

Project : Toepassingsgebied PROMOTOR
Datum : 26 januari 2015
Onderwerp : Memo toepassingsgebied PROMOTOR
Van : HKV
Aan : STOWA

1 Inleiding

Voor regionale keringen geldt dat het gebruik van PROMOTOR in beginsel de standaard aanpak is voor de probabilistische afleiding van hydraulische randvoorwaarden. Gebleken is dat er behoefte is aan duidelijkheid over de (impliciete) uitgangspunten die worden toegepast in PROMOTOR of in de stap voorafgaand aan PROMOTOR. Ook bestaat er behoefte aan inzicht in welke situaties PROMOTOR een goed hulpmiddel is en wanneer een maatwerk oplossing een verantwoorde vereenvoudiging is, voor zowel de probabilistische afleiding van de hydraulische randvoorwaarden als voor de hoogtetoets.

Daarom heeft HKV in opdracht van de STOWA een beknopt onderzoek uitgevoerd, dat beschreven is in deze memo. De aanleiding van het onderzoek, is het PROMOTOR onderzoek dat Deltares heeft uitgevoerd in opdracht van Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (*Maatgevende waterstanden en benodigde kruinhoogtes voor regionale keringen, Deltares 2013*) en de aanvullende reactie van HKV [lijn in water](#) hier op. Daarop is reactie gekomen van enkele leden van de begeleidingsgroep van de STOWA. Resultaat van de discussie is dat gesteld is dat PROMOTOR in beginsel de standaard aanpak is voor de probabilistische afleiding van hydraulische randvoorwaarden. Lokaal kan echter wel, na overleg met de provincie, worden afgeweken van de hydraulische randvoorwaarden en de hoogtetoets.

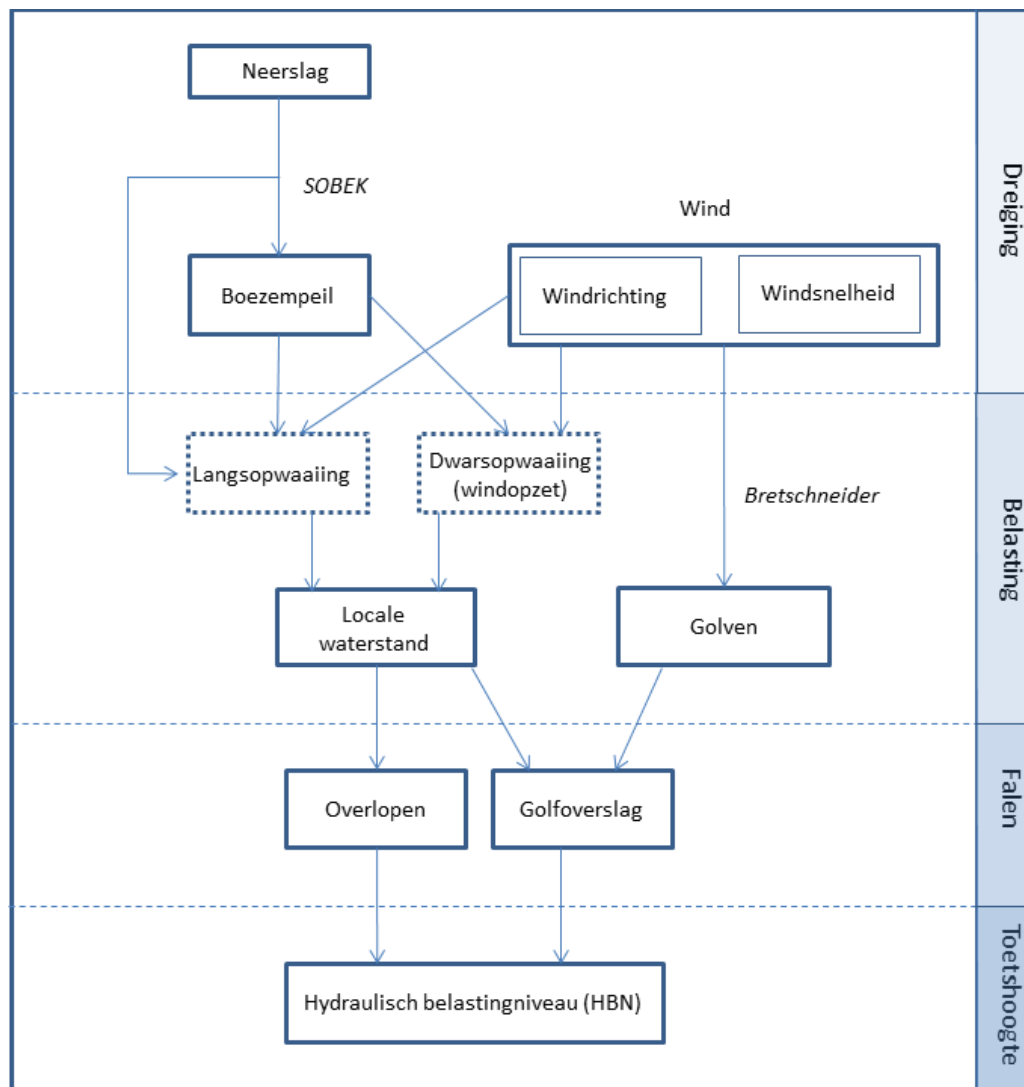
In deze memo wordt ingegaan op de wijze waarop PROMOTOR op hoofdlijnen werkt (Hoofdstuk 2) en welke belangrijke uitgangspunten hierbij een rol spelen. Dit is onderzocht in twee cases, die in Hoofdstuk 3 samengevat zijn. De uitgebreide beschrijving van de cases is in de bijlagen (Hoofdstuk 4) opgenomen.

2 Wat is PROMOTOR?

PROMOTOR is een rekenprogramma dat het hydraulisch belastingniveau (benodigde kruinhoogte) bij een opgegeven normfrequentie berekent. Het programma is op dit moment met name van belang voor de toets op hoogte van keringen. Bij berekening van de hydraulische belasting worden onderstaande variabelen gecombineerd:

- Boezempeil;
- Windrichting;
- Windsnelheid.

De maatgevende belasting bestaat uit lokale waterstand + golven. De lokale waterstand is een combinatie van boezempeil en lokale waterstandstoenames als gevolg van opwaaing (in langs- en/of dwarsrichting). De golven zijn wind-aangedreven, maar worden daarnaast ook in enige mate beïnvloed door de lokale waterstand. In Figuur 2-1 is een schematische weergave opgenomen van de relevante variabelen binnen PROMOTOR en op welke wijze deze gecombineerd worden.



Figuur 2-1: Schematische weergave invoer (dreiging) en resultaten (toetshoogte) PROMOTOR

Het hydraulische belastingniveau (HBN) kan verschillen, afhankelijk van het faalmechanisme dat bekeken wordt. Bij golfoverslag wordt berekend welke combinatie van waterstand en golven tot falen van een waterkering leidt. Hierbij wordt berekend wat de hoeveelheid overslaand water over een kering is en of hierbij een kritiek (opgegeven) overslagdebiet overschreden wordt. Voor golfoverloop wordt berekend welk debiet over de dijk heen loopt, bij een waterstand die boven de kruin van een dijk ligt.

3 Hoogtetoets

Algemeen

Bij een toets op hoogte voor een waterkering wordt voor primaire en regionale keringen gebruik gemaakt van het Voorschrift Toetsen op Veiligheid primaire waterkeringen (VTV) of de Leidraad toetsen op veiligheid regionale waterkeringen (LTVRW). PROMOTOR is ontwikkeld om probabilistisch, hydraulische randvoorwaarden af te kunnen leiden voor regionale keringen. In VTV en LTVRW worden bij de toetsing verschillende wijzen van toetsen voorgesteld, gebaseerd op het principe dat van grof naar fijn gewerkt wordt. Indien met een eenvoudige toets met conservatieve randvoorwaarden al aangetoond kan worden dat een kering hoog of stabiel genoeg is, kan volstaan worden met deze eenvoudige aanpak. Volgens de toetschema's hoeft dan geen gedetailleerdere toets te worden uitgevoerd.

Veelal zal een eenvoudige toets echter niet direct een oordeel goed/voldoende opleveren, aangezien de eenvoudige rekenregels conservatief zijn. Indien niet tot een oordeel goed/voldoende gekomen wordt, dient de toetsing uitgevoerd te worden aan de hand van een gedetailleerdere toets. Bij deze gedetailleerde toets kan de 'winst' gezocht worden aan de belasting- en/of sterktekant. Er kan dan bekeken worden of het conservatisme in de hydraulische randvoorwaarden kan worden verkleind, of dat een gedetailleerdere schematisatie of rekenmethode voor wat betreft de sterkte van een kering mogelijk is. Bij de hoogtetoets is deze ruimte aan de 'sterktekant' in vergelijking met de geotechnische faalmechanismen over het algemeen veel kleiner. De grootste winst voor een hoogtetoets zal veelal eerder aan de belastingkant liggen.

Deterministisch versus probabilistisch

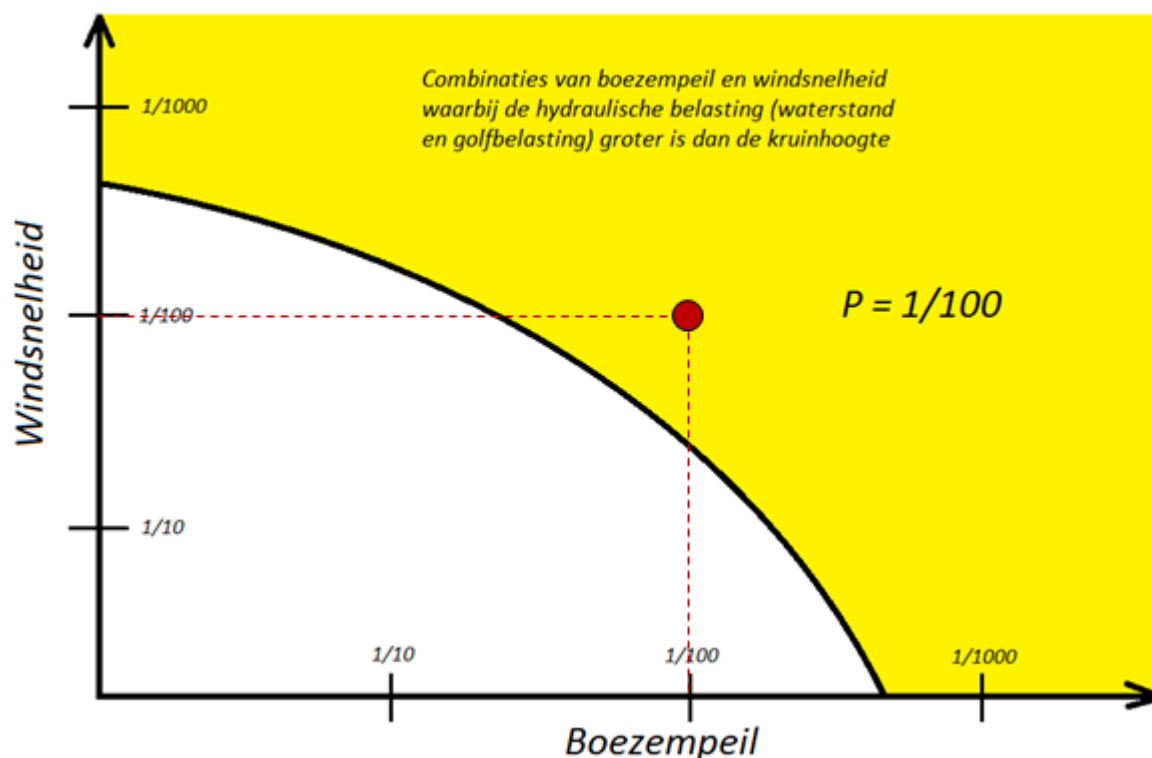
Bepaling van de maatgevende kruinhoogte van een kering vindt plaats door het combineren van een waterstand als gevolg van neerslag of afvoer in combinatie met toeslagen door windinvloeden. Het combineren van deze variabelen kan op een deterministische en op probabilistische wijze.

Bij een deterministische aanpak worden een vastgestelde maatgevende waterstand en maatgevende windsnelheid gecombineerd. De kans op al dan niet gelijktijdig optreden van deze waterstand en windsnelheid wordt niet expliciet in rekening gebracht.

Dit is wel het geval bij een probabilistische aanpak, waar naar de gezamenlijke kans van optreden van waterstanden en windsnelheden gekeken wordt. In de probabilistische berekening van PROMOTOR wordt gezocht naar bijvoorbeeld een kruinhoogte, waarvoor geldt dat de kans op een hydraulische belasting die groter is dan de kruinhoogte gelijk is aan de opgegeven normkans (vaak 1/100 per jaar).

Indien de aandrijvende krachten als onafhankelijk beschouwd worden, dan zijn er (oneindig) veel combinaties mogelijk die tot falen leiden. Bij afleiding van hydraulische randvoorwaarden met herhalingstijd T worden alle combinaties die tot falen leiden opgeteld, tot deze kansen opgeteld overeenkomen tot de gewenste kans of herhalingstijd.

In Figuur 3-1 wordt dit grafisch inzichtelijk gemaakt. Alle combinaties van boezempeil en windinvloed die in het gele gebied liggen leiden tot falen. Met falen wordt in dit geval bedoeld dat waterstand en toeslagen (langsopwaaiing en golfwerking) tot een hogere benodigde kruinhoogte leiden dan een aanwezige of te toetsen kruinhoogte. De gekromde lijn geeft alle combinaties van waterstand en windsnelheid aan die net tot falen leiden, oftewel de grens tussen wel en niet falen.



Figuur 3-1: Grafische weergave faalgebied

Alle combinaties in het gele gebied opgeteld, leveren een faalkans op. In het getekende geval is dit een faalkans P van $1/100$ (per jaar).

Ter vergelijking is tevens een rood punt opgenomen waarbij voor het boezempeil een waterstand met kans van overschrijden van $1/100$ jaar bedraagt en voor de windsnelheid eveneens een overschrijdingskans van $1/100$ jaar aangehouden is. Een dergelijke benadering wordt gehanteerd bij een deterministische aanpak. In de figuur is zichtbaar dat deze combinatie in het gele gebied ligt, op enige afstand van de gekromde lijn. Aangezien deze gekromde lijn de grens aangeeft tussen falen en niet-falen, kan geconcludeerd worden dat de hydraulische randvoorwaarde in het rode punt, zwaarder is dan een randvoorwaarde bepaald met een probabilistische methode. Het rode punt ligt 'diep' in het gele gebied.

Case 1: Effect van combinatie van waterstanden en wind gerelateerde invloeden

Zoals reeds aangegeven in de voorgaande paragraaf, worden binnen PROMOTOR waterstand en windinvloeden als onafhankelijke gebeurtenissen gezien. Om de kans van overschrijden van een bepaald hydraulisch belastingniveau te kunnen berekenen, zijn er nog een aantal andere schematiseringen aan de orde. De belangrijkste schematiseringen worden hiernavolgend opgesomd en kort toegelicht.

Afvoer als gevolg van neerslag of aanvoer van water die invloed heeft op de waterstand, wordt opgenomen in de boezempeilstatistiek binnen PROMOTOR. Het maakt voor deze waterstand niet uit wat de windrichting is op dit moment, omdat verondersteld is dat er geen correlatie is tussen neerslag en windrichting.

Bij het in rekening brengen van windinvloeden is de windrichting uiteraard wel van belang. Windinvloeden zijn hiermee windrichtingsafhankelijk. Binnen PROMOTOR worden per windrichting de opwaaiing en golfwerking berekend en gecombineerd met de boezempeilstatistiek. Hierbij worden neerslaggebeurtenissen als trage gebeurtenissen gezien en wind gerelateerde invloeden als

snelle gebeurtenissen. Bij het combineren van de wind- en waterstandsgebeurtenissen wordt hier rekening mee gehouden, door voor deze invloeden verschillende blokduren te hanteren. De waterstandsstatistiek wordt als het ware 'vertaald' naar een periode van 5 dagen, waar de windinvloeden geschematiseerd worden als blokken van 12 uur.

In bijlage A is een case beschreven, waarbij voor een toenemend aantal windrichtingen een waterstandsverlaging in rekening wordt gebracht. Bij een afnemend aantal windrichtingen waarvoor de waterstandsverlaging wordt opgelegd, blijft de afname in de benodigde kruinhoogte nog steeds zichtbaar in de berekeningsresultaten. Bij een waterstandsverhoging is iets vergelijkbaars zichtbaar: indien voor slechts 1 van 16 windrichtingen rekening gehouden wordt met een bepaalde (langs)opwaaiing, is dit al snel terug te zien als een toename op het hydraulisch belastingniveau. In hiernavolgend overzicht zijn deze berekeningsresultaten opgenomen voor een verlaging en verhoging van de waterstand als gevolg van opwaaiing.

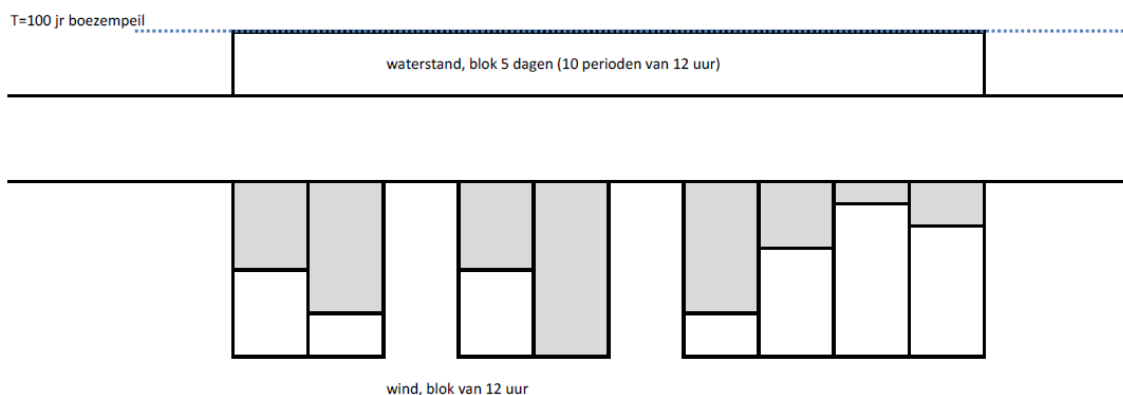
Opgemerkt wordt dat het een theoretische case betreft, waarbij voor alle windsnelheden eenzelfde waarde voor opwaaiing ingevoerd is. Daarnaast is golfwerking niet meegenomen, aangezien het faalmechanisme overloop beschouwd is. Als rekenvoorbeeld is dit echter meer inzichtelijk om de werking van de combinatie windrichtingafhankelijke en –onafhankelijke statistiek te laten zien.

Berekening	Verlaging	HBN (overloop) [NAP+m]	Opmerking
Referentie		-0,02	
Alle windrichtingen	- 30 cm	-0,32	
Oostelijke windrichtingen (9x)	- 30 cm	-0,02	
Alle windrichtingen, m.u.v. ZW en WZW	- 30 cm	-0,03	WZW en W -> 2 windr. dichtst bij dijknormaal
Alle windrichtingen, m.u.v. WZW	- 30 cm	-0,06	WZW -> 1 windr. dichtst bij dijknormaal
Alle windrichtingen, m.u.v. N	- 30 cm	-0,12	N -> windr. met kleinste kans

Berekening	Verhoging	HBN (overloop) [NAP+m]	Opmerking
Referentie		-0,02	
1 Windrichting verhoogd	+ 30 cm	0,18	Windr. N
2 Windrichtingen verhoogd	+ 30 cm	0,22	Windr. N, NNW
3 Windrichtingen verhoogd	+ 30 cm	0,25	Windr. N, NNW, NW
4 Windrichtingen verhoogd	+ 30 cm	0,26	Windr. N, NNW, NW, WNW
Alle windrichtingen	+ 30 cm	0,28	

De reden waarom de richtingsafhankelijke effecten relatief zwaar doorwerken in de maatgevende waterstand heeft te maken met blokduren. In Figuur 3-2 zijn de stochastische waterstand en windinvloeden als blokken weergegeven. Met stochastisch wordt een variabele bedoeld waarvan de exacte waarde op voorhand niet bekend is. Er wordt dus rekening mee gehouden dat de invoer een bepaalde onzekerheid in zich heeft. Het bovenste brede blok stelt een 5-daagse periode voor met een bepaald boezempeil. Aan de onderkant zijn 10 blokperiodes geschematiseerd, die de invloed van langsopwaaiing voorstellen. Aangezien er 10 van deze 12-uursperiodes in een 5-daags venster vallen, is de kans relatief groot dat er een windrichting in deze periode zit die *geen*

waterstandsverlaging veroorzaakt. De verlaging is dus pas goed zichtbaar indien er voor veel windrichtingen een verlaging ingevoerd is.



Figuur 3-2: Schematisatie stochasten in blokken

Andersom, bij een waterstandsverhoging is het effect eveneens al snel zichtbaar, indien opwaaiing slechts voor een klein aantal windrichtingen van toepassing is. Binnen een periode van 5 dagen (blokduur waterstand) is de kans dat er minstens één 12-uurs blok met een verhoogde waterstand of langsoopwaaiing aanwezig is, groot. Indien er namelijk geen waterstandstoename zichtbaar is, dienen alle tien de 12-uursperiode geen langsoopwaaiing te leveren.

Case 2: Golfwerking

Golfinvloeden worden binnen PROMOTOR meegenomen bij golfoverslagberekeningen. Op basis van vooraf gedefinieerde uitvoerpunten en een shapefile dat het waterstandsvlak weergeeft, kunnen automatisch strijklengtes en dijkoriëntaties bepaald worden. Met de formules van Bretschneider of Young-Verhagen worden vervolgens de golfhoogte en –periode uitgerekend. Een golfoverslagmodule bepaalt aan de hand van een ingevoerd dijkprofiel de benodigde kruinhoogte of het optredende golfoverslagdebiet.

Bij smalle waterlopen zal de invloed van golfwerking beperkt zijn, aangezien de effectieve strijklengtes relatief klein blijven. Dit heeft te maken met de wijze waarop de effectieve strijklengte bepaald wordt. Per windrichting wordt bepaald wat de lengtes 'over het water oppervlak' gemeten is. Er wordt echter niet één strijklengte beschouwd, maar de strijklengte wordt gewogen meegenomen, waarbij ook omliggende lengtes meegenomen worden. Bij beperkte strijklengtes zal de golfgroei beperkt blijven.

Er zijn echter meer factoren die een rol spelen bij de bepaling van de golfhoogte en –periode. Waterdiepte, mate van beschutting en windsnelheid spelen ook een rol. Waterdiepte is over het algemeen eenvoudig af te leiden voor gebruik binnen PROMOTOR en ook de windsnelheden in relatie tot kans van overschrijding die van toepassing zijn, worden in een tabel opgenomen binnen PROMOTOR. Bij de beschuttingsfactor is er sprake van een factor die door een gebruiker in te voeren is. Hierbij is het van belang te weten dat de beschuttingsfactor doorwerkt op alle wind gerelateerde gebeurtenissen, dus scheefstand en golfgroei. De strijklengte is alleen van belang voor golfgroei. Langsoopwaaiing is per windsnelheid en – richting voor alle locaties in een tabel opgenomen die PROMOTOR gebruikt. Strijklengtes hebben hier geen invloed op.

Om een indruk te krijgen van de gevoeligheid van de breedte van waterlopen zijn enkele berekeningen uitgevoerd in PROMOTOR, waar met de breedte van de waterlopen gevarieerd is. Hieruit blijkt dat de effectieve strijklengte pas echt groot wordt bij waterlopen waarbij de breedte en lengte nagenoeg even groot zijn, bijvoorbeeld bij meren. Bij smallere watergangen wordt de strijklengte sterk beperkt door de breedte van de waterloop. De gehele case is opgenomen in Bijlage B. Hiernavolgend wordt een samenvatting gegeven van de belangrijkste punten. Uit een dataset (in beheersgebied van Hoogheemraadschap van Delfland) is een locatie gekozen waar een grote golfoverslaghoogte berekend wordt bij golfoverslagberekeningen. Voor dit punt is de breedte en oriëntatie van de waterloop nabij het uitvoerpunt steeds stapsgewijs aangepast, waardoor steeds grotere effectieve strijklengtes gevonden worden. Deze exercitie is voor 3 ruwheidslengtes uitgevoerd. De ruwheidslengte (door de gebruiker op te geven als ruwheidsklassen) is een maat voor de mate waarop de wind invloed heeft op waterstanden en golven.

De resultaten zijn opgenomen in onderstaand overzicht. In de laatste 3 kolommen zijn de berekende hydraulische belastingniveaus opgenomen voor verschillende ruwheidslengtes. Van links naar rechts neemt de ruwheid van het terrein af. Van boven naar beneden in de tabel zijn de variaties in strijklengtes zichtbaar. Voor de situatie met overloop zijn de strijklengtes op nul gezet. De golfwerking is hiermee 'uitgezet'. Hierna zijn berekeningen uitgevoerd voor steeds grotere strijklengtes. In de originele situatie was de strijklengte 15 m. Deze is verbreed naar 20 m, waarna de oriëntatie van de waterloop zodanig gedraaid is, dat windrichting ZW precies evenwijdig aan de waterloop ligt. Tot slot is de breedte van de waterloop stapsgewijs vergroot tot 4000 m.

Breedte waterloop [m]	Grootste effectieve strijklengte [m]	ruwh.lengte 0,60m HBN [NAP+m]	ruwh.lengte 0,25m HBN [NAP+m]	ruwh.lengte 0,03m HBN [NAP+m]
Overloop	0	0,02	0,06	0,15
In watersysteem	15	0,03	0,08	0,18
20	80	0,08	0,14	0,27
20 geroteerd*	268	0,18	0,28	0,46
50 geroteerd	318	0,21	0,32	0,51
100 geroteerd	400	0,26	0,38	0,58
200 geroteerd	566	0,36	0,50	0,73
400 geroteerd	896	0,54	0,71	0,99
1000 geroteerd	1687	0,90	1,13	1,52
4000 geroteerd	3225	1,46	1,78	2,30

**De oriëntatie van de waterloop is zodanig geroteerd dat deze precies evenwijdig aan een van de beschouwde windrichtingen ligt.*

Er zijn bij de bepaling van het HBN meerdere factoren die een rol spelen, maar het voorbeeld geeft wel een indicatie van de invloed van de strijklengtes op het uiteindelijke HBN. Voor heel brede waterlopen (meren) is de invloed zeer groot, doordat bij de berekeningen de effectieve strijklengte ook zeer groot kan worden.

Bij de smallere waterlopen is zichtbaar dat de toeslag op het maatgevend boezempeil van NAP-0,02m in veel gevallen kleiner is dan 30 cm, dat bijvoorbeeld als waakhoogte gehanteerd kan worden.

Samenvattend

Bij toetsing of het afleiden van hydraulische randvoorwaarden van (regionale) keringen zijn er verschillende wegen die gevolgd kunnen worden. Dit zal deels afhangen van de beschikbaarheid van gegevens, mate van winst die men denkt te kunnen halen bij een gedetailleerdere aanpak of de vraag of er een noodzaak is om minder conservatief afgeleide randvoorwaarden tot de beschikking te hebben. Hierbij dient wel het principe aangehouden worden dat bij een eenvoudiger aanpak conservatievere keuzen gemaakt dienen worden. Dit conservatisme kan gezocht worden in:

- Wijze van afleiden langsopwaaiing en golfwerking. Dit kan aan de hand van een conservatieve schematisering van windinvloeden (weinig beschutting bijvoorbeeld) of conservatief gekozen strijklengtes bij golven.
- Manier waarop de verschillende dreigingen gecombineerd worden (afvoer en wind). Voor een kade met normklasse 3 (T=100 jaar) kunnen een 1/100 jaar waterstand en 1/100 jaar windsnelheid gecombineerd worden.

In principe kunnen dan relatief snel randvoorwaarden voor een toetsing worden afgeleid, echter zou een toetsing binnen PROMOTOR een relatief beperkte toename in werkzaamheden betekenen.

Bij complexere systemen is het praktisch al snel zinvol een PROMOTOR -aanpak te hanteren. Om de effecten van een complex systeem te modelleren zal in veel gevallen gebruik gemaakt worden van waterbewegingsmodellen waarin kunstwerken zijn opgenomen, waarmee de waterstanden (lokaal) kunnen worden beïnvloed. Denk bijvoorbeeld aan het berekenen van waterstanden aan randen van een gebied, nabij een uitslaandemaal. Door een combinatie van waterstandsgerelateerde gebeurtenissen en windinvloeden te modelleren, ontstaat uitvoer die bij uitstek geschikt is voor een probabilistisch model, aangezien met een dergelijk model voor een groot aantal combinaties uitvoer te genereren is. Zaak is uiteraard wel dat het model goed gekalibreerd is op metingen onder extreme omstandigheden, maar dit geldt eigenlijk voor alle berekeningen.

De voor- en nadelen van gebruik van PROMOTOR zijn hiernavolgend (niet uitputtend) opgenomen.

Voordelen:

- PROMOTOR berekent een groot aantal combinaties van waterstanden en windinvloeden op systematische wijze. Dit levert in veel gevallen een minder (over)conservatieve toetshoogte of hydraulische randvoorwaarden.
- Met het programma kunnen berekeningen snel herhaald of aangepast worden.
- Het opslaan van gegevens met betrekking tot de hydraulische randvoorwaarden bij toetsing van kade kan binnen PROMOTOR plaatsvinden. Denk bijvoorbeeld aan geschematiseerde dwarsprofielen, dijknormalen, verschillende randvoorwaarden bij meerdere herhalingstijden, gevoeligheidsanalyses etc.

Nadelen:

- Er kan veel informatie nodig zijn die als invoer dient voor PROMOTOR.
- De wijze waarop de hydraulische randvoorwaarden bepaald worden, kan zeker in eerste instantie als complex ervaren worden.
- Het interpreteren van de uitkomsten kan in eerste instantie als complex ervaren worden.

Afhankelijk van de wijze van toetsen is de noodzaak van het toepassen van een probabilistisch model verschillend. Bij een eenvoudig systeem met grote overhoogte van de kades, is voor het toetsproces een eenvoudige aanpak in principe voldoende. De grootte van de overhoogte wordt dan uiteraard minder snel inzichtelijk.

Hiertoe zou dan wel een maatgevende waterstand bekend moeten zijn op basis van boezempeilstatistiek. Hierbij dient nog een toeslag gehanteerd te worden voor langsopwaaing en golfwerking. Dit zou nog op basis van expert judgement kunnen, maar hierbij dienen de gehanteerde waarden wel onderbouwd te worden. De toeslag voor golfoverslag kan ook uit de tabellen uit LTVRW worden afgeleid. Indien de golfwerking niet expliciet meegenomen wordt, kan deze toeslag bij een combinatie van boezempeil en langsopwaaing worden opgeteld. Het uitvoeren van een waterstands- of golfvoerloopberekening met PROMOTOR kan dan worden gebruikt bij de toetsing, door de golfoverslagmarge op te tellen bij de PROMOTOR-uitvoer.

Het kan zo zijn dat de waakhoogte overal een zwaardere eis oplevert dan een toeslag voor golfoverslag. In een dergelijk geval, kan bovenstaande aanpak een uitkomst zijn. Dit zal met name voorkomen bij smalle waterlopen.

Hierbij dient wel bedacht te worden dat de wijze waarop de verschillende invloeden gecombineerd worden hier nog wel een rol speelt. Eén bepaalde windrichting kan bijvoorbeeld voor opwaaing zorgen, maar slechts beperkte golfgroei bewerkstelligen. Het optellen van de meest ongunstige gevallen zal dan leiden tot grote benodigde kruinhoogtes.

Bij bredere waterlopen zal de berekende toeslag voor golfoverslag al snel maatgevend worden. Aangezien de combinatie van hoge afvoeren en windinvloeden afzonderlijk grote invloed kunnen hebben op de maatgevende waterstanden, is het niet raadzaam dit per uitvoerpunt zelf te combineren. De toegevoegde waarde van PROMOTOR is in een dergelijke situatie het duidelijkst zichtbaar.

Hieraan voorafgaand zijn dan wel waterloopkundige berekeningen nodig, om boezempellen en mate van opwaaing af te leiden. Deze inspanning verschilt echter niet perse in vergelijking met een afwijkende aanpak, zoals bijvoorbeeld rekenen met een vastgestelde maatgevende waterstand en handmatige bepaling van de golfhoogte en –periode met Bretschneider. Een stochastenmethode heeft voor de bepaling van maatgevende waterstanden de voorkeur, met name bij gereguleerde watersystemen. Bij een stochastenmethode wordt een groot aantal sommen uitgevoerd waarbij de onzekerheid in de invoergegevens verwerkt wordt. Een andere aanpak is de zogenaamde tijdreeksenmethode, waar een lange periode op basis van gemeten gebeurtenissen wordt doorgerekend en daarna de kansverdeling van bijvoorbeeld de maatgevende waterstanden wordt afgeleid. Bij deze tijdreeksenmethode is het vaak de vraag, in hoeverre extrapolaties van opgetreden en berekende waterstanden correcte resultaten oplevert.

Het kan voorkomen dat het gedrag van een systeem niet modelmatig te modelleren is, althans niet binnen één rekenmodel. Het falen van gemalen of spui-beperkingen is hier een voorbeeld van. Hiervoor is het niet mogelijk om een standaardaanpak aan te dragen, analyse van een systeem is altijd een eerste benodigde stap. Op het moment dat dit uitgevoerd is, kan bepaald worden op welke wijze dit verwerkt wordt bij afleiding van hydraulische randvoorwaarden. Op welke wijze dit effectief toegepast wordt, is dan de laatste stap en verschilt per situatie.

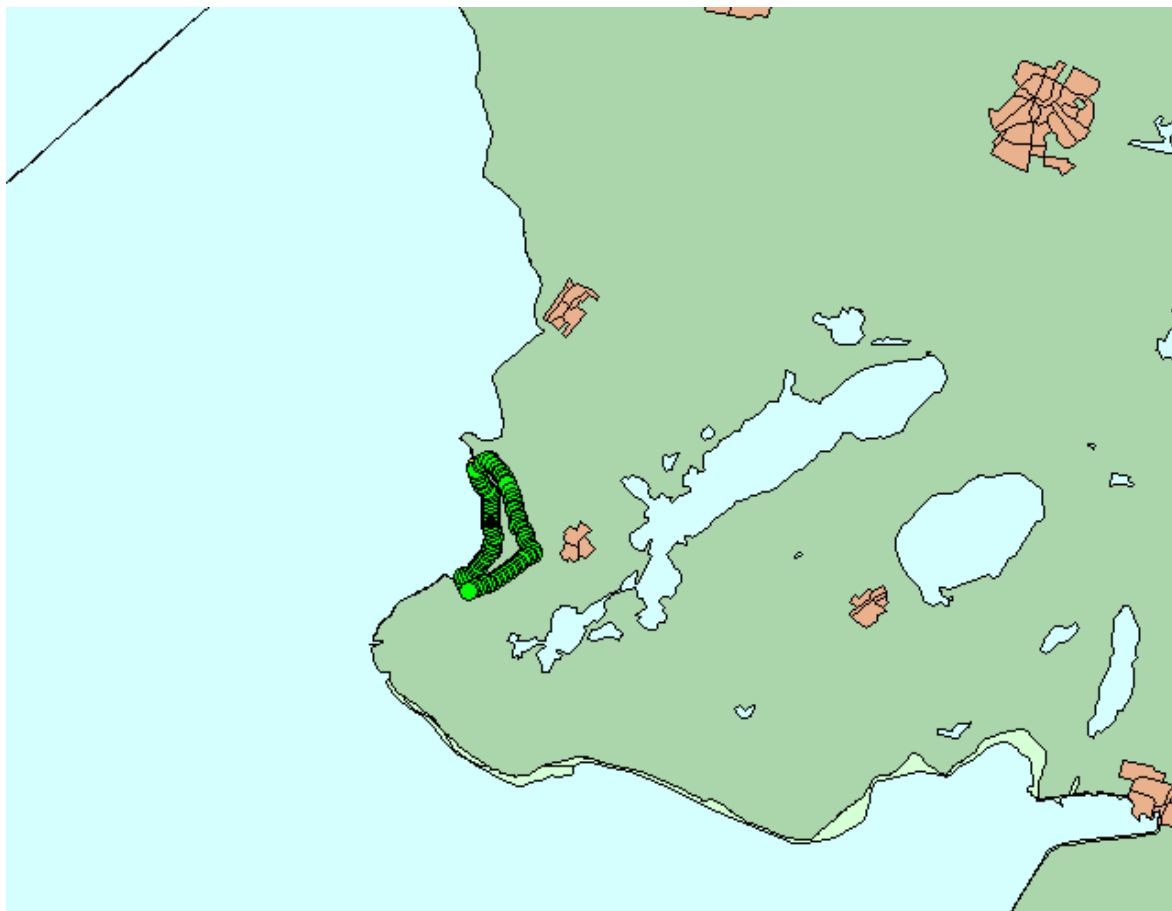
4 Bijlagen

Bijlage A

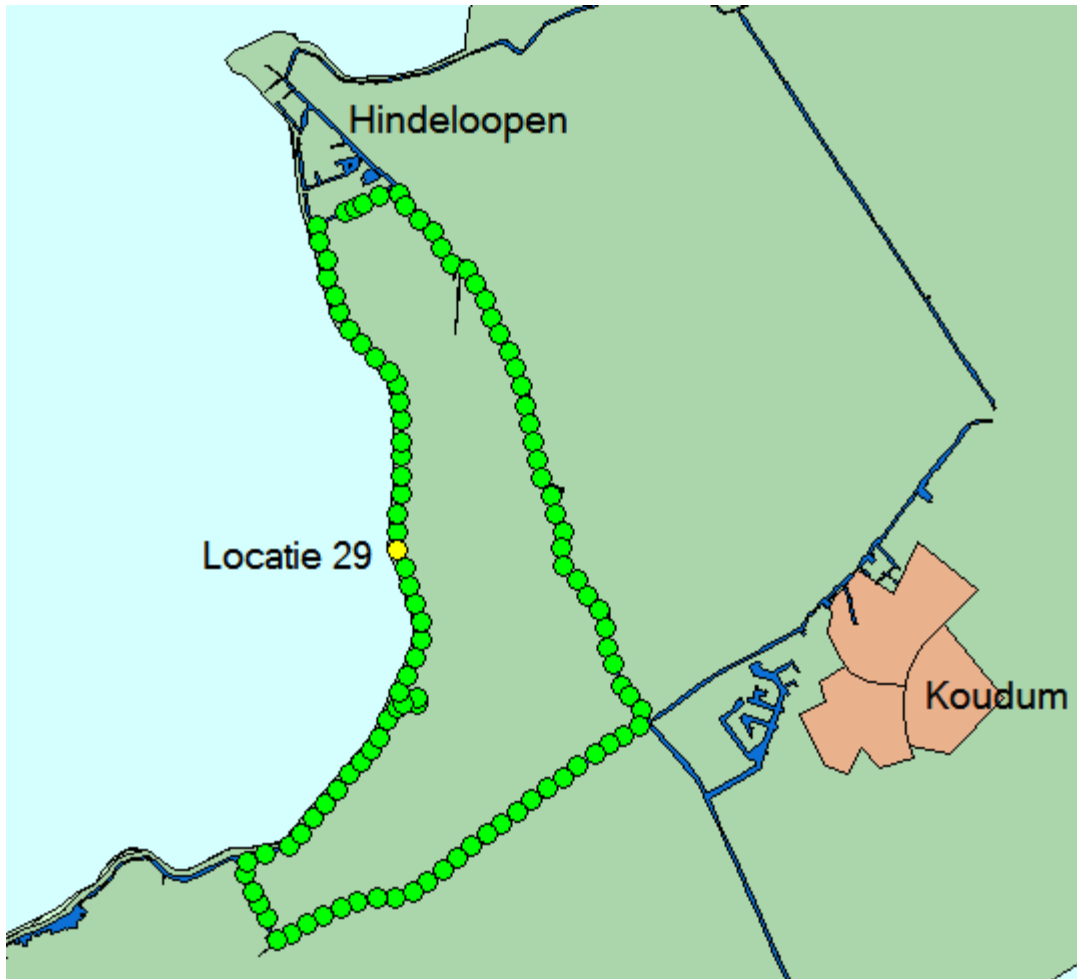
Case relatie windrichtingsafhankelijke en – onafhankelijke statistiek

We hebben onderzocht of de keuze voor een windrichtingsonafhankelijke boezempeilstatistiek van invloed is op de berekeningsresultaten van PROMOTOR. Hiertoe hebben we via aanpassingen in de invoer de boezempeilstatistiek in PROMOTOR windrichtingsafhankelijk gemaakt. We behandelen nu eerst enkele andere onderdelen van deze case. We hebben de windrichting afhankelijke boezempeilstatistiek onderzocht voor een locatie in de Friese polder KR095. De ligging van deze polder is zichtbaar gemaakt in Figuur 4-1 door alle PROMOTOR-locaties van deze polder in de figuur weer te geven. De polder KR095 bevindt zich ten zuiden van Hindeloopen en ten westen van Koudum. In deze polder hebben we locatie 29 gekozen. De ligging van deze locatie is weergegeven in Figuur 4-2. In onze analyse kiezen we voor een terugkeertijd van 100 jaar.

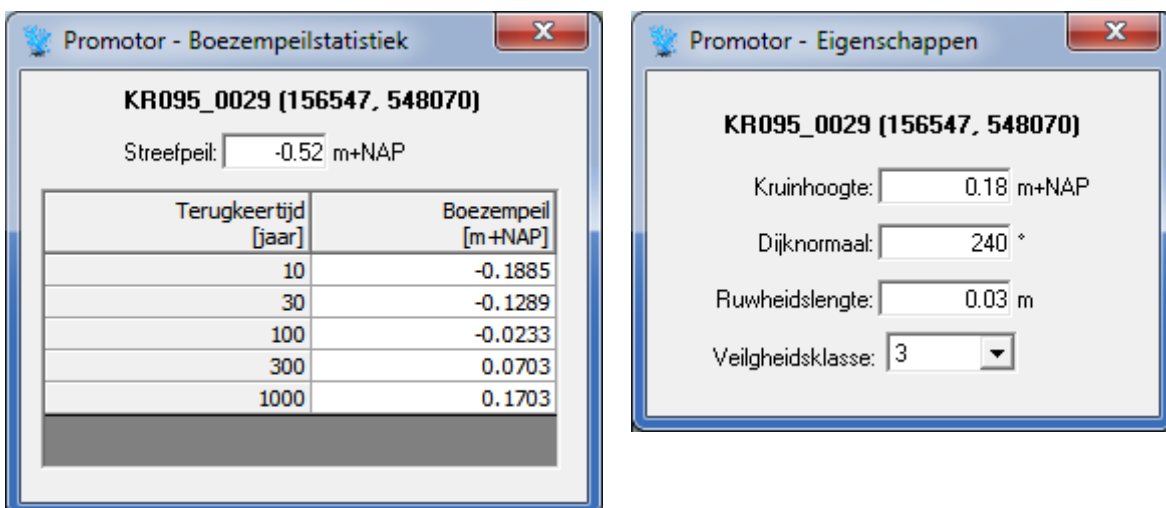
Figuur 4-3 geeft de boezempeilstatistiek en de eigenschappen van locatie 29. Hierin is zichtbaar dat het boezempeil $-0,0233 \text{ m} + \text{NAP}$ gemiddeld eens per 100 jaar wordt overschreden. In onze analyse gebruiken we de eigenschappen van locatie 29 niet (rechterkant van Figuur 4-3), maar deze gegevens geven we toch om bij deze locatie enig gevoel te creëren.



Figuur 4-1: Ligging van de Friese polder KR095 in het westen van Friesland.



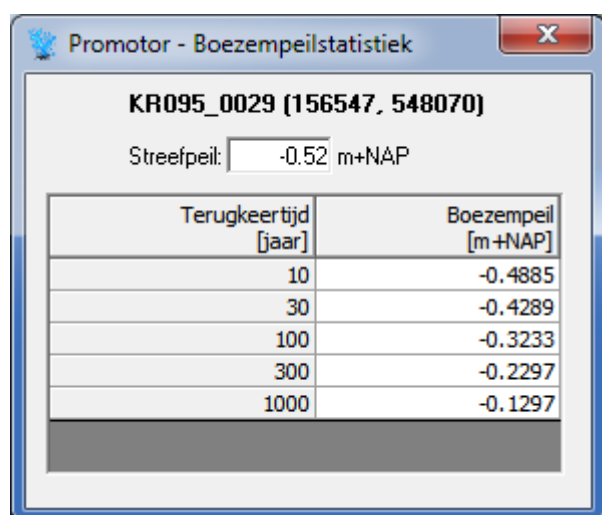
Figuur 4-2: Ligging van locatie 29 in de Friese polder KR095 met het gele rondje.



Figuur 4-3: Boezempeilstatistiek en eigenschappen van locatie 29 van Friese polder KR095

De database voor polder KR095 bevat enkel nullen voor de scheefstand: voor alle windsnelheden, alle windrichtingen en alle locaties, dus ook voor locatie 29. Als we nu een overloopberekening met PROMOTOR maken, dan vinden we nagenoeg precies het boezempeil uit de boezempeilstatistiek terug. De eens in de 100 jaar waterstand is -0,0234 m+NAP. In deze berekening is de boezem-

peilstatistiek windrichtingonafhankelijk. We gaan nu windrichting-afhankelijkheid creëren door de tabel van de scheefstand te vullen. Voor enkele windrichtingen geven we een verlaging van de waterstand op door in de scheefstand *voor alle windsnelheden* dezelfde waterstandsverlaging op te geven. We kiezen voor een verlaging van 0,3 m. Effectief geeft dit voor die windrichtingen een verlaagde boezempeilstatistiek. De effectieve boezempeilstatistiek is voor de desbetreffende windrichtingen weergegeven in Figuur 4-4. We hebben voor de verlaging van 0,30 m gekozen (en niet meer) omdat hiermee de boezempeilen bij de terugkeertijden 10 t/m 1000 jaar hoger blijven dan het streefpeil (zie Figuur 4-4).



Figuur 4-4: Effectieve boezempeilstatistiek voor enkele windrichtingen van locatie 29 van Friese polder KR095

Nu hebben we nog de keuze te maken voor welke windrichtingen we de verlaging doorvoeren en voor welke windrichtingen niet. Hiervoor kijken we naar Figuur 4-2. Omdat we graag een realistische keuze maken kiezen we voor de verlaging van de oostelijke windrichtingen. Gezien de ligging van de polder denken we dat het bij oostelijke windrichtingen goed te doen is om de boezempeilen laag te houden. De verlaging voeren we door bij 9 'oostelijke' windrichtingen: N, NNO, ..., Z. Voor de andere 7 windrichtingen voeren we geen (negatieve) scheefstand in en gebruiken we dus eenvoudigweg de boezempeilstatistiek uit Figuur 4-3. Met PROMOTOR berekenen ook in deze situatie voor een terugkeertijd van 100 jaar een waterstand van -0,0234 m+NAP.

Als we naar honderdsten van millimeters kijken dan zien we een heel klein verschil: -0,02338 m+NAP voor de berekening zonder scheefstandaanpassing en -0,02339 m+NAP voor de berekening met aanpassing in de scheefstanden. We zijn ons bewust dat dit een ongeloofwaardig klein verschil is, zeker in het licht gezien dat de gezamenlijke kans van de 9 windrichtingen ca. 0,45 is. De berekening is echter geheel juist en we zullen proberen om dit kleine verschil aannemelijk te maken.

De overloopberekening zonder aanpassing in de scheefstand is een bijzonder eenvoudige berekening doordat de wind in het geheel geen invloed heeft op de berekeningen. Er is slechts overschrijding van een waterstand bij locatie 29 als het boezempeil hoger is dan deze waterstand. Stel dat we op locatie 29 een waterstand van -0,05 m+NAP beschouwen. Deze waterstand wordt dan met kans 1 overschreden als het boezempeil hoger is dan -0,05 m+NAP. En deze kans is gelijk aan 0 als het boezempeil lager is dan -0,05 m+NAP.

De wind is een snel variërende gebeurtenis: 12 uur later kan de wind volstrekt anders zijn dan 12 uur eerder. Het boezempeil is een veel trager variërende gebeurtenis. Binnen PROMOTOR wordt

eenzelfde waarde aangehouden voor 5 dagen (120 uur). Er passen dus 10 perioden van 12 uur in een periode met een constante waarde van het boezempeil. Wil de wind in de periode van 10 dagen niet voor overschrijding van de waterstand van $-0,05 \text{ m+NAP}$ zorgen, dan zal de wind in alle 10 de 12-uursperioden zodanig moeten zijn dat de waterstand lager blijft dan $-0,05 \text{ m+NAP}$. Door het snel fluctuerende karakter van de wind kunnen we (bij benadering) stellen dat de wind onafhankelijk is van de waarde van de wind 12 uur eerder. Dit gebeurt in PROMOTOR. Dan kunnen we de kans dat de waterstand lager blijft dan $-0,05 \text{ m+NAP}$ gedurende de 5 dagen van het boezempeilblok uitrekenen uit de kans dat de waterstand in een 12-uursperiode lager is dan $-0,05 \text{ m+NAP}$. Dit gebeurt als volgt:

$$\Pr_{5 \text{ dagen}}(H < -0.05 | b) = (\Pr_{12 \text{ uur}}(H < -0.05 | b))^{10}$$

met H de maximale waterstand bij locatie 29 in 12 uur en b het boezempeil. Een vergelijkbare formule gebruikt PROMOTOR ook.

In de berekening met aanpassingen in de scheefstand voor de 9 windrichtingen zijn er nu drie soorten boezempeilen:

- Het boezempeil is zo laag dat voor alle windrichtingen de waterstand lager blijft dan $-0,05 \text{ m+NAP}$. Dan geldt: $\Pr_{12 \text{ uur}}(H < -0.05 | b) = 1$ en vervolgens $\Pr_{5 \text{ dagen}}(H < -0.05 | b) = 1$.
- Het boezempeil is zodanig dat voor 9 windrichtingen de waterstand nog lager blijft dan $-0,05 \text{ m+NAP}$ en dat voor 7 windrichtingen de waterstand wel hoger is dan $-0,05 \text{ m+NAP}$. Dan geldt: $\Pr_{12 \text{ uur}}(H < -0.05 | b) = 0.45$. Met de bovenstaande formule volgt vervolgens $\Pr_{5 \text{ dagen}}(H < -0.05 | b) = 0.00034$. Dat is bijna 0. De kans $\Pr_{5 \text{ dagen}}(H > -0.05 | b)$ is dan bijna 1. Er is in die 10 periodes van 12 uur vrijwel altijd een windrichting die tot de 7 windrichtingen behoort, die voor een hoge waterstand zorgt. De kans dat ze alle 10 tot de 9 'oostelijke' richtingen behoren is in ieder geval uiterst klein.
- Het boezempeil is zo hoog dat voor alle windrichtingen de waterstand hoger is dan $-0,05 \text{ m+NAP}$. Dan geldt: $\Pr_{12 \text{ uur}}(H < -0.05 | b) = 0$ en vervolgens $\Pr_{5 \text{ dagen}}(H < -0.05 | b) = 0$.

Als we bovenstaande toelichting goed tot ons door laten dringen en vergelijken met de situatie zonder aanpassing in de scheefstanden, dan kunnen we begrijpen dat de uitkomsten van de twee situaties zo weinig verschillen.

Als we de scheefstand verlaging op meer windrichtingen aanbrengen dan gaat de uitkomst in de overloopberekening iets meer veranderen:

- Als we de verlaging op alle windrichtingen toepassen behalve ZW en WZW (de twee richtingen rond de dijknormaal) dan berekenen we $-0,0325 \text{ m+NAP}$ bij een terugkeertijd van 100 jaar. Nog altijd een verandering van minder dan een centimeter. De gezamenlijke kans van deze twee windrichtingen is ca. 0,2. Voor de relevante range van boezempeilen geldt $\Pr_{5 \text{ dagen}}(H < -0.05 | b) \approx 0.1$.
- Als we de scheefstand verlaging op alle windrichtingen toepassen behalve WZW (de windrichting het dichtst bij de dijknormaal) dan berekenen we $-0,0558 \text{ m+NAP}$ bij een terugkeertijd van 100 jaar. Dit geeft een verandering van ca. 0,032 m ten opzichte van de oorspronkelijke berekening. De kans op windrichting is ca. 0,11. Voor de relevante range van boezempeilen geldt $\Pr_{5 \text{ dagen}}(H < -0.05 | b) \approx 0.31$.

- Als we de scheefstand verlaging op alle windrichtingen toepassen behalve de windrichting met de kleinste kans (te weten Noord) dan berekenen we $-0,119$ m+NAP bij een terugkeertijd van 100 jaar. Dit geeft een verandering van bijna 0,1 m ten opzichte van de oorspronkelijke berekening. De kans op windrichting Noord is ca. 0,038. Voor de relevante range van boezempeilen geldt $\Pr_{5 \text{ dagen}}(H < -0.05 | b) \approx 0.68$.
- Als we de scheefstandverlaging doorvoeren voor alle windrichtingen, dan berekenen we in een overloopsom $-0,323$ m+NAP. Dit is precies 0,3 m lager dan in de berekening zonder scheefstandverlaging. Dit is een resultaat wat PROMOTOR moet leveren ter bevestiging van een correct uitgevoerde analyse.

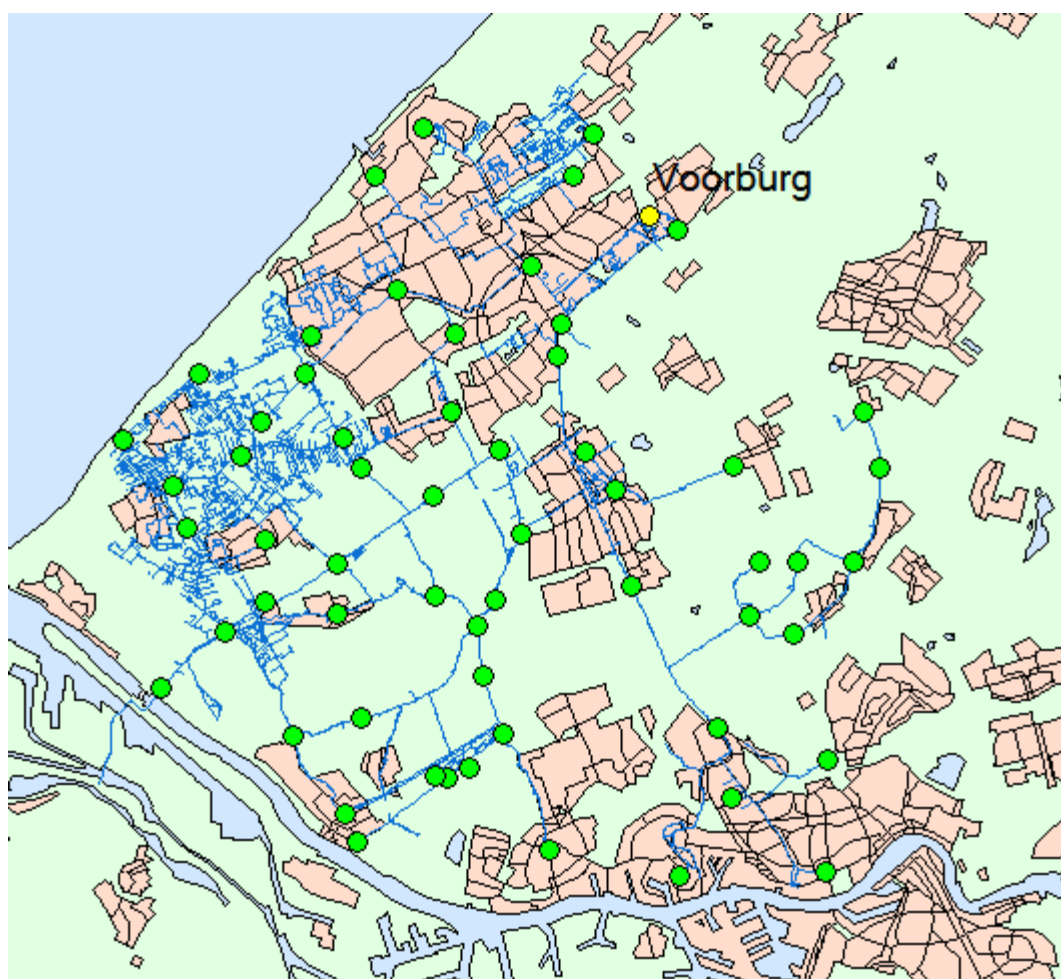
Conclusie

Bovenstaande analyse laat zien dat een windrichtingsafhankelijke boezempeilstatistiek (nagenoeg) geen verandering geeft in de PROMOTOR-uitkomsten. Alleen in extreme situaties waarin voor één windrichting de boezempeilstatistiek beduidend extremer is dan voor alle andere windrichtingen kan dit effect hebben op de berekeningsresultaten. Een en ander nog afgezien van de praktische invulling van een windrichtingsafhankelijke boezempeilstatistiek. De wind is immers een snel fluctuerende gebeurtenis, waarbij de windrichting elke 12 uur kan veranderen en de boezempeilen langzaam fluctueren, waarbij een hoogte zo'n 5 dagen constant is.

Bijlage B

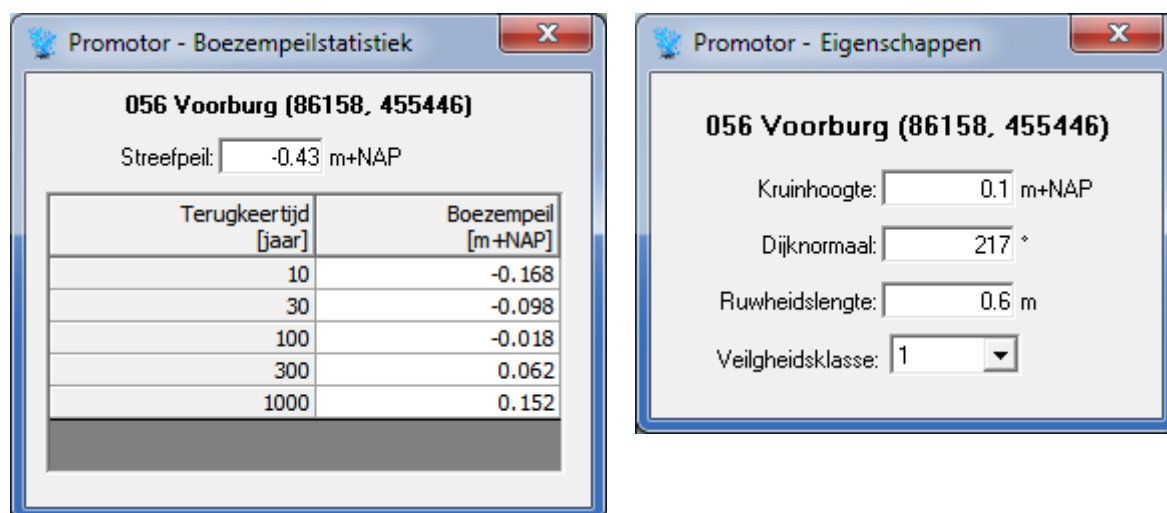
Case Breedte waterlopen

We hebben onderzocht of we op basis van de breedte van de waterlopen een advies kunnen geven om al dan niet hydraulische randvoorwaarden af te leiden met PROMOTOR. Om dit te onderzoeken hebben we gekozen voor het watersysteem van Delfland. Dit systeem is weergegeven in Figuur 4-5. Binnen dit systeem hebben we gekeken voor welke locatie er sprake is van de meeste scheefstand. Onderzoek wijst uit dat dit locatie Voorburg is. Deze locatie is met geel expliciet weergegeven in Figuur 4-5. Voor deze locatie hebben we onze analyse uitgevoerd. Verder hebben we ons onderzoek beperkt tot 1 terugkeertijd. We hebben gekozen voor een terugkeertijd van 100 jaar.



Figuur 4-5: Netwerk van waterlopen in het watersysteem van Delfland met beschikbare uitvoerlocaties voor PROMOTOR, waarin locatie Voorburg expliciet is weergegeven met het gele rondje.

Figuur 4-6 geeft de boezempeilstatistiek en de eigenschappen van locatie Voorburg. Hierin is zichtbaar dat een boezempeil van $-0,018 \text{ m} + \text{NAP}$ gemiddeld eens per 100 jaar wordt overschreden. Hogere waterstanden bij een terugkeertijd van 100 jaar zijn dan het gevolg van windinvloeden. Als we met PROMOTOR een berekening willen maken zonder enige windinvloed dan zetten we de ruwheidslengte op 10. Dit kan in het scherm, dat rechts in Figuur 4-6 is weergegeven. De PROMOTOR-uitkomst is dan inderdaad $-0,018 \text{ m} + \text{NAP}$.



Figuur 4-6: Boezempeilstatistiek en eigenschappen van locatie Voorburg

Als we de ruwheidslengte van 0,6 gebruiken, zoals deze in Figuur 4-6 is weergegeven, dan is er wel sprake van windinvloed. Deze verschijnt in ieder geval door de scheefstand, die de wind in het watersysteem van Delfland veroorzaakt. Als we de opwaaiing en de golfoverslag niet meenemen dan berekenen we een hydraulisch belastingniveau met PROMOTOR van 0,02 m+NAP bij een terugkeertijd van 100 jaar. Deze hoogte berekenen we door een overloopberekening te maken. We kunnen deze berekening ook maken door alle effectieve strijklengtes op 0 m te zetten en te rekenen met golfoverslag. We berekenen door scheefstand mee te nemen een hydraulisch belastingniveau dat 0,04 m hoger is dan het boezempeil dat eens per 100 jaar optreedt. Dit is een berekening waarbij de wind nog altijd relatief weinig invloed heeft en de boezempeilen nog steeds belangrijk zijn. De relevante windsnelheden blijven daardoor relatief laag (minder dan 15 m/s). Hierdoor is er dan ook sprake van relatief weinig scheefstand. Pas bij echt hoge windsnelheden is er sprake van veel scheefstand.

Bij kleinere ruwheidslengtes wordt de invloed van deze hogere windsnelheden relevant. In het watersysteem van Delfland komen 3 ruwheidslengtes voor. Naast de reeds doorgerekende 0,6 m komen ook 0,25 m en 0,03 m voor. In Tabel 4-1 zijn de ruwheidsklassen samengevat. Uit deze tabel is af te leiden welk type landschap hoort bij de drie ruwheidsklassen, die voorkomen in het watersysteem van Delfland. De twee andere ruwheidslengtes hebben we ook doorgerekend. Bij een ruwheidslengte van 0,25 m berekenen we een hydraulisch belastingniveau van 0,06 m+NAP (zonder opwaaiing en golfoverslag). Bij een ruwheidslengte van 0,03 m berekenen we een hydraulisch belastingniveau van 0,15 m+NAP (eveneens zonder opwaaiing en golfoverslag).

Locatie Voorburg heeft binnen het watersysteem van Delfland de meeste scheefstand. Door te kiezen voor de kleinste ruwheidslengte, die binnen het watersysteem van Delfland voorkomt (0,03 m), wordt een hydraulisch belastingniveau gevonden van 0,15 m+NAP. Dit maakt dat binnen het watersysteem van Delfland scheefstand maximaal kan zorgen voor 0,17 m verhoging ten opzichte van het boezempeil dat gemiddeld eens in de 100 jaar wordt overschreden (-0,018 m+NAP); de werkelijke waarde van de scheefstand is groter. Maar deze wordt zonder verhoging van het boezempeil gerekend vanaf het streefpeil (-0,43 m+NAP). Verder verhoging van het hydraulisch belastingniveau wordt verder alleen veroorzaakt door opwaaiing en golfoverslag. Die zijn processen waarbij de invloed van de wind toeneemt.

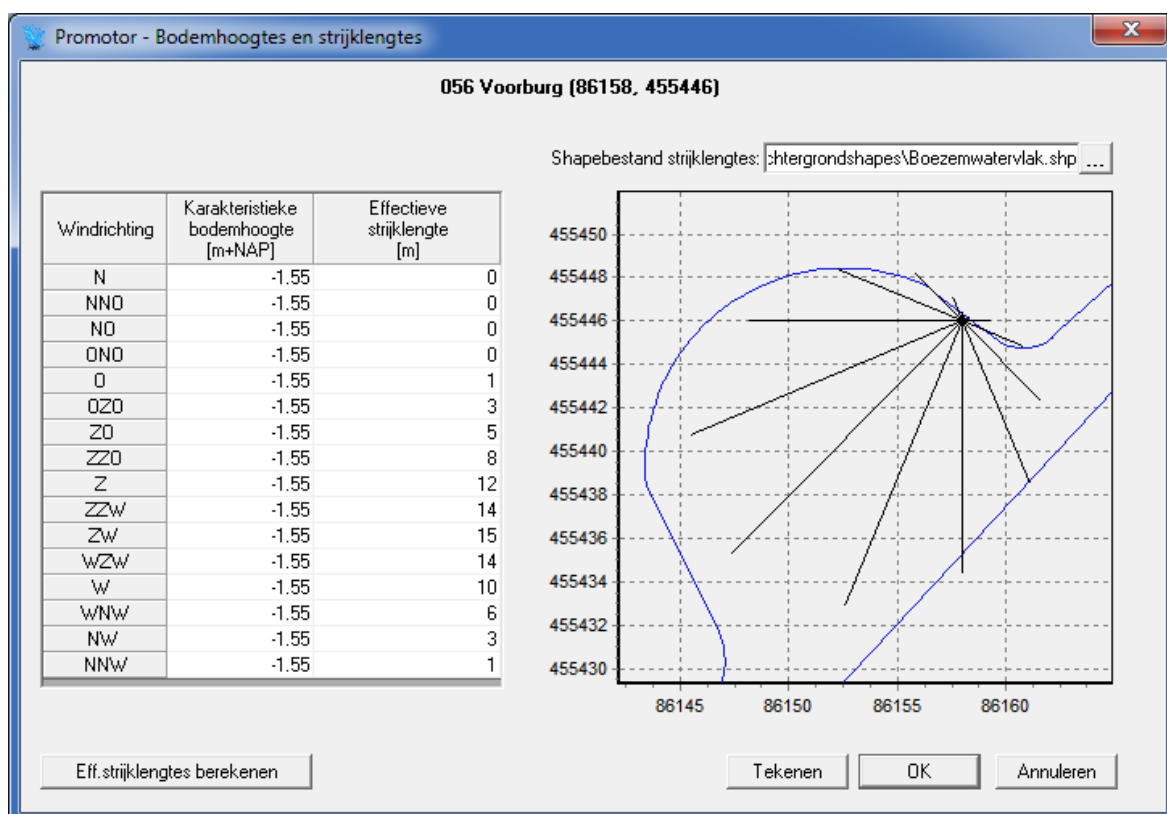
Klasse	Typering	Beschrijving	Ruwheidslengte [m]
1	Zee	Open zee of plas met een vrije strijklengte van tenminste 1 km	0,0002
2	Glad	Landoppervlak zonder merkbare obstakels of begroeiing	0,005
3	Open	Vlak land met alleen oppervlakkige begroeiing (gras) en soms geringe obstakels	0,03
4	Ruwweg open	Bouwland met regelmatig laag gewas, of weideland met sloten die minder dan 20 slootbreedten van elkaar liggen	0,1
5	Ruw	Bouwland met afwisselend hoge en lage gewassen	0,25
6	Zeer ruw	Obstakelgroepen gescheiden door open ruimte van omstreeks 10 maal de typische obstakelhoogte	0,5
7	Gesloten	Bodem regelmatig en volledig bedekt met vrij grote obstakels, met tussengelegen ruimten niet groter dan den paar obstakelhoogten	1,0
8	Stadskern	Centrum van grote stad met afwisselend laag- en hoogbouw	2,0

Tabel 4-1: Ruwheidsklassen.

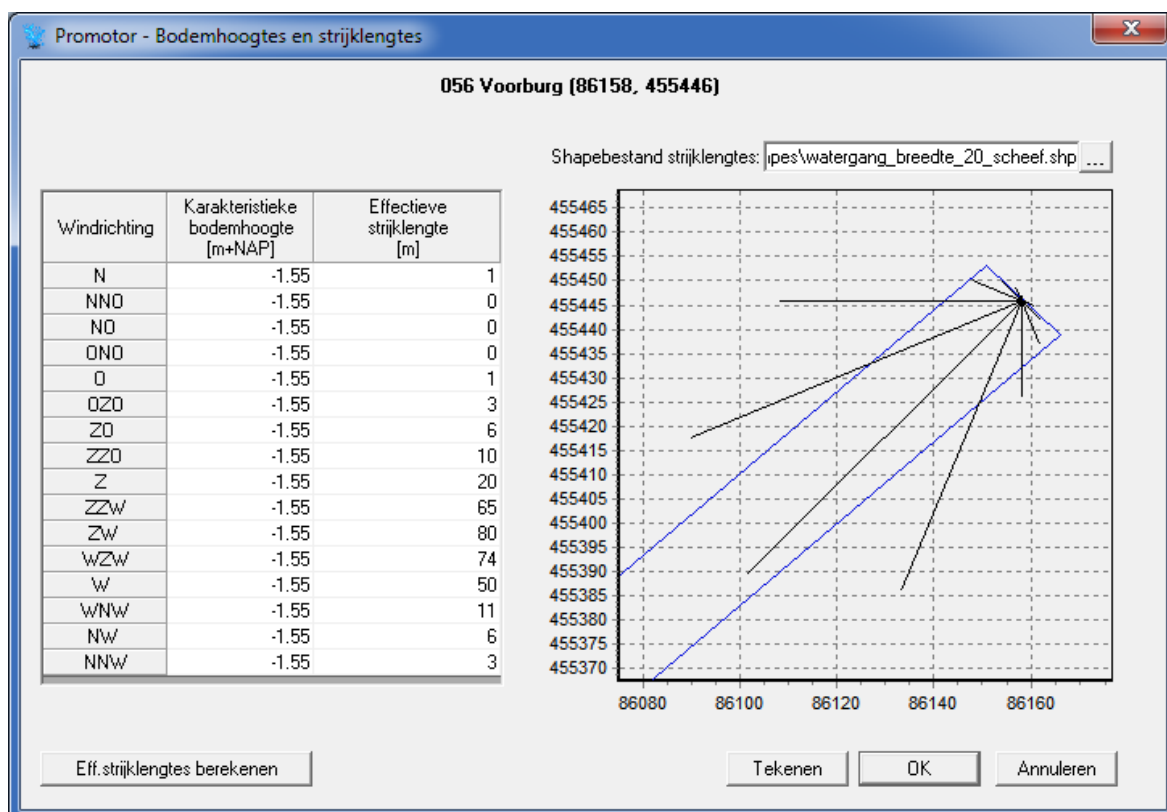
Voor opwaaiing en golfoverslag zijn veel aspecten belangrijk. Hiervoor moeten we keuzes maken. We moeten een golfoverslagdebiet kiezen. Hiervoor kiezen we 1 l/s/m. Dit is misschien niet de meest conservatieve keuze, maar we zijn van mening dat we niet steeds de meest conservatieve keuze moeten maken. Ook moeten we een profiel kiezen. We kiezen voor een conservatief profiel met een helling van 1 op 1 en grasbekleding. Hoe flauwer de helling van het profiel, des te minder kruinhoogte is nodig om te beschermen tegen golfoverslag. Bij de berekeningen wordt gebruik gemaakt van de golfgroeiformules van Young en Verhagen om de golfparameters te berekenen. Als laatste moeten we bodemhoogtes en effectieve strijklengtes kiezen. We beginnen met de reguliere waarden, die voor locatie Voorburg gebruikt worden. Deze zijn weergegeven in Figuur 4-7. Dit zijn hele korte effectieve strijklengtes; de langste is slechts 15 m. Met deze invoer berekenen we een hydraulisch belastingniveau van 0,03 m+NAP bij een ruwheidslengte van 0,6 m. Bij een ruwheidslengte van 0,25 m berekenen we een hydraulisch belastingniveau van 0,08 m+NAP en bij een ruwheidslengte van 0,03 m berekenen we een hydraulisch belastingniveau van 0,18 m+NAP. Met deze strijklengtes is er sprake van slechts weinig opwaaiing en verhoging ten gevolge van golfoverslag.

We gaan nu de effectieve strijklengtes vergroten en onderzoeken wat het effect daarvan op het hydraulische belastingniveau is. De vergroting van de effectieve strijklengtes doen we in combinatie met de breedte van de waterloop. We lichten dit onderstaand toe. De bodemhoogtes houden we in ons onderzoek gelijk aan -1,55 m+NAP, zoals in Figuur 4-7 is weergegeven.

Locatie Voorburg ligt aan het eind van een waterloop, die in Figuur 4-5 zichtbaar is. Deze waterloop heeft een lengte van ca. 3,5 km. Over dit traject plaatsen we een waterloop met een breedte van 20 meter. Met deze waterloop berekenen we de strijklengtes opnieuw. Het resultaat is weergegeven in Figuur 4-8. De grootste effectieve strijklengte is nu 80 m. Hierbij berekenen we met PROMOTOR een hydraulisch belastingniveau van 0,08 m+NAP bij een ruwheidslengte van 0,6 m. Bij een ruwheidslengte van 0,25 m berekenen we een hydraulisch belastingniveau van 0,14 m+NAP en bij een ruwheidslengte van 0,03 m berekenen we een hydraulisch belastingniveau van 0,27 m+NAP. We zien dat de wind met deze effectieve strijklengtes belangrijker gaat worden.



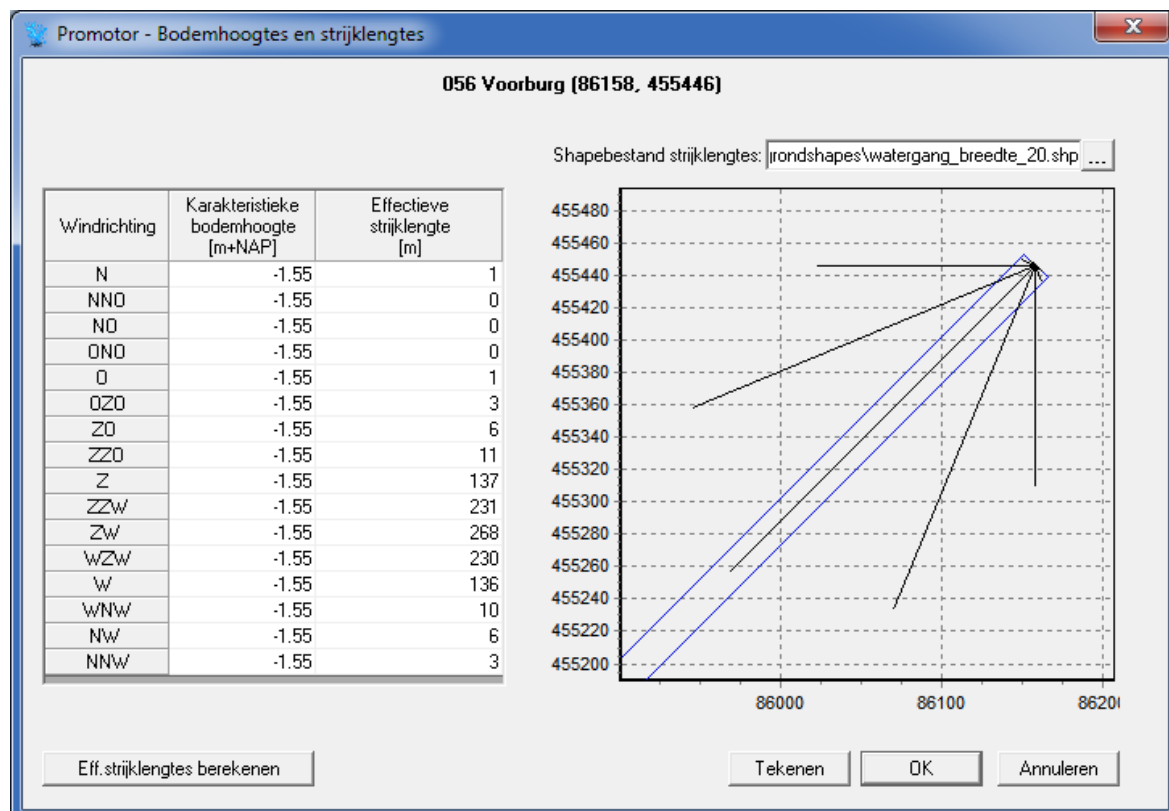
Figuur 4-7: Effectieve strijklengtes zoals gebruikt in het watersysteem van Delfland.



Figuur 4-8: Effectieve strijklengtes bij een rechthoekige waterloop met een breedte van 20 meter en iets verdraaid ten opzichte van windrichting ZW.

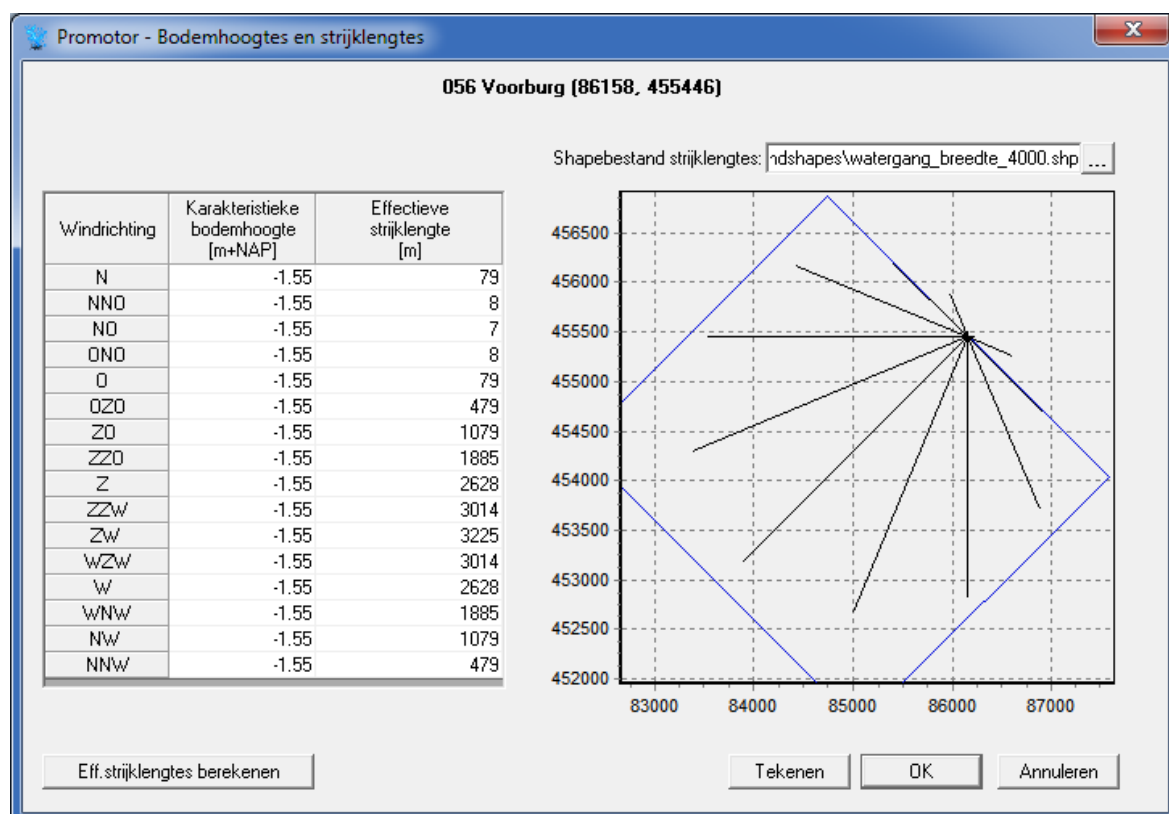
De waterloop waaraan locatie Voorburg zich bevindt, is niet helemaal Zuidwest – Noordoost georiënteerd (in Figuur 4-8 is dit goed te zien). Dit beperkt de effectieve strijklengtes en daarmee

het berekende hydraulische belastingniveau. Daarom hebben we de waterloop bijgedraaid zodanig dat deze precies Zuidwest – Noordoost komt te liggen. Het resultaat is weergegeven in Figuur 4-9. De grootste effectieve strijklengte is nu 268 m. De lengte van de waterloop beïnvloedt de grootte van de berekende effectieve strijklengtes. De gekozen 3,5 km is naar ons idee behoorlijk lang en daardoor aan de conservatieve kant. Met deze effectieve strijklengtes levert PROMOTOR een hydraulische belastingniveau van 0,18 m+NAP bij een ruwheidslengte van 0,6 m. Bij een ruwheidslengte van 0,5 m berekenen we een hydraulisch belastingniveau van 0,28 m+NAP en bij een ruwheidslengte van 0,03 m berekenen we een hydraulisch belastingniveau van 0,46 m+NAP. De invloed van de wind is verder toegenomen.



Figuur 4-9: Effectieve strijklengtes bij een rechthoekige waterloop met een breedte van 20 meter en precies ZW – NO georiënteerd.

De (tweede) waterloop met een breedte van 20 meter hebben we in stappen verbreed. Achtereenvolgens hebben we de breedtes 50 m, 100 m, 200 m, 400 m, 1000 m en 4000 m. Met de laatste breedte kan de waterloop zeker als een meer beschouwd worden. Figuur 4-10 maakt dit inzichtelijk.



Figuur 4-10: Effectieve strijklengtes bij een meer met afmetingen 4 km bij 3,5 km.

In Tabel 4-2 zijn de berekende hydraulische belastingniveaus weergegeven voor de verschillende breedtes van de waterloop voor een ruwheidslengte van 0,6 m. Ook bevat deze tabel telkens de grootste effectieve strijklengtes. In de laatste kolom van deze tabel is het verschil weergegeven met het boezempeil dat gemiddeld eens in de 100 jaar optreedt (-0,018 m+NAP).

Waterloop (breedte [m])	Grootste effectieve strijklengte [m]	HBN [m+NAP]	Vershil met 1/100 ^e boezempeil [m]
Overloop	0	0,02	0,04
In watersysteem	15	0,03	0,05
20 m (geroteerd)	80	0,08	0,10
20	268	0,18	0,20
50	318	0,21	0,23
100	400	0,26	0,28
200	566	0,36	0,38
400	896	0,54	0,56
1000	1687	0,90	0,92
4000	3225	1,46	1,48

Tabel 4-2: Hydraulisch belastingniveau als functie van de breedte van een waterloop bij een ruwheidslengte van 0,6 m.

Waterloop (breedte [m])	Grootste effectieve strijklengte [m]	HBN [m+NAP]	Verskil met 1/100° boezempeil [m]
Overloop	0	0,06	0,08
In watersysteem	15	0,08	0,10
20 m (geroteerd)	80	0,14	0,16
20	268	0,28	0,30
50	318	0,32	0,34
100	400	0,38	0,40
200	566	0,50	0,52
400	896	0,71	0,73
1000	1687	1,13	1,15
4000	3225	1,78	1,80

Tabel 4-3: Hydraulisch belastingniveau als functie van de breedte van een waterloop bij een ruwheidslengte van 0,25 m.

Waterloop (breedte [m])	Grootste effectieve strijklengte [m]	HBN [m+NAP]	Verskil met 1/100° boezempeil [m]
Overloop	0	0,15	0,17
In watersysteem	15	0,18	0,20
20 m (geroteerd)	80	0,27	0,29
20	268	0,46	0,48
50	318	0,51	0,53
100	400	0,58	0,60
200	566	0,73	0,75
400	896	0,99	1,01
1000	1687	1,52	1,54
4000	3225	2,30	2,32

Tabel 4-4: Hydraulisch belastingniveau als functie van de breedte van een waterloop bij een ruwheidslengte van 0,03 m.