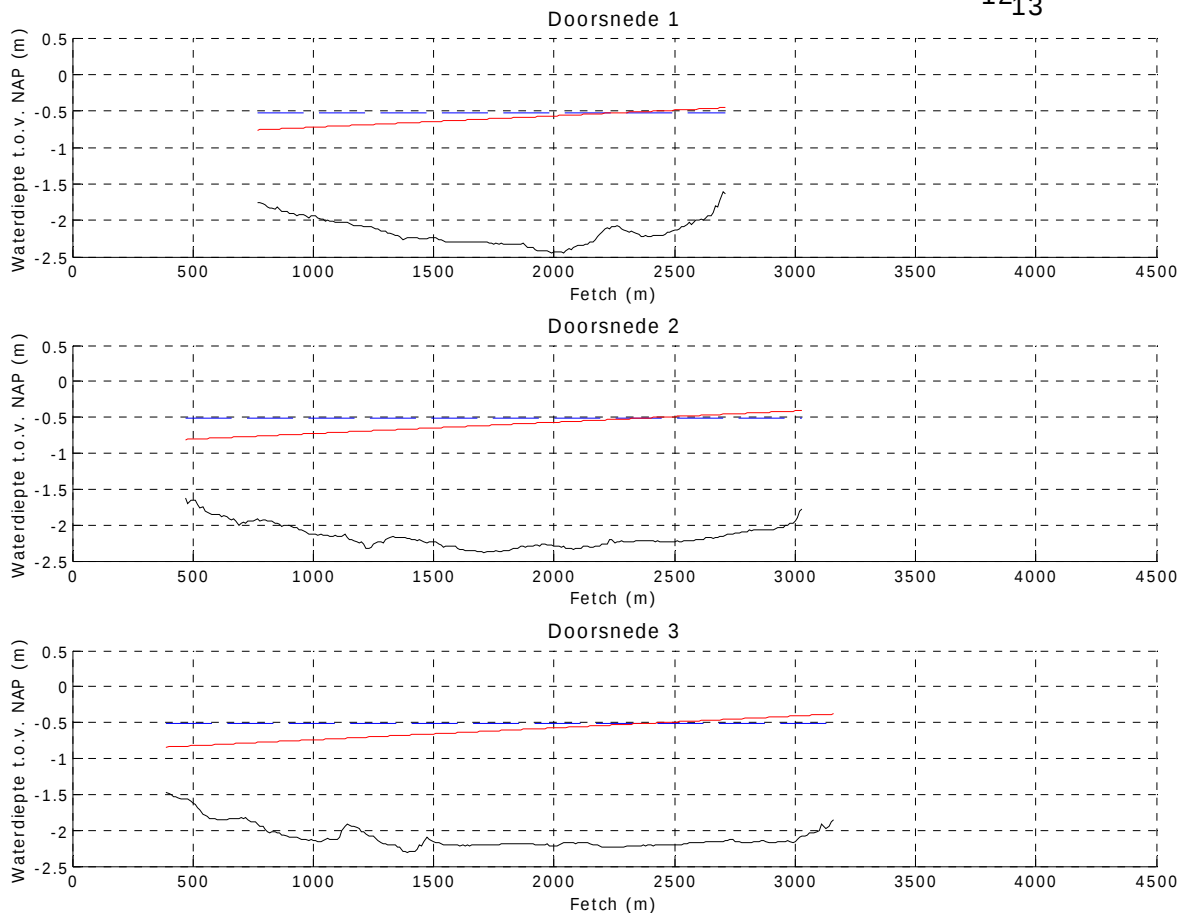
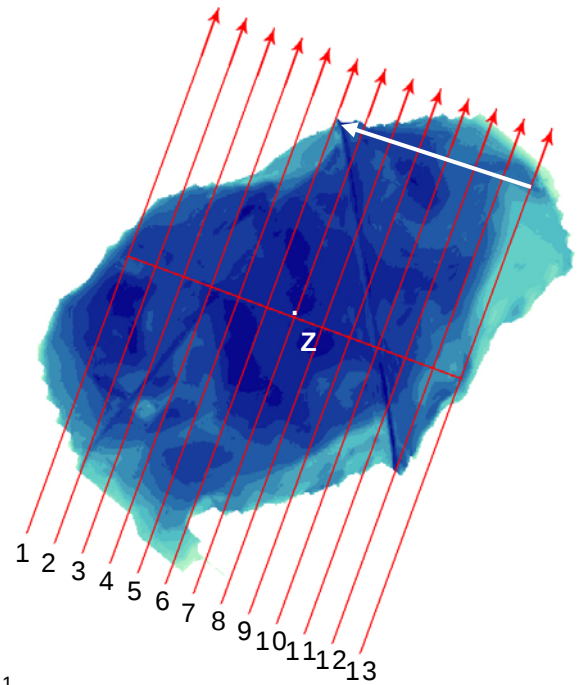
α = een schalingsfactor in de Weibull verdeling

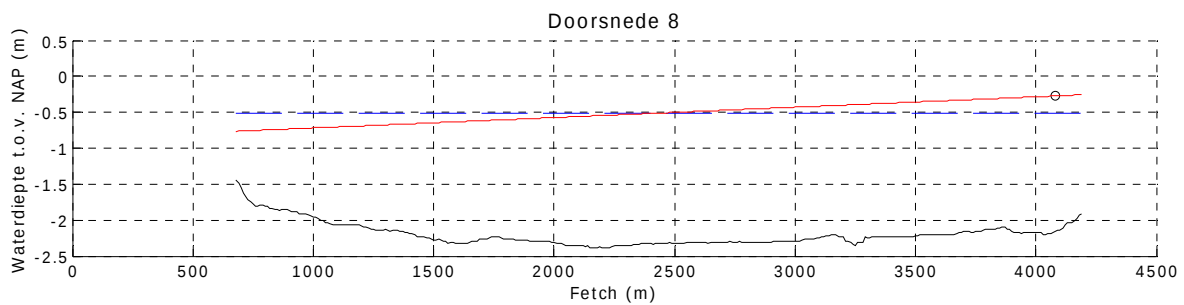
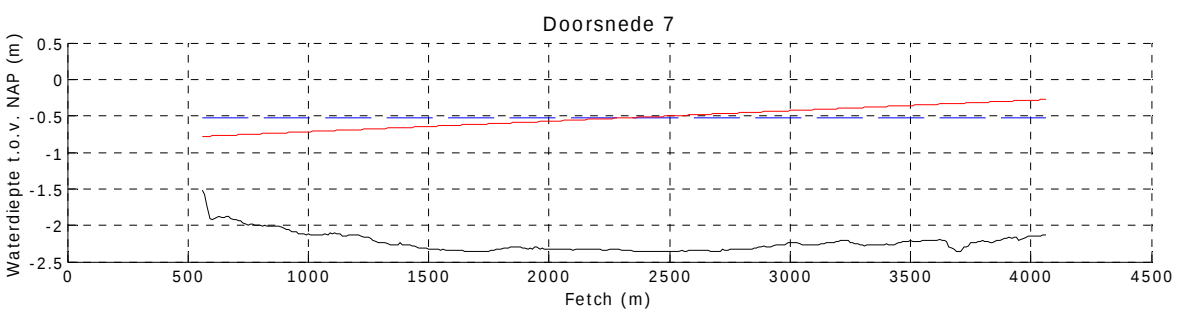
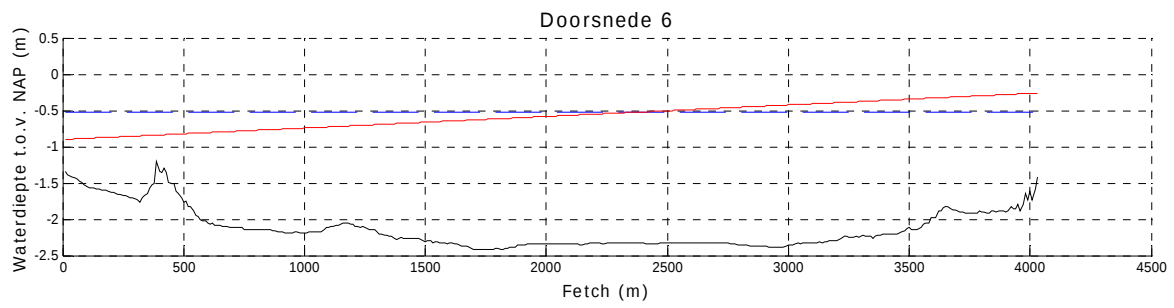
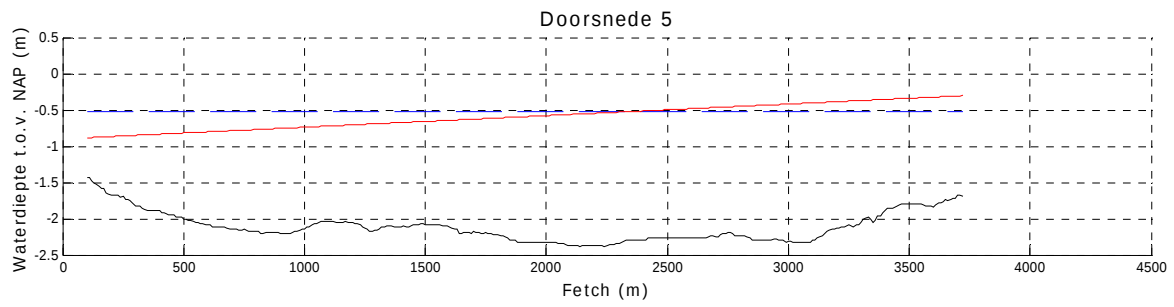
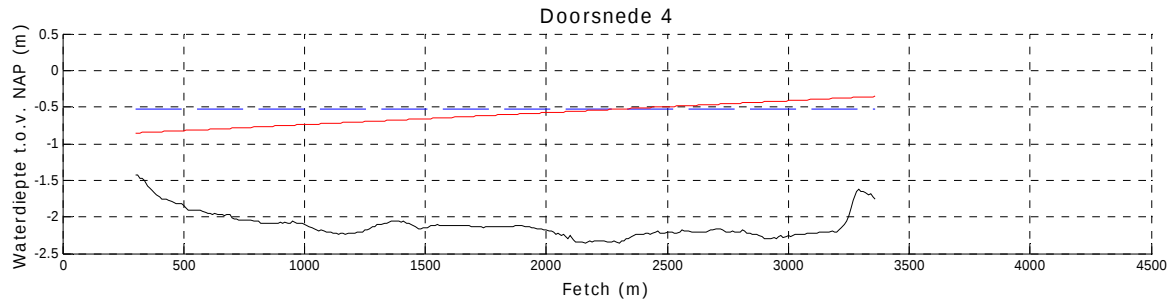
Appendix B Windopzet

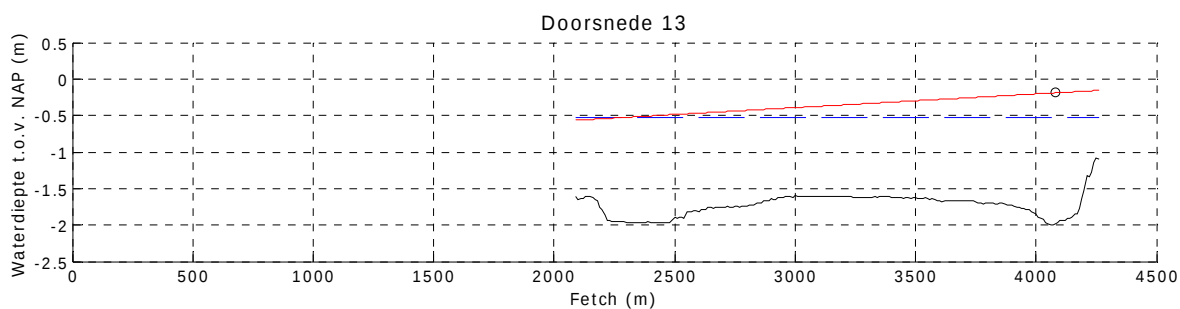
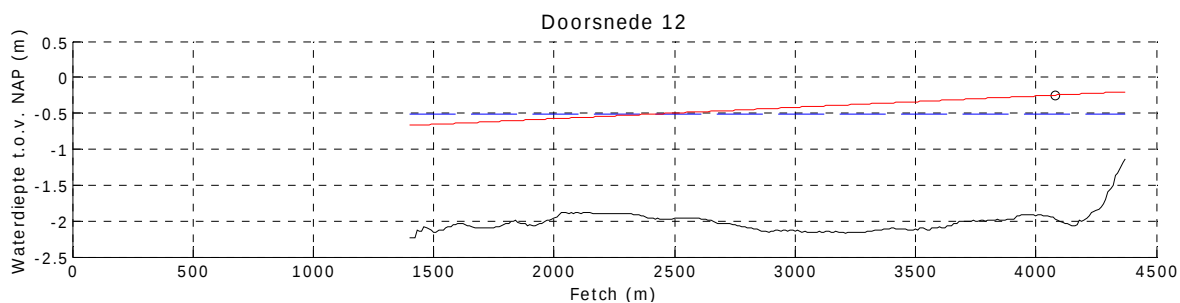
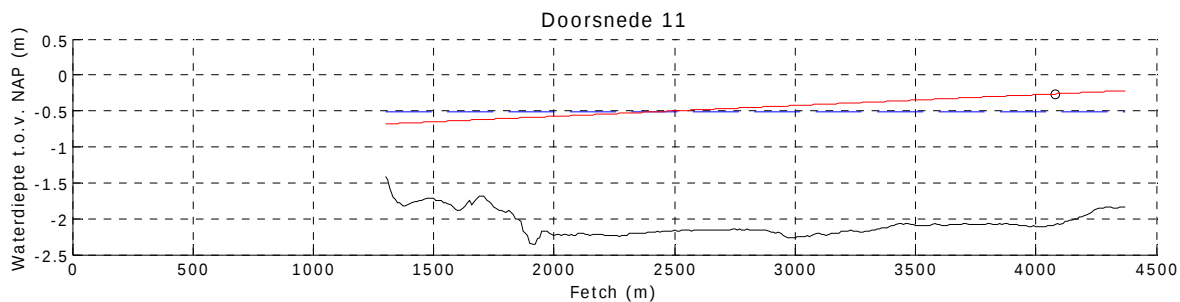
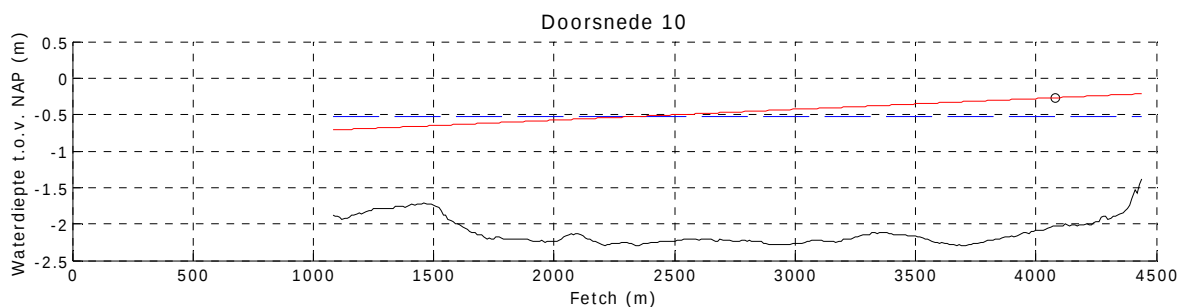
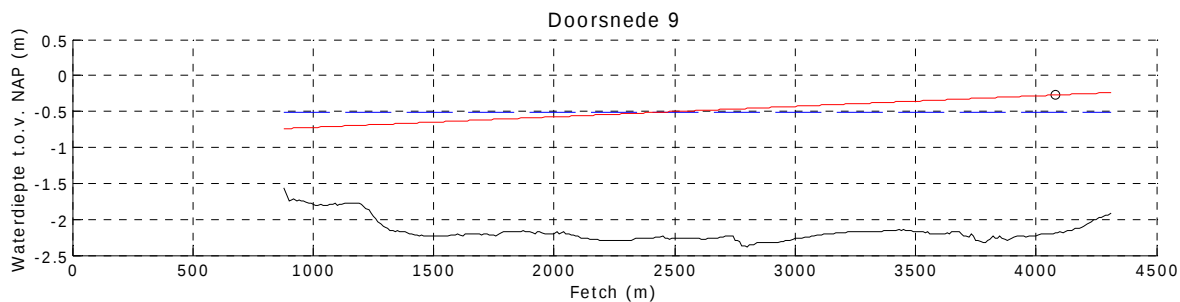
B.1 Wind uit richting 200°

De figuur hiernaast laat het Slotermeer zien, van links naar rechts is de windopzet voor de 13 doorsneden berekend. De doorsneden met windopzet zijn hieronder weergegeven. De lijn loodrecht op de windrichting is de lijn die door het zwaartepunt 'Z' gaat. Op deze plaats is geen waterstand- verhoging of verlaging.

De witte pijl geeft de plaats aan waar het meetpunt Woudsend zich bevindt. Deze pijl staat loodrecht op de windrichting en de plek waar de rode doorsnedelijnen de witte pijl snijdt is in onderstaande doorsneden weergegeven met een zwart rondje.

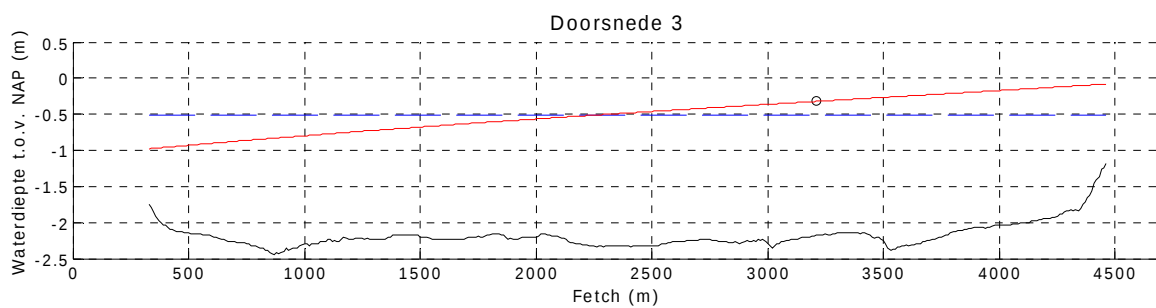
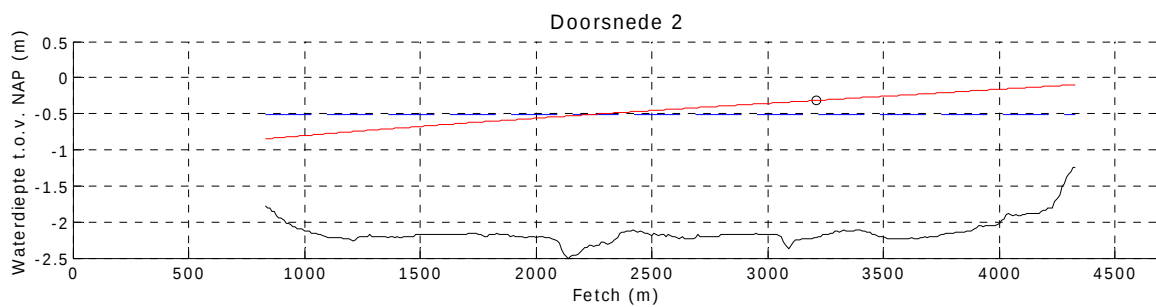
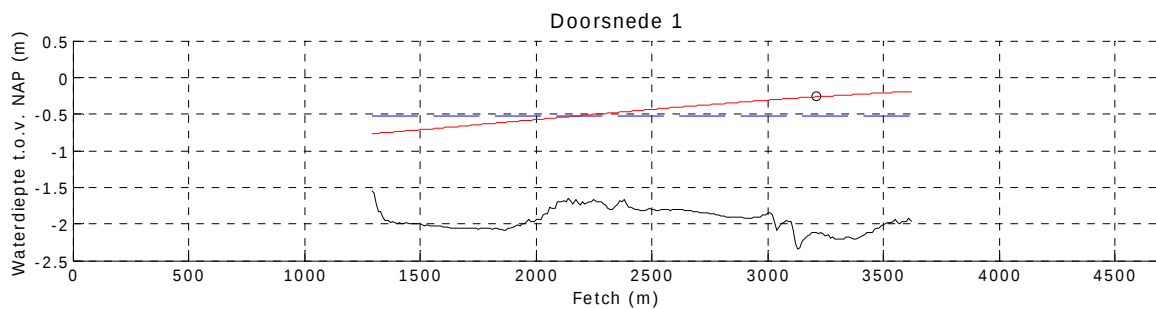
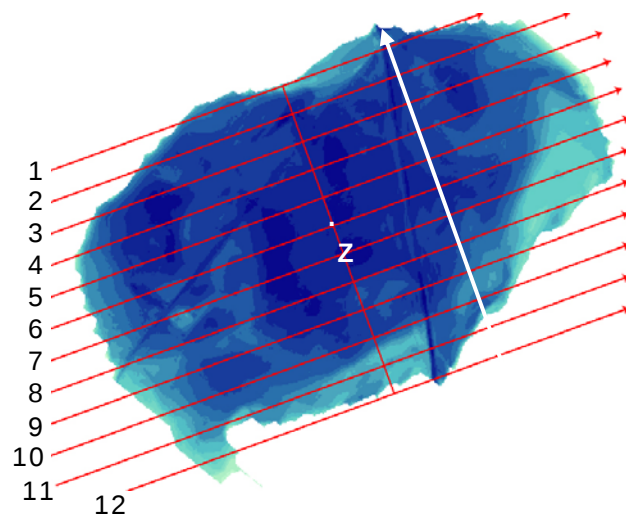


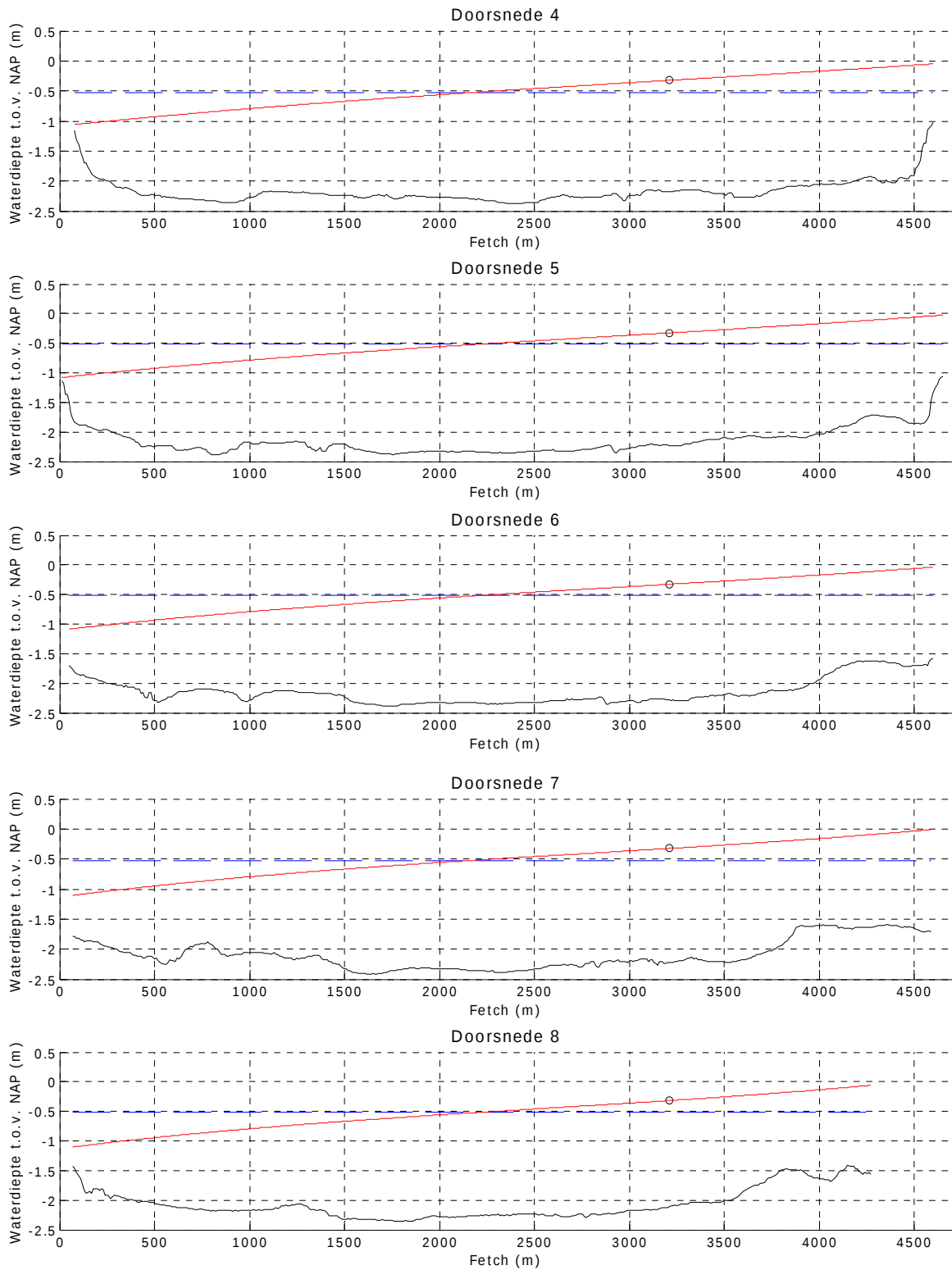


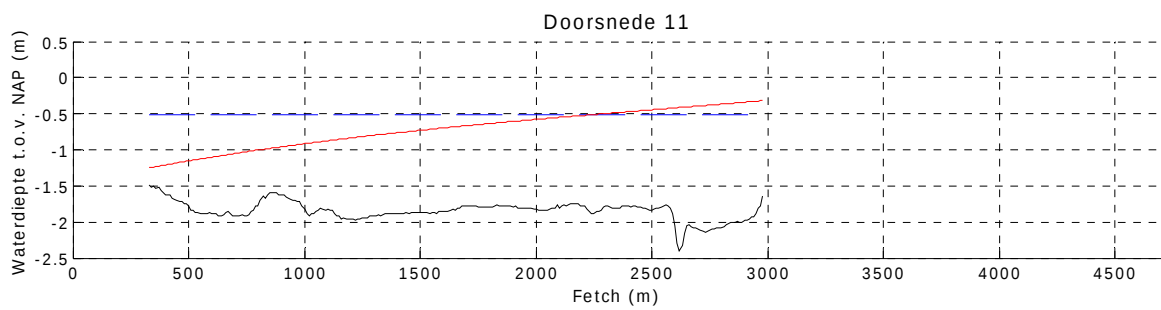
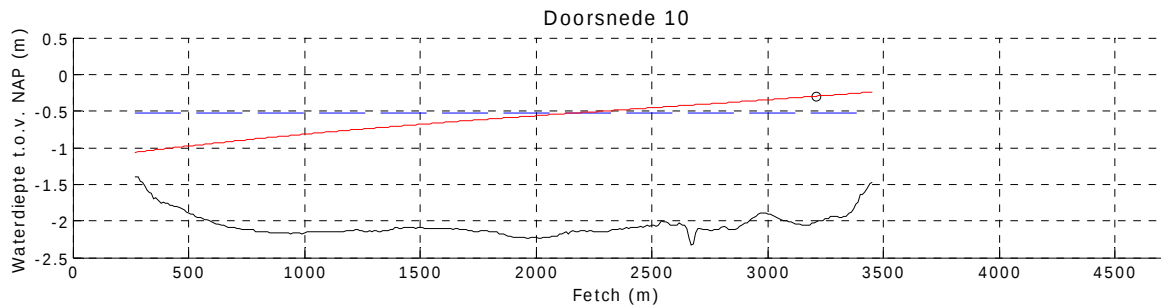
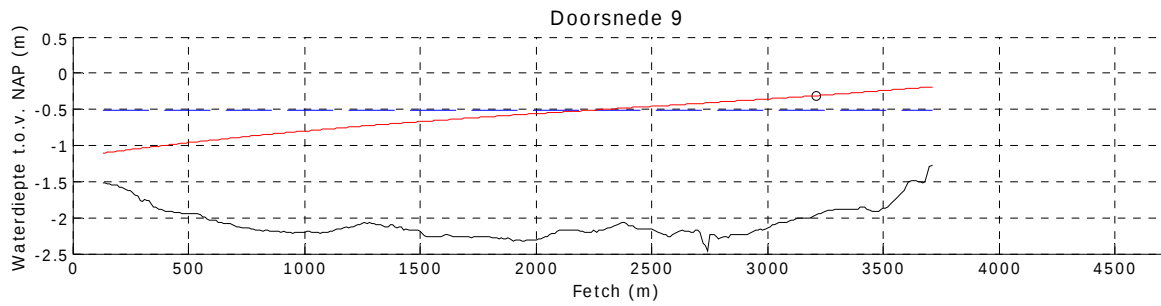


B.2 Wind uit richting 250°

Doorsnede 12 in de figuur hiernaast is niet als doorsnede berekend omdat deze lijn door een heel klein gedeelte van het meer loopt.

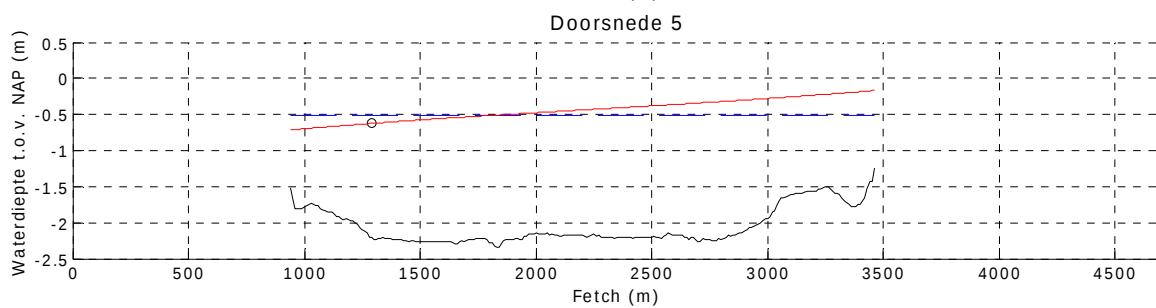
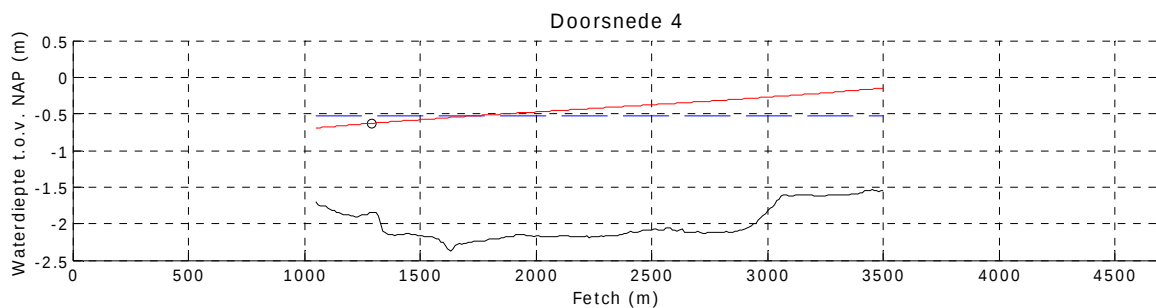
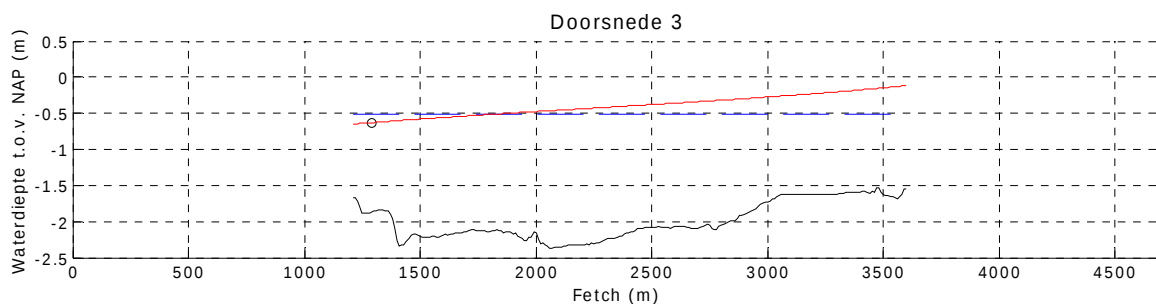
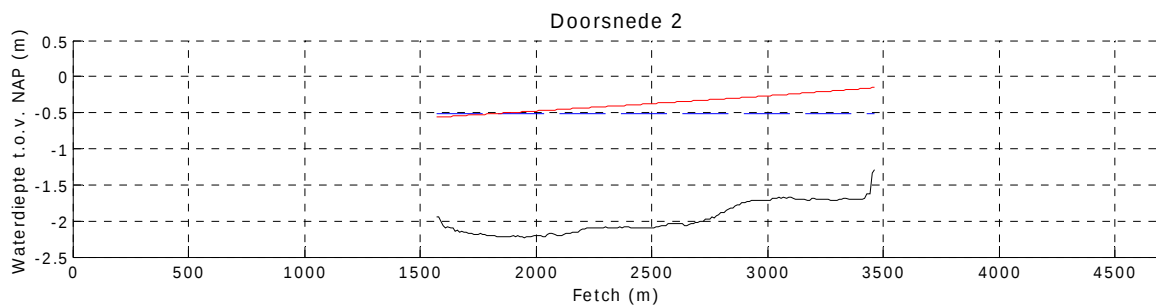
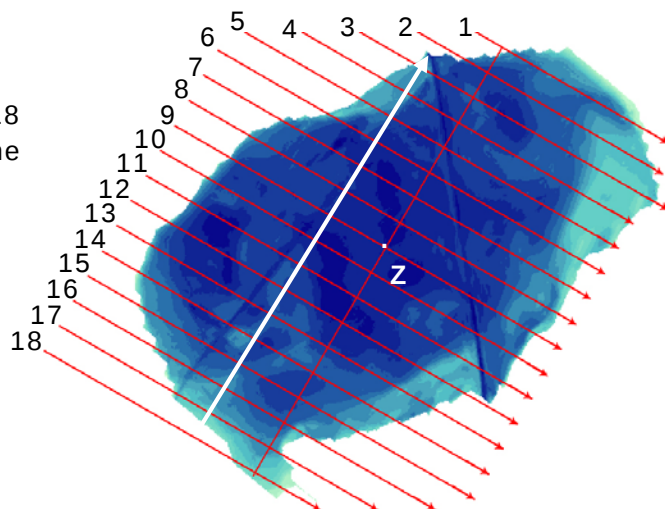


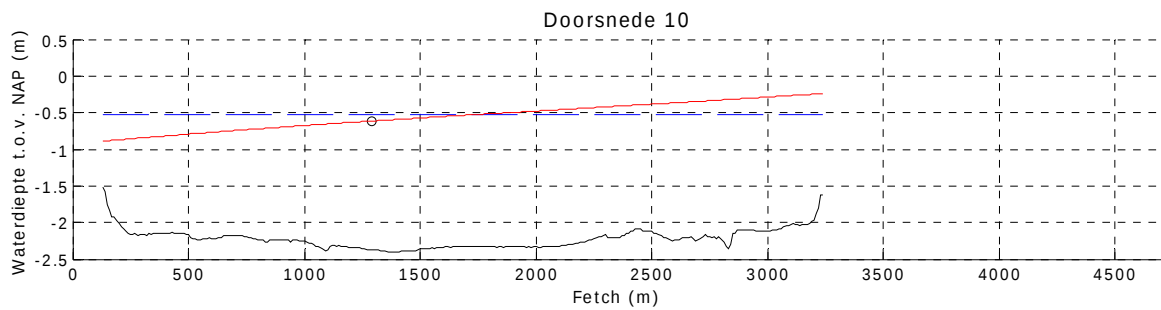
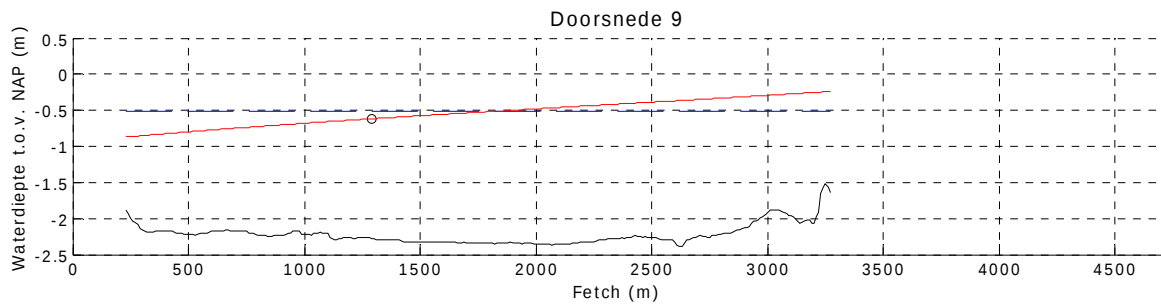
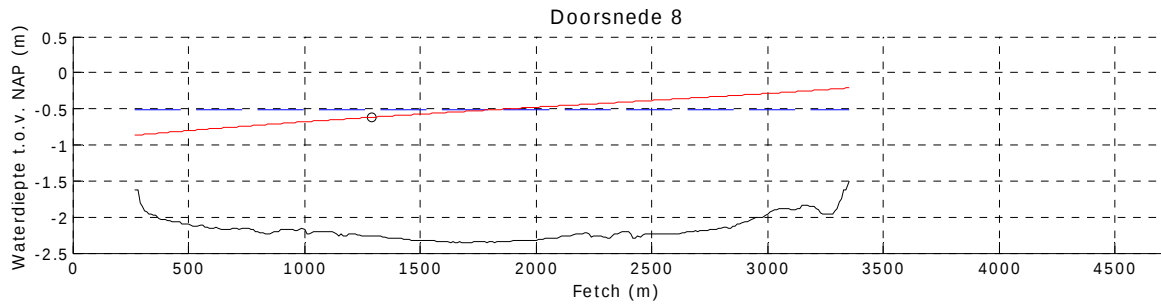
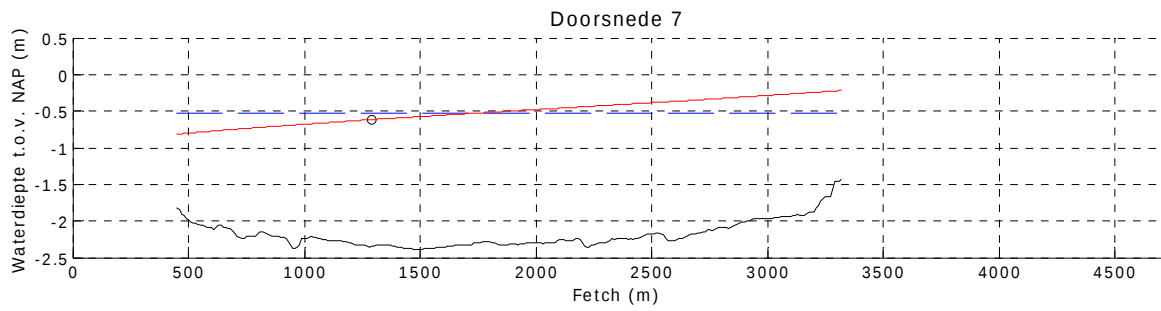
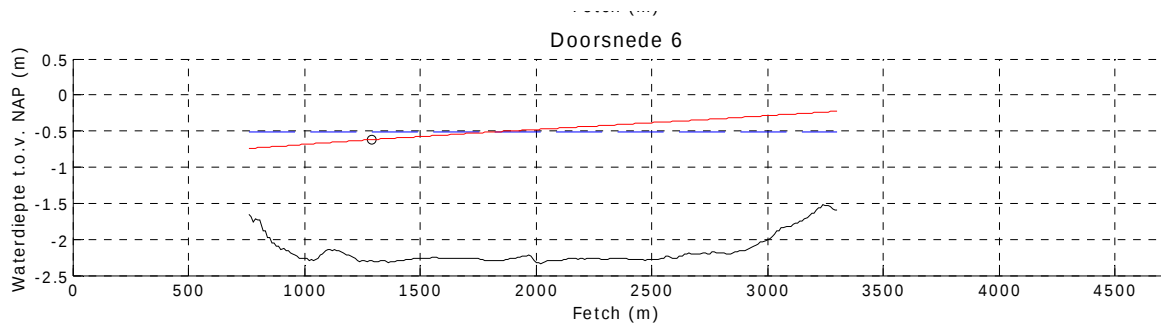


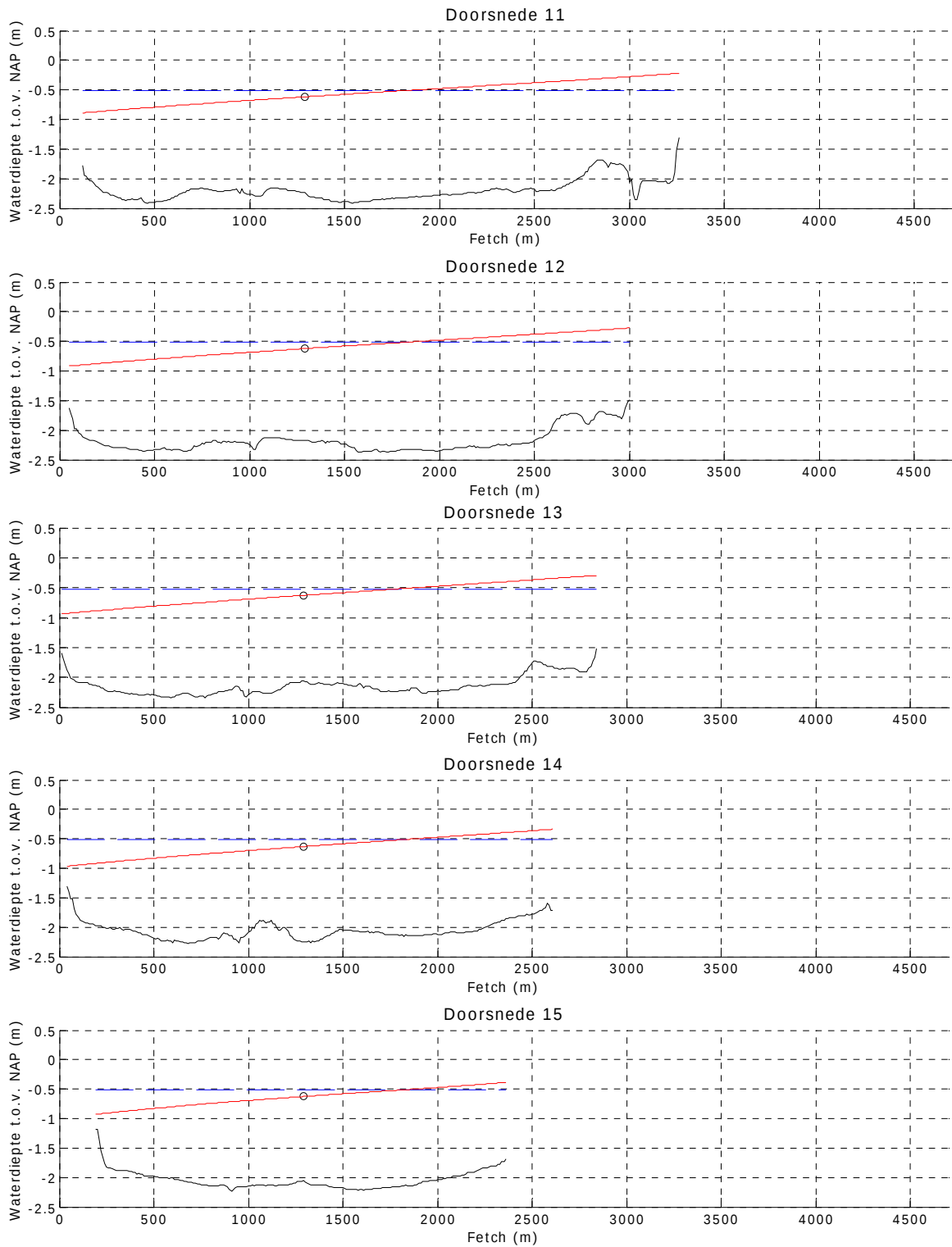


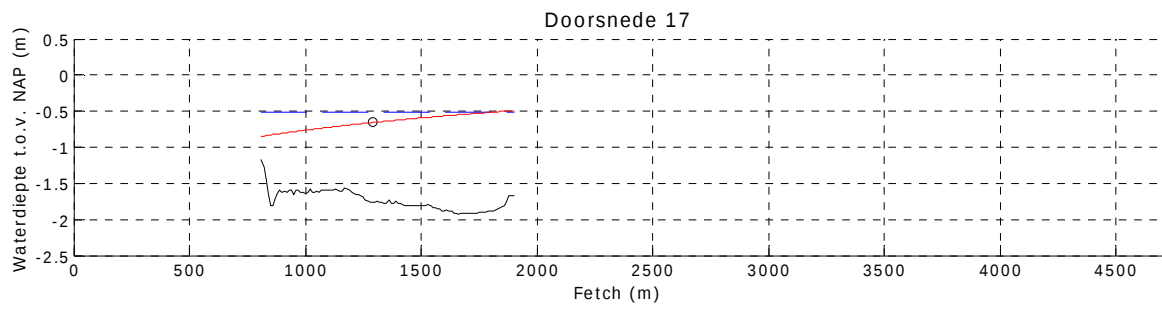
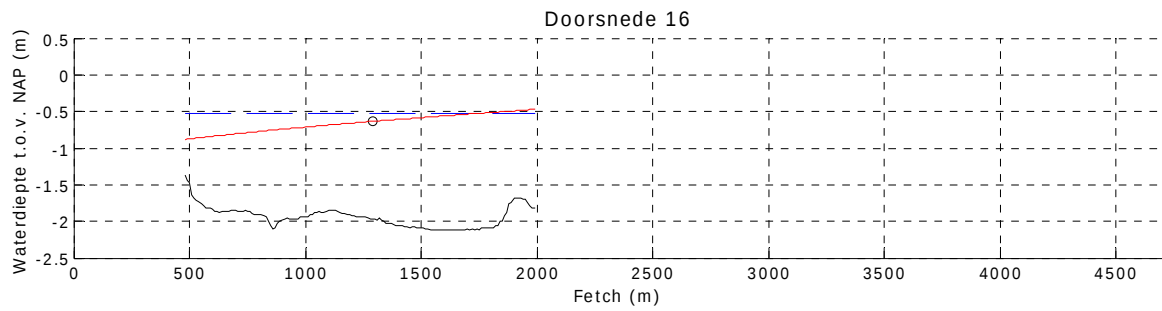
B.3 Wind uit richting 300°

Hier zijn de doorsneden 1 en 18 niet berekend vanwege de te kleine lengtes.

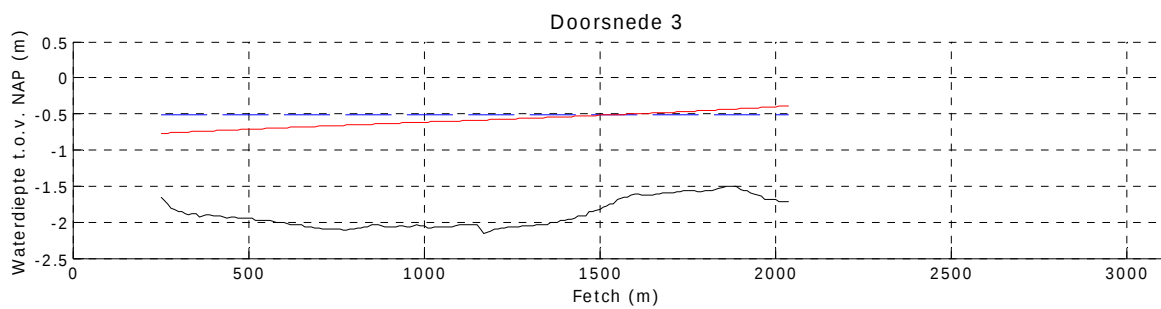
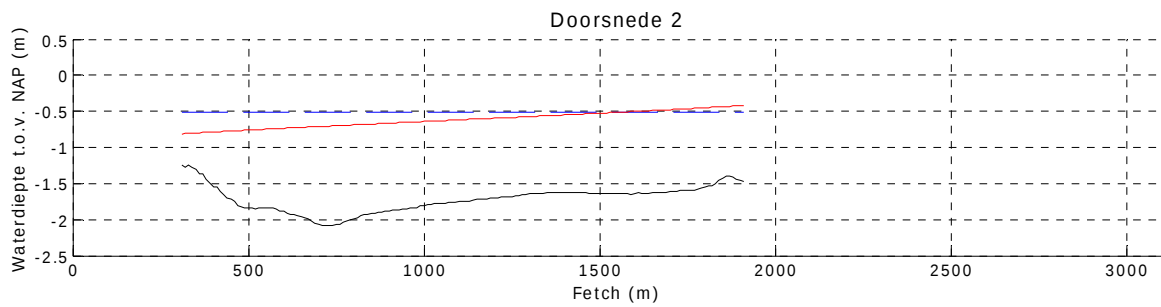
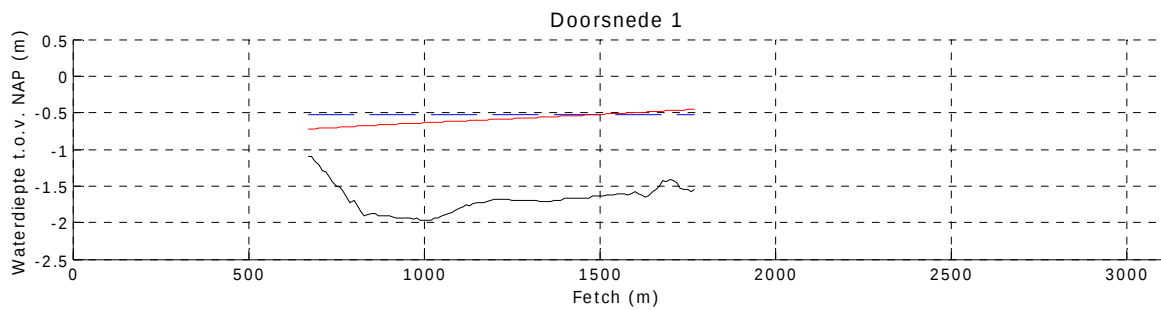
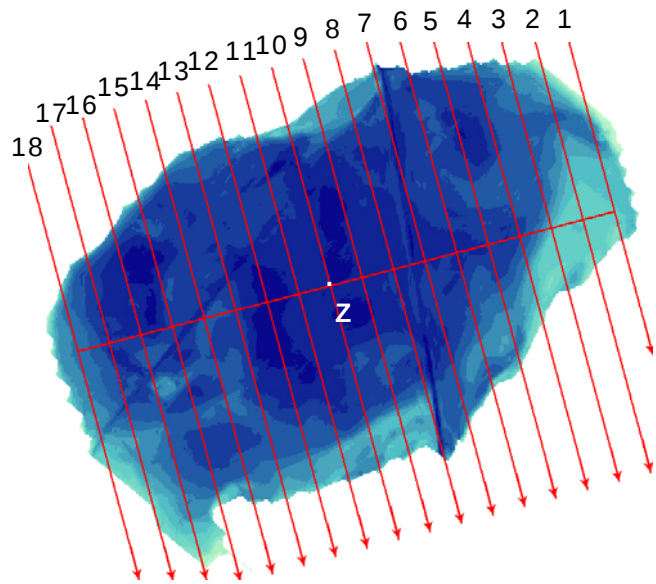


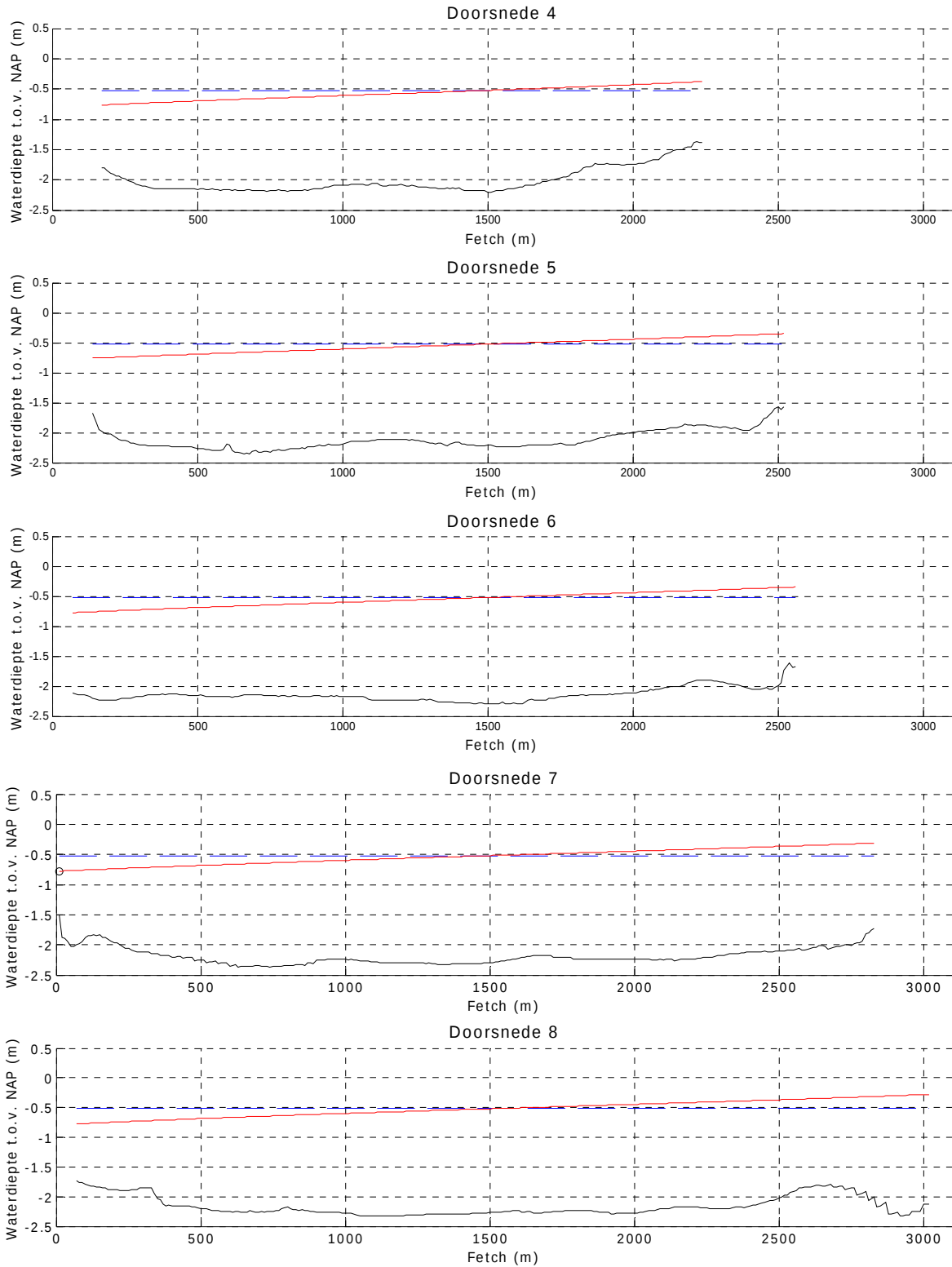


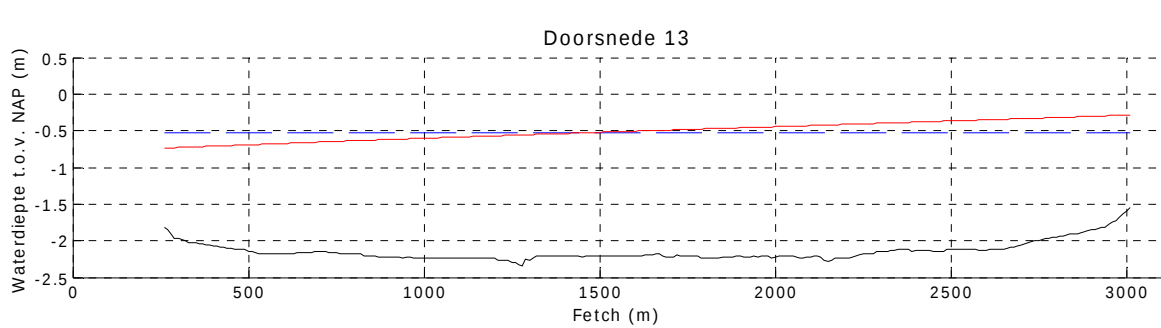
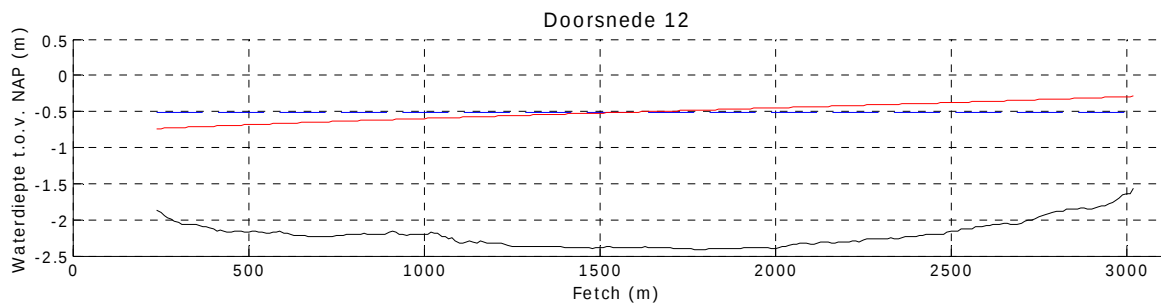
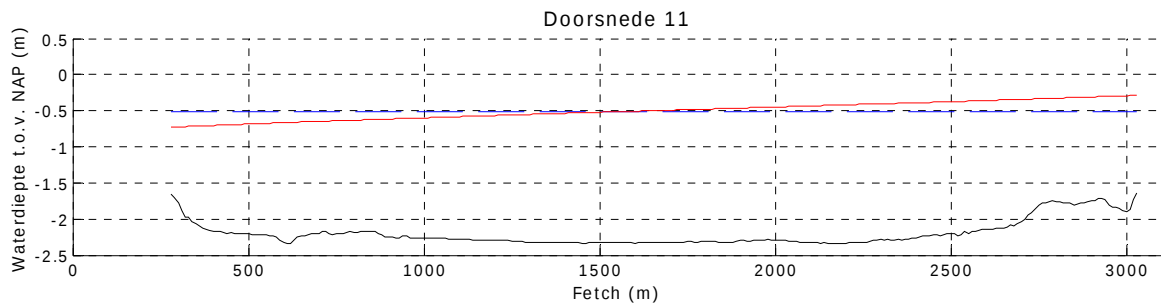
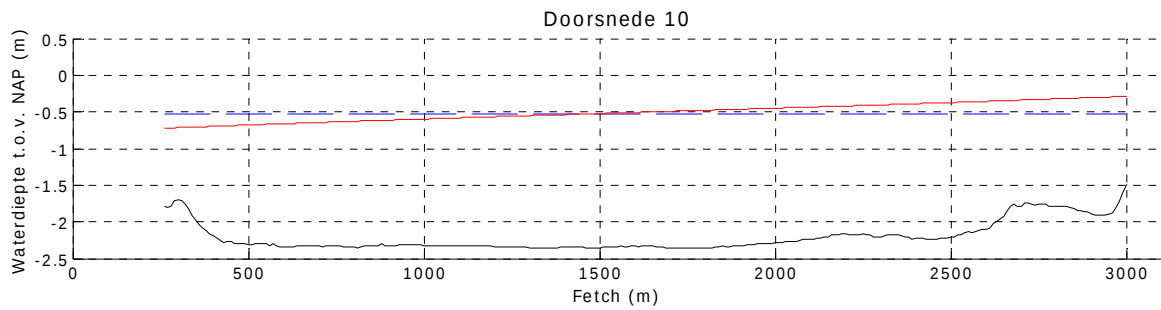
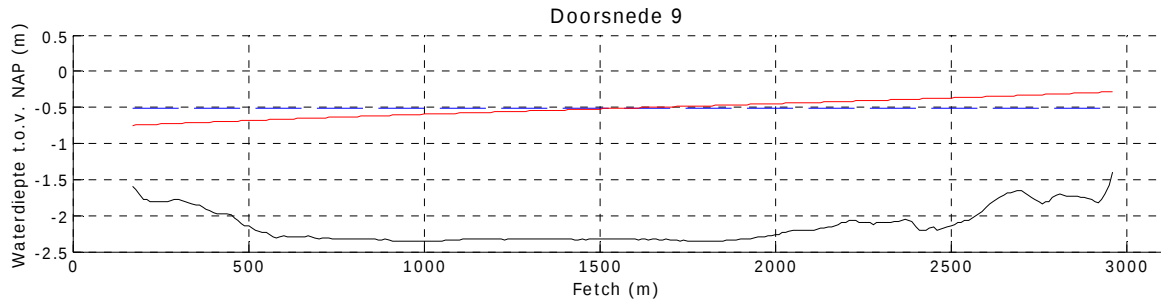


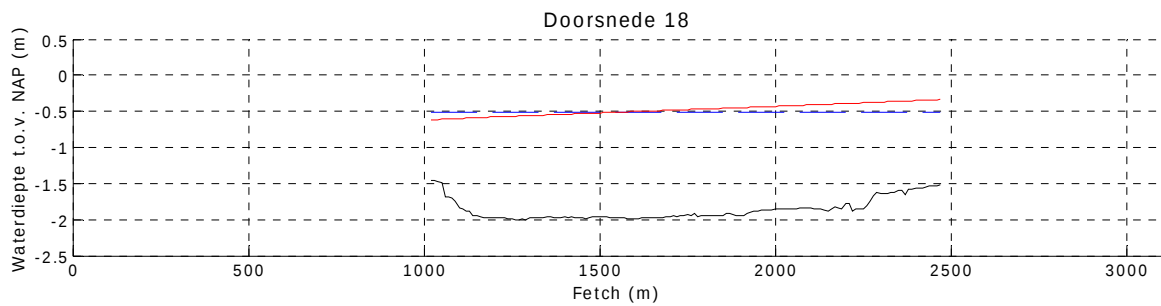
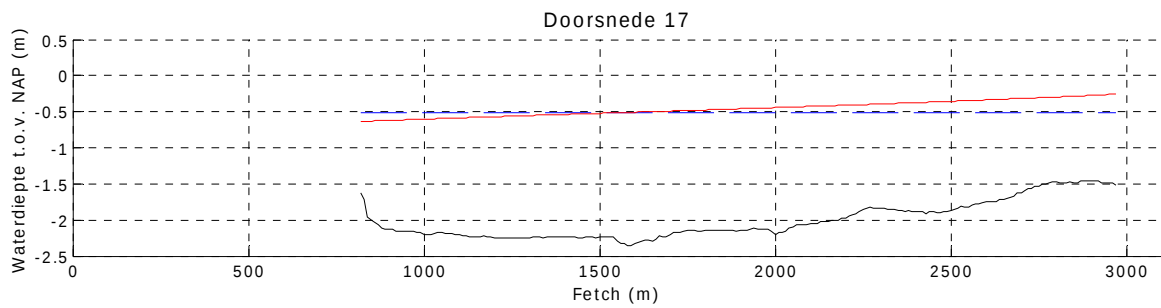
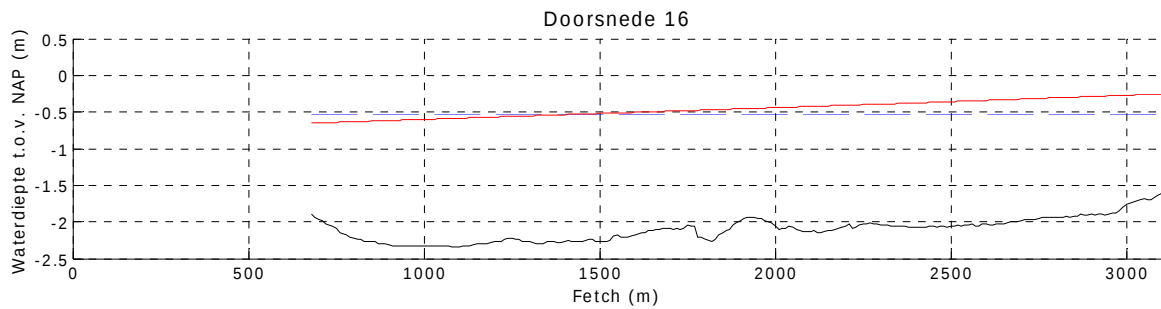
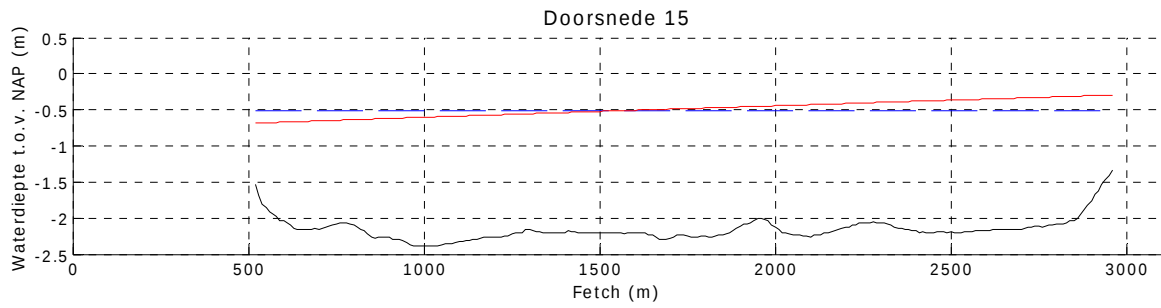
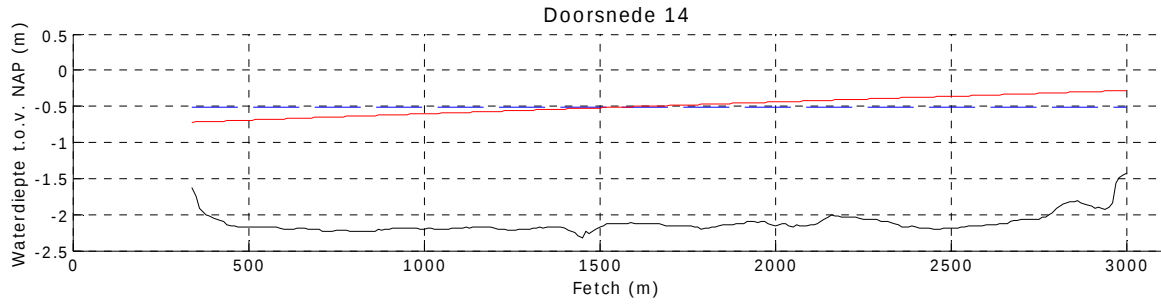


B.4 Wind uit richting 345°









Appendix C Matlab scripts

C.1 Jaarlijkse maxima verdeling, Gumbel

Het script hieronder is de berekening van de eens in de honderd jaar storm met de jaarlijks maxima verdeling.

```
clear all; clc;
figure(1), clf;

%Er zijn 42 windsnelheden in de overheersende windrichting tussen de 180
en 300 graden (255 graden gemiddeld)
X = [216.825 163.275 216.825 200.55 201.075 224.7 202.125 189 193.2
200.55 260.925 259.875 224.7 187.95 264.6 230.475 195.3 199.5 214.725
211.05 247.8 270.9 177.975 203.175 228.9 183.75 194.775 269.325 191.1
190.05 208.95 200.025 195.3 180.6 178.5 200.025 186.375 184.8 223.65
174.825 193.2 192.15];
X = X/10;
EX = mean(X);
StdX = std(X);
VarX = StdX^2;
A = EX;
B = StdX;

%Gumbel distribution en Return Period
for n = 1:42
    G(n) = exp(-exp(-(X(n)-A)/B));
    RPG(n) = 1/(1-G(n));
end

xx = 15:45;
%Polyfits
[P] = polyfit(X,RPG,2);
y = polyval(P,xx);
[Q] = polyfit(X,RPG,3);
yy = polyval(Q,xx);
[R] = polyfit(X,RPG,4);
yyy = polyval(R,xx);
[S] = polyfit(X,RPG,5);
yyyy = polyval(S,xx);

%correlatie
t = polyval(P,X);
r = corr2(t,RPG);
t = polyval(Q,X);
rr = corr2(t,RPG);
t = polyval(R,X);
rrr = corr2(t,RPG);
t = polyval(S,X);
rrrr = corr2(t,RPG);
```

```
%Welke waarde hoort bij 100?
j = 0;
jj = 15;
jjj = 0;
while (j<100 & jjj<1000)
    j = polyval(P,jj);
    jj = jj+0.01;
    jjj = jjj+0.01;
end
uw = jj-0.01;

k = 0;
kk = 15;
kkk = 0;
while (k<100 & kkk<1000)
    k = polyval(Q,kk);
    kk = kk+0.01;
    kkk = kkk+0.01;
end
uww = kk-0.01;

l = 0;
ll = 15;
lll = 0;
while (l<100 & lll<1000)
    l = polyval(R,ll);
    ll = ll+0.01;
    lll = lll+0.01;
end
uwww = ll-0.01;

m = 0;
mm = 15;
mmm = 0;
while (m<100 & mmm<1000)
    m = polyval(S,mm);
    mm = mm+0.01;
    mmm = mmm+0.01;
end
uwww = mm-0.01;
```

```
%plotten
plot(X,RPG,'o');
hold on;
plot(xx,y,'-rx');
hold on;
plot(xx,yy,'k-.');
hold on;
plot(xx,yyy,'b');
hold on;
plot(xx,yyyy,'g--');
hold on;
plot(uw,100,'O');
hold on;
plot(uww,100,'O');
hold on;
plot(uwww,100,'O');
hold on;
plot(uwwww,100,'O');
Title('Gumbel verdeling jaarlijkse maximum windsnelheden Leeuwarden op
+10m. (1961-2005)','FontSize',14);
Ylabel('Return Period (jaren)','FontSize',12);
Xlabel('Windsnelheid (m/s)','FontSize',12);
legend('meetwaarden',[ '2de orde polynoom: Uw ',num2str(uw),' m/s
corr.: ',num2str(r)],['3de orde polynoom: Uw ',num2str(uww),' m/s
corr.: ',num2str(rr)],['4de orde polynoom: Uw ',num2str(uwww),' m/s
corr.: ',num2str(rrr)],['5de orde polynoom: Uw ',num2str(uwwww),' m/s
corr.: ',num2str(rrrr)],2);
axis([15 45 0 105]);
grid on;
```

C.2 Gumbel verdeling over volledige dataset

```
clear all; clc;
figure(1), clf;

%Totaal is T, 1 is 180 - 220, 2 is 230 - 270, 3 is 280 - 320 en 4 is 330
- 360
X = 25:20:245;
XX = 25:20:225;
X = X/10;
XX = XX/10;
zz = 100; %jaar

CumT = [53283 118270 171369 205271 222404 230136 232865 233773 234042
234116 234139 234158 234160];
CumT2 = [53283 64987 53099 33902 17133 7732 2729 908 269 74 23 19 2];
Cum1 = [21730 46469 63203 73187 78092 79948 80555 80707 80761 80778
80782 80783 80783];
Cum12 = [21730 24739 16734 9984 4905 1856 607 152 54 17 4 1 0];
Cum2 = [13115 30792 47425 59784 66920 70500 71854 72321 72456 72493
72504 72516 72517];
Cum22 = [13115 17677 16633 12359 7136 3580 1354 467 135 37 11 12 1];
Cum3 = [9853 23177 36090 44192 47822 49573 50151 50395 50470 50488 50495
50499 50500];
Cum32 = [9853 13324 12913 8102 3630 1751 578 244 75 18 7 4 1];
Cum4 = [8585 17832 24651 28108 29570 30115 30305 30350 30355 30357 30358
30360 30360];
Cum42 = [8585 9247 6819 3457 1462 545 190 45 5 2 1 2 0];

somT = CumT(13);
som1 = Cum1(13);
som2 = Cum2(13);
som3 = Cum3(13);
som4 = Cum4(13);

for n = 2:12;
    NewP(n) = CumT(n)/somT;
    GT(n) = -log(log(1/NewP(n)));
    NewP(n) = Cum2(n)/som2;
    G2(n) = -log(log(1/NewP(n)));
    NewP(n) = Cum3(n)/som3;
    G3(n) = -log(log(1/NewP(n)));
end

for n = 2:11;
    NewP(n) = Cum1(n)/som1;
    G1(n) = -log(log(1/NewP(n)));
    NewP(n) = Cum4(n)/som4;
    G4(n) = -log(log(1/NewP(n)));
end

%Polyfits
xx = 0:17;
[P] = polyfit(GT,X,1);
yT = polyval(P,xx);
[Q] = polyfit(G1,XX,1);
y1 = polyval(Q,xx);
[R] = polyfit(G2,X,1);
```

```
y2 = polyval(R,xx);
[S] = polyfit(G3,X,1);
y3 = polyval(S,xx);
[T] = polyfit(G4,XX,1);
y4 = polyval(T,xx);

%Uws berekenen
z = somT-CumT2(1)-CumT2(2);
UwT = P(2)-(P(1)*(log(log(z/(z-(1/zz))))));
z = som1-Cum12(1)-Cum12(2);
Uw1 = Q(2)-(Q(1)*(log(log(z/(z-(1/zz))))));
z = som2-Cum22(1)-Cum22(2);
Uw2 = R(2)-(R(1)*(log(log(z/(z-(1/zz))))));
z = som3-Cum32(1)-Cum32(2);
Uw3 = S(2)-(S(1)*(log(log(z/(z-(1/zz))))));
z = som4-Cum42(1)-Cum42(2);
Uw4 = T(2)-(T(1)*(log(log(z/(z-(1/zz))))));

%plotten
hold on;
plot(xx,yT,'-k');
plot(xx,y1,'--r');
plot(xx,y2,'-.');
plot(xx,y3,'-xm');
plot(xx,y4,'-og');
scatter(GT,X,'xk');
scatter(G1,XX,'rx');
scatter(G2,X,'xb');
scatter(G3,X,'xm');
scatter(G4,XX,'xg');
axis([0 20 0 40]);
title({'Gumbel verdeling winddata Leeuwarden +10m (1961 t/m 2005)';'Uw  
berekend bij kans van één keer in de 100 jaar (x=0,01)'},'fontsize',14);
xlabel('Gumbel reduced variable','fontsize',12);
ylabel('Windsnelheid (m/s)','fontsize',12);
legend(['Alle richtingen (y = ',num2str(P(1)),'ln(x) +  
' ,num2str(P(2)),') Uw = ',num2str(UwT),' m/s'], ['180 tot 220 (y =  
' ,num2str(Q(1)),'ln(x) + ',num2str(Q(2)),') Uw = ',num2str(Uw1),'  
m/s'], ['230 tot 270 (y = ',num2str(R(1)),'ln(x) +  
' ,num2str(R(2)),') Uw = ',num2str(Uw2),' m/s'], ['280 tot 320 (y =  
' ,num2str(S(1)),'ln(x) + ',num2str(S(2)),') Uw = ',num2str(Uw3),'  
m/s'], ['330 tot 360 (y = ',num2str(T(1)),'ln(x) +  
' ,num2str(T(2)),') Uw = ',num2str(Uw4),' m/s'],2);
grid on;
```

C.3 Exponentiele verdeling over volledige dataset

```
clear all; clc;
figure(1), clf;

%Totaal is T, 1 is 180 - 220, 2 is 230 - 270, 3 is 280 - 320 en 4 is 330
- 360
X = 25:20:245;
XX = 25:20:225;
X = X/10;
XX = XX/10;

CumT = [53283 118270 171369 205271 222404 230136 232865 233773 234042
234116 234139 234158 234160];
Cum1 = [21730 46469 63203 73187 78092 79948 80555 80707 80761 80778
80782 80783 80783];
Cum2 = [13115 30792 47425 59784 66920 70500 71854 72321 72456 72493
72504 72516 72517];
Cum3 = [9853 23177 36090 44192 47822 49573 50151 50395 50470 50488 50495
50499 50500];
Cum4 = [8585 17832 24651 28108 29570 30115 30305 30350 30355 30357 30358
30360 30360];

somT = CumT(13);
som1 = Cum1(13);
som2 = Cum2(13);
som3 = Cum3(13);
som4 = Cum4(13);

DUUR = 2;
MT = somT/(365*24/DUUR);
M1 = som1/(365*24/DUUR);
M2 = som2/(365*24/DUUR);
M3 = som3/(365*24/DUUR);
M4 = som4/(365*24/DUUR);

for n = 1:12;
    ET(n) = (somT-CumT(n))/MT;
    E2(n) = (som2-Cum2(n))/M2;
    E3(n) = (som3-Cum3(n))/M3;
end

for n = 1:11;
    E1(n) = (som1-Cum1(n))/M1;
    E4(n) = (som4-Cum4(n))/M4;
end
```

```
%polynomen
xx = 1:12000;

%Polyfits

logpT = polyfit(log10(ET),X,1);
logp1 = polyfit(log10(E1),XX,1);
logp2 = polyfit(log10(E2),X,1);
logp3 = polyfit(log10(E3),X,1);
logp4 = polyfit(log10(E4),XX,1);
%logpred1 = polyval(logp1,ET);

%Uws berekenen
UwT = (logpT(1)*log(1/100))+(logpT(2));
Uw1 = (logp1(1)*log(1/100))+(logp1(2));
Uw2 = (logp2(1)*log(1/100))+(logp2(2));
Uw3 = (logp3(1)*log(1/100))+(logp3(2));
Uw4 = (logp4(1)*log(1/100))+(logp4(2));

%plotten
semilogx(0);
hold on;
%plot(logpred1,X,'-k');
scatter(ET,X,'xk');
scatter(E1,XX,'rx');
scatter(E2,X,'xb');
scatter(E3,X,'xm');
scatter(E4,XX,'xg');
axis([0.001 12000 0 35]);
set(gca,'XDir','reverse');
title('Exponentiele verdeling winddata Leeuwarden +10m (1961 t/m
2005)','fontsize',16);
xlabel('Exponentiele waarden','fontsize',14);
ylabel('Windsnelheid (m/s)','fontsize',14);
%legend(['Alle richtingen (y = ',num2str(P(1)),'ln(x) +
',num2str(P(2)),') Uw = ',num2str(UwT),' m/s'], ['180 tot 220 (y =
',num2str(Q(1)),'ln(x) + ',num2str(Q(2)),') Uw = ',num2str(Uw1),'
m/s'], ['230 tot 270 (y = ',num2str(R(1)),'ln(x) +
',num2str(R(2)),') Uw = ',num2str(Uw2),' m/s'], ['280 tot 320 (y =
',num2str(S(1)),'ln(x) + ',num2str(S(2)),') Uw = ',num2str(Uw3),'
m/s'], ['330 tot 360 (y = ',num2str(T(1)),'ln(x) +
',num2str(T(2)),') Uw = ',num2str(Uw4),' m/s'],2);
grid on;
```

C.4 Windopzetberekening in Matlab

Berekening van de windopzet voor 2 stramienlijnen in Matlab.

```
clear all; clc;
figure(1), clf;

zwaartepunt = 2210;
woudsend = 3210;
Uwind = 31.5;
g = 9.81;
ROlucht = 1.2;
ROwater = 1000;
Cw = 0.003;
dx = 10;
t = 0;
streefpeil = 0.52-0.20;
c = (ROlucht/ROwater)*Cw;

%lijn 1
d1 = load('250-1-d.txt');
dd1 = d1';
d1 = -d1';
d1 = d1-streefpeil;
B1 = load('250-1-b.txt');
B1 = B1';
x1 = load('250-1-F.txt');
x1 = x1';
xg1 = x1;
xexcell = xg1';
aa1 = size(x1);
z1 = aa1(2);
xmin1 = x1(1);
for n = 1:z1;
    x1(n) = x1(n)-xmin1+10;
end
F1 = z1*dx;
i1 = zeros(size(x1));
w1 = zeros(size(x1));
```

```
%lijn 2
d2 = load('250-2-d.txt');
dd2 = d2';
d2 = -d2';
d2 = d2-streefpeil;
B2 = load('250-2-b.txt');
B2 = B2';
x2 = load('250-2-F.txt');
x2 = x2';
xg2 = x2;
xexcel2 = xg2';
aa2 = size(x2);
z2 = aa2(2);
xmin2 = x2(1);
for n = 1:z2;
    x2(n) = x2(n)-xmin2+10;
end
F2 = z2*dx;
i2 = zeros(size(x2));
w2 = zeros(size(x2));

%REKENEN 1
nn1 = ((zwaartepunt-xg1(1))/dx);
i1(nn1)=(c*Uwind^2)/(g*d1(nn1));
for n = nn1:(z1-1);
    i1(n+1) = (c*Uwind^2)/(g*(d1(n+1)+w1(n)));
    w1(n+1) = w1(n) + (i1(n)*dx*(B1(n-1)/B1(n)));
end

d1 = fliplr(d1);
B1 = fliplr(B1);
i1 = fliplr(i1);
w1 = fliplr(w1);

nnn1 = z1-(nn1-1);
i1(nnn1)=-((c*Uwind^2)/(g*d1(nnn1)));
for n = nnn1:(z1-1);
    i1(n+1) = -((c*Uwind^2)/(g*(d1(n+1)+w1(n))));
    w1(n+1) = w1(n) + (i1(n)*dx*(B1(n-1)/B1(n)));
end

d1 = fliplr(d1);
B1 = fliplr(B1);
i1 = fliplr(i1);
w1 = fliplr(w1);
w1 = w1 - streefpeil;
```

```
%REKENEN 2
nn2 = ((zwaartepunt-xg2(1))/dx);
i2(nn2)=(c*Uwind^2)/(g*d2(nn2));
for n = nn2:(z2-1);
    i2(n+1) = (c*Uwind^2)/(g*(d2(n+1)+w2(n)));
    w2(n+1) = w2(n) + (i2(n)*dx*(B2(n-1)/B2(n)));
end

d2 = fliplr(d2);
B2 = fliplr(B2);
i2 = fliplr(i2);
w2 = fliplr(w2);
nnn2 = z2-(nn2-1);
i2(nnn2)=-((c*Uwind^2)/(g*d2(nnn2)));
for n = nnn2:(z2-1);
    i2(n+1) = -((c*Uwind^2)/(g*(d2(n+1)+w2(n))));
    w2(n+1) = w2(n) + (i2(n)*dx*(B2(n-1)/B2(n)));
end

d2 = fliplr(d2);
B2 = fliplr(B2);
i2 = fliplr(i2);
w2 = fliplr(w2);

w2 = w2 - streefpeil;

%FITTEN

[P] = polyfit(xg1,w1,3);
yy1 = polyval(P,xg1);
wexcell = yy1';
[P] = polyfit(xg2,w2,3);
yy2 = polyval(P,xg2);
wexcel2 = yy2';

%PLOTTEN
subplot(3,1,1);
hold on;
a = [xg1(1) xg1(z1)];
b = [-streefpeil -streefpeil];
plot(woudsend,yy1(((woudsend-xg1(1))/dx)+1),'ok');
plot(a,b,'--');
plot(xg1,yy1,'r');
plot(xg1,ddl,'k');
axis([0 4700 -2.5 0.5]);
title('Doorsnede 1','fontname','verdana','fontsize',14);
xlabel('Fetch (m)','fontname','verdana','fontsize',12);
ylabel('Waterdiepte t.o.v. NAP(m)','fontname','verdana','fontsize',12);
grid on;
```

```
subplot(3,1,2);
hold on;
a = [xg2(1) xg2(z2)];
b = [-streefpeil -streefpeil];
plot(woudsend,yy2((woudsend-xg2(1))/dx)+1,'ok');
plot(a,b,'--');
plot(xg2,yy2,'r');
plot(xg2,dd2,'k');
axis([0 4700 -2.5 0.5]);
title('Doorsnede 2','fontname','verdana','fontsize',14);
xlabel('Fetch (m)','fontname','verdana','fontsize',12);
ylabel('Waterdiepte t.o.v. NAP(m)','fontname','verdana','fontsize',12);
grid on;
```