

VERANDERING VAN KANS OP WATEROVERLAST IN HET MARK-VLIET SYSTEEM

ALS GEVOLG VAN AANWIJZING VAN HET VOLKERAK-ZOOMMEER VOOR HOOGWATERBERGING



Marlies Zantvoort

Ministerie van Verkeer en Waterstaat



Rijkswaterstaat



Universiteit Twente
de ondernemende universiteit

Foto's voorkant:

De monding van de Dintel met aangrenzend het Volkerak-Zoommeer [32a]

Hoogwater in de Bovenmark [63]

VERANDERING VAN DE KANS OP WATEROVERLAST IN HET MARK-VLIET SYSTEEM

ALS GEVOLG VAN AANWIJZING VAN HET VOLKERAK-ZOOMMEER VOOR HOOGWATERBERGING

Afstudeerrapport Marlies Zantvoort

Enschede
29 september 2006

Afstudeercommissie:
Dr. ir. D.C.M. Augustijn
Ir. J.A.E.B. Janssen
Drs. Q.J. Lodder
Drs. N. Sloodjes

Universiteit Twente



Rijkswaterstaat RIZA

Ministerie van Verkeer en Waterstaat



Rijkswaterstaat

Voorwoord

Bij aanvang van mijn afstuderen zeiden al de leden van mijn afstudeercommissie: “Jouw plannen zijn wel erg ambitieus”. Ik was me daarvan bewust, maar houdt er niet van om dingen al af te schrijven voordat ik goed en wel weet wat de mogelijkheden zijn, dus ik begon met een brede doelstelling. Langzaam begon mijn afstudeeronderzoek vorm aan te nemen en begon ik in te zien dat kansberekeningen niet zo makkelijk zijn als ik had gedacht. Deze kennis komt niet uit een studieboek, ieder watersysteem vraagt om een eigen aanpak. Gelukkig stonden Quirijn Lodder en Hans de Waal mij bij tijdens alle stappen in het proces van kansberekenen en heb ik veel mogen leren van de ervaring die zij op dit gebied hebben. Ik wil Quirijn en Hans graag bedanken voor hun onaflatende hulp.

Nadine Slootjes was degene die mij de kans heeft geboden om bij RIZA af te studeren. Bovendien is zij de expert op het gebied van hoogwaterberging op het Volkerak-Zoommeer en heeft mij in die hoedanigheid geholpen met inhoudelijke vragen over deze maatregel en de onderzoeken die al waren verricht naar de gevolgen ervan. Ik wil Nadine bij deze bedanken voor alle inhoudelijke input en voor de gezellige band die we hadden, zelfs nadat zij haar baan bij RIZA had ingeruild voor een baan bij HKV in Lelystad.

Vanuit de universiteit werd ik door mijn afstudeerdocent Denie Augustijn en mijn afstudeerbegeleider Judith Janssen bijgestaan. Ik heb hun begeleiding als zeer positief en constructief beschouwd. Doordat zij bij aanvang van mijn afstuderen minder kennis hadden van de inhoud van mijn afstudeeronderzoek, waren ze vooral belangrijk voor het begeleiden van mijn rapport en planning. Ze waren een zeer goede toets voor mij om te bepalen of mijn rapport begrijpbaar was en ik denk dat ik door hun vele suggesties erin geslaagd ben om een moeilijk onderwerp om te zetten in dit verslag. Ik wil zowel Denie als Judith bedanken voor alle tijd die ze in mijn afstuderen hebben gestoken.

Naast mijn dagelijkse begeleiders zijn er nog een aantal mensen die mij geholpen hebben om mijn afstuderen tot een zo goed mogelijk einde te brengen. Professor Hoekstra en Piet Polak van het waterschap Brabantse Delta en alle andere mensen die mij van informatie hebben voorzien of een probleem voor me hebben getackeld wil ik via deze weg bedanken. Ik wil bovendien iedereen bij RIZA in Rotterdam bedanken voor hun hulp en de gezellige tijd die ik bij hen heb gehad.

Met hulp van alle hierboven genoemde mensen heb ik mijn breed opgezette onderzoek uiteindelijk kunnen invullen op een manier die binnen de gestelde tijd haalbaar was en ik ben zelf in ieder geval heel tevreden met het eindresultaat.

Tijdens het afstuderen is het soms moeilijk om te onthouden dat er ook nog andere belangrijke dingen zijn. Ik wil mijn familie bedanken dat ze mij hieraan hebben herinnerd wanneer het nodig was. Ik wil met name Papa, Mama, Anne Fleur, Joris en Bart bedanken voor hun liefde. De belangrijkste persoon gedurende mijn afstuderen was mijn vriend Jaap. Omdat hij ook aan het afstuderen was, zaten we een beetje in hetzelfde schuitje. Ik vond het heel fijn dat je me zo goed begreep en dat je jouw eigen dingen aan de kant zette om mij te steunen als dat nodig was.

Marlies Zantvoort

Rotterdam, 3 september 2006

Samenvatting

In 2000 is de Nederlandse overheid een nieuwe weg ingeslagen op het gebied van rivierenbeheer met de planologische kernbeslissing 'Ruimte voor de Rivier' als resultaat. Dit beleid beoogt een duurzamer waterbeheer, door waar mogelijk rivierverruimende maatregelen toe te passen in plaats van de dijken te blijven verhogen en rekening te houden met de ontwikkelingen van het klimaat op de lange termijn. Eén van de maatregelen die in de PKB is opgenomen, is hoogwaterberging op het Volkerak-Zoommeer, een zoetwatersysteem in de Zeeuwse Delta. Doordat met een verwachte inzetfrequentie op de korte termijn van 1/1430 jaar de waterstand op het Volkerak-Zoommeer twee dagen verhoogd is tot meer dan 2 m +NAP, wordt de afwatering van het West-Brabantse Mark-Vliet systeem gestremd. Om vast te kunnen stellen welke overheidsinstantie verantwoordelijk is voor de hieruit resulterende toename van het risico van wateroverlast, moeten zowel de kanstoename als de toename van de gevolgen gekwantificeerd worden. Dit onderzoek heeft als doel de toename van de kans op wateroverlast vanuit het Mark-Vliet systeem als gevolg van de maatregel hoogwaterberging op het Volkerak-Zoommeer op probabilistische wijze te bepalen.

In dit onderzoek is gekeken naar de kans op wateroverlast in de boezem die wordt veroorzaakt door het overstromen van de boezemkeringen en de stremming van gemalen door de verhoging van de waterstanden in het Mark-Vliet systeem. De methode om te komen tot de verandering van de kans op wateroverlast was opgebouwd uit drie stappen:

1. Er zijn overschrijdingsfrequentielijnen inclusief windopzet bepaald voor de waterstanden bij de mondingen door middel van het probabilistische rekenprogramma Hydra-M.
2. Er zijn vervolgens waterstandberekeningen uitgevoerd met Duflow voor het Mark-Vliet systeem aan de hand van de met Hydra-M berekende overschrijdingsfrequentielijnen van de waterstanden bij de mondingen in combinatie met verschillende afvoergolven.
3. Voor het bepalen van de overschrijdingsfrequentielijnen van de waterstanden in het Mark-Vliet systeem is de probabilistische kans op wateroverlast benaderd met behulp van de deterministische IJsseldelta methode. Voor locaties waar zich wateroverlast voordoet zijn overschrijdingsfrequentielijnen bepaald voor de huidige situatie en de situatie met aanwijzing van het Volkerak-Zoommeer voor hoogwaterberging. Uit het verschil tussen de twee lijnen is de toename van de kans bepaald.

Met Hydra-M zijn nieuwe overschrijdingsfrequentielijnen berekend van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer ter plaatse van de mondingen voor de huidige situatie en de situatie met hoogwaterberging. De overschrijdingsfrequentielijnen laten zien dat de waterstand bij de Dintelmonding windgedomineerd is, met uitzondering van de situatie waarin het Volkerak-Zoommeer ingezet is voor berging. De waterstand bij de Vlietmonding is in alle situaties meerpeilgedomineerd. Zowel de resultaten van BretView als de resultaten van Hydra-M bevatten een significante mate van onzekerheid door een beperking in de hoeveelheid meetgegevens en de versimpeling van de gebruikte modellen ten opzichte van de werkelijkheid. Vooral aanname van stationariteit en de keuze van een gemiddelde bodemhoogte resulteert in het Volkerak-Zoommeer in een significante onzekerheid. Aangezien de windopzet beïnvloed wordt door de waterdiepte, resulteert dit vooral in situaties die windgedomineerd zijn in onzekerheden. De waterstanden op meerpeilgedomineerde locaties (bij inzet van het Volkerak-Zoommeer zijn dit alle locaties langs het Volkerak-Zoommeer) worden veel minder beïnvloed door de onzekerheden.

Met het 1D-programma DufLOW zijn de waterstanden in het Mark-Vliet systeem berekend. Hierbij is op basis van een correlatieanalyse van HKV LIJN IN WATER uitgegaan van een verlate inzet van het Volkerak-Zoommeer ten opzichte van de afvoerpiek in het Mark-Vliet systeem. Als gevolg van de vernieuwde inzichten aangaande de waterstandbeweging op het Volkerak-Zoommeer, zijn de waterstanden die in dit onderzoek zijn berekend lager dan de waterstanden die door het waterschap Brabantse Delta waren bepaald. Uit de berekeningen is verder gebleken dat de invloed van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer bij inzet voor hoogwaterberging verder stroomopwaarts reikt door opstuwing. Wanneer bij inzet van het Volkerak-Zoommeer een afvoer met een herhalingstijd van 100 jaar optreedt, is deze invloed in de Mark waarneembaar tot Nieuwveer. Bij Breda treden geen waterstandveranderingen op. Inzet van het Volkerak-Zoommeer voor berging leidt alleen langs de Mark tot overstromingen. De stremming van gemalen veroorzaakt geen verandering van de kans op wateroverlast.

Aan de hand van de IJsseldelta methode zijn samengestelde verhanglijnen met een herhalingstijd van 25, 50, 100 en 2000 jaar berekend. Doordat de waterstanden bij een herhalingstijd van 2000 jaar veranderen door aanwijzing van het Volkerak-Zoommeer voor hoogwaterberging, kan het verschil tussen de herhalingstijd waarbij wateroverlast optreedt in de huidige en de nieuwe situatie bepaald worden. Voor het laagste punt in de keringen langs de Mark, net benedenstrooms van de bergboezems, treedt al wateroverlast op bij afvoeren met een herhalingstijd kleiner dan 1430 jaar; de toename van de kans op wateroverlast is dus verwaarloosbaar. Op andere locaties neemt de kans, en daarmee het risico van wateroverlast, wel toe. Ter hoogte van de bergboezems treedt in de huidige situatie met een herhalingstijd van ± 1840 jaar wateroverlast op. Door hoogwaterberging op het Volkerak-Zoommeer wordt deze herhalingstijd verlaagd naar 1430 jaar. Ter hoogte van de Laaksche Vaart verandert de herhalingstijd van wateroverlast van ± 2660 jaar naar ± 1630 jaar.

De onzekerheden in de bepalingen van de waterstanden op het Volkerak-Zoommeer met BretView spelen geen significante rol in de overschrijdingsfrequentielijnen die zijn bepaald voor de waterstanden in de Mark. De onzekerheden die worden veroorzaakt door de aannames die zijn gemaakt in Hydra-M en de IJsseldelta methode beïnvloeden deze overschrijdingsfrequentielijnen wel. Deze onzekerheden zijn moeilijk te kwantificeren, maar er is aangenomen dat de resultaten in ieder geval een goede indicatie vormen van het kansverschil tussen de huidige situatie en de situatie met inzet van het Volkerak-Zoommeer.

De conclusie is dat de kans op wateroverlast op de korte termijn over het gehele systeem gezien niet toeneemt, maar op verschillende locaties langs de Mark wel hoger wordt door inzet van het Volkerak-Zoommeer. Op grond van nieuwe inzichten aangaande de windinvloed op de waterstand en de timing en hoogte van de waterstandpiek op het Volkerak-Zoommeer, konden de te verwachte waterstanden in het Mark-Vliet systeem naar beneden bijgesteld worden. Bovendien is in dit onderzoek gebleken dat Hydra-M en de IJsseldelta methode, beide ontwikkeld voor het IJsselmeergebied, gebruikt kunnen worden voor respectievelijk het Volkerak-Zoommeer en het Mark-Vliet systeem. De resultaten van dit onderzoek geven ondanks de onzekerheden een goede indicatie van hoe de kans op wateroverlast maximaal verandert op de korte termijn door inzet van het Volkerak-Zoommeer. De resultaten voldoen om te bepalen in welke mate het risico verandert en dus of er sprake is van onevenredige effecten voor waterschap Brabantse Delta.

Inhoudsopgave

Voorwoord	4
Samenvatting	5
Lijst met figuren	10
Lijst met tabellen	13
Hoofdstuk 1. Inleiding	15
1.1. Voorgeschiedenis	15
1.1.1. De geschiedenis van het rivierenbeheer	15
1.1.2. Een kijkje in de toekomst	16
1.1.3. Ruimte voor de Rivier	17
1.2. Hoogwaterberging op het Volkerak-Zoommeer	18
1.2.1. Het Volkerak-Zoommeer	18
1.2.2. De maatregel hoogwaterberging	19
1.2.3. Voorgaand onderzoek naar de maatregel	20
1.3. Gevolgen voor West-Brabant	22
1.3.1. Verwachte wateroverlast	22
1.3.2. Aansprakelijkheid voor onevenredige effecten	22
1.3.3. Hiaten in voorgaand onderzoek	23
1.4. Doelstelling en afbakening	24
1.5. Leeswijzer	27
Hoofdstuk 2. Gebiedsomschrijving	29
2.1. West-Brabant	29
2.2. Mark-Vliet systeem	30
2.2.1. Beschrijving van het stroomgebied en het watersysteem	30
2.2.2. Kenmerken	31
2.2.3. Systemschematisatie	32
2.3. Volkerak-Zoommeer	33
Hoofdstuk 3. Definities en Methode	36
3.1. Definitie van de kans op wateroverlast uit het Mark-Vliet systeem	36

3.1.1. Overstromen van de keringen	36
3.1.2. Stremming van gemalen	37
3.1.3. Stremming van beken	38
3.1.4. Kansbepaling	38
3.2. Afvoer door het Mark-Vliet systeem	39
3.3. Waterstanden op het Volkerak-Zoommeer	40
3.4. Correlatie Mark-Vliet systeem en Volkerak-Zoommeer	41
3.4.1. Correlatie afvoer Mark-Vliet systeem en meerpeil Volkerak-Zoommeer	41
3.4.2. Correlatie afvoer Mark-Vliet systeem en inzet Volkerak-Zoommeer	42
3.5. Methode	44
3.5.1. Stap 1: Overschrijdingsfrequenties van het Volkerak-Zoommeer	44
3.5.2. Stap 2: Waterstanden in het Mark-Vliet systeem	46
Afvoer Mark-Vliet systeem	46
Waterstand Volkerak-Zoommeer	46
3.5.3. Stap 3: Overschrijdingsfrequenties van het Mark-Vliet systeem	47
Hoofdstuk 4. Windinvloed op het Volkerak-Zoommeer	50
4.1. De waterbeweging op het Volkerak-Zoommeer	50
4.1.1. BretView	50
4.1.2. Toepassing van BretView	50
4.1.3. Windinvloed op het Volkerak-Zoommeer	52
4.1.4. Resultaten: waterstanden in de Dintel- en Vlietmonding	52
4.1.5. Validatie BretView	54
4.2. Probabilistische waterstanden op het Volkerak-Zoommeer	57
4.2.1. De werkwijze van Hydra-M	57
4.2.2. Hydra-M voor het Volkerak-Zoommeer	59
4.2.3. Resultaten van Hydra-M berekeningen	61
4.2.4. Gevoeligheid van de resultaten voor de bodemhoogte	64
Hoofdstuk 5. Waterstandberekeningen Mark-Vliet systeem	67
5.1. Theorie DufLOW	67
5.2. Het Mark-Vliet systeem gemodelleerd in DufLOW	68
5.3. Randvoorwaarden Volkerak-Zoommeer	70
5.4. Resultaten van de DufLOW-berekeningen	73
5.5. Vergelijking van resultaten met eerder onderzoek	77
5.6. Gevoeligheid voor randvoorwaarde Volkerak-Zoommeer	79
5.6.1. De verhouding waterstand Dintelmonding/waterstand Vlietmonding	79
5.6.2. Onzekerheid bodemhoogte Volkerak-Zoommeer	80
5.7. Veranderingen in de verhanglijnen in het Mark-Vliet systeem	81

5.7.1. Overstromen van de keringen	81
5.7.2. Stremming van de vijzelgemalen	85
5.8. Conclusies naar aanleiding van de DufLOW-resultaten	86
 Hoofdstuk 6. Toename van de kans op wateroverlast	 89
6.1. Toepassing van de IJsseldelta methode	89
6.2. Resulterende verhanglijnen	93
6.3. Overschrijdingsfrequentielijnen van het Mark-Vliet systeem	99
 7. Discussie	 106
7.1. Onzekerheden in de modellering	106
7.1.1. BretView	106
7.1.2. Hydra-M	107
7.1.3. DufLOW	108
7.1.4. IJsseldelta methode	108
7.2. Onzekerheden in randvoorwaarden	109
7.2.1. Timing van de waterstandtop Volkerak-Zoommeer ten opzichte van de afvoerpiek	109
7.2.2. De vorm van de afvoergolf	111
7.2.3. Duur van hoogwaterberging	111
7.3. Discussie van de resultaten	112
7.4. Gevolgen voor de lange termijn	113
7.5. Aanbevelingen	114
 8. Conclusies	 117
 Literatuur en websites	 120
 Begrippen	 126
 Bijlagen	 129

Lijst met figuren

Figuur 1.1: Van een natuurlijke rivier (boven) naar een ingeperkte rivier (onder) [3].....	15
Figuur 1.2: Vier klimaatscenario's voor Nederland in 2050 ten opzichte van 1990, opgesteld door het KNMI op basis van mondiale klimaatprojecties.....	16
Figuur 1.3: Maatregelen uit het basispakket van de PKB Ruimte voor de Rivier voor op de korte termijn...	18
Figuur 1.4: Kaart van het Volkerak-Zoommeer [aangepast van 12].....	19
Figuur 1.5: De maatregel berging op het Volkerak-Zoommeer [aangepast van 15].....	20
Figuur 1.6: Overschrijdingsfrequentielijn van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer voor de korte termijn [aangepast van 2].....	21
Figuur 1.7: Causaal relatiediagram van het risico van wateroverlast in de Mark-Vliet boezem inclusief of exclusief hoogwaterberging op het Volkerak-Zoommeer.....	25
Figuur 2.1: West-Brabant [aangepast van 23, 24].....	29
Figuur 2.2: Het Mark-Vliet systeem [aangepast van 31] met foto's.....	30
Figuur 2.3: Schematisch dwarsprofiel van de Mark of Vliet.....	32
Figuur 2.4: Schematisatie van het Mark-Vliet systeem met de belangrijkste toevoerpunten, gemalen en andere kenmerken [aangepast van 21].	32
Figuur 2.5: Het Volkerak-Zoommeer. Inzet: Foto's van het Volkerak-Zoommeer [34a, b, c, d & e].	33
Figuur 2.6: Dieptekaart van het Volkerak-Zoommeer [GIS].....	34
Figuur 3.2: Overschrijdingsfrequentielijn (fictief voorbeeld) van de waterstanden in de Mark-Vliet boezem in de huidige situatie en in de situatie met inzet van het Volkerak-Zoommeer [17].....	38
Figuur 3.3: Schematisatie van invloedsfactoren van de waterstanden op een meer	40
Figuur 3.4: Overschrijdingskansen van de kritieke waterstand a: afvoer MVS en waterstand VZM zijn ongecorrleerd, b: afvoer MVS en waterstand VZM zijn volledig gecorrleerd	43
Figuur 4.1: De locaties waarvoor waterstandberekeningen zijn uitgevoerd in BretView.....	52
Figuur 4.2: De met BretView berekende waterstanden	53
Figuur 4.3: Een voorbeeld van waterstanden die op kunnen treden bij de Krammersluizen (Kram), de monding van de Vliet (Vlie) en de Dintel (Dint) en bij de Volkeraksluizen (Volk). a: waterstanden gebaseerd op de huidige situatie b. Waterstanden gebaseerd op de nieuwe situatie	54
Figuur 4.4: De gemeten waterstanden versus de berekende waterstanden bij de Volkeraksluizen in het winterhalfjaar van 1987/1988.	55
Figuur 4.5: De gemeten waterstanden versus de berekende waterstanden bij de Volkeraksluizen in het winterhalfjaar van 2004/2005.	55
Figuur 4.6: Lijnen van gelijke waterstanden op basis van verschillende combinaties van meerpeilen en windsnelheden voor een bepaalde windrichting [aangepast van 40].	58
Figuur 4.7: Overschrijdingsfrequentielijnen voor de Dintelmonding in de huidige en nieuwe situatie.....	61
Figuur 4.8: Overschrijdingsfrequentielijnen voor de Vlietmonding in de huidige en nieuwe situatie.....	62
Figuur 4.9: Overschrijdingsfrequentielijnen voor de Volkeraksluizen in de huidige en nieuwe situatie.....	62
Figuur 4.10: Overschrijdingsfrequentielijnen voor de Krammersluizen in de huidige en nieuwe situatie	63
Figuur 4.11: Gevoeligheid van de overschrijdingsfrequentielijn bij de Dintelmonding voor bodemhoogte..	64
Figuur 4.12: Gevoeligheid van de overschrijdingsfrequentielijn bij de Vlietmonding voor bodemhoogte	65
Figuur 5.1b: Een dwarsdoorsnede in Dufflow [aangepast van 48].	68
Figuur 5.1a: Voorbeeld van een model in Dufflow [aangepast van 49].....	68

Figuur 5.2: Debieten bij Stampersgat (splitsing van de Mark en het Mark-Vliet kanaal) voor afvoergolven met herhalingsjiden van 1, 25, 50 en 100 jaar.....	69
Figuur 5.3: De waterstandbeweging op het Volkerak-Zoommeer, afhankelijk van de herhalingsjtid van de waterstand en de situatie.	71
Figuur 5.4: Timing van de waterstandtop op het Volkerak-Zoommeer ten opzichte van de afvoerpiek in het Mark-Vliet systeem met een herhalingsjtid van 100 jaar.....	71
Figuur 5.5: DufLOW-netwerk van het Mark-Vliet systeem.....	73
Figuur 5.6: Waterstanden in het Mark-Vliet systeem berekend met DufLOW bij een waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een herhalingsjtid van 100 jaar en een afvoer met een herhalingsjtid van respectievelijk 25, 50 en 100 jaar. Zonder inzet van het Volkerak-Zoommeer.	74
Figuur 5.7: Waterstanden in het Mark-Vliet systeem berekend met DufLOW bij een afvoergolf met een herhalingsjtid van 100 jaar en een waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een herhalingsjtid van respectievelijk 1, 100 en 1430 jaar. De waterstanden zijn berekend zonder hoogwaterberging.	74
Figuur 5.8: Waterstanden in het Mark-Vliet systeem berekend met DufLOW bij een afvoergolf met een herhalingsjtid van 100 jaar en een waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een herhalingsjtid van 1430 jaar zonder inzet (H) en met inzet (N) van het Volkerak-Zoommeer voor berging.	76
Figuur 5.9: Waterstanden in het Mark-Vliet systeem berekend met DufLOW bij een afvoergolf met een herhalingsjtid van 100 jaar en een waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een herhalingsjtid van 1430 jaar zonder inzet (H) en met inzet (N) van het Volkerak-Zoommeer voor berging. Er is hierbij uitgegaan van een verlengde waterstandverhoging van 8 dagen.....	77
Figuur 5.10: Waterstanden op een zestal locaties voor twee scenario's: gelijk = de randvoorwaarde Volkerak-Zoommeer is gelijk voor de Dintelmonding (NOD1) en de Vlietmonding (NOD336), verschil = de randvoorwaarde Volkerak-Zoommeer is verschillend voor de Dintelmonding (NOD1) en de Vlietmonding (NOD336).	79
Figuur 5.11: Waterstanden op een zestal locaties voor de drie bodemhoogte-scenario's.....	80
Figuur 5.12: Verhanglijnen in de Dintel en de Mark voor verschillende combinaties van afvoer en waterstand op het Volkerak-Zoommeer. Daarnaast zijn de keringen aan de noordzijde en de zuidzijde van het systeem weergegeven.	82
Figuur 5.13: Verhanglijnen in de Vliet voor verschillende combinaties van afvoer en waterstand op het Volkerak-Zoommeer. Daarnaast zijn de keringen aan de noordzijde en de zuidzijde van het systeem weergegeven.	83
Figuur 5.14: Verhanglijnen in het Mark-Vliet kanaal voor verschillende combinaties van afvoer en waterstand op het Volkerak-Zoommeer. Daarnaast zijn de keringen aan de noordzijde en de zuidzijde van het systeem weergegeven.	83
Figuur 5.15: Indicatie van de verhanglijnen in de zuidsingel van Breda bij een bergingsduur van respectievelijk 2 en 8 dagen. Daarnaast zijn de kadehoogtes weergegeven [21].	85
Figuur 5.16: Verhanglijnen in een deel van de Vliet voor verschillende combinaties van afvoer en waterstand op het Volkerak-Zoommeer en de kritieke waterstand voor de vjzelgemalen Visvliet en Oude Veer [21].....	86
Figuur 6.1: Verhanglijn met een frequentie van 1/2000 jaar bepaald volgens de IJsseldelta methode [aangepast van 50].	90
Figuur 6.2: Mark-Vliet systeem zoals geschematiseerd in DufLOW, gescheiden per tak.....	95
Figuur 6.3: Verhanglijn met een totale herhalingsjtid van 25 jaar zoals deze is bepaald met de IJsseldelta methode.....	96

Figuur 6.4: Verhanglijnen met een totale herhalingstijd van 50 jaar zoals deze is bepaald met de IJsseldelta methode.....	96
Figuur 6.5: Verhanglijnen met een totale herhalingstijd van 100 jaar zoals deze is bepaald met de IJsseldelta methode.....	97
Figuur 6.6: In de huidige situatie, zonder hoogwaterberging op het Volkerak-Zoommeer, is de verhanglijnen met een totale herhalingstijd van 2000 jaar gelijk aan de verhanglijnen van de afvoer van T=2000.....	97
Figuur 6.7: Verhanglijnen met een totale herhalingstijd van 2000 jaar met inzet van het Volkerak-Zoommeer zoals deze is bepaald met de IJsseldelta methode.....	98
Figuur 6.8: Verhanglijnen in een deel van de Mark voor verschillende combinaties van afvoer en waterstand op het Volkerak-Zoommeer. Daarnaast zijn de keringen aan de noordzijde en de zuidzijde van het systeem weergegeven. De keringhoogtes zijn uit GIS verkregen. Met rood is de hoogte (m +NAP) van het laagste punt in de kering aangegeven.....	99
Figuur 6.9: Overschrijdingsfrequentielijnen van de waterstand in de Mark bij Oudenbosch (NOD24) in de situatie zonder hoogwaterberging (huidig) en de situatie waarbij het Volkerak-Zoommeer is aangewezen voor hoogwaterberging (nieuw). Ook is het laagste punt van de boezemkering bij Oudenbosch weergegeven.....	101
Figuur 6.10: Overschrijdingsfrequentielijnen van de waterstand in de Mark bij de aftakking van de Laaksche Vaart (NOD38) in de situatie zonder hoogwaterberging (huidig) en de situatie waarbij het Volkerak-Zoommeer is aangewezen voor hoogwaterberging (nieuw). Ook is het laagste punt van de boezemkering bij de Laaksche Vaart weergegeven.	101
Figuur 6.11: Overschrijdingsfrequentielijnen van de waterstand in de Mark op het punt waar de boezemkering het laagst is in de situatie zonder hoogwaterberging (huidig) en de situatie waarbij het Volkerak-Zoommeer is aangewezen voor hoogwaterberging (nieuw). Ook is het laagste punt van de boezemkering weergegeven.	102
Figuur 6.12: Overschrijdingsfrequentielijnen van de waterstand in de Mark bij Nieuwveer (NOD52) in de situatie zonder hoogwaterberging (huidig) en de situatie waarbij het Volkerak-Zoommeer is aangewezen voor hoogwaterberging (nieuw). Ook is het laagste punt van de boezemkering bij Nieuwveer weergegeven.	102
Figuur 6.13: Overschrijdingsfrequentielijnen van de waterstand in de Mark bij de aftakking van het Mark-kanaal (NOD61) in de situatie zonder hoogwaterberging (huidig) en de situatie waarbij het Volkerak-Zoommeer is aangewezen voor hoogwaterberging (nieuw). Ook is het laagste punt van de boezemkering bij het Mark-kanaal weergegeven.....	103
Figuur 7.1: Waterstanden in het Mark-Vliet systeem zoals berekend met Duflo bij een afvoergolf met een herhalingstijd van 100 jaar en een waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een herhalingstijd van 1430 jaar zonder inzet van het Volkerak-Zoommeer. De waterstanden zijn berekend voor zowel variant 1 als variant 2.....	109
Figuur 7.2: Waterstanden in het Mark-Vliet systeem zoals berekend met Duflo bij een afvoergolf met een herhalingstijd van 100 jaar en een waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een herhalingstijd van 1430 jaar met inzet van het Volkerak-Zoommeer voor hoogwaterberging. De waterstanden zijn berekend voor zowel variant 1 als variant 2.....	110

Lijst met tabellen

Tabel 3.1: Mogelijke combinaties voor het berekenen van de verhanglijnen in het Mark-Vliet systeem.	46
Tabel 4.1: De kwadratensommen van de verschillen tussen de gemeten en de berekende waterstanden.....	56
Tabel 4.2: Vergelijking van de windopzet uit een onderzoek daterend uit 1987 en de resultaten van BretView bij windsnelheden van 8, 9 en 10 Bft.	56
Tabel 5.1: Overschrijdingsfrequenties van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer bij de Dintelmonding en de Vlietmonding in de situatie met en zonder inzet van het Volkerak-Zoommeer zoals berekend met Hydra-M, uitgaande van een bodemhoogte van 6 m - NAP.	72
Tabel 5.2: Maximale waterstanden (m + NAP) uit scenario's afkomstig uit [16] vergeleken met maximale waterstanden (m + NAP) berekend met Dulfow	78
Tabel 5.3: De maximale waterstanden (m + NAP) die optreden na 1 februari bij inzet van het Volkerak- Zoommeer.....	79
Tabel 6.1: De combinaties die met DufLOW berekend zijn om tot de samengestelde verhanglijn met een overschrijdingsfrequentie van 1/25 jaar, 1/50 jaar, 1/100 jaar, 1/2000 jaar in de huidige situatie en 1/2000 jaar in de situatie met berging.	92
Tabel 6.2: IJsseldelta methode uitgewerkt voor herhalingsjaren van 25, 50, 100 en 2000 jaar.....	94



Hoofdstuk 1. Inleiding

Het Nederlandse waterbeheer is sinds 2000 een nieuwe weg ingeslagen. Het uitgangspunt van bescherming tegen hoogwater is niet langer het ophogen van dijken, maar het (terug)geven van ruimte aan de rivieren. De overheid heeft dit vastgelegd in de planologische kernbeslissing (PKB) ‘Ruimte voor de Rivier’ [1]. Er is in 2005 een basispakket met maatregelen opgesteld, waarmee gerealiseerd zal worden dat de Rijn en Maas in 2015 respectievelijk 16.000 m³/s en 3.800 m³/s water veilig af kunnen voeren.

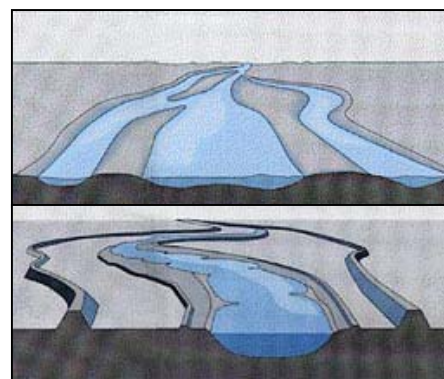
Het bergen van water uit de Nederlandse benedenrivieren op het Volkerak-Zoommeer is één van de maatregelen in dit basispakket [1]. Hoogwaterberging op het Volkerak-Zoommeer heeft echter een aantal negatieve gevolgen, onder andere voor de waterhuishouding van West-Brabant [2]. Het doel van dit onderzoek is de toename van de kans op wateroverlast in de Brabantse rivieren door de inzet van het Volkerak-Zoommeer voor hoogwaterberging te kwantificeren. Er zijn al een aantal onderzoeken naar de kans en gevolgen voor West-Brabant uitgevoerd, maar hierbij zijn een aantal aspecten onderbelicht gebleven. Met dit onderzoek is voor het eerst een beeld van de totale kansverandering geschapen.

Ter inleiding wordt in paragraaf 1.1 eerst de voorgeschiedenis van ‘Ruimte voor de Rivier’ kort besproken. In paragraaf 1.2 worden de kenmerken van de maatregel hoogwaterberging op het Volkerak-Zoommeer besproken. De gevolgen die verwacht worden in West-Brabant zijn onderwerp van paragraaf 1.3. In deze paragraaf wordt ook ingegaan op de aansprakelijkheidskwestie, wie is waar verantwoordelijk voor? Hieruit komen een aantal punten naar voren die onderzocht moeten worden, zodat bepaald kan worden of West-Brabant onevenredige problemen ondervindt van de nationale maatregel. In paragraaf 1.4 worden vervolgens de doelstelling en onderzoeksvragen van dit onderzoek gepresenteerd. Hoofdstuk 1 wordt afgesloten met een leeswijzer van dit rapport.

1.1. Voorgeschiedenis

1.1.1. De geschiedenis van het rivierenbeheer

In het verleden zijn in Europa de grote rivieren en hun zijrivieren gekanaliseerd, bedijkt en verder ingeperkt, zoals figuur 1.1 laat zien. Door de vele ingrepen in het rivierensysteem is de natuurlijke veerkracht van dit systeem grotendeels verdwenen. In 1850 besloeg het winterbed van de Nederlandse rivieren nog een oppervlakte van 80.000 ha, nu is dat nog maar 30.000 ha [4]. Grote delen van de stroomgebieden bestaan nu uit verhard oppervlak of landbouwgrond in plaats van bebossing, waardoor de afstroming sterk is versneld. De neerslag die valt in een stroomgebied stroomt snel naar het oppervlaktewater, waarna het door de rechtgetrokken zijrivieren zeer snel naar de hoofdriever stroomt [5]. De piekafvoeren zijn toegenomen door de versnelde afvoer en er is geen ruimte meer voor berging. Hieruit is de noodzaak ontstaan om de



Figuur 1.1: Van een natuurlijke rivier (boven) naar een ingeperkte rivier (onder) [3]

dijken steeds verder op te hogen ten einde overstromingen te voorkomen. In Nederland wordt deze noodzaak nog eens vergroot door de doorgaande bodemdaling [6].

Bijna 900 jaar nadat men begonnen is de rivieren naar de hand te zetten, heeft men moeten vaststellen dat dit verregaande consequenties heeft [7]. Het achterland is veel beter beschermd tegen overstromingen, maar er moet keer op keer geïnvesteerd worden om de negatieve gevolgen van het insnoeren van de rivieren tegen te gaan of te beperken [7]. Een oplossing van dit probleem kan gevonden worden in het verruimen van het winterbed van de rivieren. Desalniettemin is het niet mogelijk om het hele beleid zomaar ineens om te gooien, al het ingepolderde land terug te geven aan de rivier en de loop weer vrij te laten. Er zijn in de geschiedenis van het waterbeheer grote sommen geld geïnvesteerd om de rivieren in Europa beheersbaar en bevaarbaar te maken en de ruimte die de rivier is ontnomen is nu vaak drukbevolkt. Er is echter nog een aanleiding om het rivierbeheer te herzien: de verwachte klimaatverandering.

1.1.2. Een kijkje in de toekomst

Sinds een aantal jaar is een globale opwarming van de aarde gesignaleerd [8]. Het KNMI heeft recentelijk vier klimaatscenario's gepresenteerd voor Nederland in 2050. Deze scenario's zijn in figuur 1.2 gepresenteerd. In de vier scenario's is onderscheid gemaakt tussen een gematigde of een warme temperatuurverandering en tussen het wel of niet veranderen van luchtstromingen. Afhankelijk van deze randvoorwaarden zijn klimaatveranderingen voor Nederland berekend [8].

Wereldwijde temperatuurstijging Verandering in luchtstromingspatronen		Gematigd +1°C nee	Gematigd + +1°C ja	Warm +2°C nee	Warm + +2°C ja
Winter ³	gemiddelde temperatuur	+0,9°C	+1,1°C	+1,8°C	+2,3°C
	koudste winterdag per jaar	+1,0°C	+1,5°C	+2,1°C	+2,9°C
	gemiddelde neerslaghoeveelheid	+4%	+7%	+7%	+14%
	aantal natte dagen (≥ 0,1 mm)	0%	+1%	0%	+2%
	10-daagse neerslagsom die eens in de 10 jaar wordt overschreden	+4%	+6%	+8%	+12%
	hoogste daggemiddelde windsnelheid per jaar	0%	+2%	-1%	+4%
Zomer ³	gemiddelde temperatuur	+0,9°C	+1,4°C	+1,7°C	+2,8°C
	warmste zomerdag per jaar	+1,0°C	+1,9°C	+2,1°C	+3,8°C
	gemiddelde neerslaghoeveelheid	+3%	-10%	+6%	-19%
	aantal natte dagen (≥ 0,1 mm)	-2%	-10%	-3%	-19%
	dagsom van de neerslag die eens in de 10 jaar wordt overschreden	+13%	+5%	+27%	+10%
	potentiële verdamping	+3%	+8%	+7%	+15%
Zeespiegel absolute stijging		15-25 cm	15-25 cm	20-35 cm	20-35 cm

Figuur 1.2: Vier klimaatscenario's voor Nederland in 2050 ten opzichte van 1990, opgesteld door het KNMI op basis van mondiale klimaatprojecties. Voor uitleg zie www.knmi.nl/klimaatscenarios/knmi06 [8].

De vier scenario's laten een aantal algemene trends zien, welke indicatief ook voor de stroomgebieden van de Rijn en Maas gelden, met uitzondering van de Alpen [8]. Twee van deze trends hebben directe gevolgen voor de maximale waterstanden op de grote rivieren in Nederland:

- ~ De doorgaande opwarming van het klimaat leidt tot een toename van de stijging van het zeespiegelniveau [8]. Hierdoor zullen de waterstanden op de benedenrivieren toenemen.
- ~ In het winterseizoen zullen de neerslaghoeveelheid en de neerslagintensiteit toenemen met alle consequenties van dien voor de grootte en de frequentie van voorkomen van piekafvoeren [8].

In de huidige situatie is de Rijn gedimensioneerd om een afvoer van 15.000 m³/s veilig af te voeren en de Maas kan 3650 m³/s veilig verwerken. De extreme waterstanden in de rivieren worden echter hoger [9]. Momenteel gaat de overheid daarom uit van een toename van de afvoer op de korte termijn naar respectievelijk 16.000 m³/s en 3800 m³/s [1]. Gevolg is dat er maatregelen getroffen moeten worden om de overstromingskansen weer te laten voldoen aan de wettelijk vastgelegde veiligheidsnormen. Historisch gezien worden in deze situatie in Nederland de dijken opgehoogd en versterkt. Door de klimaatveranderingen kan echter niet worden uitgesloten dat de afvoeren tussen 2050 en 2100 toenemen tot respectievelijk 18.000 en 4600 m³/s [1]. Grootchalige dijkverbetering is dan niet langer wenselijk. Binnendijks zou een metershoge waterkolom kunnen ontstaan. Bij een dijkdoorbraak zouden de economische en emotionele gevolgen dan niet te overzien zijn. Door de rivier meer ruimte te geven, kunnen verdere toenames van de waterstanden beperkt worden [10].

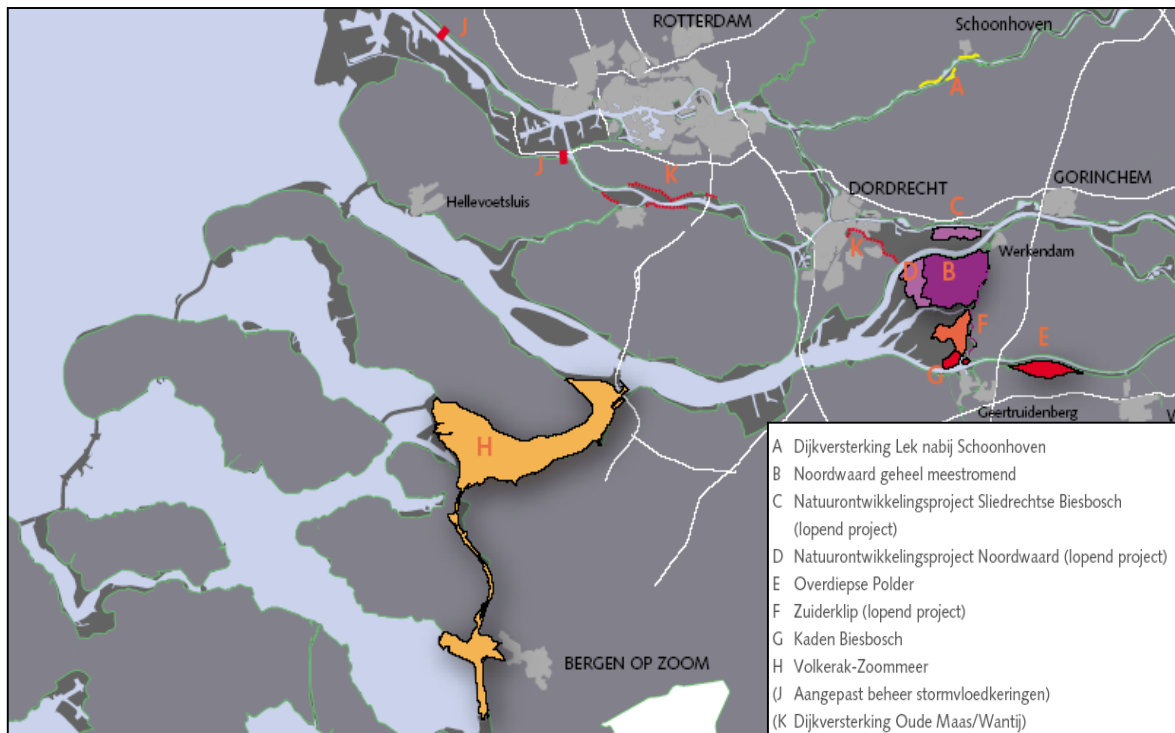
1.1.3. Ruimte voor de Rivier

Het besef dat het tot nu toe gevoerde beleid niet duurzaam is en de mogelijke gevolgen van de verwachte klimaatveranderingen hebben samen gediend als mandaat om grote investeringen te doen in het verruimen van de rivieren. De hoogwaters van 1993 en 1995 hebben Nederland eens te meer duidelijk gemaakt dat het langs de rivieren niet zo veilig is als gedacht werd. De Nederlandse overheid heeft als gevolg besloten een andere weg in te slaan op het gebied van het rivierenbeheer [10]. De rivieren moeten ruimte terug krijgen en gebruiksfuncties rond het water moeten aangepast worden aan de rivier in plaats van de rivier altijd aan te passen aan het gebruik ervan [7]. Op deze manier wil de overheid een duurzaam en veerkrachtig rivierenbeheer verwezenlijken, waarbij het belangrijk is om op toekomstige ontwikkelingen te anticiperen [11].

Het nieuwe beleid aangaande veiligheid rondom de grote rivieren is vastgelegd in de PKB '*Ruimte voor de Rivier*' [1]. De PKB stelt dat voor 2015 voldaan moet worden aan veiligheidsniveaus behorende bij een afvoer van 16.000 m³/s bij Lobith voor de Rijn en een afvoer van 3800 m³/s voor de Maas benedenstrooms van Hedikhuizen. De kern van het beleid is dat rivierverruimende ingrepen¹ worden verkozen boven dijkverbetering. Voorts stelt de PKB met oog op de klimaatveranderingen dat bij de nu te nemen maatregelen geanticipeerd moet worden op een verdere toename van de maatgevende hoogwaters op de lange termijn [1].

Maatregelen in het kader van Ruimte voor de Rivier bestaan voornamelijk uit dijkverleggingen, het verlagen van kribben, het vergraven van uiterwaarden en het verwijderen van obstakels en zomerkades. Daar waar geen ruimte is voor verruimende maatregelen worden alsnog dijkversterkingen toegepast [1]. In figuur 1.3 is weergegeven welke maatregelen getroffen worden in het benedenrivierengebied.

¹ Het kiezen voor rivierverruiming leidt in veel gevallen tot herinrichting van het rivierengebied, waardoor een koppeling ontstaat met de ruimtelijke ordening. Naast het handhaven van de veiligheidsniveaus heeft Ruimte voor de Rivier daarom een tweede doelstelling; de verruimende maatregelen moeten een bijdrage leveren aan het verbeteren van de ruimtelijke kwaliteit van het rivierengebied [1]



Figuur 1.3: Maatregelen uit het basispakket van de PKB Ruimte voor de Rivier voor de korte termijn [1].

Met deze maatregelen worden de taakstellingen² op de korte termijn voor de benedenrivieren gehaald [1]. Hoogwaterberging op het Volkerak-Zoommeer (maatregel H in figuur 1.3) is één van de maatregelen die genomen worden om de taakstelling op de benedenrivieren te halen.

1.2. Hoogwaterberging op het Volkerak-Zoommeer

1.2.1. Het Volkerak-Zoommeer

Na de voltooiing van de Deltawerken in Zeeland in 1987 vormden het Volkerak, het Krammer, het Zoommeer, de Eendracht en het Bathse Spuikanaal het Volkerak-Zoommeer. Dit zoetwatersysteem ligt in de Zeeuwse Delta en is afgesloten van de Grevelingen, de Oosterschelde, de Westerschelde en het Hollandsch Diep door middel van dammen en sluisen [2]. Figuur 1.4 geeft het Volkerak-Zoommeer, de dammen en sluisencomplexen en de directe omgeving weer.

² De taakstellingen geven het verschil weer tussen het vastgestelde toetspeil, de waterstand behorende bij normfrequentie van de betreffende waterkering, en de maatgevende hoogwaterstand (mhw) behorende bij een debiet van 16.000 m³/s op de Rijn en 3.800 m³/s op de Maas. Als door een maatregelenpakket de taakstelling wordt gehaald, betekent dit dat de waterkeringen hoog genoeg zijn om de bij de mhw behorende afvoer veilig af te kunnen voeren. De toetspeilen voor alle primaire waterkeringen in Nederland zijn vastgelegd in het *Hydraulische Randvoorwaardenboek 2001* [13]



Figuur 1.4: Kaart van het Volkerak-Zoommeer [aangepast van 12].

1.2.2. De maatregel hoogwaterberging

In het kader van ‘Ruimte voor de Rivier’ gaat men het Volkerak-Zoommeer inzetten om water te bergen vanaf het Hollandsch Diep ten tijde van extreme waterstanden op de Rijn en Maas [1]. Via de Volkeraksluizen wordt water gespuid op het Volkerak-Zoommeer als bij Rak-Noord een waterstand van 2.60 m boven NAP wordt *voorspeld* [2]. Rak-Noord is het meetpunt gelegen in het Hollandsch Diep bij de Volkeraksluizen. Randvoorwaarde voor inzet is dat de stormvloedkeringen in de Nieuwe Waterweg en het Hartelkanaal, respectievelijk de Maeslantkering en de Hartelkering, gesloten zijn [2].

Bij inzet treedt op het Volkerak-Zoommeer gedurende 2 dagen een verhoogde waterstand op; er is één dag nodig om het water in te laten en één dag om het weer weg te krijgen. Twee dagen na inzet is het peil weer teruggebracht tot 0.15 m + NAP. Het water wordt gedeeltelijk doorgevoerd naar de Oosterschelde via de Krammersluizen en naar de Westerschelde via de Bathse Spuisluis. Zodoende kan de maximale waterstand op het Volkerak-Zoommeer beperkt worden [2]. Om de duur van de waterstandverhoging op het Volkerak-Zoommeer te beperken, wordt het water na een dag teruggespuid op het Hollandsch Diep [14]. De maatregel is weergegeven in figuur 1.5.



Figuur 1.5: De maatregel berging op het Volkerak-Zoommeer. De rode pijlen geven de richting van waterberging aan, de groene pijlen de doorvoer routes [aangepast van 15].

Door berging op het Volkerak-Zoommeer wordt op het Haringvliet, het Hollandsch Diep, het Spui en de Dordtsche Kil de taakstelling opgelost. Op de Amer en de Oude Maas wordt voor een groot deel aan de taakstelling voldaan [2]. Technisch gezien kan de maatregel met kleine aanpassingen aan de huidige kunstwerken gerealiseerd worden [2].

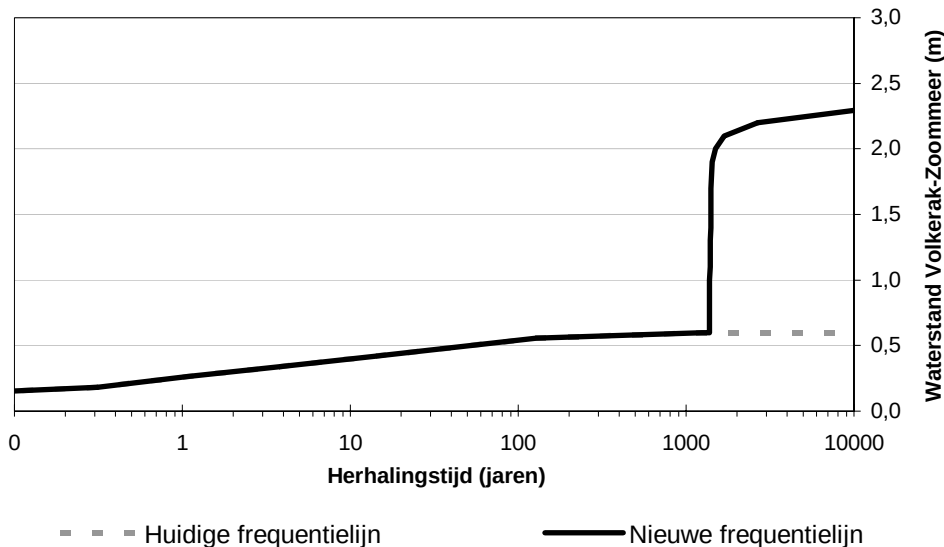
1.2.3. Voorgaand onderzoek naar de maatregel

De maatregel hoogwaterberging op het Volkerak-Zoommeer is voor het eerst bekeken in de Integrale Verkenning Benedenrivieren uit 2001. RIZA heeft in het kader van 'Ruimte voor de Rivier' een verdiepingsslag uitgevoerd, gerapporteerd in '*Hoogwaterberging Volkerak-Zoommeer. Verdiepingsslag voor Ruimte voor de Rivier*' [2]. Er van uitgaand dat de Hartelkering en de Maeslantkering gesloten zijn op het moment van inzet, is aan de hand van de overschrijdingsfrequentielijn³ voor de benedenrivieren uit het Hydraulisch Randvoorwaardenboek 2001 bepaald dat een waterstand van 2.6 m + NAP bij Rak-Noord eens in de 1430 jaar voorspeld wordt. De inzetfrequentie van het Volkerak-Zoommeer op de korte termijn is daarom 1/1430 jaar [2].

De overschrijdingsfrequentielijn van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer verandert door inzet van het systeem voor hoogwaterberging. De waterstanden die op kunnen treden worden door de maatregel veel hoger en zijn afhankelijk geworden van de hoeveelheid water die bij inzet geborgen wordt. Deze hoeveelheid water wordt bepaald door de waterstand bij Rak-Noord, welke weer afhankelijk is van de waterstand op zee, de afvoer van de Maas en de afvoer van de Rijn [2]. De huidige overschrijdingsfrequentielijn van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer is daarom aangepast aan de hand van de frequentieverdeling van de zeestanden, de afvoer van de Maas en de

³ Iedere waterstand die in een systeem kan optreden heeft een bepaalde kans van voorkomen. De overschrijdingsfrequentielijn geeft voor alle mogelijk optredende waterstanden de kans dat deze waterstanden worden overschreden.

afvoer van de Rijn. Hierbij is de waterstand op het Volkerak-Zoommeer bovendien afhankelijk gesteld van het wel of niet falen van de Maeslantkering, de Hartelkering en de Volkeraksluizen en de nauwkeurigheid van de waterstandvoorspelling bij Rak-Noord [2]. Voor de korte termijn is zodoende een nieuwe overschrijdingsfrequentielijn bepaald, welke is weergegeven in figuur 1.6.



Figuur 1.6: Overschrijdingsfrequentielijn van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer voor de korte termijn. De huidige frequentielijn geeft de situatie zonder inzet van het Volkerak-Zoommeer weer, de nieuwe frequentielijn geeft de situatie met inzet van het Volkerak-Zoommeer voor hoogwaterberging weer [aangepast van 2].

De overschrijdingsfrequentielijn verandert op de korte termijn niet voor herhalingstijden kleiner dan eens in de 1430 jaar, aangezien het systeem onder deze herhalingstijd niet ingezet wordt voor hoogwaterberging. De waterstanden op het Volkerak-Zoommeer nemen bij grotere herhalingstijden wel toe, tot 2.1 m bij omstandigheden die eens in de 2000 jaar voorkomen en tot 2.2 m bij omstandigheden die eens in de 4000 jaar voorkomen op de korte termijn [2].

Inzet op de lange termijn wordt beïnvloed door het beleid dat de komende jaren gevoerd zal worden. De inzetfrequentie kan toenemen tot 1/25 jaar als de huidige lijn, inclusief de plannen in het kader van Ruimte voor de Rivier, wordt voortgezet [2]. Op de lange termijn kan Nederland echter genooddaakt worden om bijvoorbeeld de dijken rond de benedenrivieren alsnog op te hogen als gevolg van de toenemende zeespiegelstijging en maatgevende afvoeren [8]. Als dit het geval is, kunnen de inzetcriteria aangepast worden; de voorspelde waterstand waarbij het Volkerak-Zoommeer wordt ingezet kan dan omhoog. Dat zou ertoe kunnen leiden dat de inzetfrequentie niet of veel minder toeneemt dan nu wordt verwacht.

In [2] wordt naast de inzetfrequentie ook aandacht besteed aan de consequenties van het bergen van water op het Volkerak-Zoommeer voor de omliggende gebieden. Inzet voor berging heeft mogelijk gevolgen voor de veiligheid van de huidige waterkeringen, de ecologie, de buitendijkse bebouwing bij Tholen en de regionale waterhuishouding. Voorliggend rapport spits zich toe op de gevolgen voor de waterhuishouding in West-Brabant, die volgens [2] nader onderzoek behoeven.

1.3. Gevolgen voor West-Brabant

1.3.1. Verwachte wateroverlast

Als water op het Volkerak-Zoommeer wordt geborgen, zijn de waterstanden daar 2 dagen hoger dan normaal [2]. Het Mark-Vliet systeem en de rivier de Zoom, de West-Brabantse rivieren die op het Volkerak-Zoommeer afwateren, kunnen door de verhoogde waterstand op het Volkerak-Zoommeer niet of nog maar beperkt afwateren. De waterstanden in deze rivieren nemen hierdoor toe, met als gevolg dat het risico van wateroverlast toeneemt.

Er zijn reeds een aantal onderzoeken verricht naar de gevolgen van inzet van het Volkerak-Zoommeer voor West-Brabant, waarbij de nadruk ligt op de Mark-Vliet boezem. Uit deze onderzoeken is gebleken dat wateroverlast in West-Brabant kan ontstaan als op het moment van inzet de afvoer van de Brabantse rivieren hoger dan gemiddeld is [2, 16]. Oorzaken van de wateroverlast zijn het overstromen van de keringen en het beperken van de capaciteit van gemalen. Verder kunnen indirect ook de vele beken in het gebied voor wateroverlast zorgen, wanneer de waterstanden in de hoofdtakken zo hoog worden dat de beken niet meer kunnen lozen [16]. Uit een onderzoek dat in opdracht van het waterschap Brabantse Delta is uitgevoerd, kwam naar voren dat vooral langs de benedenstroomse delen van het Mark-Vliet systeem grote wateroverlast kan ontstaan in de boezem [16]. Ook steden als Breda en Roosendaal kunnen overlast ondervinden. Een beperking van [16] is dat is uitgegaan van een ‘worst-case scenario’, er geen kansen aan de gevolgen gekoppeld zijn en er geen vergelijking is gemaakt met het risico van wateroverlast in de huidige situatie.

Voor waterschap Brabantse Delta is de belangrijkste vraag of inzet van het Volkerak-Zoommeer een verlaging van het beschermingsniveau tot gevolg zal hebben. HKV LIJN IN WATER heeft in opdracht van Rijkswaterstaat RIZA onderzocht hoe de kans op wateroverlast toeneemt door inzet van het Volkerak-Zoommeer [17]. Dit is gedaan door te kijken naar de kans van samenvallen van inzet van het Volkerak-Zoommeer en een hoger dan gemiddelde afvoer van het Mark-Vliet systeem. Het onderzoek van HKV LIJN IN WATER heeft uitgewezen dat er bij inzet van het Volkerak-Zoommeer een grote kans is dat de afvoer op het Mark-Vliet systeem verhoogd is [17]. De kans dat inzet van het Volkerak-Zoommeer samenvalt met hoge afvoeren op het Mark-Vliet systeem is echter kleiner dan de kans op inzet van het Volkerak-Zoommeer. HKV LIJN IN WATER concludeert daarom dat de kans op wateroverlast minimaal zal toenemen, het beschermingsniveau blijft nagenoeg gelijk [17]. Desondanks leidt de aanwijzing van het Volkerak-Zoommeer voor waterberging ertoe dat het risico, gedefinieerd als kans x gevolg, toeneemt [1, 17]. Deze risicotename wordt veroorzaakt door een toename van de mogelijke gevolgen. Bovendien is het onderzoek naar de kanstename niet compleet. Er is daarom aanleiding om het risico van inzet van het Volkerak-Zoommeer nader te onderzoeken [2, 17].

1.3.2. Aansprakelijkheid voor onevenredige effecten

Hoogwaterberging op het Volkerak-Zoommeer is aangewezen als maatregel in het kader van landelijk beleid. In het Nederlandse waterbeleid is vastgelegd dat nadelige effecten van maatregelen niet mogen worden afgewenteld op een andere partij [18]. Met betrekking tot het Volkerak-Zoommeer is hierover een uitspraak gedaan in de beantwoording van een inspraakreactie van het waterschap Brabantse Delta op de PKB. De inspraakreactie luidde als volgt:

“Inspreker [waterschap Brabantse Delta, mz] geeft aan dat als gevolg van de waterberging op het Volkerak-Zoommeer schade in het stroomgebied van Mark, Dintel en de Roosendaalsche en Steenbergsche Vliet ontstaat. Tevens geeft inspreker aan dat er een lozingsbeperking ontstaat bij de gemalen en vrijlozende beken die direct op het Volkerak-Zoommeer lozen. Inspreker geeft aan een schade van circa 20.000.000,- euro te verwachten. De schade die het gevolg is van de maatregel dient naar de mening van inspreker gedragen te worden door het Rijk.” [19]

Hierop is vanuit het ministerie van Verkeer en Waterstaat het volgende antwoord gegeven:

“In het Nationaal Bestuursakkoord Water is overeengekomen dat gemeenten en waterschappen op regionaal niveau hun problemen moeten oplossen. Indien er onevenredig veel problemen in de regio ontstaan door nationale maatregelen zal het Rijk naar een oplossing zoeken. De eventueel te nemen compenserende en mitigerende maatregelen worden nader onderzocht in de genoemde inrichtingsplanstudie in de fase na de PKB [...]” [19]

Het waterschap Brabantse Delta is in principe akkoord gegaan met de maatregel waterberging op het Volkerak-Zoommeer, maar wil wel dat de effecten van de maatregel voor West-Brabant goed in kaart gebracht worden [16]. Rijkswaterstaat RIZA heeft naar aanleiding van de uitkomsten van [2] besloten de risicotoename die ontstaat voor West-Brabant door aanwijzing van het Volkerak-Zoommeer voor waterberging verder te onderzoeken. Voorliggend onderzoek is in dit kader ontstaan en richt zich op het bepalen van de toename van de kans op wateroverlast. Met dit onderzoek wordt een stap gezet in het kwantificeren van de effecten voor West-Brabant van inzet van het Volkerak-Zoommeer voor hoogwaterberging, zodat vastgesteld kan worden of het Rijk mitigerende of compenserende maatregelen dient te nemen.

1.3.3. Hiaten in voorgaand onderzoek

Voorgaande onderzoeken zijn niet voldoende om de risicotoename te kwantificeren. Op het gebied van de kansberekening is het wenselijk om de totale probabilistische kans op wateroverlast in de huidige situatie en de situatie met inzet van hoogwaterberging op het Volkerak-Zoommeer met een frequentie van 1/1430 jaar te bepalen. Zodoende kan de kanstoename die toegeschreven kan worden aan de nationale maatregel hoogwaterberging op het Volkerak-Zoommeer vastgesteld worden. Om de totale probabilistische kans op wateroverlast te bepalen moeten een drietal hiaten in voorgaand onderzoek bekeken worden.

Ten eerste heeft HKV LIJN IN WATER bepaald dat het beschermingsniveau niet of nauwelijks verandert [17]. Er is echter niet gekeken hoe de kans op wateroverlast verandert voor grotere herhalingstijden. Om vast te stellen of hoogwaterberging op het Volkerak-Zoommeer tot onevenredige effecten leidt in West-Brabant, moet een totaal beeld van de verandering van de kans op wateroverlast worden bepaald en niet alleen naar het beschermingsniveau gekeken worden.

Het tweede hiaat betreft de invloed van de wind op de waterstanden op het Volkerak-Zoommeer. De berekeningen en analyses in voorgaand onderzoek zijn gebaseerd op gemiddelde waterstanden

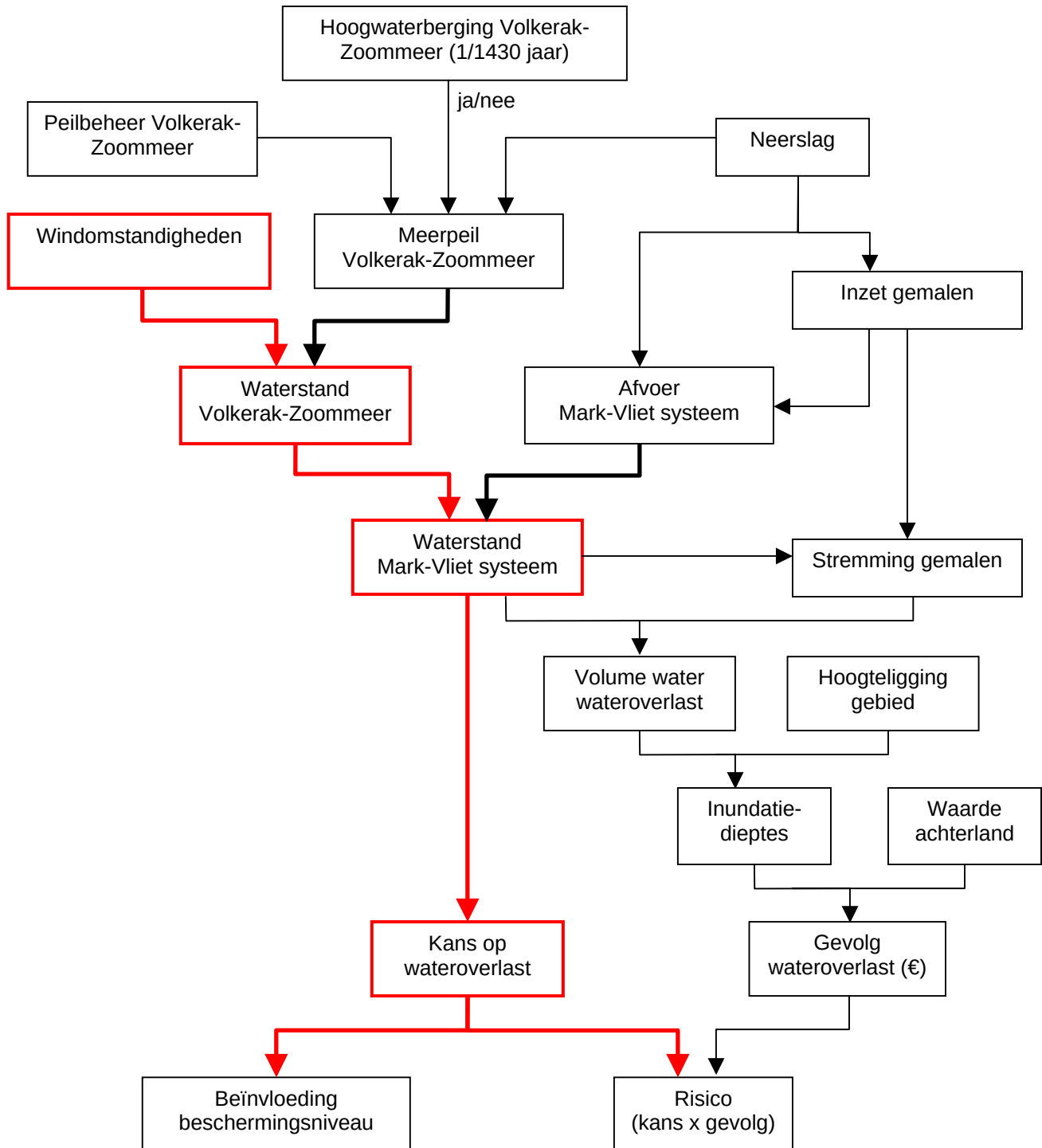
op het Volkerak-Zoommeer. Bij de mondingen van het Mark-Vliet systeem kan de waterstand echter significant afwijken van de gemiddelde waterstand door windopzet. Net na het ontstaan van het Volkerak-Zoommeer is door Rijkswaterstaat een onderzoek verricht naar de windopzet. Aan de hand van modelsimulaties is vastgesteld dat de wind een significante invloed heeft op de waterstand op het Volkerak-Zoommeer [20]. In het rapport ‘Hoogwaterlijnen Mark en Vliet [21] wordt bij het bepalen van hoogwaterlijnen voor de Mark en Vliet ook de windinvloed meegenomen. In [21] wordt gesteld dat hoge waterstanden op de Mark en Dintel vaak samen gaan met een zuidwesterstorm, welke tot opwaaiing bij de mondingen leidt [21]. Uit het bovenstaande blijkt dat voor het bepalen van de waterstand in de mondingen de lokale windopzet niet verwaarloosd kan worden.

Uit de voorgaande onderzoeken is gebleken dat het tijdstip waarop het Volkerak-Zoommeer wordt ingezet ten opzichte van een hoogwaterpiek in het regionale systeem kan variëren en van belang is voor het bepalen van het risico [17]. In de waterstandberekeningen in opdracht van waterschap Brabantse Delta was uitgegaan van een variant met verhoogde peilen op het Volkerak-Zoommeer aan het begin van de regionale afvoergolf en een variant met verhoogde peilen op het Volkerak-Zoommeer halverwege de regionale afvoergolf [16]. Uit het onderzoek van HKV LJN IN WATER is gebleken dat de peilen op het Volkerak-Zoommeer waarschijnlijk pas verhogen nádat de regionale afvoerpiek is opgetreden [17]. De derde aanvulling op het voorgaande onderzoek is bepalen wat het effect van dit nieuwe inzicht op de maximale waterstanden in de Brabantse rivieren is.

Er is nog een aspect dat van groot belang is voor de kansberekening. Het betreft de correlatie tussen het Mark-Vliet systeem en het Volkerak-Zoommeer. Uit het onderzoek van HKV LJN IN WATER is een aanbeveling gekomen om met langere neerslagreeksen te rekenen aan de relatie tussen de inzet van het Volkerak-Zoommeer en hoogwater in het regionale systeem, zodat nauwkeuriger uitspraken gedaan kunnen worden aangaande de statistiek van het systeem [17]. Bovendien dient nader onderzocht te worden of hoge afvoeren op de Brabantse rivieren gecorreleerd zijn aan hoge afvoeren op de grote rivieren of niet. De correlatie tussen deze omstandigheden is bepalend voor de kans op het samenvallen van de twee situaties [17]. Een correlatieanalyse is geen onderdeel van voorliggend onderzoek. Wel wordt in paragraaf 3.4 nog dieper ingegaan op de correlatie tussen de twee systemen op basis van de literatuur.

1.4. Doelstelling en afbakening

In het causaal relatiediagram in figuur 1.7 is voor het Mark-Vliet systeem samengevat weergegeven welke aspecten het risico van wateroverlast bepalen.



Figuur 1.7: Causaal relatiediagram van het risico van wateroverlast in de Mark-Vliet boezem inclusief of exclusief hoogwaterberging op het Volkerak-Zoommeer. De inhoud van voorliggend onderzoek is aangegeven in rood.

Dit onderzoek is zoals gezegd beperkt tot de kansberekening, in het diagram aangegeven met de vetgedrukte rode vakken en pijlen. Op basis van deze rode draad is voor het onderzoek de volgende doelstelling geformuleerd:

Kwantificeren van de kanstoename van wateroverlast in het stroomgebied van het Mark-Vliet systeem op de korte termijn welke ontstaat na instelling van de maatregel hoogwaterberging op het Volkerak-Zoommeer.

Er zijn een drietal centrale vragen geformuleerd waarvan de antwoorden alle informatie zullen bevatten die nodig is om de doelstelling te behalen. Deze centrale vragen omvatten bovendien de drie hiaten die zijn besproken in paragraaf 1.3.3; de kansen op extreme situaties, de invloed van de windopzet op de kans op wateroverlast en de invloed van het tijdstip van inzet van het Volkerak-Zoommeer ten opzichte van de hoogwatergolf door het Mark-Vliet systeem.

1. Hoe veranderen de overschrijdingsfrequenties van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer ter hoogte van de mondingen van het Mark-Vliet systeem op de korte termijn door instelling van de maatregel hoogwaterberging op het Volkerak-Zoommeer als de invloed van de windopzet op het Volkerak-Zoommeer wordt meegenomen?
2. Hoe beïnvloedt de waterstand op het Volkerak-Zoommeer de waterstanden in het Mark-Vliet systeem?
 - a. Wat is de invloed van het tijdstip van inzet van het Volkerak-Zoommeer ten opzichte van de afvoerpiek in het Mark-Vliet systeem?
 - b. Hoever stroomopwaarts reikt de invloed van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer bij de mondingen?
3. Hoe verandert de kans op wateroverlast in het Mark-Vliet systeem op de korte termijn door inzet van het Volkerak-Zoommeer voor hoogwaterberging?

Voor het berekenen van de toename van de kans op wateroverlast wordt een probabilistische benadering gekozen. Dit wordt in hoofdstuk 3 verder besproken. Voor regionale rivieren als het Mark-Vliet systeem bestaan geen probabilistische rekenprogramma's of modellen. Het Mark-Vliet systeem lijkt echter veel op de IJsseldelta, die afwatert op het IJsselmeer. Voor deze primaire wateren zijn wel programma's en modellen beschikbaar waarmee probabilistisch gerekend kan worden. Op basis hiervan is een vierde onderzoeksvraag geformuleerd.

4. Zijn probabilistische kansberekeningmethodes die zijn ontwikkeld voor de IJsseldelta en het IJsselmeer toepasbaar voor een vergelijkbaar regionaal systeem als het Mark-Vliet systeem?

Met deze vier onderzoeksvragen is het onderzoek gedefinieerd. Er zijn naast de correlatieanalyse nog een tweetal punten die buiten de afbakening van het onderzoek vallen. Het eerste punt is dat het onderzoek wordt beperkt tot het Mark-Vliet systeem, de rivier de Zoom wordt niet meegenomen in het onderzoek. De Zoom heeft een geringe afvoer en er zijn in de huidige situatie goede mogelijkheden om wateroverlast vanuit de Zoom tegen te gaan, zoals het sluiten van de sluis bij de monding waarbij overtollig water met een pomp op het Volkerak-Zoommeer geloosd kan worden [51]. De gevolgen vanuit het Mark-Vliet systeem worden door de grotere afvoeren wel als bedreigend beschouwd.

De tweede afbakening betreft de kans op de lange termijn. Dit onderzoek beperkt zich tot het berekenen van de kanstoename op de korte termijn, omdat op de lange termijn een aantal onzekerheden spelen die het zeer moeilijk maken om iets zinnigs te zeggen over de risicotoename door inzet van het Volkerak-Zoommeer op de lange termijn. De klimaatveranderingen beïnvloeden niet alleen de zeewaterstanden en de waterstanden op de Maas en Rijn, waardoor naar verwachting het Volkerak-Zoommeer steeds vaker ingezet zal worden. Ook de regionale waterhuishouding

wordt beïnvloed. De verwachting is dat de neerslagintensiteit toe zal nemen [8], waardoor ook de afvoerpieken toenemen. Booij [22] heeft onderzoek verricht naar de effecten van klimaatveranderingen op overstromingen. Het onderzoek van Booij heeft uitgewezen dat de bestaande modellen op regionale schaal een grote variatie in voorspellingen laten zien, een duidelijk teken van de onzekerheden in deze modellen [22]. Gezien de complexiteit van de problematiek op de lange termijn wordt deze in dit onderzoek buiten beschouwing gelaten.

1.5. Leeswijzer

In dit hoofdstuk is het onderzoek gedefinieerd en afgebakend. Om een idee te krijgen van het gebied waarin de problematiek speelt, is in hoofdstuk 2 een gebiedsomschrijving opgenomen. Hierin worden de belangrijkste kenmerken van het Mark-Vliet systeem en het Volkerak-Zoommeer besproken en wordt een visueel beeld geschapen van de systemen.

Hoofdstuk 3 bevat definities en bespreekt de gehanteerde methode. De kans op wateroverlast wordt gedefinieerd en de twee variabelen die de wateroverlast veroorzaken, de afvoer door het Mark-Vliet systeem en de waterstand op het Volkerak-Zoommeer, worden besproken. Paragraaf 3.5 behandelt de methode, welke in drie stappen is verdeeld die overeenkomen met de eerste drie onderzoeksvragen.

In hoofdstuk 4 is de eerste stap uitgewerkt. Eerst wordt gerekend aan de waterstandbeweging op het Volkerak-Zoommeer. De waterstandberekeningen en de resultaten hiervan worden in sectie 4.1 besproken. In sectie 4.2 worden de overschrijdingsfrequentielijnen van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer bepaald.

Hoofdstuk 5 gaat in op de tweede stap. Het eerste deel van het hoofdstuk gaat in op de waterstandberekeningen van het Mark-Vliet systeem. De invloed die de waterstand op het Volkerak-Zoommeer heeft op de waterstanden in het Mark-Vliet systeem wordt geanalyseerd aan de hand van deze berekeningen. Aan het eind van het hoofdstuk wordt bepaald waar in het Mark-Vliet systeem wateroverlast optreedt door hoogwaterberging op het Volkerak-Zoommeer.

Het antwoord op de derde onderzoeksvraag wordt in hoofdstuk 6 gegeven. Voor de waterstanden in het Mark-Vliet systeem worden overschrijdingsfrequentielijnen bepaald. Het verschil tussen de overschrijdingsfrequentielijnen in de huidige situatie en in de situatie met aanwijzing van het Volkerak-Zoommeer voor berging geeft inzicht in hoe de kans op wateroverlast toeneemt.

Hoofdstuk 7 bevat een discussie van de resultaten. Hierin worden een aantal aandachtspunten besproken en wordt ingegaan op de onzekerheid in de resultaten van het onderzoek. Ook worden een aantal praktische aanbevelingen gedaan .

Het rapport sluit af met een aantal conclusies aangaande de eerste drie onderzoeksvragen. Deze zijn in hoofdstuk 8 gepresenteerd. De vierde onderzoeksvraag is in hoofdstuk 4 en 6 impliciet aan de orde gekomen, ook hieraan worden conclusies verbonden in hoofdstuk 8.

Begrippen die uitleg behoeven zijn opgenomen in de lijst met begrippen na de literatuurlijst.



Hoofdstuk 2. Gebiedsomschrijving

Dit hoofdstuk voorziet in een visualisatie van het onderzoeksgebied, alsmede in een omschrijving van de belangrijkste kenmerken van West-Brabant en in het bijzonder van het Mark-Vliet systeem en het Volkerak-Zoommeer. De rivier de Zoom wordt niet meegenomen in het onderzoek en wordt daarom niet besproken in de gebiedsomschrijving.

2.1. West-Brabant

West-Brabant is het westelijke gedeelte van de provincie Noord-Brabant, zoals is te zien in figuur 2.1. Het gebied ligt gedeeltelijk binnen dijkkring 34 en wordt begrensd door het Hollandsch Diep en de Amer in het noorden, het Volkerak-Zoommeer in het westen en de grens met België in het zuiden. In figuur 2.1 zijn de belangrijkste gemeentes van West-Brabant te zien; Breda,

Roosendaal, Etten-Leur en Bergen op Zoom. Er wonen ongeveer 751.000 mensen in het gebied, verspreid over 21 gemeentes [25]. Naast het stedelijk gebied en een aantal natuurgebieden bestaat het gebied voornamelijk uit landbouwgrond.

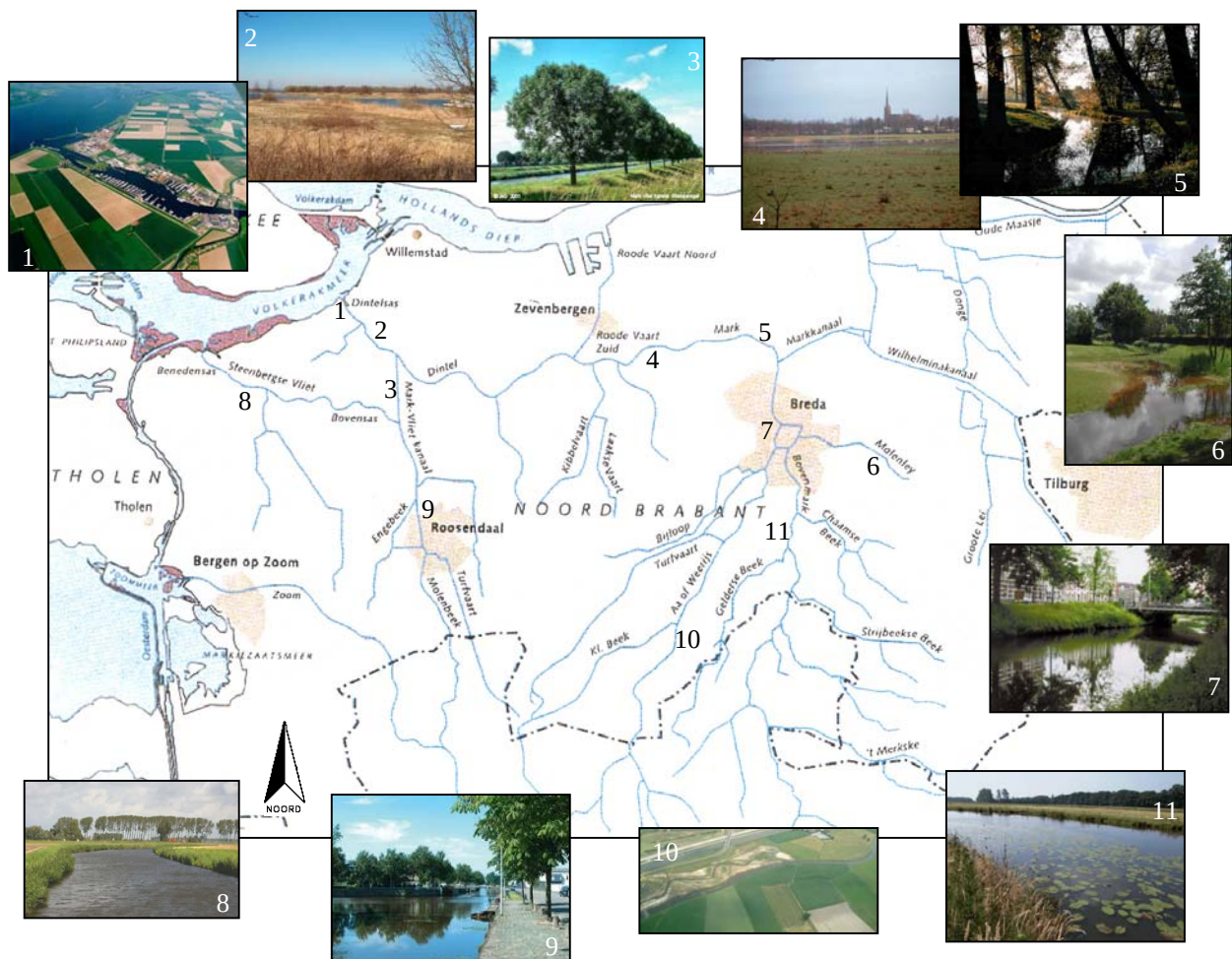


1/50 jaar. Het niveau zal in 2015 naar 1/100 jaar verhoogd moeten zijn naar aanleiding van het Nationaal Bestuursakkoord Water (NBW), waarin normen voor regionale gebieden zijn vastgesteld [27]. Er wordt momenteel gewerkt aan het verhogen van het beschermingsniveau. Het is daarom niet meer van belang hoe inzet van het Volkerak-Zoommeer het huidige beschermingsniveau van 1/50 jaar beïnvloedt. Als uitgangspunt voor dit onderzoek is dan ook aangenomen dat het beschermingsniveau van West-Brabant reeds 1/100 jaar is.

2.2. Mark-Vliet systeem

2.2.1. Beschrijving van het stroomgebied en het watersysteem

Er valt in West-Brabant jaarlijks gemiddeld 750 tot 800 mm neerslag [28]. Deze neerslag wordt grotendeels afgevoerd door het Mark-Vliet systeem, dat bestaat uit de riviertjes de Mark, de Dintel en de Steenbergsche en Roosendaalsche Vliet. Het stroomgebied wordt doorkruist door veel beken die op het Mark-Vliet systeem lozen, zoals de Molenbeek bij Roosendaal en de Bovenmark en Aa of Weerij bij Breda. De bovenlopen van het Mark-Vliet systeem lopen tot in Vlaanderen. Het totale stroomgebied van het Mark-Vliet systeem, inclusief het Belgische deel, is ongeveer 141500 ha groot [2]. In figuur 2.2 is een weergave van het Mark-Vliet systeem gegeven.



Figuur 2.2: Het Mark-Vliet systeem [aangepast van 31] met foto's van: 1. Bedrijventerrein Dintelmond [32a], 2. Dintel [32b], 3. Mark-Vliet kanaal [32c], 4 en 5. Mark [32d, e], 6. Molenlei, een beek bij Breda [32f], 7. De singel van Breda [29], 8. Steenbergsche Vliet [32g], 9. Roosendaalsche Vliet [32h], 10. Aa of Weerij [32i], 11. Bovenmark [32j].

Bij Breda komen een aantal beken bijeen in de singel van Breda, welke afwatert op de Mark. De Mark stroomt door Breda en draait dan richting het westen. De oorspronkelijke loop van de Mark waterde af op het Hollandsch Diep ter hoogte van Zevenbergen via wat nu de Roode Vaart heet. Tegenwoordig watert de Mark af op de Dintel ter hoogte van het Mark-Vliet kanaal. Door middel van het Mark-Vliet kanaal is in de jaren tachtig een verbinding gemaakt tussen de Mark en de Roosendaalsche Vliet. De Roosendaalsche Vliet vindt zijn oorsprong ten noorden van Roosendaal, waar een aantal beken samenkomen. Bij Steenbergen gaat de Roosendaalsche Vliet over in de Steenbergsche Vliet. De Dintel en de Steenbergsche Vliet wateren beide onder vrij verval af op het Volkerak-Zoommeer. Het Mark-Vliet systeem wordt verbonden met het Wilhelminakanaal door middel van het Markkanaal dat ten noorden van Breda is gesitueerd. Deze verbinding is onder normale omstandigheden afgesloten door een sluis. Alle wateren in het systeem zijn in beheer van het waterschap Brabantse Delta met uitzondering van het Volkerak-Zoommeer, dat in beheer is van de regionale Rijkswaterstaat-dienst Zeeland [29].

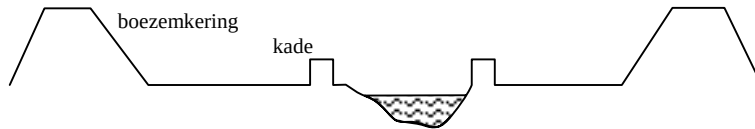
2.2.2. Kenmerken

De gemiddelde winterafvoer van de Mark is $18 \text{ m}^3/\text{s}$ [16]. De verhouding tussen de afvoeren van de Dintel en de Vliet is afhankelijk van de totale afvoer. Bij een hoge totale afvoer is de afvoer van de Vliet veel kleiner dan de afvoer van de Mark. Onder normale omstandigheden zijn de peilen in het Mark-Vliet systeem ongeveer gelijk aan het peil op het Volkerak-Zoommeer, welke schommelt rond NAP. Ten tijde van extreme omstandigheden kunnen de waterstanden in het Mark-Vliet systeem echter snel toenemen. De reden voor het snelle reageren ligt in de normalisering van het systeem; de lopen van zowel de rivieren als de meeste beken zijn vastgelegd [29]. Vooral de breedte van de Mark en Dintel is langs grote delen van de loop beperkt. De uiterwaarden van de Vliet zijn breder [30].

Het stroomgebied van de Mark en Vliet wordt gekenmerkt door een zeer gevarieerd landschap van hooggelegen zandgronden in het zuiden tot laaggelegen kleigebieden in het noorden [29]. De hoogte van het gebied varieert tussen 30 m boven NAP en iets onder NAP. In de polders rond de Dintel en Vliet varieert de hoogteligging tussen de 0.5 m onder NAP en de 1.5 m boven NAP. De afwatering van het hooggelegen gebied gebeurt onder vrij verval via de vele hoofdbeken die van zuid naar noord stromen. Om het laaggelegen gebied te ontwateren is een groot aantal gemalen actief [29].

Het achterland wordt door boezemkeringen beschermd tegen wateroverlast uit het Mark-Vliet systeem. Tegenwoordig bestaat het Mark-Vliet systeem uit regenrivieren, maar voor de aanleg van de Deltawerken en het ontstaan van het Volkerak-Zoommeer waren de Mark, de Dintel en de Vliet getijdenrivieren [29]. Toen het systeem in open verbinding met de zee stond, zijn langs het Mark-Vliet systeem een stelsel zeedijken aangelegd om de polders tegen overstromingen te beschermen. Na de bouw van sluizen bij Dintelsas en Benedensas in de mondingen van de Dintel en de Steenbergsche Vliet [30] werden deze zeedijken secundaire keringen en na het ontstaan van het Volkerak-Zoommeer is de rol van deze keringen teruggebracht tot het keren van binnenwater [29]. Doordat het doel van de keringen is veranderd, hebben de huidige boezemkeringen in het gebied volgens het waterschap Brabantse Delta “een aanzienlijke overhoogte” [16]. De kans dat deze boezemkeringen overstroomd is daarom zeer klein.

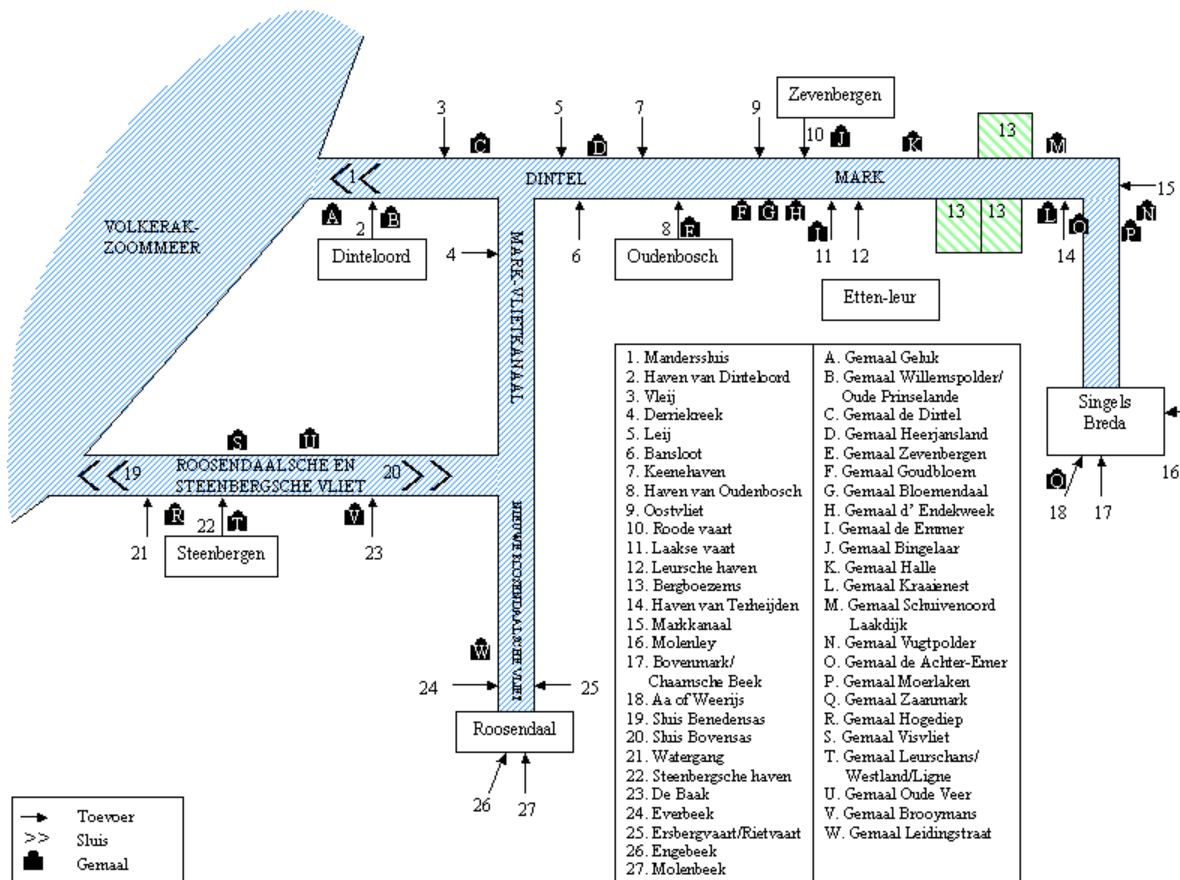
Er zijn naast de boezemkeringen langs grote delen van de rivieren kades aanwezig om de uiterwaarden langs het Mark-Vliet systeem tegen wateroverlast te beschermen. Deze kades zijn nu nog gedimensioneerd op waterstanden die eens in de 50 jaar voorkomen, wat voor de Mark overeenkomt met een maatgevende afvoer van $150 \text{ m}^3/\text{s}$ [16]. In figuur 2.3 is een dwarsdoorsnede van het systeem geschematiseerd weergegeven. Voor een overzicht van de waterkeringen die West-Brabant beschermen wordt verwezen naar de kaart in bijlage A.



Figuur 2.3: Schematisch dwarsprofiel van de Mark of Vliet

Behalve door de bovengenoemde waterkeringen wordt West-Brabant beschermd tegen wateroverlast door de aanwezigheid van een drietal bergboezems langs de Mark. Deze bergboezems genaamd Terheijden, Rooskensdonk en Weimeren worden gemiddeld eens in de vijf jaar ingezet om hoogwaterpieken bij Breda af te vlakken. Ze hebben een gezamenlijke inhoud van 3.0686.000 m³ [16]. Naast deze bergboezems is er nog een overstromingsvlakte aanwezig ten westen van de Leurse haven met een beschermingsniveau van ongeveer 1/25 jaar [21].

2.2.3. Systemschematisatie

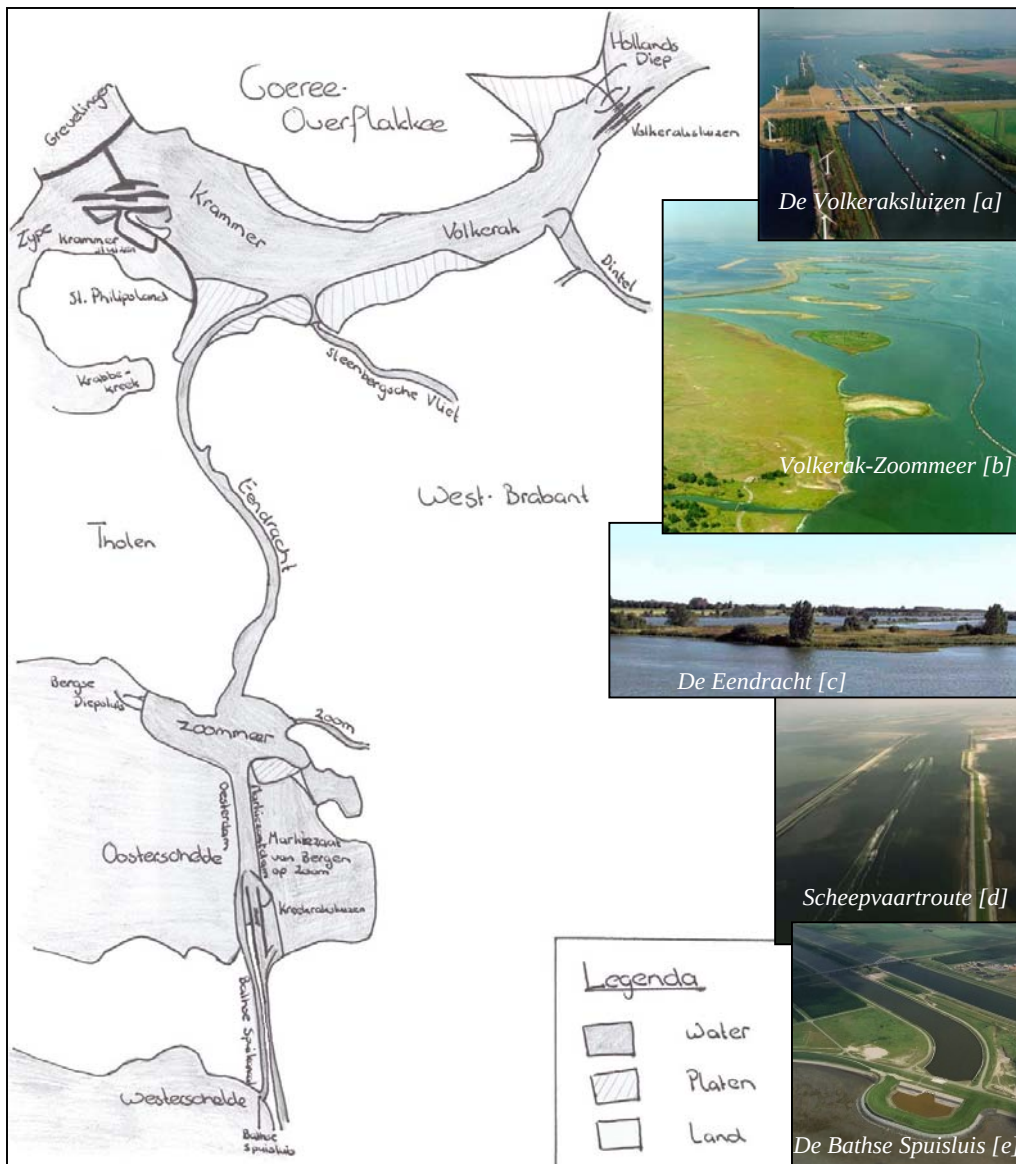


Figuur 2.4: Schematisatie van het Mark-Vliet systeem met de belangrijkste toevoerpunten, gemalen en andere kenmerken [aangepast van 21].

In figuur 2.4 wordt het Mark-Vliet systeem met de belangrijkste zijtakken, de gemalen die direct op het systeem lozen, de sluizen en de bergboezems Terheijden, Rooskensdonk en Weimeren schematisch weergegeven. De gemalen Visvliet (S in figuur 2.4) en Oude Veer (U in figuur 2.4) zijn vijzelgemalen. De andere gemalen zijn pompgemalen. De capaciteiten van de pompen zijn in bijlage B opgenomen. In bijlage C zijn geschematiseerde langsdoorsneden van het systeem weergegeven. Figuur C2, C3, C4 en C5 laten het bodemverhang en de hoogtes van de dijken zien voor respectievelijk de Mark/Dintel, het Mark-Vliet kanaal, de Vliet en de singel van Breda inclusief de hieraan grenzende gedeeltes van de Bovenmark (nr. 17 in figuur 2.4) en de Aa of Weerij (nr. 18 in figuur 2.4).

2.3. Volkerak-Zoommeer

In figuur 2.5 is het Volkerak-Zoommeer geschematiseerd en gevisualiseerd.

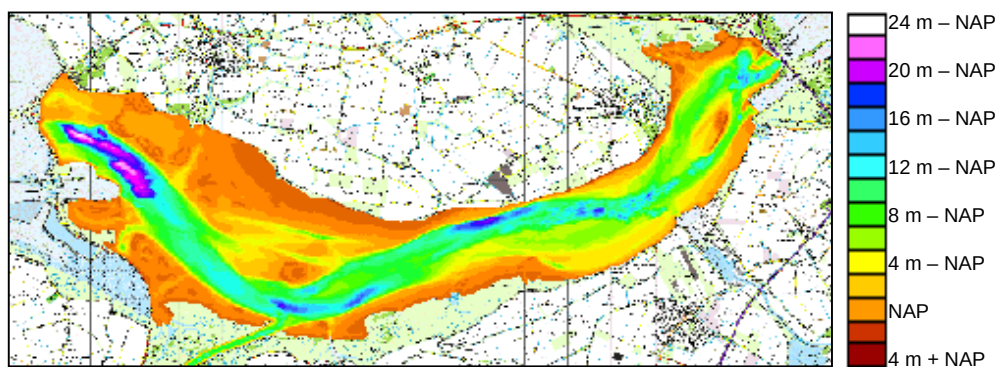


Figuur 2.5: Het Volkerak-Zoommeer. Inzet: Foto's van het Volkerak-Zoommeer [34a, b, c, d & e].

In paragraaf 1.2 is reeds vermeld dat het Volkerak-Zoommeer is opgebouwd uit het Volkerak, het Krammer, het Zoommeer, de Eendracht en het Bathse Spuikanaal. Zoals in figuur 2.5 is te zien, is het Volkerak-Zoommeer tussen Tholen (Zeeland), Goeree-Overflakkee (Zuid-Holland) en West-Brabant gelegen. Samen met de Grevelingen, de Oosterschelde en de Westerschelde maakt het Volkerak-Zoommeer deel uit van de Zeeuwse Delta.

Het Volkerak-Zoommeer is ontstaan als gevolg van de Deltawerken. Door de aanleg van de Oosterscheldekering was de instroomopening van de Oosterschelde en als gevolg daarvan de getijdenwerking sterk verkleind. Om de getijdenwerking in het gebied weer rond het gewenste waterpeil te krijgen, moest de inhoud van de Oosterschelde verkleind worden [35]. Bovendien moest Nederland in afspraak met België voor een getijvrije scheepvaartroute tussen Antwerpen en Rotterdam zorgen [2]. Om beide doelen te verwezenlijken zijn de Philipsdam, het Bathse Spuikanaal en de Oesterdam aangelegd. Tijdens de aanleg van de Oesterdam kwam de doorgang van de scheepvaart in gevaar door sterke stromingen. In de uitvoeringsfase is daarom besloten de Markiezaatskade aan te leggen [35]. In 1987 was het Volkerak-Zoommeer een feit. Voor de scheepvaart en waterafvoer zijn een aantal sluizen aangelegd. De Volkeraksluizen verbinden het Volkerak-Zoommeer met het Hollandsch Diep, de Krammersluizen in de Philipsdam en de Bergsche Diepsluis in de Oesterdam verzorgen verbindingen met de Oosterschelde en de Kreekraksluizen en de Bathse Spuisluis vormen de verbinding tussen het Volkerak-Zoommeer en de Westerschelde en door naar de haven van Antwerpen [2].

Door de afscheiding met dammen en sluizen is het Volkerak-Zoommeer een zoetwatermeer geworden. Het heeft een nat oppervlakte van 6000 ha en een gemiddelde diepte van 5.2 m. De oude getijdengeulen die nog aanwezig zijn kunnen echter een diepte hebben tot 24 m. Daarnaast is er ongeveer 2300 ha aan drooggevalen gebied aanwezig [2]. Met name het Volkerak heeft grote bodemhoogteverschillen, zoals te zien is in figuur 2.6.



Figuur 2.6: Dieptekaart van het Volkerak-Zoommeer [GIS].

Het peil op het Volkerak-Zoommeer is doorgaans nagenoeg constant. Het mag variëren tussen 0.10 m -NAP en 0.15 m +NAP. Dit peilbeheer wordt gehandhaafd door overtollig water af te voeren naar de Westerschelde via de Bathse spuisluis of door water in te laten via de Volkeraksluizen als het minimale peil niet gehandhaafd kan worden [2]. Het peilbeheer van het Volkerak-Zoommeer ligt vast in het Rijn-Schelde traktaat; een afspraak tussen Nederland en België ten behoeve van de scheepvaart [36]. Uit de literatuur blijkt dat het Volkerak-Zoommeer een maximaal peil van 0.35 m + NAP mag hebben om wateroverlast vanuit het Mark-Vliet systeem bij een beschermingsniveau van 1/50 jaar te voorkomen [16, 30].



Hoofdstuk 3. Definities en Methode

In dit hoofdstuk wordt eerst vastgelegd wat onder ‘de kans op wateroverlast’ wordt verstaan in dit rapport. Vervolgens wordt de onderzoeksmethode besproken. Wateroverlast in het Mark-Vliet systeem ontstaat wanneer de waterstanden in het systeem een bepaalde kritieke waarde overschrijden. De waterstanden in het Mark-Vliet systeem worden bepaald door twee variabelen; de afvoer door het systeem en de waterstand op het Volkerak-Zoommeer. In respectievelijk paragraaf 3.2 en paragraaf 3.3 worden deze twee variabelen besproken. In paragraaf 3.4 wordt vervolgens ingegaan op de correlatie tussen het Mark-Vliet systeem en het Volkerak-Zoommeer. Nadat door het bespreken van de variabelen en de relatie tussen deze variabelen is vastgelegd hoe de waterstanden in het Mark-Vliet systeem tot stand komen, kan besproken worden hoe de berekeningen aangepakt zijn. De aanpak is in drie stappen verdeeld die overeenkomen met de eerste drie onderzoeksvragen. De stappen zijn in paragraaf 3.5 uitgewerkt.

3.1. Definitie van de kans op wateroverlast uit het Mark-Vliet systeem

Kansen kunnen op vele manieren gedefinieerd worden. In dit geval wordt de kans op wateroverlast vanuit het Mark-Vliet systeem gedefinieerd als ‘de waarschijnlijkheid dat als gevolg van (een combinatie van) hoge regionale afvoeren en een hoge waterstand op het Volkerak-Zoommeer, de waterstanden in het Mark-Vliet systeem zo hoog zijn dat een waterkering langs het Mark-Vliet systeem overstroomt of dat indirecte wateroverlast optreedt’.

3.1.1. Overstromen van de keringen

Overstromingen vanuit een rivier kunnen onder andere ontstaan door het overstroomen van dijken, het afschuiven van (een deel van) een dijk en onderloopsheid van dijken [23]. Andere faalmechanismen dan het mechanisme ‘overstromen van dijken’ worden in dit onderzoek buiten beschouwing gelaten. Reden hiervoor zijn de voormalige zeedijken die de Mark-Vliet boezem beschermen. Het belastingniveau op deze, nu secundaire, dijken is door de afsluiting van het Volkerak-Zoommeer veel lager geworden dan waar zij bij aanleg op zijn gedimensioneerd [21]. Er wordt daarom aangenomen dat overstroming het enige faalmechanisme is dat voor deze overgedimensioneerde keringen een significante bedreiging vormt.

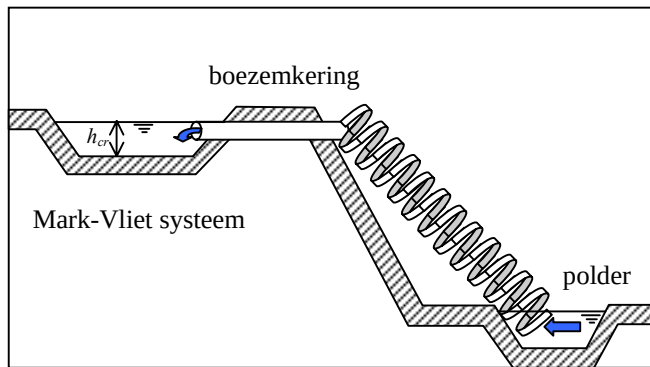
Dit onderzoek beperkt zich tot het bepalen van de kans op wateroverlast in de Mark-Vliet boezem, dus wanneer de oude zeedijken overstroomen. Omdat de keringen niet overal dezelfde hoogte hebben (zie figuren C2 tot en met C5, bijlage C), is de kans op wateroverlast afhankelijk van de locatie. De kades die de uiterwaarden op verschillende plaatsen beschermen hebben een lager beschermingsniveau dan de boezemkeringen. De uiterwaarden lopen daardoor eerder onder water dan de boezem. De kans dat de uiterwaarden onderlopen is in dit onderzoek om praktische redenen buiten beschouwing gelaten.

Zoals op de kaart in bijlage A is te zien, worden Breda en Roosendaal niet beschermd door dijken. Breda is door de beperkte hoogte van de kades aldaar in de situatie zonder hoogwaterberging op het Volkerak-Zoommeer ook al een zwak punt in het systeem [21]. Wateroverlast in stedelijk gebied levert grote schadeposten op, het is daarom belangrijk om te bepalen hoe de kans daar

verandert en welke waterstanden op kunnen treden. Aangezien de kades hier de enige bescherming tegen wateroverlast zijn, zijn zij beschouwd als het verlengde van de zeedijken. Wanneer vanaf dit punt over de keringen wordt gesproken, wordt daarmee verwezen naar zowel de voormalige zeedijken als de kades bij Breda en Roosendaal.

3.1.2. Stremming van gemalen

Naast het overstromen van de keringen, ontstaat een indirecte vorm van wateroverlast in de Mark-Vliet boezem wanneer de waterstand in het systeem zo hoog wordt, dat gemalen die op het Mark-Vliet systeem afwateren beperkt worden in hun capaciteit. Er zijn twee soorten gemalen aanwezig in het stroomgebied van het Mark-Vliet systeem. Bij Dintelsas staan twee vijzelgemalen, gemaal Visvliet en gemaal Oude Veer. Deze vijzelgemalen werken helemaal niet meer als de waterstand



in het Mark-Vliet systeem een waterstand van 0.5 m +NAP overschrijdt [21], zoals is afgebeeld in figuur 3.1. Deze twee gemalen hebben een gezamenlijke capaciteit van 110 m³/min die dan niet meer ingezet kan worden. Voor dit onderzoek is het van belang om te bepalen of de kans op wateroverlast door de stremming van de vijzelgemalen toeneemt. Daartoe zal een antwoord gevonden moeten worden op

de volgende vraag: komt een waterstand van 0.5 m + NAP of hoger ter plaatse van de vijzelgemalen vaker voor als het Volkerak-Zoommeer wordt ingezet voor hoogwaterberging ten opzichte van de huidige situatie?

Naast de twee vijzelgemalen zijn er ook nog een groot aantal pompgemalen aanwezig in het gebied. Ten tijde van hoge waterstanden in het Mark-Vliet systeem ondervinden deze gemalen een achteruitgang van het rendement door de toename van tegendruk [16]. Het is moeilijk om vast te stellen hoe groot de wateroverlast is die door de achteruitgang van het rendement wordt veroorzaakt. Er is in de literatuur niets te vinden over problemen die zich voordoen doordat de gemalen een deel van de capaciteit verliezen. Deze oorzaak van eventuele wateroverlast wordt daarom buiten beschouwing gelaten in dit onderzoek. Wanneer het peil bij de Trambrug in Breda groter wordt dan 1,7 m +NAP wordt een algehele maalstop ingezet [2]. De hoeveelheid water die door de maalstop niet verwerkt kan worden, kan gekwantificeerd worden aan de hand van de pompcapaciteit. Gebaseerd op de gegevens uit 'Hoogwaterlijnen Mark en Vliet'[21] is aangenomen dat bij een neerslaggebeurtenis met een frequentie van eens in de 100 jaar of kleiner de pompcapaciteit van de gemalen volledig ingezet zou moeten worden. Tijdens een maalstop kan daardoor de totale pompcapaciteit, wat overeenkomt met een debiet van 3564 m³/min⁴, niet worden verwerkt. De stremming van de gemalen zorgt dan wel voor extra wateroverlast, maar de kans wordt niet beïnvloed. Als bij Trambrug een waterstand van 1.7 m + NAP wordt gerealiseerd en een maalstop wordt afgekondigd, dan zal het water al over enkele kades bij Breda stromen.

⁴ In bijlage B zijn de pompcapaciteiten en overslagdebieten van de gemalen weergegeven.

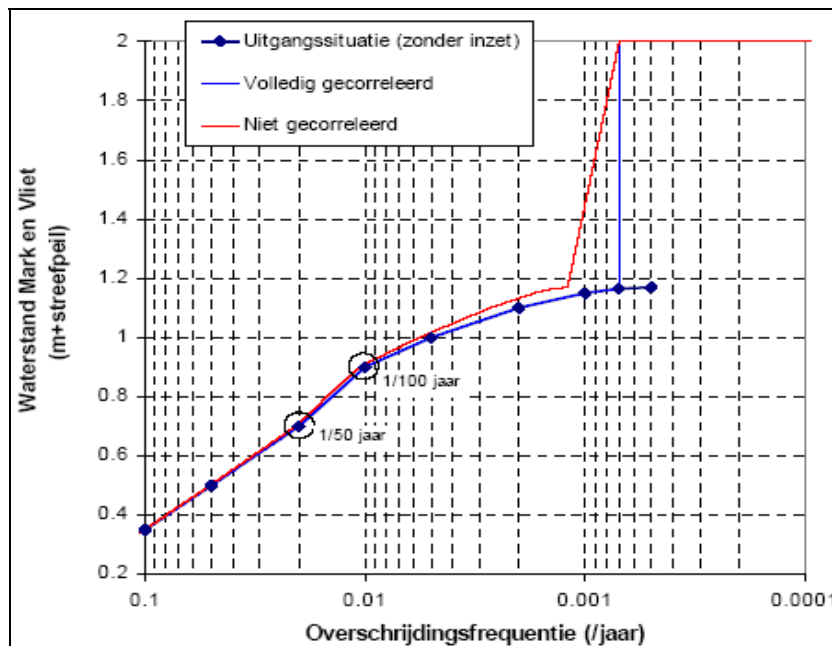
3.1.3. Stremming van beken

Naast het overstromen van de dijken en de stremming van gemalen is er nog een derde, indirecte oorzaak waardoor wateroverlast kan ontstaan; stremming van een of meerdere beken die op het systeem afwateren. Als een beek niet meer (voldoende) kan lozen op het Mark-Vliet systeem, zullen overstromingen in het beekdal het gevolg zijn. Door gebrek aan gegevens wordt deze oorzaak van wateroverlast buiten beschouwing gelaten in dit onderzoek. Het is aan te bevelen om te bepalen bij welke waterstanden in het Mark-Vliet systeem de verschillende beken niet meer kunnen afwateren en om de gevolgen van wateroverlast vanuit de beken te onderzoeken.

Een situatie waarin de twee vormen van indirecte wateroverlast zich voordoen ontstaat alleen wanneer stremming plaats vindt én de neerslaghoeveelheid in het stroomgebied groot is, waardoor er veel water afgevoerd moet worden door de beken en gemalen. Aangezien de waterstanden op het Mark-Vliet systeem ook grotendeels afhankelijk zijn van de hoeveelheid neerslag die in het stroomgebied valt, is er een verhoogde kans dat bij hoge waterstanden in het Mark-Vliet systeem de gemalen en beken voor problemen zullen zorgen [21].

3.1.4. Kansbepaling

Uit eerder onderzoek is gebleken dat de kans op wateroverlast bij omstandigheden met kleine herhalingsstijden op de korte termijn niet of nauwelijks toe zal nemen [17]. HKV LIJN IN WATER concludeerde dat afhankelijk van de correlatie tussen de inzet van het Volkerak-Zoommeer en de afvoer van de het Mark-Vliet systeem het beschermingsniveau hooguit kan veranderen naar 1/48 jaar in plaats van de gewenste 1/50 jaar. Wanneer het beschermingsniveau is verhoogd naar 1/100 jaar, kan het door inzet van het Volkerak-Zoommeer veranderen naar 1/94 jaar [17]. De resultaten van HKV LIJN IN WATER zijn samengevat weergegeven in de fictieve grafieken in figuur 3.2.



Figuur 3.2: Overschrijdingsfrequentielijn (fictief voorbeeld) van de waterstanden in de Mark-Vliet boezem in de huidige situatie en in de situatie met inzet van het Volkerak-Zoommeer. Zowel de situatie waarin de maximale afvoer van het Mark-Vliet systeem en het moment van waterberging op het Volkerak-Zoommeer volledig gecorreleerd zijn als waarin ze ongecorreleerd zijn, is weergegeven. Door de lage frequentie van inzet van het Volkerak-Zoommeer blijft de afname van het beschermingsniveau van de Mark-Vliet boezem beperkt [17].

In het onderzoek van HKV LIJN IN WATER is bepaald wat de maximale beïnvloeding van het beschermingsniveau is op basis van een statistische analyse. Op basis hiervan zijn de in figuur 3.2 weergegeven *fictieve* overschrijdingsfrequentielijnen van de wateroverlast bepaald. Voorliggend onderzoek beoogt voor de knelpunten in het Mark-Vliet systeem daadwerkelijk de overschrijdingsfrequentielijnen te bepalen, aan de hand waarvan de kansverandering bepaald kan worden.

Er zijn in bovenstaande paragrafen twee oorzaken van wateroverlast gedefinieerd die in dit onderzoek nader bekeken worden; wateroverlast door het overstromen van de boezemkeringen en wateroverlast door stremming van de vijzelgemalen. Het doel is om vast te stellen hoe waarschijnlijk het is dat deze oorzaken optreden. Deze waarschijnlijkheid kan uitgedrukt worden in de kans dat een bepaalde waterstand wordt overschreden waarbij wateroverlast optreedt in het Mark-Vliet systeem. Er wordt onderzocht of de hieronder genoemde kritieke waterstanden in de situatie met hoogwaterberging op het Volkerak-Zoommeer statistisch gezien vaker voor zullen komen dan in de huidige situatie, zonder hoogwaterberging.

- ~ Waterstand > keringhoogte per locatie in het Mark-Vliet systeem;
- ~ Waterstand > 0.5 m +NAP in het Mark-Vliet systeem bij de twee vijzelgemalen;

De waterstand in het Mark-Vliet systeem is afhankelijk van twee variabelen; de afvoer door het systeem en de waterstand bij de mondingen op het Volkerak-Zoommeer. Deze twee variabelen kunnen in een heleboel verschillende combinaties voorkomen, bijvoorbeeld een hoge afvoer met een gemiddelde waterstand op het Volkerak-Zoommeer of een hoge afvoer met een hoge waterstand. Bovenstaande kritieke waterstanden kunnen bereikt worden bij meerdere combinaties van deze variabelen. Aan de hand van de overschrijdingsfrequenties van de afvoeren in het Mark-Vliet systeem en de overschrijdingsfrequenties van de waterstanden op het Volkerak-Zoommeer kan bepaald worden hoe vaak deze combinaties voorkomen. Door de overschrijdingsfrequenties van alle combinaties die leiden tot een kritieke waterstand op te tellen, kan op probabilistische wijze de totale overschrijdingskans van de desbetreffende kritieke waterstand bepaald worden. Om de overschrijdingskansen van waterstanden op het Mark-Vliet systeem te berekenen, moeten dus voor zowel de afvoer als de waterstand op het Volkerak-Zoommeer overschrijdingskansen bekend zijn.

3.2. Afvoer door het Mark-Vliet systeem

De afvoer door het Mark-Vliet systeem wordt bepaald door de neerslag die in het gebied valt en de hydrologische en hydraulische kenmerken van het systeem. Voor het berekenen van de afvoer kan gebruik gemaakt worden van een waterbewegingsmodel waarin deze kenmerken zijn gemodelleerd. Het waterschap Brabantse Delta heeft modellen van het 1D waterbewegingsmodel DufLOW van het Mark-Vliet systeem beschikbaar, waarin de hydraulische kenmerken reeds zijn ingevoerd. Er zijn drie modellen beschikbaar waarin verschillende afvoergolven zijn gedefinieerd; afvoeren met een herhalingsstijg van 1/25, 1/50 en 1/100 [16]. Deze DufLOW-modellen kunnen gebruikt worden om de waterstanden in het Mark-Vliet systeem behorende bij een bepaalde afvoergolf te berekenen. Omdat de afvoergolven gekoppeld zijn aan een herhalingsstijg, kan het aandeel van de afvoer in de overschrijdingskansen van waterstanden op het Mark-Vliet systeem

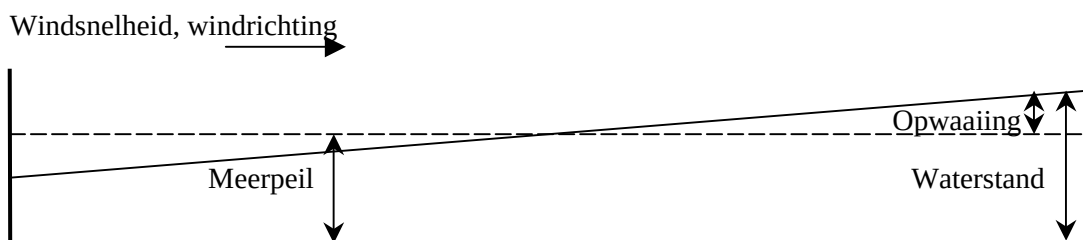
bepaald worden. De enige randvoorwaarde die nog ontbreekt in de Duflow-modellen is de waterstand op het Volkerak-Zoommeer ter hoogte van de mondingen van het Mark-Vliet systeem.

3.3. Waterstanden op het Volkerak-Zoommeer

Een waterstand op het Mark-Vliet systeem ontstaat zoals gezegd uit een combinatie van een bepaalde afvoergolf en een bepaalde waterstand op het Volkerak-Zoommeer. Om te bepalen wat de kans van voorkomen is van een bepaalde waterstand in het Mark-Vliet systeem, zijn daarom naast de herhalingsjijd van de afvoergolf ook de overschrijdingsfrequenties van de waterstanden bij de mondingen van het Mark-Vliet systeem, dus op het Volkerak-Zoommeer, benodigd. De benodigde overschrijdingskansen van waterstanden in de mondingen zijn in tegenstelling tot de regionale afvoeren echter niet rechtstreeks beschikbaar.

Er zijn wel overschrijdingsfrequentielijnen voor zowel de huidige als de nieuwe situatie opgesteld door Rijkswaterstaat RIZA [2], maar deze lijnen gelden voor een **gemiddelde** waterstand op het Volkerak-Zoommeer. Op- en afwaaiing beïnvloeden de inhoud van het systeem niet en hebben daarom geen invloed op de bergingscapaciteit van het Volkerak-Zoommeer, waardoor de waterstandverdeling onder invloed van de wind niet direct van invloed is op de maatregel hoogwaterberging. Door windopzet kan een lokale waterstand echter sterk afwijken van de gemiddelde waterstand van een watersysteem.

In figuur 3.3 is de invloed van de wind op de waterstand geschematiseerd. De waterstand op een bepaald punt op of langs een meer wordt bepaald door drie variabelen. Ten eerste bepaalt het volume water in het meer het meerpeil, of wel de gemiddelde waterstand bij windstille. Door aanwezigheid van wind wordt het water in het meer opgestuwd. De combinatie van windrichting en windsnelheid bepaalt de opwaaiing of afwaaiing per locatie⁵.



Figuur 3.3: Schematisatie van invloedsfactoren van de waterstanden op een meer

Net na het ontstaan van het Volkerak-Zoommeer is door Rijkswaterstaat een onderzoek verricht naar de windopzet [20]. De resultaten van deze studie zijn in bijlage D opgenomen. In [20] is vastgesteld dat bij de Volkeraksluizen een windopzet van 20 cm bij een windsnelheid van 10 Bft optreedt. Dit doet vermoeden dat de windopzet bij de monding van de Dintel groot kan zijn, met

⁵ Door de aanwezigheid van wind ontstaan naast windopzet ook golven. Deze golven bewegen echter rond de 'effectieve waterstand', de waterstand die wordt bepaald door de combinatie van meerpeil en opwaaiing en zullen als gevolg weinig invloed hebben op de afwateringscapaciteit van het systeem. In dit onderzoek wordt daarom aangenomen dat de invloed van windgolven op het Volkerak-Zoommeer verwaarloosbaar is voor de waterstanden in het Mark-Vliet systeem. Voor het berekenen van de overschrijdingsfrequentielijnen worden daarom alleen het meerpeil, de windsnelheid en de windrichting meegenomen.

de nodige gevolgen voor de waterstanden in de Dintel en de Mark. In het rapport 'Hoogwaterlijnen Mark en Vliet [21] wordt bovendien gezegd dat hoge waterstanden op de Mark en Dintel vaak samen gaan met een zuidwesterstorm, welke tot hoge opwaaiing bij de mondingen leidt.

Een eigenschap van windopzet zorgt voor een tweede reden die het interessant maakt om de windinvloed mee te nemen in de berekeningen. Een hogere bodemhoogte of wel kleinere waterdiepte zal leiden tot een hogere opwaaiing doordat de waterdruk kleiner is, waardoor het windverhang steiler kan worden [37]. In theorie betekent dit voor het Volkerak-Zoommeer dat de wind een relatief kleinere invloed heeft op de waterstand ten tijde van extreem hoge meerpeilen in vergelijking met een situatie waarin gemiddelde meerpeilen optreden. Dit zou het verschil in waterstand tussen de huidige situatie en de situatie met inzet van het Volkerak-Zoommeer voor waterberging beïnvloeden, wat weer van invloed kan zijn op de kansverandering van wateroverlast.

Op basis van [20] en [21] en de hiervoor genoemde eigenschap van de windopzet is vastgesteld dat de windinvloed op het Volkerak-Zoommeer meegenomen dient te worden in het berekenen van de overschrijdingsfrequenties van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer. In paragraaf 3.5 wordt besproken hoe de nieuwe overschrijdingsfrequenties van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer zijn bepaald en hoe daarmee overschrijdingsfrequentielijnen voor het Mark-Vliet systeem zijn berekend. Eerst wordt echter nog ingegaan op de correlatie tussen de afvoer van het Mark-Vliet systeem en het meerpeil van het Volkerak-Zoommeer en de correlatie tussen de afvoer van het Mark-Vliet systeem en inzet van het Volkerak-Zoommeer voor hoogwaterberging.

3.4. Correlatie Mark-Vliet systeem en Volkerak-Zoommeer

Doordat het Mark-Vliet systeem en het Volkerak-Zoommeer met elkaar verbonden zijn, is er sprake van een relatie tussen de twee systemen. Hoe deze relatie de overschrijdingskansen van waterstanden in beide systemen beïnvloedt, is afhankelijk van de mate van correlatie tussen de afvoer van het Mark-Vliet systeem en het meerpeil op het Volkerak-Zoommeer en van de mate van correlatie tussen de afvoer van het Mark-Vliet systeem en inzet van het Volkerak-Zoommeer voor hoogwaterberging. In deze paragraaf worden beide correlaties besproken op basis van literatuur.

3.4.1. Correlatie afvoer Mark-Vliet systeem en meerpeil Volkerak-Zoommeer

De mate van correlatie tussen de afvoer van het Mark-Vliet systeem en het meerpeil (en daarmee indirect de waterstand) op het Volkerak-Zoommeer bepaalt welke combinaties van afvoer en waterstanden voor kunnen komen. Als de twee variabelen volledig gecorreleerd zouden zijn, dan betekent dit dat een afvoer met een herhalingsjijd van bijvoorbeeld 100 jaar altijd samenvalt met een waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een herhalingsjijd van 100 jaar. In de praktijk zijn er zoveel factoren die de afvoer en waterstand beïnvloeden dat volledige correlatie alleen als theoretische bovengrens gezien wordt. Wanneer er geen relatie is tussen de trends in de meerpeilbeweging op het Volkerak-Zoommeer en het afvoerverloop in het Mark-Vliet systeem, kan geconcludeerd worden dat de twee variabelen volledig ongecorreleerd zijn. Gezien het feit dat het Mark-Vliet systeem de grootste toevoer van water in het Volkerak-Zoommeer levert [2], is het onwaarschijnlijk dat de twee variabelen volledig ongecorreleerd zijn. Met behulp van een simpele

kombergingsbenadering kan een indicatie verkregen worden van de correlatie tussen de twee variabelen [38].

Aan de hand van het oppervlak van het Volkerak-Zoommeer kan bepaald worden hoe een extreme afvoer de waterstand op het Volkerak-Zoommeer beïnvloedt. Het Volkerak-Zoommeer heeft een nat oppervlak van ongeveer 6000 ha. Een extreme afvoer van het Mark-Vliet systeem van 150 m³/s zal over een periode van 24 uur leiden tot een meerpeilstijging van 22 cm over dit oppervlak. De grootte van de stijging duidt op een zekere correlatie. Het is echter de vraag of deze meerpeilstijging daadwerkelijk zal optreden gezien het peilbeheer op het Volkerak-Zoommeer. Bij extreme afvoeren van de Brabantse rivieren wordt via de Krammersluizen in de Philipsdam het overtollige water vanaf het Volkerak-Zoommeer geloosd op de Oosterschelde [16].

De correlatie kan goed onderzocht worden door meerpeilmetingen op het Volkerak-Zoommeer uit te zetten tegen afvoermetingen bij Dintelsas. In dit onderzoek is geen ruimte voor deze analyse, maar het is aan te bevelen de correlatie tussen de afvoer van het Mark-Vliet systeem en het meerpeil op het Volkerak-Zoommeer nader te onderzoeken. Gezien de andere invloedsfactoren op het meerpeil, zoals het peilbeheer en binnenkort ook de hoogwaterberging, waarvan de precieze invloed op het meerpeil ook onzeker is, wordt in dit onderzoek uitgegaan van een te verwaarlozen relatie tussen het meerpeil en de afvoer.

3.4.2. Correlatie afvoer Mark-Vliet systeem en inzet Volkerak-Zoommeer

Naast de correlatie tussen de afvoer en het meerpeil is er ook sprake van een mogelijke correlatie tussen de afvoer van het Mark-Vliet systeem en inzet van het Volkerak-Zoommeer voor hoogwaterberging. Als er een grote kans is dat de afvoer verhoogd is ten tijde van inzet van het Volkerak-Zoommeer voor hoogwaterberging, is ook de kans op wateroverlast tijdens inzet van het Volkerak-Zoommeer groot. In opdracht van RIZA heeft HKV LJN IN WATER berekend of inzet van het Volkerak-Zoommeer gecorreleerd is aan hoge afvoeren in het Mark-Vliet systeem [17].

HKV LJN IN WATER heeft afvoerreeksen voor het Mark-Vliet systeem berekend op basis van meerjarige neerslagreeksen gemeten bij Oudenbosch, gelegen in het stroomgebied van de Mark. Inzet van het Volkerak-Zoommeer is afhankelijk van de zeewaterstand en de afvoeren door de Maas en Rijn, aangezien deze variabelen de waterstand bij Rak-Noord bepalen [2]. HKV LJN IN WATER heeft daarom een analyse uitgevoerd van de correlatie tussen [17]:

1. De berekende afvoerreeksen voor het Mark-Vliet systeem en historische meetgegevens van de zeewaterstand;
2. De berekende afvoerreeksen voor het Mark-Vliet systeem en de historische afvoerreeksen van de Maas;
3. De berekende afvoerreeksen voor het Mark-Vliet systeem en historische afvoerreeksen van de Rijn.

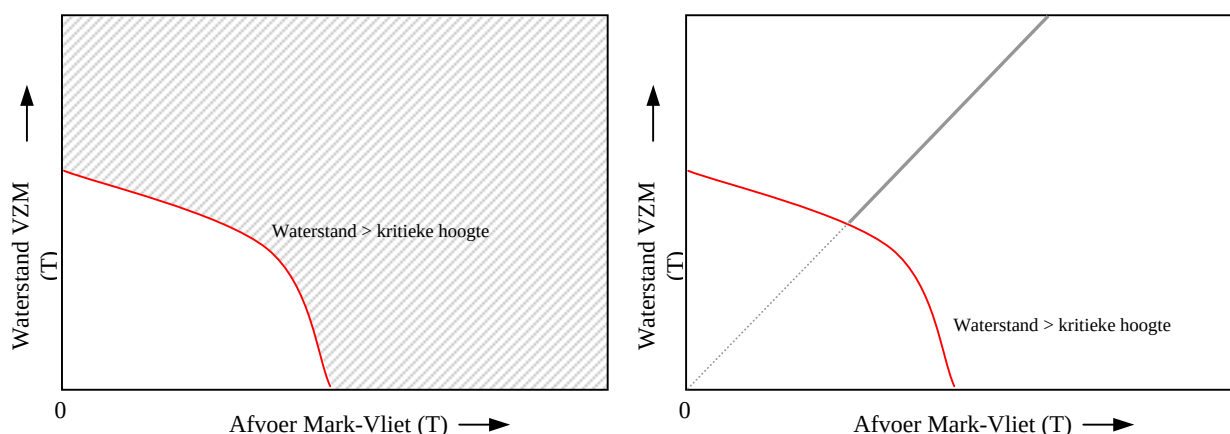
Uit deze analyses is gebleken dat er in ieder geval een grote kans is dat de afvoer in het Mark-Vliet systeem ten tijde van inzet van het Volkerak-Zoommeer hoger dan gemiddeld is. Verder lijkt er een zeer zwakke correlatie te bestaan tussen de inzet van het Volkerak-Zoommeer en de hoogte van de afvoer in het Mark-Vliet systeem [17]. De statistische analyse van HKV LJN IN WATER bevat door een gebrek aan data echter een significante mate van onzekerheid. Aangezien het verlengen van de neerslagreeksen om zodoende de onzekerheid te verkleinen buiten de scope van

voorliggend onderzoek valt, wordt op aanraden van [17] in dit onderzoek uitgegaan van twee uitersten, een situatie waarin inzet en afvoer volledig gecorreleerd zijn en een situatie waarin inzet en afvoer ongecorreleerd zijn.

Bij inzet van het Volkerak-Zoommeer hoort in het geval van volledige correlatie een afvoer met een herhalingstijd die overeenkomt met de herhalingstijd van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer. Als er sprake is van volledige correlatie wordt bij een afvoer van 1/100 jaar het Volkerak-Zoommeer nooit ingezet voor hoogwaterberging. Alleen wanneer een afvoer met een herhalingstijd van 1430 jaar optreedt, zal het Volkerak-Zoommeer ingezet worden. Het beschermingsniveau wordt in dit geval niet kleiner dan in de situatie zonder aanwijzing van het Volkerak-Zoommeer voor berging. In extreme situaties met herhalingstijden groter dan 1430 jaar kunnen echter wel grote problemen ontstaan wanneer wordt overgegaan tot het inzetten van het Volkerak-Zoommeer [17].

Wanneer de inzet van het Volkerak-Zoommeer en de afvoer van het Mark-Vliet systeem ongecorreleerd zijn, kan inzet van het Volkerak-Zoommeer samenvallen met iedere willekeurige afvoer op het Mark-Vliet systeem. Wanneer als uitgangspunt wordt genomen dat inzet altijd samenvalt met een afvoergolf die tot wateroverlast leidt, dan zal zoals gezegd het beschermingsniveau door inzet afnemen van 1/100 jaar naar maximaal 1/94 jaar [17]. Deze waarde is een bovengrensbepijndering, in de realiteit valt het te verwachten dat inzet niet altijd samenvalt met een afvoer die zo hoog is dat wateroverlast ontstaat.

In de praktijk zullen de variabelen nooit volledig gecorreleerd of ongecorreleerd zijn, deze situaties dienen om een boven- en ondergrens aan te geven. Als de variabelen ongecorreleerd zijn, bestaat de kans uit een optelling van alle verschillende kansen die bijdrage aan de overschrijding van de kritieke waterstand. Als aangenomen wordt dat de variabelen volledig gecorreleerd zijn is de overschrijdingskans beperkt tot alle situaties waarin de twee variabelen een gelijke herhalingstijd hebben. Dit is in figuur 3.4 uitgebeeld.



a. *Figuur 3.4: Overschrijdingskans van de kritieke waterstand afhankelijk van de herhalingstijd (T) van de afvoer en de herhalingstijd (T) van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer. a: afvoer MVS en waterstand VZM zijn ongecorreleerd, de overschrijdingskans is weergegeven door het gearceerde gebied, b: afvoer MVS en waterstand VZM zijn volledig gecorreleerd, de overschrijdingskans is weergegeven door de grijze lijn boven de kritieke waterstand, situaties waarin de herhalingstijden niet gelijk zijn aan elkaar komen in deze situatie niet voor.*

In figuur 3.4 is duidelijk te zien dat de overschrijdingskans bij volledige correlatie resulteert in een kleinere overschrijdingskans dan bij ongecorreleerde omstandigheden. Het uitgangspunt van volledige correlatie vormt daarom de ondergrens van de overschrijdingskans en de bovengrens wordt gevormd door te rekenen met ongecorreleerde omstandigheden als uitgangspunt.

3.5. Methode

Deze paragraaf bespreekt de onderzoeksmethode die is gehanteerd. De aanpak is in drie stappen verdeeld, waarmee achtereenvolgend de eerste drie onderzoeksvragen beantwoord worden.

Stap 1: Het berekenen van locatiegebonden overschrijdingsfrequentielijnen van de waterstanden op het Volkerak-Zoommeer ter hoogte van de mondingen van het Mark-Vliet systeem.

Stap 2: De waterstanden in het Mark-Vliet systeem berekenen. Dit wordt gedaan met de DufLOW-modellen voor verschillende afvoergolven en waterstanden in de mondingen. De waterstanden bij de mondingen volgen uit stap 1. Aan de hand van de DufLOW-berekeningen wordt bepaald waar wateroverlast optreedt door inzet van het Volkerak-Zoommeer voor hoogwaterberging.

Stap 3: Bepalen hoe de kans op wateroverlast verandert. Dit wordt gedaan door de overschrijdingsfrequenties van de waterstanden in het Mark-Vliet systeem te berekenen. De overschrijdingsfrequenties zijn locatieafhankelijk; er wordt daarom per knelpunt (locatie waar wateroverlast optreedt) een overschrijdingsfrequentielijn voor de huidige situatie en één voor de situatie met hoogwaterberging bepaald. Het verschil tussen de lijnen geeft aan hoe de kans op wateroverlast op die locatie verandert.

3.5.1. Stap 1: Overschrijdingsfrequenties van het Volkerak-Zoommeer

Er is gekozen om de overschrijdingsfrequentielijnen van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer bij de mondingen van het Mark-Vliet systeem te berekenen met het probabilistische rekenprogramma Hydra-M. Hydra-M is een computerprogramma dat is gebruikt bij het vaststellen van de hydraulische belastingen voor de dijkvakken in het IJsselmeergebied [39]. De hydraulische belasting is bij het weglaten van de invloed van golven gelijk aan de waterstand. Zowel fysische als statistische gegevens van het meerpeil, de windsnelheid en de windrichting vormen de input. Uit deze hydraulische en statistische randvoorwaarden worden belastingcombinaties samengesteld, waaruit Hydra-M overschrijdingsfrequentielijnen berekent voor een opgegeven locatie. De voor het IJsselmeergebied gevolgde ontwerpmethodiek staat beschreven in het rapport “Achtergronden Hydraulische Belastingen Dijken IJsselmeergebied” [40] en de bijbehorende deelrapporten. Deze ontwerpmethodiek kan met een aantal aanpassingen overgenomen worden zodat het programma voor het Volkerak-Zoommeer te gebruiken is. Het voordeel van Hydra-M is dat binnen een kort tijdsbestek gerekend kan worden met een groot aantal combinaties van bedreigingen [40]. Hierdoor kan de overschrijdingskans nauwkeurig bepaald worden.

De statistische randvoorwaarden die als invoer dienen worden afgeleid uit bestaande meetgegevens. De fysische randvoorwaarden worden berekend met een waterbewegingsmodel. Welk computerprogramma geschikt is voor de simulering van de waterbeweging is afhankelijk van welke aspecten meegenomen moeten worden en van het gewenste detailniveau van de

uitkomsten. Ter illustratie; voor het IJsselmeergebied moeten iedere 5 jaar toetspeilen berekend worden om de waterkeringen te toetsen [13, 40]. Het berekenen van de toetspeilen moet nauwkeurig gebeuren aangezien de veiligheid van het achterland van de toetsing afhankelijk is en de kosten van dijkverbetering hoog zijn. De waterbeweging in het IJsselmeergebied is daarom berekend met het 2D computermodel WAQUA, waarin alle relevante fysische processen op gedetailleerde wijze zijn geschematiseerd. Nadeel van dit programma is dat de rekentijd lang is [40].

Voorliggend onderzoek behoeft niet dezelfde mate van nauwkeurigheid als bij bijvoorbeeld de toetsing van waterkeringen. Voorwaarde is dat de overschrijdingskansen die worden berekend voor zowel de huidige als de toekomstige situatie in ieder geval voldoen om een duidelijk beeld te schetsen van de omvang van de gevolgen van inzet van het Volkerak-Zoommeer voor waterberging. De eis die hier aan de resultaten gesteld wordt zodat aan deze voorwaarde wordt voldaan, is dat de waterstand op het Volkerak-Zoommeer tot 20 cm nauwkeurig wordt voorspeld door het gekozen waterbewegingsmodel. Dat deze onnauwkeurigheid geen grote gevolgen heeft voor de waterstand in het Mark-Vliet systeem kan worden onderbouwd met [21], waarin is aangetoond dat de invloed van een 15 cm hogere waterstand op het Volkerak-Zoommeer tot een waterstandverhoging bij Breda van slechts 2 cm leidt. Bij de berekening was uitgegaan van een grote afvoer door het systeem, het is waarschijnlijk dat een waterstandverhoging op het Volkerak-Zoommeer bij lagere afvoeren tot grotere waterstandverhogingen in het Mark-Vliet systeem zal leiden. Aangezien juist de extreme situaties, met grote afvoeren, van belang zijn bij het bepalen van de kans op wateroverlast, wordt aangenomen dat een nauwkeurigheid tot 20 cm voldoet.

In voorliggend onderzoek is de keuze voor het detailniveau van de waterbewegingssimulatie door een aantal externe omstandigheden bepaald. Ten eerste zijn er doordat het Volkerak-Zoommeer nog maar 19 jaar bestaat slechts een beperkt aantal metingen beschikbaar van het meerpeil. Deze beperking leidt tot een significante onzekerheid in de overschrijdingskansen van extreme waterstanden in de huidige situatie [41, 2]. Ten tweede is het Volkerak-Zoommeer geen buitenwater, met als gevolg dat er geen bruikbare 2D modelschematisatie van het gebied bestaat, aangezien er geen toetsingen van de waterkeringen rond het meer worden uitgevoerd [13]. Het maken van een gedetailleerde modelschematisatie is een tijdrovende klus. Aangezien de invoer al een mate van onzekerheid bevat, er binnen het onderzoek niet genoeg tijd is om een gedetailleerde modelschematisatie te maken en het resultaat dit ook niet perse verlangt, is gekozen voor een minder nauwkeurige wijze van simuleren. Voor een snelle en eenvoudige simulering van de waterbeweging is het programma BretView gebruikt. Er is voor dit programma gekozen vanwege de eenvoudige invoer en de korte rekentijden. Het programma levert bovendien automatisch de juiste fysische gegevens aan voor Hydra-M.

Met Hydra-M worden overschrijdingsfrequentielijnen berekend voor zowel de huidige situatie als de nieuwe situatie, waarin het Volkerak-Zoommeer is aangewezen voor hoogwaterberging. Zodoende kan in stap 2 bepaald worden hoe de waterstanden veranderen door inzet van het Volkerak-Zoommeer. Deze stap in het onderzoek wordt in hoofdstuk 4 uitgewerkt. In dit hoofdstuk wordt ook dieper ingegaan op de programma's BretView en Hydra-M en de aannames die gemaakt zijn in dit onderzoek.

3.5.2. Stap 2: Waterstanden in het Mark-Vliet systeem

De waterstanden op het Volkerak-Zoommeer met bijbehorende herhalingstijden bij de monding van de Vliet en de Dintel, randvoorwaarden voor de Duflow-modellen, kunnen uit de met Hydra-M berekende overschrijdingsfrequentielijnen gehaald worden. Met Duflow worden vervolgens verhanglijnen in het Mark-Vliet systeem berekend voor een zo breed mogelijk spectrum aan combinaties van afvoeren en waterstanden op het Volkerak-Zoommeer. In tabel 3.1 wordt weergegeven welke combinaties gemaakt worden, waarbij het aantal beschikbare afvoergolven de beperkende factor is.

Afvoer Mark-Vliet systeem	Waterstand Volkerak-Zoommeer
$P(mvs) = 1$	$P(vzm) = 1$
$P(mvs) = 1/25$	$P(vzm) = 1/25$
$P(mvs) = 1/50$	$P(vzm) = 1/50$
$P(mvs) = 1/100$	$P(vzm) = 1/100$
	$P(vzm) = 1/1000$
	$P(vzm) = 1/1430$
	$P(vzm) = 1/2000$

Tabel 3.1: Mogelijke combinaties voor het berekenen van de verhanglijnen in het Mark-Vliet systeem. De afvoer wordt hoog genoemd wanneer deze gelijk of hoger is dan het beschermingsniveau.

Naast bovenstaande combinaties wordt bij de berekening gekeken naar de invloed van de timing van de variabelen. Uit het correlatieonderzoek van HKV LJUN IN WATER is gebleken dat de afvoergolf in het Mark-Vliet systeem in de meeste gevallen al (zo goed als) voorbij is op het moment dat het Volkerak-Zoommeer wordt ingezet. Het onderzoek van HKV LJUN IN WATER is niet uitgebreid genoeg om bovenstaand fenomeen als vaststaand feit te beschouwen. Een rapport aangaande het samenvallen van hoogwaterpieken op de Maas en haar zijrivieren laat zien dat de pieken in de Limburgse regionale rivieren voorlopen op de afvoerpiek in de Maas [42]. Dit onderzoek betreft een ander systeem, maar dit systeem ligt in hetzelfde stroomgebied. Er wordt daarom aangenomen dat [42] de ondervindingen van HKV LJUN IN WATER onderschrijft. Op basis hiervan wordt er, in tegenstelling tot wat in het onderzoek van waterschap de Brabantse Delta [16] is aangehouden, in voorliggend onderzoek vanuit gegaan dat de afvoergolf niet zal samenvallen met de waterstandpiek op het Volkerak-Zoommeer. In de discussie in paragraaf 6.4 wordt ingegaan op de consequenties van deze aanname.

Met Duflow worden zoals gezegd voor de mogelijke combinaties, weergegeven in tabel 3.1, de verhanglijnen berekend. Er worden berekeningen uitgevoerd voor de huidige situatie en de situatie met inzet van het Volkerak-Zoommeer om het verschil tussen de beide situaties te bepalen. De resultaten van deze berekeningen geven een goed inzicht in de invloed die de waterstand op het Volkerak-Zoommeer heeft op de waterstanden in het Mark-Vliet systeem. Er wordt aan de hand van de berekende verhanglijnen en de keringhoogtes, welke uit GIS gehaald worden, bepaald waar de boezemkeringen overstromen. Ook wordt bepaald of de kans op stremming van de vjzelmalen toeneemt. Dit is uitgewerkt in hoofdstuk 5, waar ook het programma Duflow en de gemaakte aannames worden besproken.

3.5.3. Stap 3: Overschrijdingsfrequenties van het Mark-Vliet systeem

Om de kans op wateroverlast in de Mark-Vliet boezem nauwkeurig te bepalen is een probabilistische aanpak gewenst. Hierbij wordt een zo breed mogelijk spectrum aan mogelijke combinaties van omstandigheden doorgerekend, zodat alle optredende situaties vertegenwoordigd zijn in de kans op wateroverlast. De beste manier om de probabilistische kans op wateroverlast te berekenen zou zijn om het programma Hydra-VIJ aan te passen voor het Mark-Vliet systeem. Hydra-VIJ is een zusterprogramma van Hydra-M, ontwikkeld om de hydraulische belastingen op de dijkvakken langs de Vecht en IJssel te berekenen [39]. Deze systemen, die afwateren op het IJsselmeer, zijn vergelijkbaar met het Mark-Vliet systeem, dat ook afwatert op een meer. Met een aangepaste Hydra-VIJ zouden op probabilistische wijze overschrijdingsfrequentielijnen voor ieder punt langs het Mark-Vliet systeem berekend kunnen worden, waarmee de kans op wateroverlast nauwkeurig vastgesteld zou kunnen worden. Het aanpassen van Hydra-VIJ voor het Mark-Vliet systeem is echter zeer tijdrovend. Bovendien wordt de toepassing van Hydra-VIJ beperkt door de voorhanden zijnde gegevens van het Mark-Vliet systeem. Voor de afvoer zijn enkel golven van 1/25, 1/50 en 1/100 beschikbaar, terwijl voor het probabilistisch berekenen van de overschrijdingskans van de waterstand een zo compleet mogelijk bereik aan randvoorwaarden moet worden gebruikt [40]. Om deze redenen is ervoor gekozen om de overschrijdingsfrequenties van de waterstanden in het Mark-Vliet systeem te berekenen met een veel minder tijdrovende aanpak die naar verwachting toch een redelijk beeld zal geven van de kansverandering door inzet van het Volkerak-Zoommeer.

De aanpak die is gekozen om de overschrijdingsfrequenties van de waterstanden in het Mark-Vliet systeem te bepalen is een deterministische methode die de probabilistische aanpak benadert. De aanpak is bekend onder de naam verhanglijnenmethode of IJsseldelta methode. Met DufLOW worden twee verhanglijnen berekend waarbij één belasting maatgevend is; een verhanglijn met een maatgevende waterstand op het Volkerak-Zoommeer en een verhanglijn met een maatgevende afvoer. Uit de twee verhanglijnen wordt een samengestelde verhanglijn bepaald aan de hand van de IJsseldelta methode [50]. Deze verhanglijn heeft op iedere locatie dezelfde overschrijdingsfrequentie. Door deze samengestelde verhanglijn voor herhalingstijden van 25 jaar, 50 jaar, 100 jaar en 1430 jaar of groter te bepalen, kan per locatie langs het Mark-Vliet systeem een overschrijdingsfrequentielijn bepaald worden voor de huidige situatie (zonder inzet voor hoogwaterberging) en de nieuwe situatie (met inzet voor hoogwaterberging) door de herhalingstijden uit te zetten tegen de waterstanden die bij deze waterstand op de locatie optreedt. Uit het verschil tussen de twee frequentielijnen kan benaderd worden hoe de kans op wateroverlast verandert.

Omdat er geen afvoergolf beschikbaar is met een herhalingstijd groter dan 100 jaar, kunnen er met DufLOW geen verhanglijnen berekend worden voor combinaties inclusief inzet van het Volkerak-Zoommeer, dus bij een afvoergolf met een herhalingstijd van 1430 jaar of groter en een waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een herhalingstijd van 1430 jaar of groter. Dit zou betekenen dat de probabilistische kans op wateroverlast niet benaderd kan worden. In het rapport 'Hoogwaterlijnen van het Mark-Vliet systeem' [21] is een verhanglijn behorende bij een extreme afvoer van 1/2000 jaar gecombineerd met een lage waterstand op het Volkerak-Zoommeer berekend. Door deze verhanglijn te gebruiken kan bovenstaande aanpak toch gebruikt worden om de probabilistische kans op wateroverlast te benaderen. De verhanglijn resulterend uit een

maatgevende waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een herhalingsstijd van 2000 jaar kan wel met DufLOW berekend worden.

De IJsseldelta methode benadert de probabilistische kans, maar omdat alleen de twee meest dominerende belastingcombinaties worden meegenomen in plaats van het hele spectrum aan combinaties, wordt een veiligheid ingebouwd die deze onderschatting ondervangt. De IJsseldelta methode resulteert hierdoor altijd in een conservatieve benadering van de waterstanden behorende bij een bepaalde herhalingsstijd. In hoofdstuk 6 worden de IJsseldelta methode en de resulterende overschrijdingsfrequentielijnen van de waterstanden in het Mark-Vliet systeem verder toegelicht.

De IJsseldelta methode bepaalt de overschrijdingsfrequentie van een verhanglijn uitgaande van ongecorreleerde omstandigheden. Zoals besproken is in paragraaf 3.4.2 is het niet duidelijk hoe groot de correlatie tussen inzet van het Volkerak-Zoommeer en de afvoerpiek in het Mark-Vliet systeem is. De toename van de kans op wateroverlast zou daarom ook voor de volledig gecorreleerde situatie berekend moeten worden. Dit zou met DufLOW geen probleem zijn, ware het niet dat er geen afvoergolf beschikbaar is met een herhalingsstijd groter dan de herhalingsstijd van inzet van het Volkerak-Zoommeer. Bij herhalingsstijden van 25, 50 en 100 jaar treden er nagenoeg geen verschillen op tussen de huidige en nieuwe situatie; aan de hand van de waterstanden die bij combinaties van een T25-afvoer met een T25 waterstandverloop, een T50-afvoer met een T50-waterstandverloop en een T100-afvoer en een T100-waterstandverloop zijn berekend is het niet mogelijk om overschrijdingsfrequentielijn van de waterstand in het Mark-Vliet systeem te bepalen voor de nieuwe situatie. Het is in voorliggend onderzoek daardoor alleen mogelijk om de bovengrens van de overschrijdingskans, de zogenaamde ‘worst-case’, te berekenen.



Hoofdstuk 4. Windinvloed op het Volkerak-Zoommeer

4.1. De waterbeweging op het Volkerak-Zoommeer

De waterbeweging op het Volkerak-Zoommeer is gesimuleerd om de waterstanden inclusief windinvloed te berekenen. In deze paragraaf wordt eerst nader ingegaan op het waterbewegingsmodel BretView, waarna de invoer voor dit model wordt besproken. Aan de hand van uitvoer van BretView wordt de invloed van wind op de waterstanden op het Volkerak-Zoommeer bediscussieerd. Vervolgens worden voor de belangrijkste locaties waterstandberekeningen gepresenteerd. Er zijn berekeningen uitgevoerd voor de Dintel- en Vlietmonding en bij de Volkerak- en Krammersluizen. De paragraaf wordt afgesloten met een validatie van BretView voor het Volkerak-Zoommeer.

4.1.1. BretView

BretView is gebaseerd op een simpel bakmodel, waarin de waterstand numeriek wordt bepaald uit een versimpelde impulsbalans en massabalans [52]. Door waterdruk, windschuifspanning en bodemschuifspanning verandert de hoogte van een waterkolom, maar in het meer kan nooit water ‘verdwijnen’. Het water wordt op basis van de formules in BretView dus herverdeeld over het meer. De invoer bestaat uit een reeks meerpeilen, een reeks windrichtingen, een reeks windsnelheden, een constante bodemhoogte en een gebiedscontour. In BretView wordt van deze 2D gebiedscontour een 1D rekenmodel gemaakt door de x-as over de windrichting te laten lopen. Het model berekent vervolgens de waterstand, die dus alleen in de x-richting varieert [52]. De vergelijking waarmee de verhanglijn wordt berekend is afhankelijk van het wel of niet voorkomen van droogval. De waterstanden worden in BretView iteratief opgelost totdat aan de wet van massabehoud wordt voldaan [52]. De vergelijkingen waarop BretView is gebaseerd worden nader toegelicht in bijlage E.

4.1.2. Toepassing van BretView

Het model gaat uit van stationariteit, ruimtelijke onafhankelijkheid en een dieptegemiddelde stroomsnelheid binnen de gebiedscontour. Stromingen in het meer worden niet meegenomen en de bodem heeft in het model een constante hoogte [52]. Deze aannames hebben een aantal gevolgen voor aanpak en de nauwkeurigheid van de modellering. In bijlage E worden deze uitgebreid besproken. De belangrijkste aanpassingen en aandachtspunten zijn:

- ~ BretView werkt niet goed voor smalle wateren; de aannames van stationariteit en ruimtelijke onafhankelijkheid gaan daar niet op [52]. Aangezien in dit onderzoek alleen de waterstanden bij de Dintel- en Vlietmonding van belang zijn, is om dit probleem te ondervangen de gebiedscontour beperkt tot het Volkerak en Krammer, het brede water waarop de rivieren uitmonden. De smalle Eendracht en al het water ten zuiden daarvan wordt niet meegenomen in de modellering. Doordat de inhoud van dit deel van het Volkerak-Zoommeer relatief klein is, wordt aangenomen dat deze beperking van de gebiedscontour de resultaten niet significant zal beïnvloeden. Figuur 4.1 in paragraaf 4.1.4 geeft een weergave van de gebiedscontour zoals deze is aangehouden in BretView;
- ~ BretView gaat altijd uit van evenwichtsituaties; het programma berekent de verhanglijn alsof deze de tijd krijgt om naar zijn evenwicht te komen [52]. In werkelijkheid is dit niet het geval,

doordat de windcondities en het meerpeil constant in beweging zijn. De aanname van evenwicht in BretView leidt tot een zekere overschatting van de opwaaiing. Deze conservatieve aanpak levert geen probleem op; door de vele versimpelingen in de modellering is een conservatief resultaat wenselijk om eventuele onderschattingen te ondervangen;

- ~ In een bergings situatie zullen er stromingen in het Volkerak-Zoommeer ontstaan door het inlaten en doorvoeren van water. Deze stromingen worden niet meegenomen in BretView, terwijl zij de verhanglijn wel kunnen beïnvloeden. Hoe deze stromingen inwerken op de waterstand is niet bekend, er wordt aanbevolen hier onderzoek naar te doen;
- ~ In BretView wordt een constante bodemhoogte aangenomen. Dit is voor het Volkerak-Zoommeer de aanname die tot de grootste onzekerheid in de resultaten leidt. In hoofdstuk 2 is de hoogteligging van het Volkerak-Zoommeer besproken. De bodemhoogte varieert van 24 m onder NAP tot 1 m boven NAP en is daarmee een van de meest variërende meerbodems van Nederland. Het gevolg is dat een keuze van een representatieve bodemhoogte niet eenvoudig is. De bodemhoogte is zeer bepalend voor de opwaaiing en het is maar de vraag of de gemiddelde bodemhoogte gemiddeld ongeveer dezelfde opwaaiing tot gevolg heeft als een gevarieerde bodem. Er is besloten tot het rekenen met drie bodemhoogtes; een conservatieve gemiddelde bodemhoogte van 4.5 m onder NAP, een lager gelegen bodem van 6 m onder NAP en een hoger gelegen bodem van 3 m onder NAP. Aan de hand van de waterstanden en overschrijdingskansen die met deze drie varianten worden berekend kan de gevoeligheid van de resultaten voor de bodemhoogtekeuze worden bepaald. Op basis van een validatie van de resultaten ten opzichte van metingen kan vervolgens bepaald worden met welke bodemhoogte verder gerekend moet worden.

Door de vele versimpelingen en aannames zit er in BretView een significante onzekerheid. Aangezien de waterstanden niet onderschat worden door de conservatieve aanpak, wordt deze onzekerheid echter geaccepteerd zolang de resultaten voldoen aan de eis dat de waterstand op het Volkerak-Zoommeer tot 20 cm nauwkeurig wordt voorspeld (zie paragraaf 3.5.1). Door middel van een validatie is bekeken of de resultaten van BretView voldoen. Deze validatie is opgenomen in paragraaf 4.1.5.

De invoer bestaat zoals gezegd uit gebiedskenmerken en randvoorwaarden van meerpeil en wind. De keuzes die zijn gemaakt ten opzichte van de gebiedskenmerken worden hierboven kort besproken. De in te voeren meerpeil-, windrichting en windsnelheidreeksen zijn gebaseerd op gegevens in de verdiepingsslag [2] en op de gewenste invoer voor Hydra-M. Voor de huidige situatie varieert het meerpeil tussen NAP en 0.6 m + NAP. In de nieuwe situatie is uitgegaan van een maximaal meerpeil van 2.5 m + NAP door inzet van het Volkerak-Zoommeer. De windsnelheid is gevarieerd tussen 14 m/s en 42 m/s (van 7 tot 12 Bft), waarbij de wind uit alle richtingen kan komen. De invoer is in bijlage E gespecificeerd en onderbouwd.

De waterstanden in de mondingen van de Dintel en Vliet zijn niet alleen afhankelijk van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer, maar ook van de afvoer van de rivieren. De waterstand vlak vóór de mondingen wordt echter als onafhankelijk van de afvoer beschouwd. Deze aanname is in paragraaf 3.4.1 onderbouwd.

4.1.3. Windinvloed op het Volkerak-Zoommeer

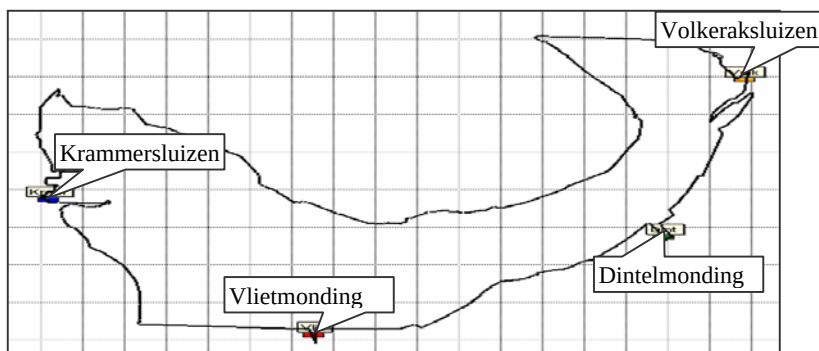
Met BretView kan de waterstand over het gehele Volkerak-Zoommeer of op vastgestelde locaties worden berekend. Uit berekeningen over het gehele systeem zijn een aantal algemene kenmerken van de windinvloed op de waterstand van het Volkerak-Zoommeer naar voren gekomen. Deze kenmerken worden in deze paragraaf eerst kort toegelicht. De invloed van de wind bij de mondingen van de Dintel en Vliet wordt besproken in paragraaf 4.1.4.

De resultaten van de waterstandberekeningen met BretView laten zien dat de wind inderdaad een grote invloed op de waterstand kan hebben, afhankelijk van de waterdiepte, de windsnelheid en de windrichting. De vier belangrijkste observaties uit de berekeningen van de windinvloed op de waterstand zijn:

- ~ De waterstand kantelt rond het zwaartepunt van de watermassa, waar de waterstand gelijk blijft aan het meerpeil. De plaats van het zwaartepunt is afhankelijk van de windrichting.
- ~ De opstuwing op een locatie aan het Volkerak-Zoommeer bereikt zijn maximale hoogte bij een voor die locatie specifieke windrichting. De opstuwing op het Volkerak-Zoommeer is in het algemeen het hoogst bij wind uit een noordoostelijke of zuidwestelijke richting, de wind heeft in deze richtingen de grootste strijklengtes;
- ~ Uit de resultaten blijkt dat een hogere bodem, dus een kleinere waterdiepte, zoals verwacht leidt tot hogere opwaaiing.
- ~ De hoogte van opwaaiing is vooral tijdens extreme windcondities zeer afhankelijk van de bodemhoogte. Zoals al was aangenomen blijkt dat de juiste keuze voor de bodemhoogte daarom erg belangrijk is voor een nauwkeurige berekening van de waterstand.

4.1.4. Resultaten: waterstanden in de Dintel- en Vlietmonding

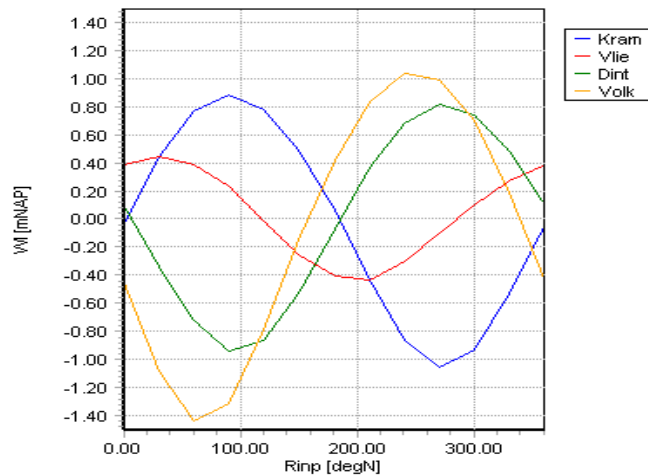
Er zijn voor een viertal locaties waterstandberekeningen uitgevoerd. Behalve bij de mondingen van de Dintel en Vliet zijn ook berekeningen uitgevoerd bij de Volkeraksluizen en de Krammersluizen. De locaties zijn in figuur 4.1 weergegeven. De berekeningen voor de Volkerak- en Krammersluizen dienen als controlepunten voor de uitvoer van BretView. In de waterstand met windinvloed zit altijd een zelfde trend, waarbij een kant hoge waterstanden heeft, de tegenovergestelde kant lage waterstanden laat zien en de waterstand rond het zwaartepunt gelijk is aan het meerpeil. Deze trend dient altijd zichtbaar te zijn in de resultaten.



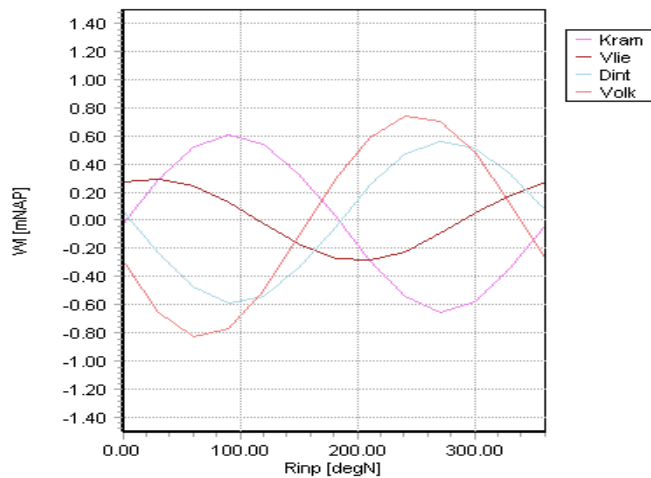
Figuur 4.1: De locaties waarvoor waterstandberekeningen zijn uitgevoerd in BretView

Er zijn per locatie matrixberekeningen uitgevoerd; voor iedere mogelijke combinatie tussen het meerpeil, de windsnelheid en de windrichting is een berekening gemaakt. In figuur 4.2 wordt per bodemhoogte-variant de waterstand gepresenteerd voor de vier locaties.

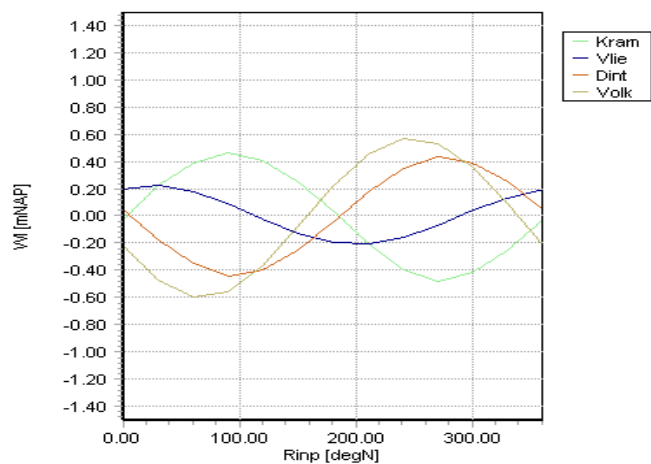
Afhankelijk van de windrichting treedt op- of afwaaiing op. Bij de monding van de Vliet treedt bij een wind uit het noordnoordoosten de hoogste windopzet op. Bij de monding van de Dintel is een wind uit het westen maatgevend. Bij de monding van de Vliet treden minder hoge waterstanden op dan bij de Dintelmonding. Reden is dat de Vlietmonding dichterbij de buurt van het zwaartepunt van de watermassa in het Volkerak-Zoommeer ligt. Het is duidelijk te zien dat de wind meer invloed heeft bij lage waterdieptes.



a.



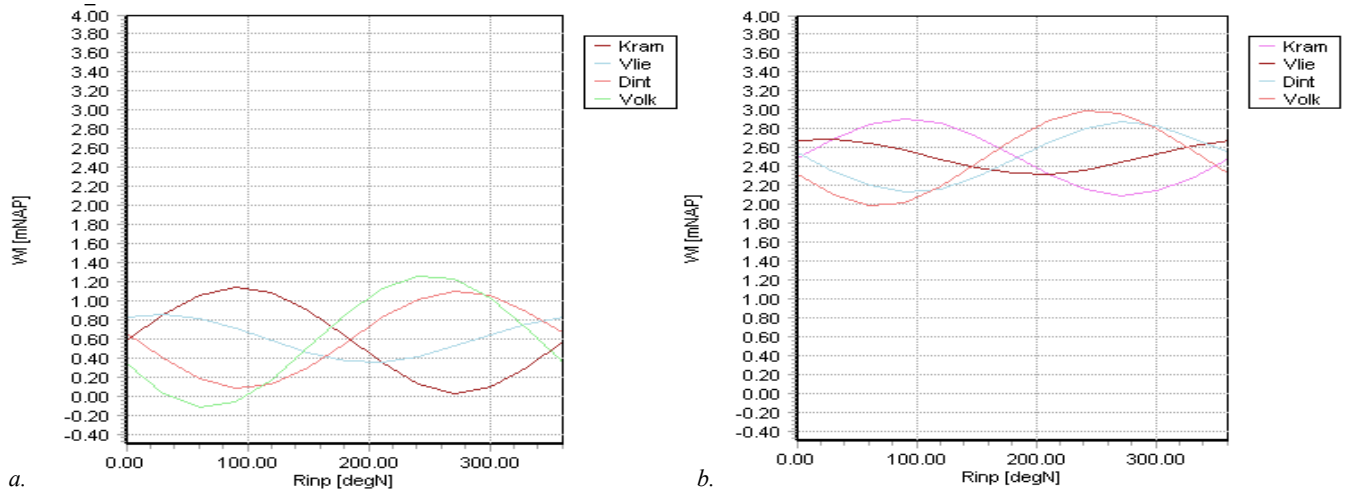
b.



c.

*Figuur 4.2: De met BretView berekende waterstanden, afhankelijk van de windrichting, bij de Krammersluizen (Kram), de monding van de Vliet (Vlie) en de Dintel (Dint) en de Volkeraksluizen (Volk) voor verschillende bodemhoogtes:
a: de bodemhoogte is 3 m – NAP;
b: de bodemhoogte is 4.5 m – NAP;
c: de bodemhoogte is 6 m – NAP.
Het meerpeil is gesteld op 0 m NAP en de windsnelheid is 28 m/s in alle varianten.
Rinp is de windrichting in graden, beginnend bij een noordenwind.*

Het enige verschil tussen de huidige en nieuwe situatie, wanneer het Volkerak-Zoommeer voor hoogwaterberging wordt ingezet, is de maximale waterstand die optreedt. Ter illustratie is in figuur 4.3 de waterstand bij een windsnelheid van 28 m/s en een bodemhoogte van 4.5 m – NAP weergegeven voor de verschillende situaties.



Figuur 4.3: Een voorbeeld van waterstanden die op kunnen treden bij de Krammersluizen (Kram), de monding van de Vliet (Vlie) en de Dintel (Dint) en bij de Volkeraksluizen (Volk). a: waterstanden gebaseerd op de huidige situatie, uitgaande van een meerpeil van 0.6 m + NAP; b. Waterstanden gebaseerd op de nieuwe situatie, uitgaande van een meerpeil van 2.5 m + NAP. De waterstand is in beide grafieken afhankelijk van de windrichting (Rinp).

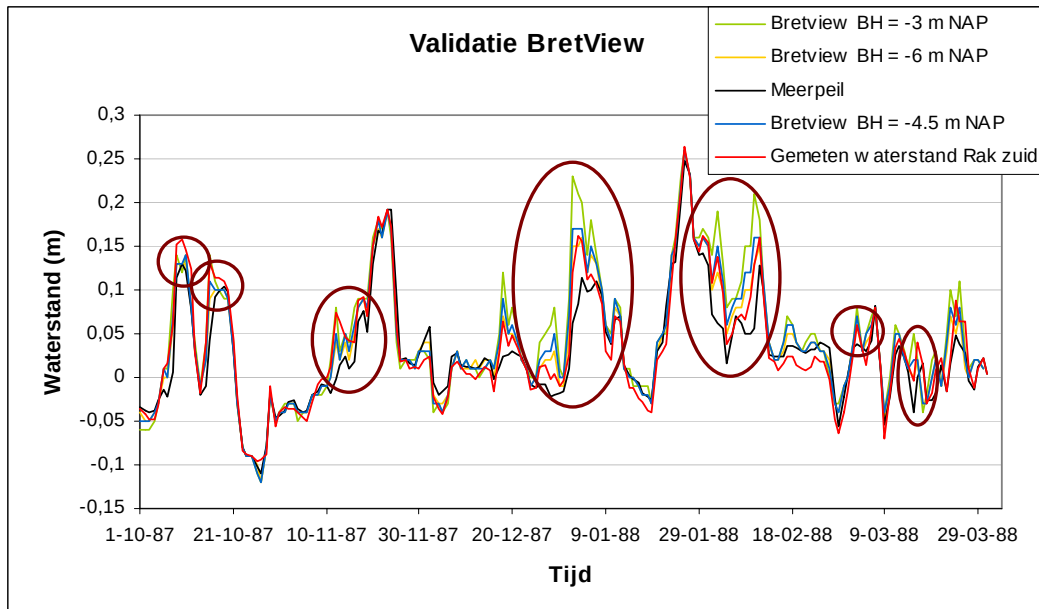
In de huidige situatie (figuur 4.3a) is het meerpeil maximaal 0.6 m + NAP, in de nieuwe situatie (figuur 4.3b) kan een meerpeil van 2.5 m + NAP optreden. Voor de Dintel verandert de maximale waterstand bij een windsnelheid van 28 m/s van 1.10 m + NAP naar 2.85 m + NAP. In de Vlietmonding kan de waterstand bij deze windsnelheid nu 0.85 m + NAP worden. Tijdens inzet van het Volkerak-Zoommeer voor waterberging kan dit toenemen tot 2.70 m + NAP wanneer de windsnelheid 28 m/s bedraagt. Omdat de opwaaiing bij een kleinere waterdiepte groter is, is het verschil in de maximale waterstand in de nieuwe situatie iets minder dan het verschil tussen de twee meerpeilen. Dit beïnvloedt de verandering van de kans op wateroverlast; wanneer de windinvloed meegenomen wordt, is het absolute verschil tussen de waterstanden bij inzet en zonder inzet kleiner dan wanneer de windinvloed niet wordt meegenomen.

Op basis van de resultaten van BretView en van de literatuur kan geconcludeerd worden dat de windinvloed niet verwaarloosd kan worden. Met BretView is voor iedere bodemhoogte-variant een database aangemaakt waarin waterstanden voor alle combinaties van meerpeilen, windrichtingen en windsnelheden zijn opgenomen. Deze database vormt een deel van de invoer van Hydra-M, waarmee de overschrijdingsfrequenties van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer worden berekend.

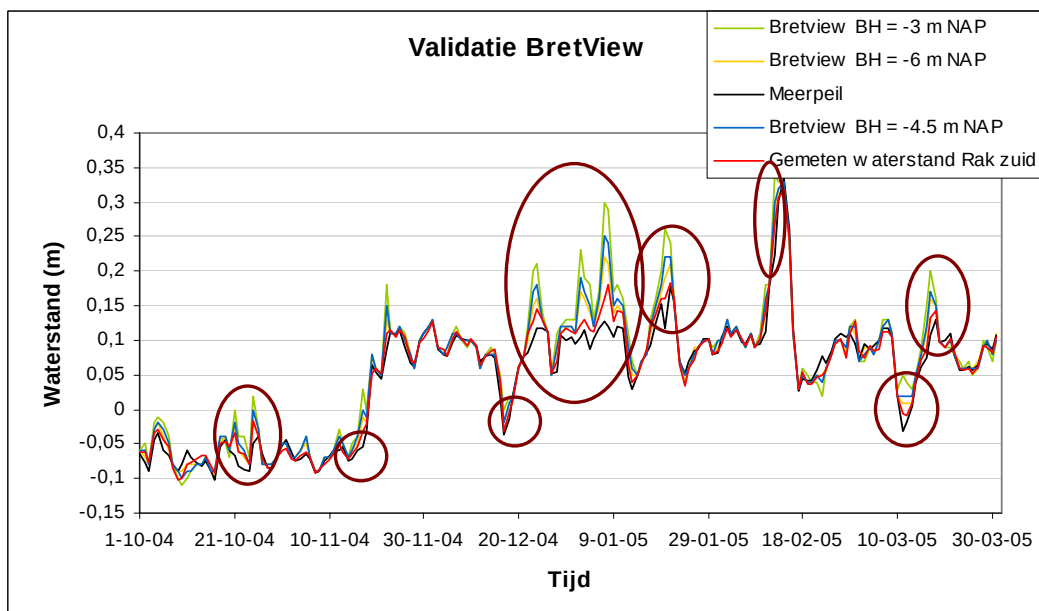
4.1.5. Validatie BretView

Er worden bij het gebruik van BretView een aantal belangrijke aannames gedaan. De twee belangrijkste aannames waarvan de gevolgen onbekend zijn, zijn het buiten beschouwing laten van bodemhoogtevariëaties en het negeren van de Eendracht, het Zoommeer en het Bathse Spuikanaal bij de modellering. Door middel van het valideren van BretView door de resultaten te vergelijken met geobserveerde waterstanddata wordt bekeken of de resultaten van BretView acceptabel zijn.

In BretView zijn twee tijdreeks-berekeningen uitgevoerd aan de hand van een uit metingen bepaalde reeks meerpeilen [43] en een reeks windcondities van het KNMI [44]. Met deze randvoorwaarden is voor twee winterhalfjaren de waterstand bij de Volkeraksluizen berekend. Deze berekeningen zijn vergeleken met waterstandmetingen genomen bij de Volkerak-sluizen (Rak-Zuid). In bijlage E is de validatie uitgebreid beschreven. De resultaten zijn in onderstaande figuren 4.4 en 4.5 gepresenteerd.



Figuur 4.4: De gemeten waterstanden versus de berekende waterstanden bij de Volkeraksluizen in het winterhalfjaar van 1987/1988. De berekeningen van BretView volgen de trend van de gemeten waterstand goed. De waterstanden onder extreme windcondities (windkracht 5 of hoger) zijn omcirkeld en laten een overschatting van de waterstand zien.



Figuur 4.5: De gemeten waterstanden versus de berekende waterstanden bij de Volkeraksluizen in het winterhalfjaar van 2004/2005. De berekeningen van BretView volgen de trend van de gemeten waterstand goed. De waterstanden onder extreme windcondities (windkracht 5 of hoger) zijn omcirkeld en laten een overschatting van de waterstand zien.

Op basis van de vergelijking van berekende en gemeten waterstanden bij de Volkerak-sluizen kan geconcludeerd worden dat BretView de trend van de gemeten waterstand goed modelleert. Het buiten beschouwing laten van bodemhoogtevariëaties en het negeren van de Eendracht, het Zoommeer en het Bathse Spuikanaal in de modellering lijken niet te leiden tot significante onnauwkeurigheden in de waterstand. De werkelijke windopzet wordt bij hoge windsnelheden echter wel behoorlijk overschat, van enkele centimeters oplopend tot meer dan tien centimeter. De reden hiervoor ligt vooral in de aanname van stationariteit in BretView. Ook de keuze voor de bodemhoogte speelt een rol in de overschatting van de waterstand. In tabel 4.1 zijn de kwadratsommen van de verschillen tussen de gemeten en de berekende waterstanden gepresenteerd. Op basis van de tijdreeksen in figuur 4.4 en 4.5 en de kwadratsommen kan geconcludeerd worden dat de modellering met een bodemhoogte van 6 m – NAP de waterstand onder de huidige aannames het best benadert.

Periode 1987/1988	Kwadratensom van het verschil t.o.v. de gemeten waterstanden
Bodemhoogte = 3 m - NAP	0,12
Bodemhoogte = 4,5 m - NAP	0,05
Bodemhoogte = 6 m - NAP	0,04

Periode 2004/2005	Kwadratensom van het verschil t.o.v. de gemeten waterstanden
Bodemhoogte = 3 m - NAP	0,13
Bodemhoogte = 4,5 m - NAP	0,05
Bodemhoogte = 6 m - NAP	0,02

Tabel 4.1: De kwadratensommen van de verschillen tussen de gemeten en de berekende waterstanden. Hoe kleiner de kwadratensom van de verschillen, hoe beter de berekende waterstand overeenkomt met de gemeten waterstand.

Voor de variant met een bodemniveau van 6 m – NAP zijn in tabel 4.2 de opwaaiing en afwaaiing weergegeven voor verschillende windsnelheden, welke overeenkomen met de windsnelheden waarvoor berekeningen zijn gemaakt bij de studie van Rijkswaterstaat naar windopzet op het Volkerak-Zoommeer uit 1987 [20].

Locatie	Windkracht	Verhoging 1987	Verhoging BretView	Vershil
Volkeraksluizen	19 m/s (8 Bft)	12 cm	20 cm	8 cm
	22 m/s (9 Bft)	17 cm	29 cm	12 cm
	25 m/s (10 Bft)	21 cm	40 cm	19 cm
Krammersluizen	19 m/s (8 Bft)	7 cm	18 cm	11 cm
	22 m/s (9 Bft)	10 cm	25 cm	15 cm
	25 m/s (10 Bft)	13 cm	35 cm	22 cm

Tabel 4.2: Vergelijking van de windopzet uit een onderzoek daterend uit 1987 en de resultaten van BretView bij windsnelheden van 8, 9 en 10 Bft. In BretView is een meerpeil van NAP en een bodemhoogte van 6 m –NAP aangehouden. De windrichtingen zijn overeenkomstig gekozen met de studie uit 1987, dit zijn de windrichtingen waarbij voor deze locaties de hoogste windopzet ontstaat [aangepast van 20].

Voor de in tabel 4.2 opgenomen locaties blijft het verschil tussen de nauwkeurige berekeningen uit 1987 en de minder nauwkeurige berekeningen van BretView ongeveer binnen de nauwkeurigheidseis van 20 cm. Op basis van deze vergelijking valt echter te verwachten dat de berekeningen voor hogere windsnelheden verder uit elkaar zouden lopen. Voor zeer hoge windsnelheden voldoet BretView daardoor waarschijnlijk niet aan de eis die binnen dit onderzoek aan de nauwkeurigheid is gesteld. Dit heeft geen grote gevolgen voor de kans op wateroverlast, aangezien de kans op snelheden hoger dan 10 Bft zeer klein zijn. In paragraaf 4.2.4 wordt gekeken hoe deze onnauwkeurigheid de overschrijdingsfrequenties van de waterstand beïnvloedt. Voor nu wordt ervan uitgegaan dat de resultaten van BretView acceptabel zijn voor dit onderzoek, ondanks de overschatting van de windopzet.

Het is belangrijk om in gedachten te houden dat BretView voor zowel de huidige als de nieuwe situatie een overschatting van de windopzet berekent. Met de waterstanden die met BretView zijn berekend, kan daarom ook bij extreme windsnelheden een goed beeld verkregen worden van het **verschil** tussen de huidige situatie en de nieuwe situatie.

Voor het bepalen van de gevolgen van wateroverlast uit het Mark-Vliet systeem kan deze overschatting van BretView echter wel consequenties hebben. Dit wordt verder besproken in hoofdstuk 5.

4.2. Probabilistische waterstanden op het Volkerak-Zoommeer

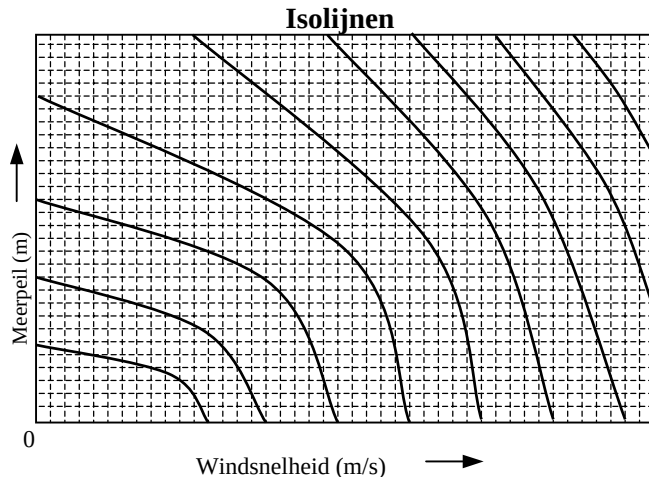
Met BretView is de waterbeweging op het Volkerak-Zoommeer bepaald. Het programma Hydra-M is vervolgens gebruikt om bij de optredende waterstanden overschrijdingsfrequenties te berekenen. In bijlage F worden de kenmerken van dit programma uitgebreid behandeld. In paragraaf 4.2.1 wordt de werkwijze van Hydra-M samengevat weergegeven. In paragraaf 4.2.2 wordt vervolgens de inzet van Hydra-M voor berekeningen aangaande het Volkerak-Zoommeer besproken. Bij de gebruikte ontwerpmethodiek in Hydra-M zijn een aantal kanttekeningen te plaatsen. De belangrijkste worden genoemd in het rapport “Achtergronden Hydraulische Belastingen Dijken IJsselmeergebied” [40]. De belangrijkste aannames en kanttekeningen bij het gebruik van Hydra-M voor het Volkerak-Zoommeer worden ook in paragraaf 4.2.2 besproken. In paragraaf 4.2.3 worden de resultaten van de berekeningen met Hydra-M gepresenteerd. Sectie 4.2 wordt afgesloten met een bespreking van de gevoeligheid van de resultaten.

4.2.1. De werkwijze van Hydra-M

Hydra-M is een programma ontwikkeld door RIZA om de hydraulische belasting op een dijkvak langs het IJsselmeergebied te bepalen [40]. Het programma gebruikt zowel fysische als statistische informatie aangaande het meerpeil en de windcondities als invoer. Hieruit worden belastingcombinaties gevormd, waarmee de kans dat een bepaald belastingniveau wordt overschreden kan worden berekend [40]. Aangezien golfcondities buiten beschouwing worden gelaten in dit onderzoek, wordt er vanaf dit punt over een waterstand in plaats van over een belastingniveau gesproken.

Er is niet één combinatie van belastingen die tot een zekere waterstand leidt; een zelfde waterstand kan onder verschillende omstandigheden bereikt worden, bijvoorbeeld door een hoog meerpeil met

een matige wind of een gemiddeld meerpeil en een storm. In Hydra-M worden alle combinaties van omstandigheden die tot een zelfde waterstand leiden als het ware opgeteld om tot de frequentieverdeling van de waterstand te komen. Dit proces resulteert in een grafiek zoals weergegeven in figuur 4.6, waarin alle omstandigheden die tot een zelfde waterstand leiden zijn verbonden met een zogenaamde isolijn.



Figuur 4.6: Lijnen van gelijke waterstanden op basis van verschillende combinaties van meerpeilen en windsnelheden voor een bepaalde windrichting [aangepast van 40].

De ruimte boven een isolijn bevat alle combinaties die tot een overschrijding leiden van de waterstand die deze isolijn representeert. Door de overschrijdingskansen van alle combinaties in deze ruimte op te tellen, wordt de totale overschrijdingskans van de desbetreffende waterstand bepaald. Zo kan voor iedere mogelijk optredende waterstand de overschrijdingskans berekend worden. Het berekenen van de ruimte boven een isolijn wordt gedaan aan de hand van de Riemann-integratie methode [40]. De methode wordt in bijlage F besproken. Het resultaat van deze probabilistische rekenmethode is een overschrijdingsfrequentielijn van de waterstand op een bepaalde locatie.

Om de overschrijdingskansen te berekenen heeft Hydra-M de volgende informatie nodig [40]:

- ~ Waterstanden uit waterbewegingberekeningen: deze geven informatie over welke belastingcombinaties tot welke waterstanden leiden;
- ~ Voor situaties waarin het meerpeil de grootste bedreiging vormt, is een overschrijdingsfrequentielijn van het meerpeil nodig. Daarnaast is de kans dat de windsnelheid een bepaald niveau overschrijdt binnen de duur van de verhoging van het meerpeil belangrijk om te bepalen hoe groot de kans is dat gedurende een verhoogd meerpeil een maatgevende waterstand wordt bereikt door windopzet. Hydra-M heeft daarom ook een overschrijdingsduurlijn van het meerpeil (de duur in dagen) en de kans dat de windsnelheid binnen een dag een bepaalde drempel overschrijdt nodig [45];
- ~ Voor situaties waarin de windsnelheid de grootste bedreiging vormt, is een tabel met overschrijdingskansen van de windsnelheid over een jaar en een overschrijdingsfrequentielijn van het meerpeil nodig. De duur van de meerpeilverhoging doet er in dit geval niet toe.

Met de bovenstaande invoer berekent Hydra-M de overschrijdingsfrequentie van de waterstand per windrichting. Vervolgens worden deze overschrijdingsfrequenties van de verschillende windsectoren bij elkaar opgeteld om tot de totale overschrijdingsfrequentie te komen.

In de berekening van de overschrijdingskansen mogen geen afhankelijkheden tussen de variabelen bestaan. Om deze reden zijn voor het IJsselmeer de volgende aanpassingen gedaan [40]:

- ~ Er zijn in de berekeningen alleen meerpeilmetingen van het winterhalfjaar gebruikt. Uit analyse van de metingen bleek een correlatie tussen het seizoen en de meerpeilstatistiek. In het winterhalfjaar treden de extreme meerpeilen op, waardoor gekozen is de berekeningen te beperken tot het winterhalfjaar, dat loopt van 1 oktober tot 31 maart
- ~ Er is gerekend met twee aparte windvakken, een oostelijk en westelijk windvlak. Zodoende wordt onafhankelijkheid tussen het meerpeil en de windrichting gegarandeerd in de berekeningen. Er is afhankelijkheid tussen deze variabelen wanneer niet meer gespuid kan worden op de Waddenzee als deze wordt opgestuwd door een wind uit het westelijke vlak.
- ~ Een afhankelijkheid tussen het meerpeil en de windsnelheid was moeilijk vast te stellen. Er is daarom aangenomen dat de variabelen onafhankelijk zijn.

4.2.2. Hydra-M voor het Volkerak-Zoommeer

Hydra-M wordt in het kader van dit onderzoek gebruikt om de overschrijdingskansen van waterstanden op het Volkerak-Zoommeer te bepalen. Er worden twee situaties doorerekend, de huidige situatie en de situatie waarin het Volkerak-Zoommeer wordt ingezet voor waterberging, waaraan gerefereerd wordt met de nieuwe situatie. Doel is te bepalen hoeveel groter de kans wordt dat op het Volkerak-Zoommeer een waterstand optreedt die in het Mark-Vliet systeem tot wateroverlast leidt. Hydra-M is specifiek ontwikkeld voor het IJsselmeergebied en het programma kan niet rechtstreeks overgenomen worden voor een ander gebied. De fysieke en statistische gegevens die voor het IJsselmeergebied zijn gebruikt zijn niet gelijk aan de fysieke en statistische kenmerken van het meerpeil, de windsnelheid en windrichting van het Volkerak-Zoommeergebied. In deze paragraaf wordt daarom besproken welke aspecten aangepast zijn. Ook wordt aangegeven welke aannames gemaakt zijn.

Fysieke gegevens

De fysieke gegevens voor het Volkerak-Zoommeer zijn gegenereerd met BretView, zoals in sectie 3.2 is besproken. Voor zowel de huidige als de nieuwe situatie zijn drie varianten berekend, met bodemhoogtes van respectievelijk 3 m – NAP, 4,5 m – NAP en 6 m – NAP. Er wordt met de verschillende bodemhoogtes gerekend om de gevoeligheid van de overschrijdingsfrequenties voor de bodemhoogte te onderzoeken. De overschrijdingsfrequentielijnen die worden berekend met een bodemhoogte van 6 m – NAP worden op basis van de analyse in paragraaf 4.1.5 gebruikt om de waterstanden in het Mark-Vliet systeem te berekenen. De invoer van fysieke gegevens in Hydra-M bestaat uit zes databases. Bijlage F bevat meer informatie aangaande de fysieke gegevens.

Statistische windgegevens

Voor de windstatistiek is uitgegaan van de statistische windgegevens zoals deze voor het IJsselmeergebied zijn bepaald aan de hand van het windklimaat boven Schiphol. Reden hiervoor is een beperking van de benodigde aanpassingstijd van Hydra-M. Uit een vergelijking van de windcondities boven Schiphol, het IJsselmeergebied en het Volkerak-Zoommeer is gebleken dat de gegevens qua orde grootte en qua verdeling voldoende op elkaar lijken om met de gegevens van het IJsselmeergebied een realistisch beeld te schetsen van de overschrijdingskansen van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer (zie bijlage F).

Statistische meerpeilgegevens

De overschrijdingsfrequentielijn van meerpeilen op het Volkerak-Zoommeer in de huidige situatie en in de situatie met inzet van het Volkerak-Zoommeer voor berging zijn bekend bij RIZA [2]. Ze zijn gepresenteerd in figuur 1.6 in paragraaf 1.2.3.

Naast de overschrijdingsfrequentielijnen voor de huidige en nieuwe situatie heeft Hydra-M ook overschrijdingsduurlijnen van beide situaties nodig. Deze waren niet voorhanden en zijn daarom op basis van meetgegevens en waterstandsimulaties geconstrueerd. De meetgegevens zijn afkomstig uit Waterbase [46], waarbij de metingen bij Kreekrak noord en Rak zuid gemiddeld zijn om tot het meerpeil te komen. Er zijn metingen uit 1987 tot en met 2005 gebruikt. De waterstandsimulaties zijn uitgevoerd in het kader van de verdiepingsslag ‘Hoogwaterberging Volkerak-Zoommeer’ [2]. Uit waterstandberekeningen voor vier locaties is het meerpeil bepaald. De gegevens van deze simulaties zijn voor het bepalen van de duurlijn in de nieuwe situatie toegevoegd aan de meetgegevens. In bijlage F is beschreven welke methode gevolgd is bij het bepalen van de overschrijdingsduurlijnen.

Er is op basis van een analyse van het systeem en van de meerpeilmetingen aangenomen dat windrichting en meerpeil onafhankelijk zijn, in tegenstelling tot op het IJsselmeer. Verder is aangenomen dat de windsnelheid en het meerpeil onafhankelijk zijn, aangezien het vaststellen van correlatie tussen de twee variabelen lastig is [47]. Er is net als bij het IJsselmeer alleen gebruikgemaakt van de metingen in de winterhalfjaren. Reden is de aanname dat het meerpeil seizoensafhankelijk is en dat de extremen voornamelijk in het winterseizoen optreden.

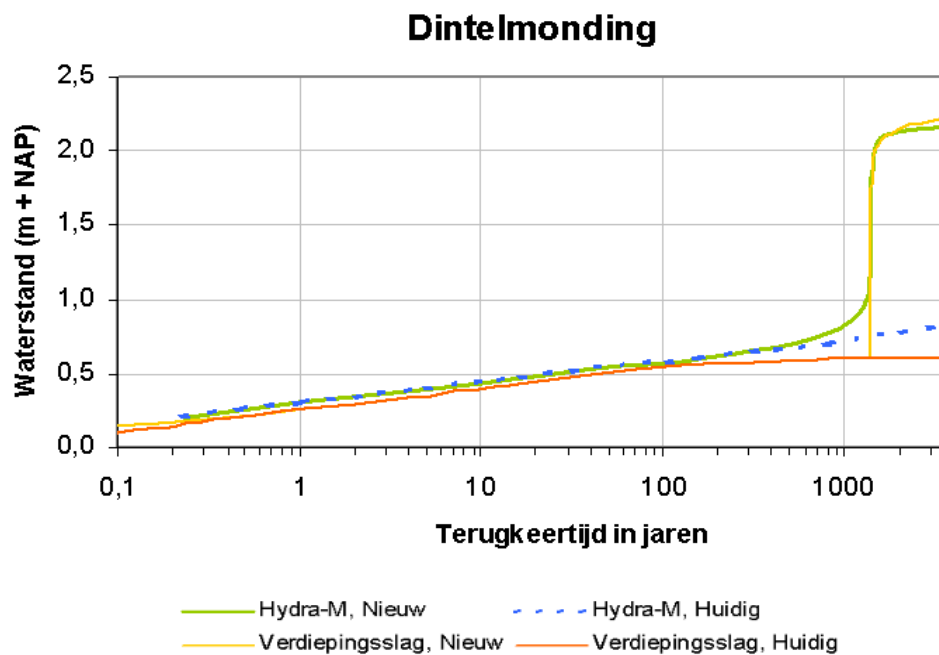
Andere aannames en kanttekeningen aangaande het aanpassen van Hydra-M voor het Volkerak-Zoommeer zijn:

- ~ De fysieke gegevens die als invoer voor Hydra-M zijn gebruikt zijn gebaseerd op een zeer versimpeld model. In sectie 4.1 zijn de aannames en onzekerheden die bij deze aanpak zijn gehanteerd besproken.
- ~ De windstatistiek die gebruikt is voor het Volkerak-Zoommeer is gebaseerd op de windstatistiek van het IJsselmeer. Deze keuze is gebaseerd op de gelijkenis tussen extreme windcondities boven de twee locaties. In bijlage F wordt deze keuze onderbouwd.
- ~ Doordat het Volkerak-Zoommeer pas 19 jaar bestaat en er in deze periode maar op twee locaties continu metingen zijn verricht, is het aantal metingen beperkt, wat tot onzekerheid in de meerpeilstatistiek leidt.
- ~ De overschrijdingsfrequentielijn van de huidige situatie is op een gelimiteerd aantal punten gebaseerd [2], er wordt aangenomen dat de lijn de overschrijdingsfrequenties van het meerpeil redelijk goed benadert.
- ~ Doordat de fysieke randvoorwaarden de nodige onzekerheden bevatten, is het onnodig om de statistische gegevens zeer nauwkeurig te bepalen. Het is hierdoor wel zaak om in het oog te houden dat de resultaten van de berekeningen met Hydra-M geen andere betekenis hebben dan een indicatie van de gevolgen van inzet voor waterberging voor de overschrijdingskansen van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer.

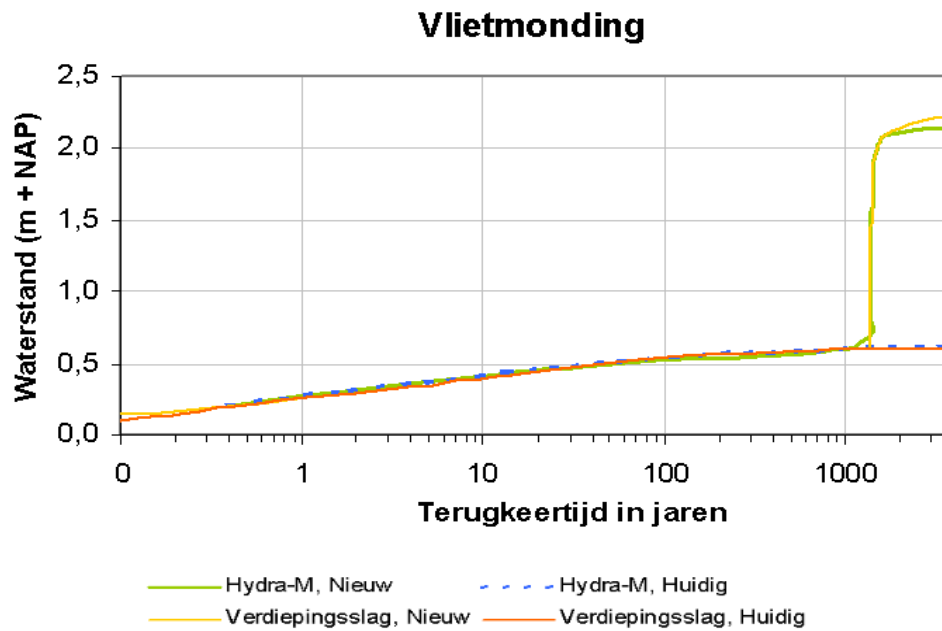
Doordat dezelfde onzekerheden zowel de huidige als de nieuwe overschrijdingsfrequentielijn beïnvloeden, zijn de resultaten van Hydra-M wel geschikt om een vergelijking te maken tussen de twee situaties om zodoende de kansverandering van wateroverlast in het Mark-Vliet systeem door hoogwaterberging op het Volkerak-Zoommeer te bepalen.

4.2.3. Resultaten van Hydra-M berekeningen

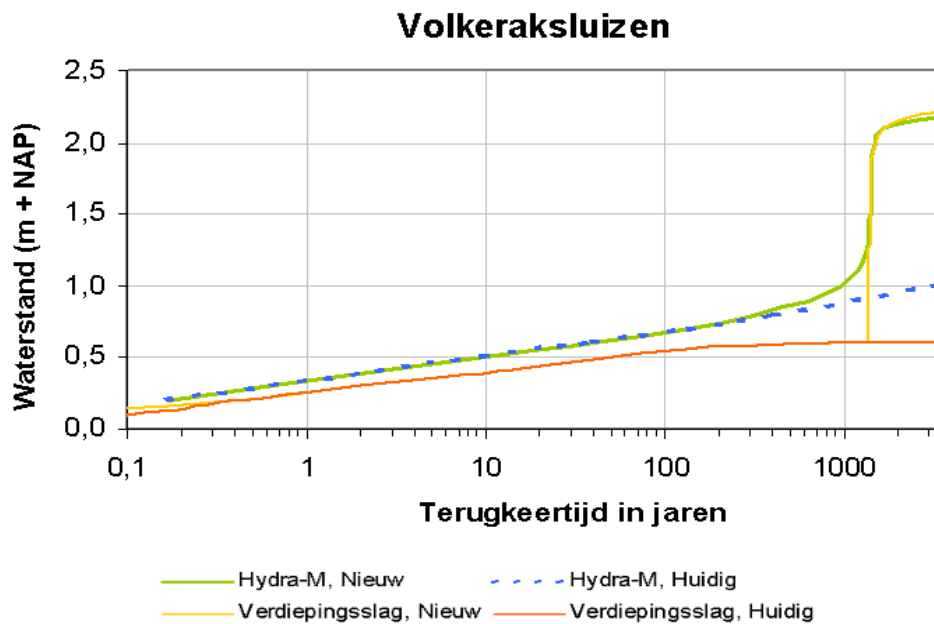
In deze paragraaf zijn voor het Volkerak-Zoommeer met een gemiddelde bodemhoogte van 6 m – NAP de met Hydra-M berekende overschrijdingslijnen voor de waterstanden in de Dintel- en Vlietmonding gepresenteerd. Daarnaast zijn ook de overschrijdingsfrequentielijnen voor de waterstanden bij de Volkeraksluizen en de Krammersluizen gepresenteerd om een goed beeld te krijgen van de windinvloed op de overschrijdingsfrequenties van de waterstand. Voor alle vier de locaties zijn vier grafieken naast elkaar weergegeven; de huidige overschrijdingsfrequentielijn zonder windinvloed en de nieuwe overschrijdingsfrequentielijn zonder windinvloed, beiden uit de Verdiepingsslag [2], en daarnaast de huidige overschrijdingsfrequentielijn met windinvloed en de nieuwe overschrijdingsfrequentielijn met windinvloed zoals berekend met Hydra-M. De grafieken zijn per locatie weergegeven in figuren 4.7, 4.8, 4.9 en 4.10.



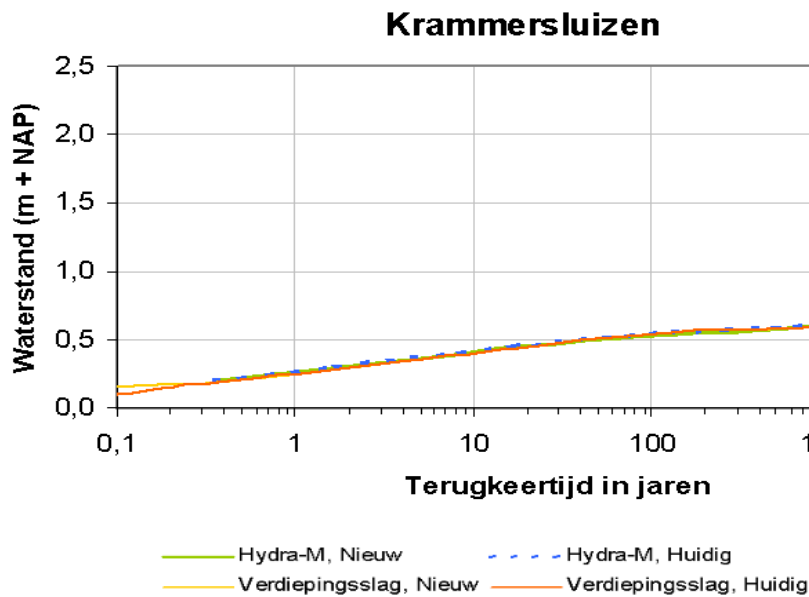
Figuur 4.7: Overschrijdingsfrequentielijnen voor de Dintelmonding in de huidige en de nieuwe situatie. De figuur laat zowel de overschrijdingsfrequentielijnen van het meerpeil (verdiepingsslag) als de overschrijdingsfrequentielijnen van de waterstand (Hydra-M) zien.



Figuur 4.8: Overschrijdingsfrequentielijnen voor de Vlietmonding in de huidige en de nieuwe situatie. De figuur laat zowel de overschrijdingsfrequentielijnen van het meerpeil (verdiepingsslag) als de overschrijdingsfrequentielijnen van de waterstand (Hydra-M) zien.



Figuur 4.9: Overschrijdingsfrequentielijnen voor de Volkeraksluizen in de huidige en de nieuwe situatie. De figuur laat zowel de overschrijdingsfrequentielijnen van het meerpeil (verdiepingsslag) als de overschrijdingsfrequentielijnen van de waterstand (Hydra-M) zien.



Figuur 4.10: Overschrijdingsfrequentielijnen voor de Krammersluizen in de huidige en de nieuwe situatie. De figuur laat zowel de overschrijdingsfrequentielijnen van het meerpeil (verdiepingsslag) als de overschrijdingsfrequentielijnen van de waterstand (Hydra-M) zien.

Uit bovenstaande figuren blijkt duidelijk dat sommige delen van het Volkerak-Zoommeer windgedomineerd zijn, terwijl andere delen meerpeilgedomineerd zijn. Op de windgedomineerde locaties is te zien dat de overschrijdingsfrequentielijn inclusief de windinvloed duidelijk verschilt van de overschrijdingsfrequentielijn zonder windinvloed (grafiek verdiepingsslag). Bij de Volkeraksluizen ondervindt de waterstand de meeste invloed van de wind, zoals ook uit de berekeningen met BretView bleek. De overschrijdingsfrequentielijnen zonder en met windinvloed liggen hier in zowel de situatie met als zonder hoogwaterberging een aantal decimeters uit elkaar. Bij de Dintelmonding is de waterstand ook windgedomineerd, maar de windinvloed is kleiner dan bij de Volkeraksluizen (zie figuur 4.7) aangezien de Dintelmonding dichterbij het kantelpunt ligt.

Bij de Krammersluizen en bij de monding van de Vliet is de windinvloed nagenoeg niet terug te zien in de overschrijdingsfrequentielijnen. Deze locaties zijn meerpeilgedomineerd, of te wel de waterstand wordt in de maatgevende omstandigheden voornamelijk bepaald door het meerpeil. Deze resultaten zijn logisch aangezien deze locaties veel dichterbij het kantelpunt van de windverhanglijn liggen dan de locaties Volkeraksluizen en Dintelmonding.

De verschillen tussen de overschrijdingsfrequentielijnen zonder en met windinvloed bij de Dintelmonding en de Volkeraksluizen zijn naar alle waarschijnlijkheid overschat, doordat BretView de waterstand overschat. Hoe groot deze overschatting is, is moeilijk te zeggen aangezien een overschrijding van een bepaalde waterstand is opgebouwd uit verschillende combinaties van omstandigheden waarbij de overschatting van de waterstand door BretView varieert. Een combinatie van sterke wind met gemiddelde meerpeilen zal een grotere overschatting veroorzaken dan een combinatie van gemiddelde wind met zeer hoge meerpeilen. De verwachting is wel dat het verschil tussen de overschrijdingsfrequentielijnen zonder en met windinvloed niet volledig wordt veroorzaakt door de overschatting van de waterstand bij hoge windsnelheden. De waterstand zal door de sterke windinvloed op de punten verder van het kantelpunt wel degelijk hoger zijn. Dit wordt onderschreven door meetgegevens [43], die in de waterstand een duidelijke

kanteling van de waterstand rond een zwaartepunt midden in het systeem laten zien, waarbij de waterstanden ver van het zwaartepunt een grotere afwijking van het meerpeil vertonen dan waterstanden die dichterbij het zwaartepunt zijn gemeten.

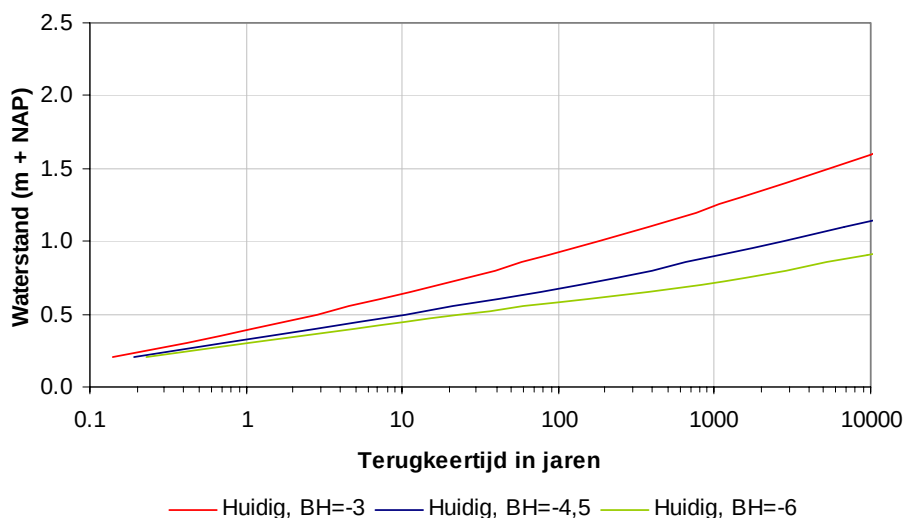
Dat de waterstand bij de Dintelmonding windgedomineerd is, betekent dat de kans groot is dat in een gegeven situatie de waterstand daar hoger zal zijn dan bij de Vlietmonding. De vraag is wat dit betekent voor de afvoerverdeling door het systeem. De ratio afvoer Dintelmonding/afvoer Vlietmonding zal verschuiven; als de waterstand in de Vlietmonding lager is, zal een groter percentage van de afvoer door de Vliet gaan. Het is interessant om te kijken hoe groot de verandering in de verdeling is en wat de gevolgen hiervan zijn voor de waterstanden in het Mark-Vliet systeem en daaruit volgend de wateroverlast. In paragraaf 5.6.1 wordt hierop ingegaan aan de hand van de resultaten van DufLOW.

De grafieken in figuren 4.7 tot en met 4.10 gaan niet verder dan terugkeertijden van 1/3000 jaar. Voorbij deze terugkeertijden was de output van Hydra-M niet meer betrouwbaar. De oorzaak van dit probleem zat in de programmeercode van Hydra-M en kon niet aangepast worden op korte termijn. Voor de berekening van de verhanglijnen in het Mark-Vliet systeem zijn geen hogere herhalingstijden nodig, deze beperking vormt daarom geen probleem.

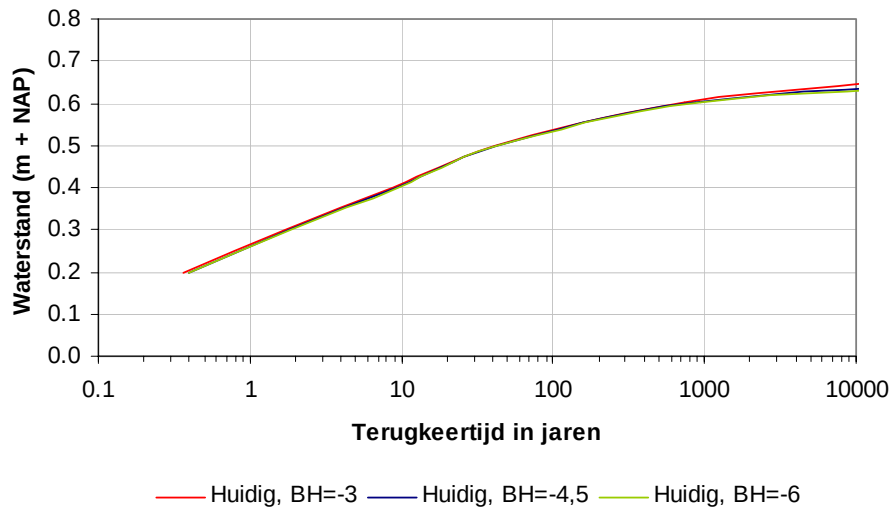
De overschrijdingsfrequenties die in de bovenstaande grafieken zijn gepresenteerd worden gebruikt als randvoorwaarden bij het berekenen van de verhanglijnen. Hierop wordt verder ingegaan in hoofdstuk 5. In paragraaf 4.2.4 wordt eerst nog ingegaan op de gevoeligheid van de overschrijdingsfrequenties voor bodemhoogte veranderingen.

4.2.4. Gevoeligheid van de resultaten voor de bodemhoogte

Om de gevoeligheid van de overschrijdingsfrequenties voor de bodemhoogte te bepalen, zijn voor bodemhoogtes van 3 m, 4,5 m en 6 m – NAP overschrijdingsfrequentielijnen berekend met Hydra-M. De resultaten zijn gepresenteerd in figuur 4.11 voor de Dintelmonding en in figuur 4.12 voor de Vlietmonding.



Figuur 4.11: Gevoeligheid van de overschrijdingsfrequentielijn bij de Dintelmonding voor de bodemhoogte. Bij de berekening is uitgegaan van de huidige situatie, zonder inzet van het Volkerak-Zoommeer voor hoogwaterberging.



Figuur 4.12: Gevoeligheid van de overschrijdingsfrequentielijn bij de Vlietmonding voor de bodemhoogte. Bij de berekening is uitgegaan van de huidige situatie, zonder inzet van het Volkerak-Zoommeer voor hoogwaterberging.

Uit bovenstaande figuren blijkt dat de gevoeligheid van de overschrijdingsfrequenties voor de bodemhoogte groot is op windgedomineerde locaties en klein voor meerpeilgedomineerde locaties. Het gevolg is dat er een significante onzekerheid in de overschrijdingsfrequentielijn van de Dintelmonding zit, terwijl deze lijn als randvoorwaarde voor verdere berekeningen wordt gebruikt. Bij een terugkeertijd van 100 jaar wordt door een bodemhoogteverandering van 6 m naar 4.5 m een 0.1 m hogere waterstand verwacht. Bij een terugkeertijd van 10000 jaar wordt een bijna 0.3 m hogere waterstand verwacht bij een zelfde bodemhoogteverandering.

Zoals besproken in de voorgaande paragrafen, wordt de onzekerheid geïntroduceerd door onzekerheid over de juiste keuze voor de gemiddelde bodemhoogte en het overschatten van BretView van de waterstand. Uit figuur 4.11 blijkt dat de gevoeligheid van de overschrijdingsfrequenties voor de bodemhoogte wel afneemt voor diepere wateren. Aangezien met een relatief diepe gemiddelde waterdiepte wordt gerekend, heeft dit een gunstig effect op de resultaten. Het feit blijft echter dat de keuze van de bodemhoogte tot een onzekerheid leidt die door zal werken in de berekening van de kans op wateroverlast. Dit wordt verder besproken in hoofdstuk 5 en 6.

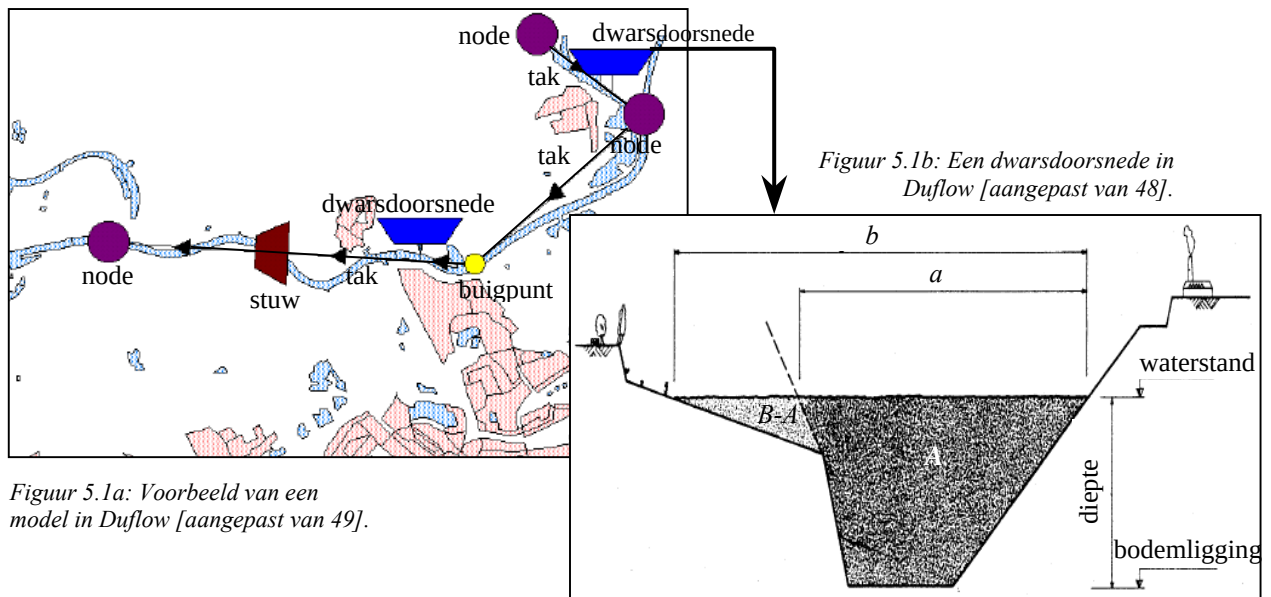


Hoofdstuk 5. Waterstandberekeningen Mark-Vliet systeem

Met het programma Duflow is berekend hoe de waterstanden in het Mark-Vliet systeem veranderen door de verhoogde waterstanden op het Volkerak-Zoommeer. Hierbij is uitgegaan van de overschrijdingsfrequentielijnen van de waterstanden op het Volkerak-Zoommeer bij de mondingen van het Mark-Vliet systeem, zoals deze met behulp van Hydra-M zijn berekend. De Duflow-berekeningen geven inzicht in de relatie tussen het Volkerak-Zoommeer en het Mark-Vliet systeem. Hoe reageren de waterstanden in het Mark-Vliet systeem op het inzetten van het Volkerak-Zoommeer voor hoogwaterberging? Hoe ver stroomopwaarts reikt de invloed van het Volkerak-Zoommeer en hoe verandert dit wanneer water geborgen wordt? Dit soort vragen worden besproken in dit hoofdstuk. Eerst wordt ingegaan op de werking en de kenmerken van het programma Duflow. Vervolgens worden in paragraaf 5.2 de modellen van het Mark-Vliet systeem behandeld en wordt in paragraaf 5.3 ingegaan op de benedenstroomse randvoorwaarden (Volkerak-Zoommeer). De resultaten worden gepresenteerd en bediscussieerd in paragraaf 5.4. Paragraaf 5.5 gaat in op een vergelijking van de resultaten met eerder onderzoek en in paragraaf 5.6 wordt de gevoeligheid van de waterstanden in het Mark-Vliet systeem voor de randvoorwaarde Volkerak-Zoommeer besproken. In paragraaf 5.7 worden de resultaten van de Duflow-berekeningen doorvertaald naar verhanglijnen in het Mark-Vliet systeem. Aan de hand van deze verhanglijnen en de dijkhoogtes in het systeem wordt bepaald waar wateroverlast op zal treden, de zogenaamde knelpunten. Ook wordt in deze paragraaf besproken of hoogwaterberging op het Volkerak-Zoommeer voor een toename van de indirecte wateroverlast door stremming van de vijnzelgemalen leidt. Paragraaf 5.8 sluit het hoofdstuk af met de belangrijkste conclusies die uit het hoofdstuk naar voren komen.

5.1. Theorie Duflow

Duflow is een computerprogramma waarmee 1D niet-stationaire stromingen door open kanalen berekend kunnen worden. Duflow is gebaseerd op een numerieke methode waarbij de wet van behoud van massa en de impuls wet als uitgangspunten gelden. Er wordt uitgegaan van een dieptegemiddelde stromingssnelheid, een constante dichtheid en van subkritische stroming [48]. Door middel van discretisatie in tijd en ruimte zijn de formules op te lossen gegeven bepaalde randvoorwaarden. De randvoorwaarden kunnen drie vormen hebben; een $Q(t)$ -reeks, een $H(t)$ -reeks of een QH -relatie [48]. Deze randvoorwaarden kunnen opgelegd worden op een node, een punt in de schematisatie van het watersysteem. De nodes zijn met takken aan elkaar verbonden. Een tak krijgt door het aankoppelen van een of meer dwarsdoorsneden een bepaalde inhoud mee. Een dwarsdoorsnede wordt opgebouwd uit een stromende en bergende breedte en een bodemniveau [49]. Figuur 5.1 laat een voorbeeld van een Duflow-model en een dwarsdoorsnede zien. Naast de basiselementen (nodes, takken en dwarsdoorsneden) kunnen verschillende aspecten als stuwen, duikers, pompen en deelstroomgebieden worden toegevoegd aan een model. De dimensies van deze onderdelen worden door de gebruiker bepaald. In een Duflow model moeten bovendien voor alle nodes en takken beginvoorwaarden worden opgegeven. Verder kunnen onder andere de windcondities, ruwheden en een tijdshorizon waarover wordt gerekend aangegeven worden [49].



Figuur 5.1a: Voorbeeld van een model in Duflow [aangepast van 49].

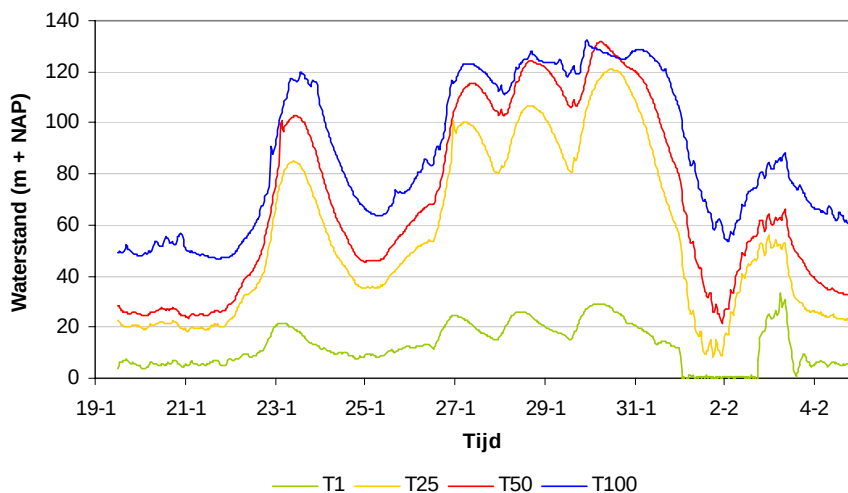
Figuur 5.1b: Een dwarsdoorsnede in Duflow [aangepast van 48].

Als een Duflow netwerk is geschematiseerd aan de hand van de hierboven beschreven mogelijkheden en de begin- en randvoorwaarden zijn vastgelegd, kunnen verschillende berekeningen uitgevoerd worden. De uitvoer bestaat uit de waterstanden en debieten op de gedefinieerde rekenpunten in het model.

5.2. Het Mark-Vliet systeem gemodelleerd in Duflow

Het waterschap Brabantse Delta heeft een Duflow netwerk van het Mark-Vliet systeem. Hierin zijn de Dintel, de Mark, de Steenbergsche en Roosendaalsche Vliet, het Mark-Vliet kanaal en de singel van Breda volledig geschematiseerd. Verder zijn er een aantal zijtakken, zoals de Laaksche Vaart en het Markkanaal, gedeeltelijk gemodelleerd. Ten zuiden van de singel zijn twee toevoerbeken deels geschematiseerd; de Bovenmark tot stuw Blauwe Kamer en de Aa of Weerij tot stuw Oranjeboom. Daarnaast zijn er een groot aantal toevoerpunten in het netwerk aanwezig waar gemalen en beekjes op het systeem lozen.

Van het netwerk van de Mark en Vliet zijn voor drie verschillende afvoergolven kant-en-klare modellen beschikbaar, waarin alleen de randvoorwaarden in de toe- en afvoerpunten anders zijn. De afvoergolven zijn gebaseerd op een afvoer uit januari 1995, de hoogst gemeten afvoer van het Mark-Vliet systeem [21]. Het netwerk is gekalibreerd en gevalideerd voor deze afvoer. De hoogste gemeten afvoer, met een herhalingsstijd van ongeveer 20 jaar, is door waterschap Brabantse Delta geëxtrapoleerd naar afvoergolven met een frequentie van 1/25 jaar, 1/50 jaar en 1/100 jaar [16, 21]. Dit is gedaan op basis van historische afvoerreeksen gemeten in de periode van 1982 tot en met 1995, waarbij de reeksen beperkt zijn tot de winterhalfjaren. De geëxtrapoleerde afvoergolven zijn voor gebruik in Duflow vertaald naar debieten per toevoerpunt [21]. Er zijn 39 toevoerpunten geschematiseerd in het netwerk, met debieten variërend tussen constant en tijdsafhankelijk, structureel of incidenteel, significant en bijna verwaarloosbaar. Het totale debiet dat tijdens de verschillende afvoerscenario's door het systeem gaat bij Stampersgat (de splitsing van de Mark en het Mark-Vliet kanaal) is in figuur 5.2 gepresenteerd.



Figuur 5.2: Debieten bij Stampersgat (splitsing van de Mark en het Mark-Vliet kanaal) voor afvoergolven met herhalings tijden van 1, 25, 50 en 100 jaar. De gegevens zijn afkomstig uit Duflow, bepaald door waterschap Brabantse Delta [21] en Arcadis [16]. De T1-afvoer is hierop een uitzondering, deze is voor voorliggend onderzoek bepaald via een grove schatting.

In figuur 5.2 is te zien hoe de afvoer bij een herhalings tijd van 100 jaar hier en daar is afgevlakt. Dit is in het T100-model opgenomen bij eerder onderzoek [21], omdat vanaf die afvoer sommige toevoerbeken buiten hun oevers beginnen te treden. In figuur 5.2 is naast de drie door het waterschap geleverde waterstanden ook een debiet met een terugkeertijd van 1 jaar te zien. Deze afvoer is een grove schatting op basis van de T25-afvoer en berust niet op berekeningen. De verhoudingen tussen de verschillende aanvoerpunten zijn gelijk gehouden aan de verhoudingen bij grotere afvoergolven en het maximale debiet is geschat op basis van gegevens aangaande de gemiddelde afvoer van het Mark-Vliet systeem. In Duflow is een model gemaakt op basis van deze T1-afvoergolf, welke is gebruikt voor berekeningen volgens de IJsseldelta methode zoals in sectie 5.2 wordt uitgelegd. Hiervoor hoeft de afvoer niet heel accuraat te zijn. De in figuur 5.2 gepresenteerde T1-afvoer is voor andere berekeningen dan de in dit rapport gepresenteerde IJsseldelta methode berekeningen niet bruikbaar.

Arcadis [16] heeft in een voorgaand onderzoek naar de gevolgen van inzet van het Volkerak-Zoommeer voor waterberging voor West-Brabant reeds gebruik gemaakt van de Duflow-modellen van het Mark-Vliet systeem⁶. De modellen zijn toen aangepast en verfijnd [16]. Er is aangenomen dat er sinds 2004 geen grote veranderingen zijn opgetreden in het Mark-Vliet systeem en dat de Duflow modellen daarom zonder aanpassingen gebruikt konden worden in voorliggend onderzoek. De enige veranderingen die gemaakt zijn, betreffen de randvoorwaarden die het Volkerak-Zoommeer oplegt aan het Mark-Vliet systeem. Waarom en hoe deze randvoorwaarden zijn aangepast wordt in paragraaf 5.3 besproken.

Omdat met een andere versie van Duflow wordt gewerkt, waarbij een aantal instellingen net iets anders kunnen zijn, is een vergelijking gemaakt tussen berekeningen gemaakt door Arcadis in 2004 en berekeningen gemaakt met hetzelfde model in versie 3.8 van Duflow. In bijlage H is deze vergelijking bijgevoegd. Hieruit blijkt dat de modellen bijna dezelfde resultaten geven. De maximale waterstanden die door Arcadis waren bepaald (1.96 m +NAP bij Trambrug en 2.39 m

⁶ Met uitzondering van de T1-afvoergolf.

+NAP bij Julianabrug) zijn iets hoger dan de maximale waterstanden die met versie 3.8 zijn berekend (1.95 m +NAP bij Trambrug en 2.38 m +NAP bij Julianabrug), maar gezien de complexiteit van de Mark-Vliet systeem modellen is niet naar de oorzaak van deze afwijking gezocht. De resultaten in de huidige versie lijken voldoende op de eerdere resultaten om met de modellen verder te gaan zoals ze zijn. Er wordt wel aanbevolen om de DufLOW-modellen van het Mark-Vliet systeem door te lichten op inconsistenties en de modellering te versimpelen. De huidige modellering bevat veel details die, gezien de nauwkeurigheid van de berekeningen in DufLOW, onnodig zijn en daardoor ongewenste complexiteit, ondoorzichtigheid en mogelijkheden tot fouten in de modellen introduceert.

5.3. Randvoorwaarden Volkerak-Zoommeer

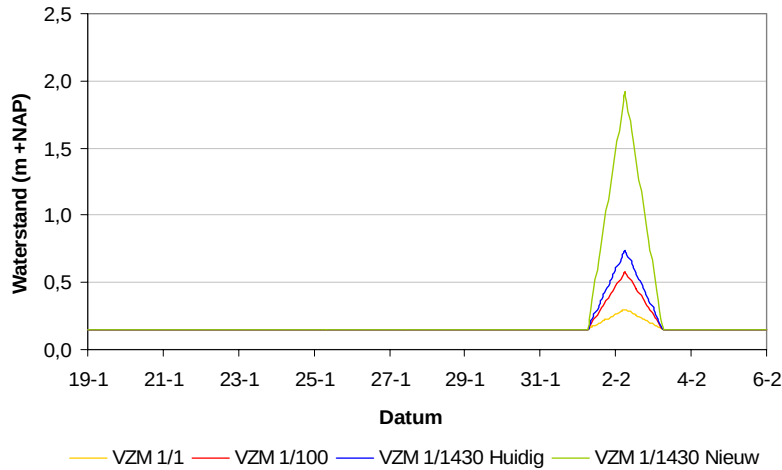
De verhanglijn in het Mark-Vliet systeem is afhankelijk van de vorm van het waterstandverloop op het Volkerak-Zoommeer. De waterstand wordt in DufLOW opgelegd over een periode die gelijk is aan de periode waarover de afvoergolven door het Mark-Vliet systeem lopen; van 19 januari 1995 tot 5 februari 1995. Er is aangenomen dat de waterstand, wanneer niet verhoogd, op het gemiddeld peil van 0.15 m + NAP zal liggen. De top van de waterstandverhoging op het Volkerak-Zoommeer bij een gegeven herhalingsstijd wordt afgelezen uit de overschrijdingsfrequentielijnen in figuur 4.7 voor de Dintelmonding en in figuur 4.8 voor de Vlietmonding in paragraaf 4.2.3.

In de situatie met inzet van het Volkerak-Zoommeer wordt de vorm van de waterstandbeweging op het Volkerak-Zoommeer bepaald door de duur van de hoogwaterberging. Binnen een dag bereikt het Volkerak-Zoommeer het maximale waterpeil. Een dag later is het systeem weer op een gemiddeld peil [2], zoals in paragraaf 1.2.2 is toegelicht. De waterstand is dus twee dagen verhoogd, waarbij de top na 24 uur wordt bereikt.

In de huidige situatie, zonder inzet van het Volkerak-Zoommeer voor hoogwaterberging, is de duur van een waterstandverhoging op het Volkerak-Zoommeer afhankelijk van de neerslagpatronen en het spuibeleid. Uit de beperkte hoeveelheid beschikbare metingen blijkt dat de waterstand op het Volkerak-Zoommeer gemiddeld ongeveer drie dagen aaneengesloten boven het gemiddelde peil blijft in de huidige situatie. Vooruitlopend op de resultaten van de DufLOW berekeningen blijkt echter dat de keuze voor de duur van de waterstandverhoging op het Volkerak-Zoommeer in de huidige situatie maar weinig invloed heeft op de maximale waterstanden in het Mark-Vliet systeem. Bovenstrooms is de afvoer dominerend. Alleen benedenstrooms, in de Dintel en de Vliet, worden de maximale waterstanden in het systeem bepaald door de waterstand op het Volkerak-Zoommeer. De maximale waterstanden worden daar in de huidige situatie voornamelijk bepaald door de hoogte van de waterstandtop op het Volkerak-Zoommeer, opstuwings door de duur van de waterstandverhoging heeft een verwaarloosbare invloed. Benadrukt moet worden dat dit alleen geldt in de huidige situatie. Zoals zal blijken in paragraaf 5.4, speelt de duur van de verhoging in de situatie met aanwijzing van het Volkerak-Zoommeer voor berging wel een rol. Ter versimpeling van de invoer is gekozen om de duur van de waterstandverhoging in de huidige situatie gelijk te houden aan de duur in de situatie met inzet, dus een duur van twee dagen.

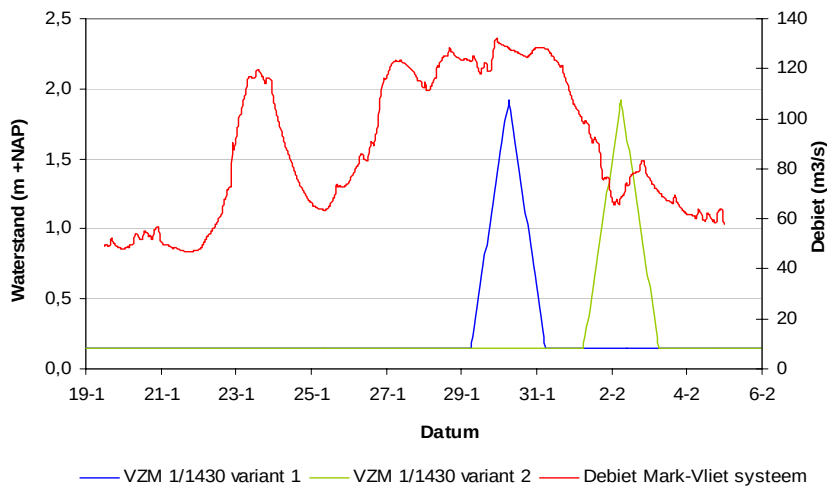
Figuur 5.3 laat voorbeelden zien van het waterstandverloop op het Volkerak-Zoommeer bij de monding van de Dintel voor vier situaties; een situatie waarbij een waterstand met een frequentie

van 1/1 jaar optreedt, een situatie waarbij een waterstand met een frequentie van 1/100 jaar optreedt, een situatie waarbij een waterstand met een frequentie van 1/1430 jaar optreedt in de huidige situatie, dus zonder hoogwaterberging en een situatie waarbij een waterstand met een frequentie van 1/1430 jaar optreedt met hoogwaterberging.



Figuur 5.3: De waterstandbeweging op het Volkerak-Zoommeer, afhankelijk van de herhalingsjijd van de waterstand en de situatie (huidig = situatie zonder aanwijzing hoogwaterberging op het Volkerak-Zoommeer; nieuw = situatie met aanwijzing hoogwaterberging op het Volkerak-Zoommeer).

Naast het bepalen van de top en de vorm van de waterstandbeweging op het Volkerak-Zoommeer is ook de timing van het optreden van de top ten opzichte van de afvoerpiek in het Mark-Vliet systeem van belang. Bij voorgaand onderzoek naar de gevolgen van inzet van het Volkerak-Zoommeer voor waterberging is uitgegaan van een waterstand op het Volkerak-Zoommeer vergelijkbaar met variant 1 in figuur 5.4.



Figuur 5.4: Timing van de waterstandtop op het Volkerak-Zoommeer ten opzichte van de afvoerpiek in het Mark-Vliet systeem met een herhalingsjijd van 100 jaar (oranje lijn). In variant 1 (blauwe lijn) vallen de toppen samen. In variant 2 (groene lijn) komt de waterstandtop 3 dagen na de afvoertop. Het debiet van het Mark-Vliet systeem moet van de rechter y-as afgelezen worden, de waterstand op het Volkerak-Zoommeer van de linker y-as.

De reden was dat het samenvallen van de toppen de meest extreme waterstanden in het Mark-Vliet systeem oplevert [16]. Uit onderzoek van HKV LJIN IN WATER blijkt echter dat het waarschijnlijk is dat de afvoerpieken op de Rijn en Maas en dus de inzet van het Volkerak-Zoommeer een aantal dagen na de afvoerpiek op het Mark-Vliet systeem optreedt [17]. Er wordt, zoals besproken in paragraaf 3.5.2, in dit onderzoek daarom uitgegaan van variant 2 in figuur 5.4. De verschillen

tussen de twee varianten en de gevolgen die de keuze voor variant 2 met zich mee brengt worden bediscussieerd in paragraaf 6.4.3.

De correlatie tussen de waterstand op het Volkerak-Zoommeer en de afvoer door het Mark-Vliet systeem in de huidige situatie is niet gelijk aan de correlatie tussen de waterstand op het Volkerak-Zoommeer en de afvoer door het Mark-Vliet systeem bij inzet van het Volkerak-Zoommeer voor hoogwaterberging. In paragraaf 3.4 is hierop ingegaan. Voor de Dufrow-randvoorwaarden betekent dit dat er vanuit wordt gegaan dat de waterstandverhoging op het Volkerak-Zoommeer in de huidige situatie niet gebonden is aan een tijdstip ten opzichte van de hoogwatergolf in het Mark-Vliet systeem. De timing van de twee pieken ten opzichte van elkaar zou alleen van belang zijn als de maximale waterstanden in het Mark-Vliet systeem worden verhoogd door opstuwing als gevolg van hoge waterstanden in de mondingen van het systeem. De invloed van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer op de maximale waterstanden bovenstrooms is echter gering in de huidige situatie, de waterstanden bovenstrooms zijn bijna volledig afvoergedomineerd. De maximale waterstand in het Mark-Vliet systeem wordt in de huidige situatie dus niet beïnvloed door de timing van de waterstandverhoging op het Volkerak-Zoommeer. Benedenstrooms wordt de maximale waterstand bepaald door de top op het Volkerak-Zoommeer. De timing heeft weinig invloed aangezien de afvoerpieken daar grotendeels uitgedempt zijn, zoals in figuur 5.5 is te zien.

In tabel 5.1 zijn de benedenstroomse randvoorwaarden op het Volkerak-Zoommeer voor de verschillende herhalingsstijden gepresenteerd zoals ze in dit onderzoek zijn gehanteerd.

<i>Overschrijdingsfrequentie (1/jaar)</i>	Dintelmonding		Vlietmonding	
	<i>Waterstand huidig (m + NAP)</i>	<i>Waterstand nieuw (m + NAP)</i>	<i>Waterstand huidig (m + NAP)</i>	<i>Waterstand nieuw (m + NAP)</i>
1	0,3	0,3	0,26	0,26
1/25	0,5	0,5	0,46	0,46
1/50	0,54	0,54	0,51	0,51
1/100	0,58	0,58	0,53	0,53
1/1000	0,72	0,83	0,60	0,61
1/1430	0,74	1,92	0,60	1,91
1/2000	0,77	2,12	0,61	2,11

Tabel 5.1: Overschrijdingsfrequenties van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer bij de Dintelmonding en de Vlietmonding in de situatie met en zonder inzet van het Volkerak-Zoommeer voor hoogwaterberging zoals berekend met Hydra-M, uitgaande van een bodemhoogte van 6 m - NAP.

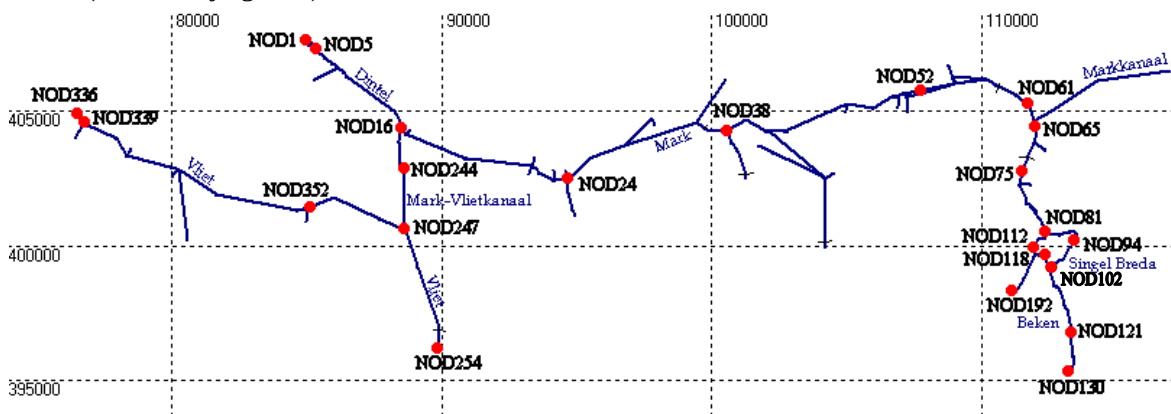
In tegenstelling tot eerder onderzoek is in dit onderzoek de waterstandtop beter onderbouwd op basis van statistiek. Daarnaast wordt uitgegaan van een verlaatte inzet van het Volkerak-Zoommeer ten opzichte van de afvoergolf in het Mark-Vliet systeem. Een derde verandering ten opzichte van eerder onderzoek is het gebruiken van verschillende waterstanden bij de Dintel- en Vlietmonding. Uit berekeningen blijkt dat vooral bij lage herhalingsstijden het verschil in waterstand tussen de Dintelmonding en de Vlietmonding significant kan zijn. Dit verschil wordt veroorzaakt door de gevoeligheid van de waterstand op die locatie voor windinvloed. Zoals in hoofdstuk 4 is besproken is de waterstand bij de Dintelmonding windgedomineerd, terwijl de waterstand bij de Vlietmonding veel meer door het meerpeil wordt bepaald. De waterstand is onder dezelfde omstandigheden daarom vaak hoger bij de monding van de Dintel. Het verschil in waterstand in de twee mondingen kan leiden tot een andere verdeling van water over de Mark en

Vliet, wat weer leidt tot waterstandveranderingen in het systeem. Dit wordt verder besproken in paragraaf 5.6.1.

Tijdens inzet van het Volkerak-Zoommeer is de waterstand in de mondingen meerpeilgedomineerd; het verschil tussen de Vlietmonding en Dintelmonding bedraagt slechts een centimeter en heeft in deze situatie daarom een verwaarloosbare invloed. Desondanks is het wel belangrijk om voor de twee mondingen aparte randvoorwaarden op te leggen in DufLOW, zodat het verschil tussen de huidige situatie en de situatie met inzet van het Volkerak-Zoommeer duidelijk in kaart gebracht kan worden.

5.4. Resultaten van de DufLOW-berekeningen

Met DufLOW worden waterstanden in het Mark-Vliet systeem berekend voor een zo breed mogelijk bereik aan combinaties tussen waterstanden bij de mondingen en afvoergolven. In paragraaf 3.5.2 is besproken welke combinaties berekend worden om een goed beeld te geven van de veranderingen tussen de situatie zonder inzet en met inzet van het Volkerak-Zoommeer voor waterberging en van de gevolgen die de inzet heeft voor West-Brabant. Bij de discussie van de resultaten zullen de waterstanden op verschillende nodes of wel locaties gepresenteerd en besproken worden. De hierbij gebruikte nummers komen overeen met de in figuur 5.5 genoemde nodes (zie ook bijlage H2).

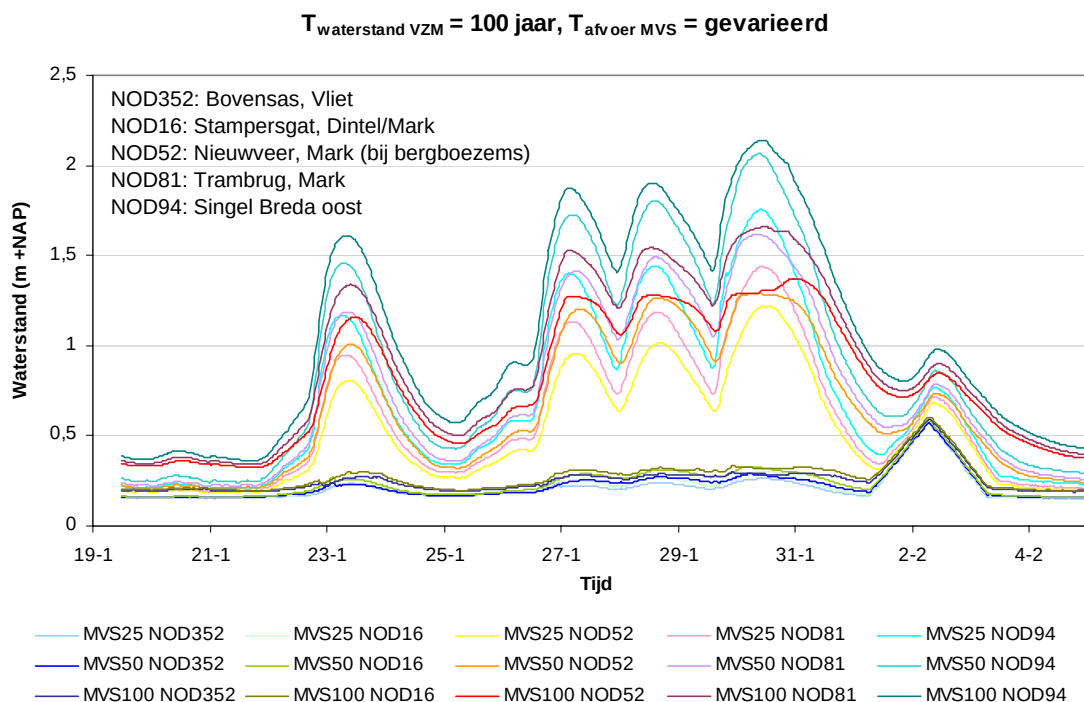


Figuur 5.5: DufLOW-netwerk van het Mark-Vliet systeem

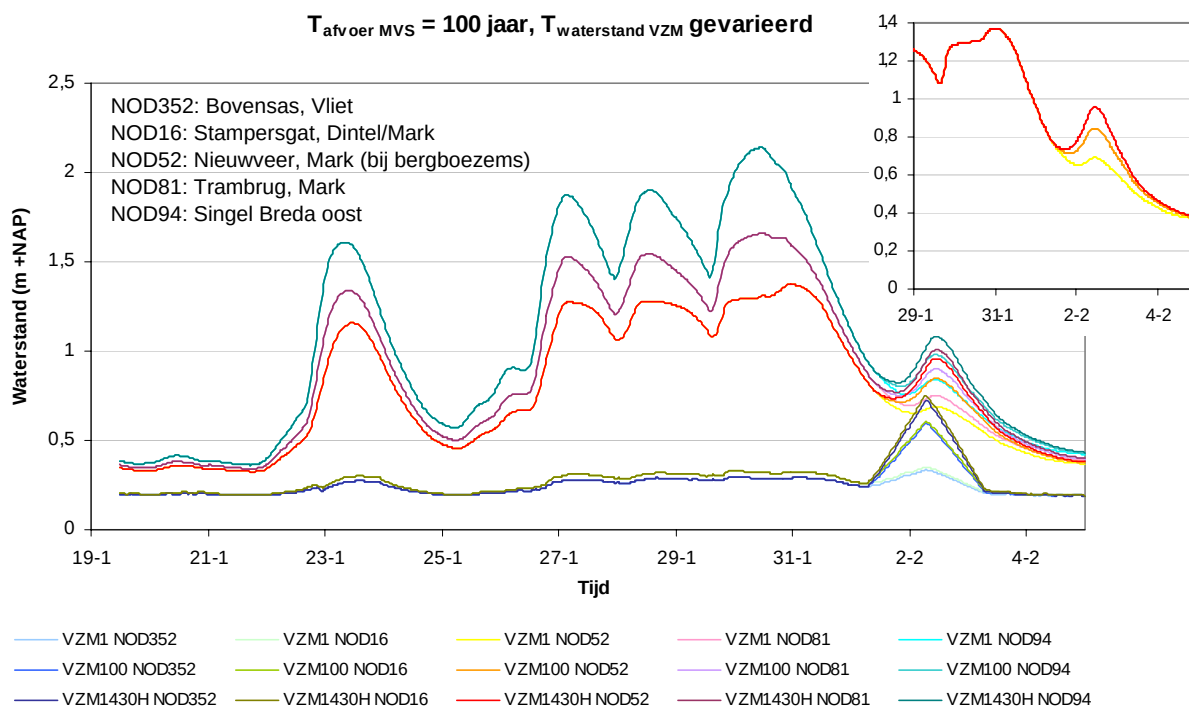
In onderstaande figuren worden grafieken gepresenteerd die de waterstanden in het Mark-Vliet systeem weergeven voor 5 plaatsen die het systeem goed representeren. De waterstanden zijn uitgezet tegen de tijd voor een periode van twee en een halve week waarin hoogwater optreedt in het Mark-Vliet systeem. De waterstanden worden naast de afvoergolf bepaald door de waterstand op het Volkerak-Zoommeer. In de grafieken zijn de randvoorwaarden weergegeven als een bepaalde herhalingstijd; MVS25 VZM100 betekent dat met een afvoergolf met een herhalingstijd van 25 jaar en een waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een herhalingstijd van 100 jaar is gerekend. De bijbehorende waterstanden op het Volkerak-Zoommeer staan in tabel 5.1.

Eerst wordt aan de hand van de grafieken in figuur 5.6 en figuur 5.7 een overzicht gegeven van de waterstanden die in de huidige situatie op kunnen treden. In figuur 5.6 worden grafieken met een gelijke randvoorwaarde op het Volkerak-Zoommeer voor variërende afvoergolven gepresenteerd.

In figuur 5.7 is te zien hoe de waterstand in het Mark-Vliet systeem varieert als gevolg van verschillende waterstanden op het Volkerak-Zoommeer.



Figuur 5.6: Waterstanden in het Mark-Vliet systeem zoals berekend met Duflow bij een waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een herhalingsstijd van 100 jaar en een afvoer met een herhalingsstijd van respectievelijk 25, 50 en 100 jaar. De waterstanden zijn berekend zonder inzet van het Volkerak-Zoommeer.



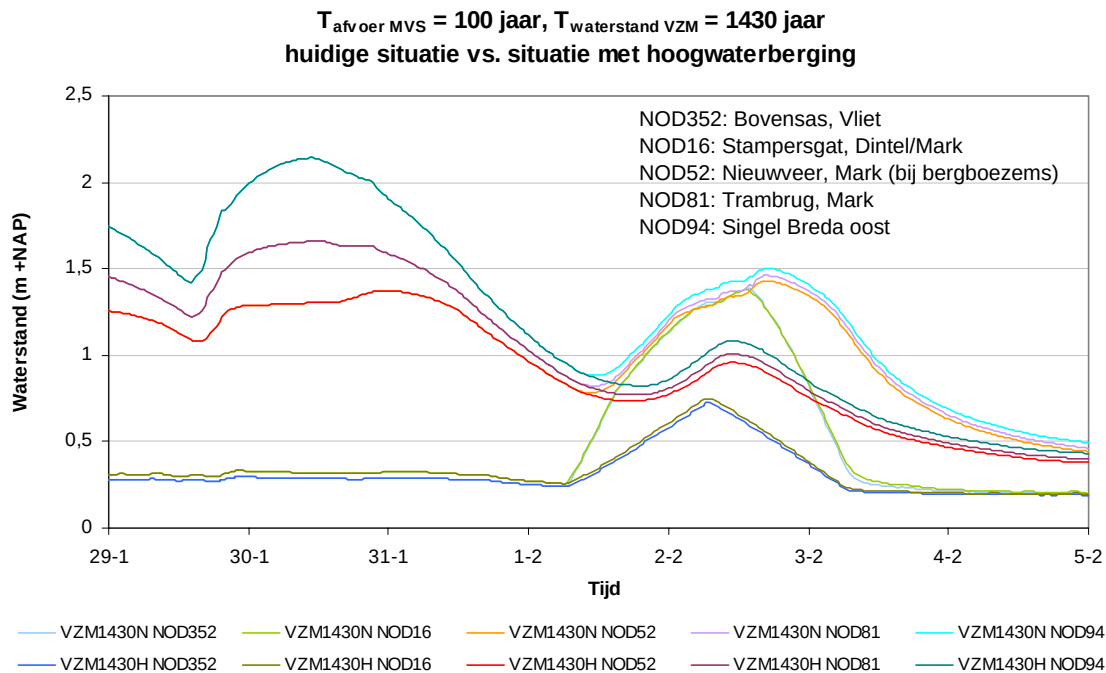
Figuur 5.7: Waterstanden in het Mark-Vliet systeem zoals berekend met Duflow bij een afvoergolf met een herhalingsstijd van 100 jaar en een waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een herhalingsstijd van respectievelijk 1, 100 en 1430 jaar. De waterstanden zijn berekend zonder hoogwaterberging. De inzet laat voor één locatie duidelijk zien hoe de waterstand in het Mark-Vliet systeem beïnvloed wordt door de waterstand op het Volkerak-Zoommeer.

De waterstanden in figuur 5.6 gaan zoals verwacht omhoog bij toenemende afvoeren. In de bovenstroomse delen (NOD94 en NOD81) zijn de waterstanden het hoogst. Bij Nieuwveer is de invloed van de bergboezems op de waterstand zichtbaar, in de pieken rond 29 en 31 januari zijn de waterstanden hier afgevlakt. Benedenstrooms van de bergboezems zijn de waterstanden afgevlakt. De invloed van de afvoer op de waterstand is hier wat minder groot dan bovenstrooms van de bergboezems, de pieken zijn uitgedempt.

In figuur 5.7 is te zien dat de maximale waterstanden in de bovenloop van de Mark en de singel van Breda worden bepaald door de afvoer. De waterstanden aldaar worden wel beïnvloed door de waterstand op het Volkerak-Zoommeer, maar de maximale waterstanden ondervinden geen invloed van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer. In figuur 5.7 is dit te zien aan de pieken die optreden rond 31 januari, deze worden niet hoger door hogere waterstanden op het Volkerak-Zoommeer. Alleen voor de waterstanden in de Vliet, de Dintel en het benedenstroomse deel van de Mark levert een verhoogde waterstand op het Volkerak-Zoommeer maatgevende waterstanden op.

Een opvallende observatie is dat er tussen de benedenstroomse locaties maar kleine verschillen in de waterstanden zitten. Uit de data blijkt dat de waterstanden in de Dintel bij NOD16 en de Vliet bij Roosendaal (NOD 352) vrijwel gelijk aan elkaar zijn, terwijl de waterstanden op het Volkerak-Zoommeer met een herhalingsstijd van 1430 jaar bij de Dintelmonding bijna 15 cm hoger is dan bij de Vlietmonding. Dit duidt erop dat waterstanden in het bovenstroomse deel van de Vliet sterk afhankelijk zijn van de waterstanden in de Dintel en niet zo zeer van de waterstanden in het benedenstroomse deel van de Vliet. Gezien de afvoerverdeling is dit logisch, het percentage van de afvoer dat door de Dintel stroomt is veel groter dan de afvoer van de Vliet. De afvoer en dus de waterstanden in het Mark-Vliet kanaal en in de Roosendaalsche Vliet worden daardoor sterk beïnvloed door de waterstand in de Dintel/Mark bij Stampersgat.

In de huidige situatie, waarin het Volkerak-Zoommeer niet voor berging wordt gebruikt, wordt de waterstand in het Mark-Vliet systeem over een beperkte afstand beïnvloed door de waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een herhalingsstijd tot 2000 jaar [21]. Wanneer het Volkerak-Zoommeer wel ingezet gaat worden voor hoogwaterberging nemen de maximale waterstanden op het Volkerak-Zoommeer sterk toe bij herhalingsstijden groter dan 1430 jaar. De invloed die deze hogere waterstanden bij de mondingen van de Dintel en de Vliet hebben op de waterstanden in het Mark-Vliet systeem is onderzocht met Duflow. In figuur 5.8 is een vergelijking van de waterstanden voor de huidige situatie en de nieuwe situatie weergegeven bij een waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een herhalingsstijd van 1430 jaar in beide situaties.

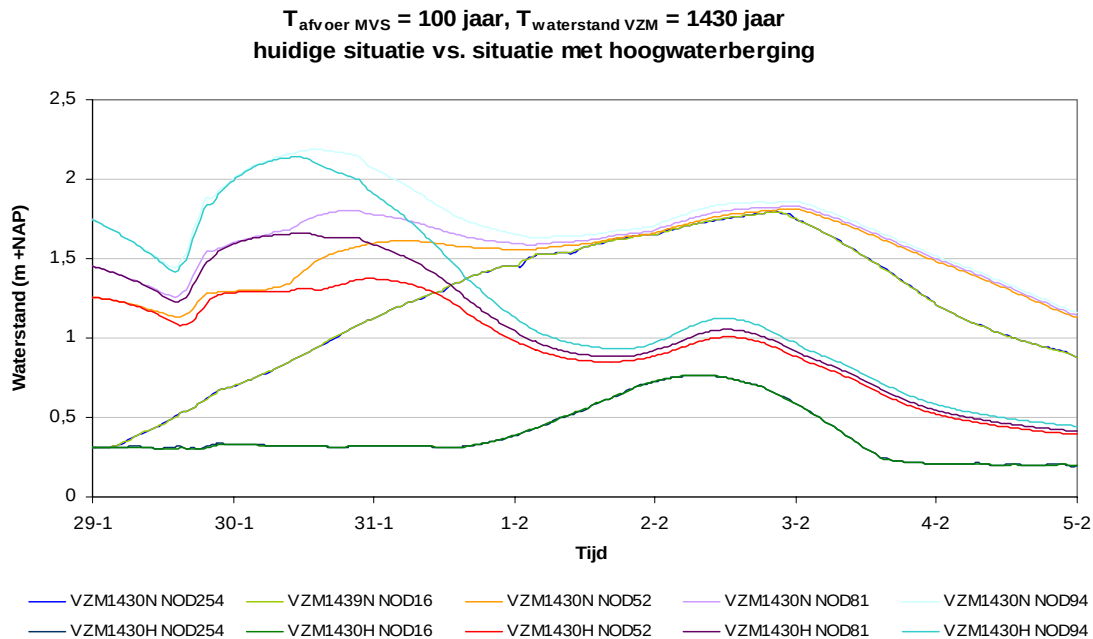


Figuur 5.8: Waterstanden in het Mark-Vliet systeem zoals berekend met Duflow bij een afvoergolf met een herhalingsstijd van 100 jaar en een waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een herhalingsstijd van 1430 jaar zonder inzet (H) en met inzet (N) van het Volkerak-Zoommeer voor berging.

In figuur 5.8 is alleen het laatste deel van de periode van hoogwater weergegeven. Vóór 29 januari zijn er geen verschillen in de waterstanden. Uit figuur 5.8 blijkt dat bij omstandigheden met eenzelfde herhalingsstijd de invloed van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer verder bovenstrooms merkbaar is in de nieuwe situatie. In de huidige situatie was de invloed op de maximale waterstand van een waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een herhalingsstijd van 1430 jaar slechts merkbaar tot iets voorbij Stampersgat (NOD16). Door inzet van het Volkerak-Zoommeer wordt de maximale waterstand hoger tot voorbij Nieuwveer (NOD 52), 20 km stroomopwaarts van Stampersgat. De invloed benedenstrooms is het grootst aangezien de waterstanden daar reageren direct op de waterstanden bij de mondingen. De waterstanden op benedenstroomse locaties nemen met meer dan een halve meter toe vergeleken met een situatie waarin het Volkerak-Zoommeer niet wordt ingezet. Op locaties bovenstrooms van Nieuwveer (NOD81 en NOD94) beïnvloedt de inzet van het Volkerak-Zoommeer voor waterberging de maximale waterstand niet; de maximale waterstand, die optreedt rond 31 januari, is nog steeds afvoergedomineerd.

Uit de Duflow-berekeningen kwam nog een punt naar voren waaraan in dit onderzoek verder geen consequenties worden verbonden, maar dat wellicht van belang kan zijn. Zoals te zien is in figuur 5.9 blijkt de lengte van de periode waarover de waterstand verhoogd is zeer belangrijk te zijn voor de maximale waterstanden die bereikt worden in het Mark-Vliet systeem wanneer er vanuit wordt uitgegaan dat de waterstandtop op het Volkerak-Zoommeer 3 dagen na de afvoerpiek komt. Bij een korte duur (2 dagen waterstandverhoging) worden de maximale waterstanden bij Trambrug en verder bovenstrooms niet beïnvloed, zoals bleek uit figuur 5.7. De maximale waterstanden zijn bovenstrooms in deze situatie afvoergedomineerd. Wanneer de duur van de waterstandverhoging op het Volkerak-Zoommeer echter toeneemt, kan het Mark-Vliet systeem over een langere periode

niet afwateren en wordt het water zo ver opgestuwd dat de maximale waterstanden tot in de singels van Breda (NOD94) omhoog gaan bij inzet van het Volkerak-Zoommeer voor berging.



Figuur 5.9: Waterstanden in het Mark-Vliet systeem zoals berekend met Duflow bij een afvoergolf met een herhalingsstijd van 100 jaar en een waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een herhalingsstijd van 1430 jaar zonder inzet (H) en met inzet (N) van het Volkerak-Zoommeer voor berging. Er is hierbij uitgegaan van een verlengde waterstandverhoging; de waterstand op het Volkerak-Zoommeer is ongeveer 8 dagen verhoogd.

Er wordt van uitgegaan dat de waterstand op het Volkerak-Zoommeer 2 dagen verhoogd zal zijn [14]. Uit de Duflow-berekeningen blijkt dat wanneer de duur toeneemt, de consequenties voor de maximale waterstanden groot kunnen zijn door toenemende opstuwing. Wanneer de uitgangspunten aangaande de duur van hoogwaterberging op het Volkerak-Zoommeer veranderen, kan opstuwing dus grote gevolgen hebben voor de gevolgen van de maatregel in West-Brabant.

Samenvattend kan het volgende geconcludeerd worden uit de resultaten van de Duflow berekeningen. De invloed van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer op de waterstanden in het Mark-Vliet systeem reikt maximaal ongeveer 20 km verder stroomopwaarts bij inzet van het Volkerak-Zoommeer. Uit de vergelijking van de huidige en nieuwe situatie blijkt dat bij eenzelfde herhalingsstijd op een groot aantal locaties de maximale waterstand in het Mark-Vliet systeem toeneemt. Hoever bovenstrooms de invloed van de waterstand bij de mondingen reikt is afhankelijk van de hoogte van deze waterstand, maar ook van de duur van de stremmingperiode van het Mark-Vliet systeem. In paragraaf 5.7 zal verder ingegaan worden op de gevolgen van de veranderingen in de waterstanden in het Mark-Vliet systeem.

5.5. Vergelijking van resultaten met eerder onderzoek

In het onderzoek van Arcadis in opdracht van het waterschap Brabantse Delta [16] is uitgegaan van andere, inmiddels achterhaalde, randvoorwaarden. Ten eerste is uitgegaan van een andere timing van de verhoogde waterstand op het Volkerak-Zoommeer. Arcadis heeft de waterstandtop samen laten vallen met de afvoerpiek [16]. Ten tweede is door Arcadis uitgegaan van een

waterstandtop van ongeveer 2.4 m +NAP ten opzichte van de 2.1 m +NAP bij een herhalingstijd van 1430 jaar in voorliggend onderzoek. In onderstaande tabellen worden de door Arcadis [16] en in voorliggend onderzoek berekende waterstanden gepresenteerd voor variërende afvoeren.

Herhalingstijd	Juliana-brug ± NOD118	Tram-brug NOD81	Nieuw-veer NOD52	Ouden-bosch NOD24	Roosen-daal NOD254	Dintel-sas NOD5	Beneden-sas NOD339
T25, scenario 1 [16]	2,01	1,56	1,42	1,37	1,37	1,37	1,37
T25 VZM1430 N	1,84	1,44	1,22	1,09	1,08	1,07	1,05
T50, scenario 4 [16]	2,34	1,95	1,77	1,52	1,47	1,46	1,42
T50 VZM1430 N	2,18	1,62	1,29	1,24	1,23	1,23	1,19
T100, scenario 9	2,61	2,08	1,87	1,57	1,55	1,55	1,44
T100 VZM1430 N	2,26	1,66	1,43	1,38	1,39	1,38	1,38
T50 Huidig [16]	2,26	1,64	1,33	0,82	0,63	0,57	0,51
T50 Huidig	2,18	1,62	1,29	0,77	0,75	0,74	0,61

Tabel 5.2: Maximale waterstanden (m + NAP) uit scenario's afkomstig uit [16] vergeleken met maximale waterstanden (m + NAP) berekend met Dulfow voor de randvoorwaarden zoals deze in voorliggend rapport zijn bepaald. De waterstanden afkomstig uit [16] zijn grijs weergegeven. Bij deze scenario's is uitgegaan van een tweedaagse waterstandverhoging op het Volkerak-Zoommeer. Voor de in voorliggend rapport berekende waterstanden, weergegeven in zwart, geldt dat de eerste drie scenario's (N) met inzet van het Volkerak-Zoommeer zijn berekend waarbij de waterstand 2 dagen verhoogd is. Het vierde scenario (huidig) geeft de waterstanden voor een afvoer met een herhalingstijd van 50 jaar en een waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een herhalingstijd van 1430 jaar in de huidige situatie, dus zonder inzet van het Volkerak-Zoommeer.

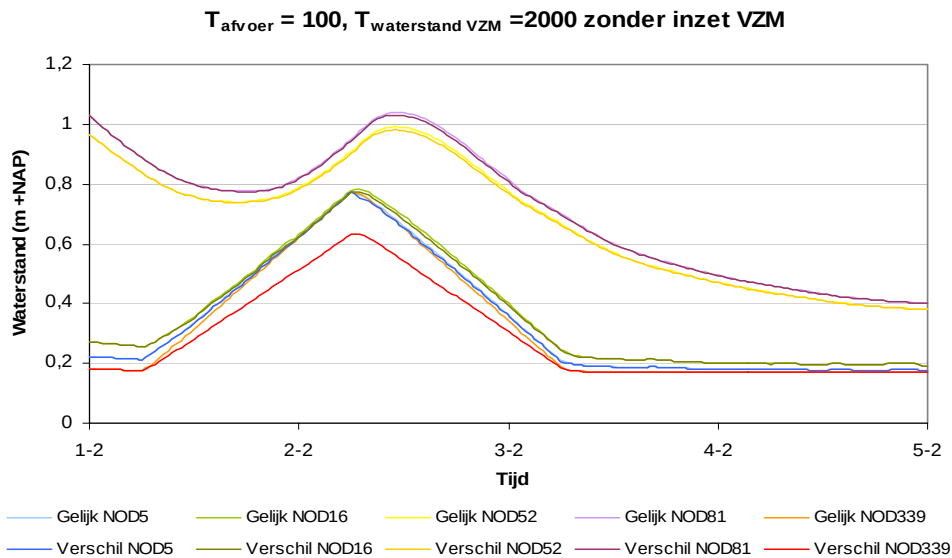
Uit de vergelijking van de maximale waterstanden in tabel 5.2 blijkt dat de in voorliggend onderzoek berekende waterstanden (zwart) tijdens hoogwaterberging op alle locaties lager uitvallen dan de waterstanden uit [16] (grijs). Dit was verwacht gezien de aanpassingen die zijn gemaakt in de randvoorwaarde Volkerak-Zoommeer; zowel de verlaatte inzet ten opzichte van de afvoerpiek als de lagere waterstanden bij de mondingen tijdens hoogwaterberging hebben een verlagend effect op de waterstanden in het Mark-Vliet systeem.

De waterstanden in de huidige situatie zouden ongeveer gelijk moeten zijn. Bovenstrooms, in het afvoergedomineerde deel van het systeem, komen de waterstanden van T50 huidig aardig overeen. Op de locaties waar de waterstand beïnvloed wordt door de waterstand op het Volkerak-Zoommeer (Oudenbosch, Roosendaal, Benedensas en Dintelsas) verschillen de waterstanden wel. Het is niet bekend welke waterstand opgelegd is bij de mondingen in de huidige situatie door Arcadis. Het is waarschijnlijk dat de waterstanden berekend door Arcadis lager uitvallen dan de nieuw berekende waterstanden benedenstrooms doordat in de nieuwe berekeningen met een relatief hoge waterstand in de mondingen is gerekend door het meenemen van windopzet. Al met al kan geconcludeerd worden dat de vergelijking met [16] de verwachtingen bevestigd en dat het vernieuwde inzicht in het verloop van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer leidt tot lagere verwachte waterstanden in het Mark-Vliet systeem.

5.6. Gevoeligheid voor randvoorwaarde Volkerak-Zoommeer

5.6.1. De verhouding waterstand Dintelmonding/waterstand Vlietmondning

In hoofdstuk 4 en paragraaf 5.3 is aangestipt hoe de verdeling van de afvoer over de Dintel en de Vliet kan veranderen doordat de waterstanden in de mondingen van de Dintel en de Vliet niet altijd gelijk zijn. In figuur 5.10 is weergegeven hoe de waterstanden in het Mark-Vliet systeem veranderen door het veranderen van de verhouding tussen de waterstanden bij de mondingen. Een set waterstanden is berekend met als uitgangspunt een waterstand in de Vlietmondning gelijk aan de met Hydra-M berekende waterstand in de Dintelmonding, de andere set waterstanden is berekend met verschillende waterstanden in de twee mondingen. Uit figuur 5.10 is op te maken dat de verschillen zeer klein zijn, met uitzondering van de waterstanden vlakbij de Vlietmondning.



Figuur 5.10: Waterstanden op een zestal locaties voor twee scenario's: gelijk = de randvoorwaarde Volkerak-Zoommeer is gelijk voor de Dintelmonding (NOD1) en de Vlietmondning (NOD336), verschil = de randvoorwaarde Volkerak-Zoommeer is verschillend voor de Dintelmonding (NOD1) en de Vlietmondning (NOD336). Bij het scenario met gelijke waterstanden zijn de met Hydra-M berekende waterstanden in de Dintelmonding aangehouden voor de Vlietmondning.

Ter verduidelijking zijn in tabel 5.3 de verschillen tussen de waterstanden van beide sets weergegeven in cijfers voor een T100-afvoergolf en een waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een herhalingsstijd van 2000 jaar zonder inzet voor berging. De vergelijking is voor meerdere combinaties van afvoeren en waterstanden op het Volkerak-Zoommeer gemaakt. De uitkomsten leken allemaal op de in tabel 5.3 weergegeven verschillen.

	<i>Gelijke waterstanden</i>	<i>Verschillende waterstanden</i>	<i>Verschil</i>
VZM: Dintelmonding	0,77	0,77	0,00
NOD5 (Dintel)	0,78	0,77	0,00
NOD16 (Dintel/Mark)	0,78	0,78	0,01
NOD52 (Mark)	0,99	0,98	0,01
NOD81 (Mark/Singel)	1,04	1,03	0,01
VZM: Vlietmondning	0,77	0,61	0,16
NOD339 (Vliet)	0,77	0,63	0,14
NOD247 (Vliet)	0,79	0,78	0,01

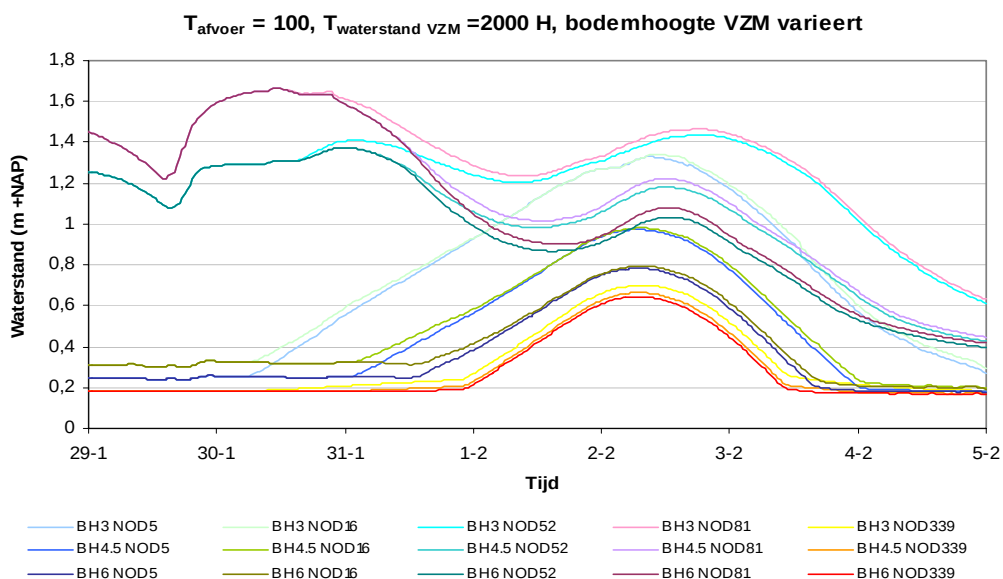
Tabel 5.3: De maximale waterstanden (m + NAP) die optreden na 1 februari bij inzet van het Volkerak-Zoommeer

Alleen dichtbij de monding van de Vliet is een verschil in de waterstanden te zien, maar dit verschil is 15 kilometer stroomopwaarts bij NOD247 al nauwelijks meer waarneembaar. Het deel van de afvoer dat door de Vliet gaat is blijkbaar zo klein (kleiner dan 20 procent van de afvoer van de Dintel), dat een 15 cm hogere waterstand in de Vlietmonding een verandering in de afvoerverdeling teweegbrengt die slechts een verwaarloosbare invloed heeft op de waterstanden in het systeem. Op basis van figuur 5.10 en tabel 5.3 kan geconcludeerd worden dat de waterstanden in het Mark-Vliet systeem niet gevoelig zijn voor een veranderende verhouding tussen de waterstanden in de mondingen. Desondanks is het wel van belang in de twee mondingen verschillende waterstanden aan te houden in de modelberekeningen, anders worden de waterstanden in de buurt van de Vlietmonding behoorlijk overschat.

5.6.2. Onzekerheid bodemhoogte Volkerak-Zoommeer

Dan rest de vraag of de waterstanden in het Mark-Vliet systeem indirect gevoelig zijn voor de bodemhoogte van het Volkerak-Zoommeer die is aangehouden in de berekeningen van Hydra-M. Uit de gevoeligheidsanalyse in paragraaf 4.2.4 is gebleken dat de gevoeligheid van de overschrijdingsfrequenties van de waterstanden op het Volkerak-Zoommeer voor de bodemhoogte groot is op windgedomineerde locaties. Of de onzekerheid in de bodemhoogte resulteert in onzekerheid in de kans op wateroverlast, is afhankelijk van de indirecte gevoeligheid van de waterstanden in het Mark-Vliet systeem voor de bodemhoogte welke als uitgangspunt is gebruikt bij het berekenen van de overschrijdingskansen van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer.

Naast de bodemhoogte van 6 m –NAP waarmee is verder gerekend zijn met Hydra-M ook voor bodemhoogtes van 3 m –NAP en 4.5 m –NAP overschrijdingsfrequentielijnen berekend. Met DufLOW zijn op basis van de drie overschrijdingsfrequentielijnen waterstanden in het Mark-Vliet systeem berekend. In figuur 5.11 staan de resultaten van deze berekeningen voor de drie bodemhoogte-scenario's bij een afvoer met een herhalingsstijd van 100 jaar en een waterstand in de mondingen met een herhalingsstijd van 2000 jaar zonder inzet voor berging.



Figuur 5.11: Waterstanden op een zestal locaties voor de drie bodemhoogte-scenario's BH = 3 m –NAP, 4.5 m –NAP en 6 m –NAP, uitgaand van een T100-afvoergolf en een waterstandtop* op het Volkerak-Zoommeer met een frequentie van 1/2000 jaar. Er vindt geen berging plaats op het Volkerak-Zoommeer. *Duur van hoogwaterberging > 2 dagen.

De verschillen in de waterstand door het gebruik van een andere gemiddelde bodemhoogte in het Volkerak-Zoommeer zijn in figuur 5.11 overdreven weergegeven door dat de berekeningen met een langere waterstandverhoging op het Volkerak-Zoommeer zijn berekend. Gebaseerd op de andere berekeningen kan aangenomen worden dat de invloed van de onzekerheid in de bodemhoogte stroomopwaarts af zal nemen bij een duur van 2 dagen.

Behalve in de buurt van de Vlietmonding is de invloed van een andere bodemhoogte in het Volkerak-Zoommeer op de waterstanden in het Mark-Vliet systeem groot. De bodemhoogte bepaalt de waterdiepte en de waterdiepte bepaalt hoe groot de windinvloed is. De invloed van de bodemhoogte-keuze bij het windgedomineerde Dintelsas (NOD5) is daarom groot, terwijl de waterstand Benedensas (NOD339) ongevoelig is voor de bodemhoogte-keuze. De waterstanden in de Roosendaalsche Vliet zijn wel gevoelig voor de bodemhoogteverandering, doordat de waterstanden daar sterk beïnvloed worden door de waterstand in de Dintel/Mark.

In figuur 5.11 is te zien dat de waterstanden in het systeem, met uitzondering van de Steenbergsche Vliet, veel hoger zijn bij een bodemhoogte van 3 m –NAP dan bij een bodemhoogte van 6 m –NAP. Geconcludeerd kan worden dat, wanneer het Volkerak-Zoommeer niet ingezet wordt voor hoogwaterberging, de windgevoeligheid van de waterstand in de Dintelmonding tot een significante onzekerheid leidt in de berekende waterstanden in het Mark-Vliet systeem. Deze onzekerheid kan bij hoge waterstanden op het Volkerak-Zoommeer oplopen tot ongeveer een decimeter door het gehele systeem, met uitzondering van het benedenstroomse deel van de Vliet. De gevolgen hiervan voor de kans op wateroverlast worden bediscussieerd in hoofdstuk 7.

Uit de berekeningen is gebleken dat bovenstaande gegevens aangaande de invloed van de bodemhoogte-keuze alleen gelden bij situaties waarin het Volkerak-Zoommeer niet wordt ingezet voor waterberging. Wanneer wel berging plaatsvindt, worden de waterstanden op het Volkerak-Zoommeer vrijwel volledig door het meerpeil bepaald, zoals is besproken in hoofdstuk 4. De waterstanden in het Mark-Vliet systeem die zijn berekend voor de situatie waarin het Volkerak-Zoommeer wordt ingezet zijn nagenoeg ongevoelig voor de onzekerheden in de berekeningen van BretView.

5.7. Veranderingen in de verhanglijnen in het Mark-Vliet systeem

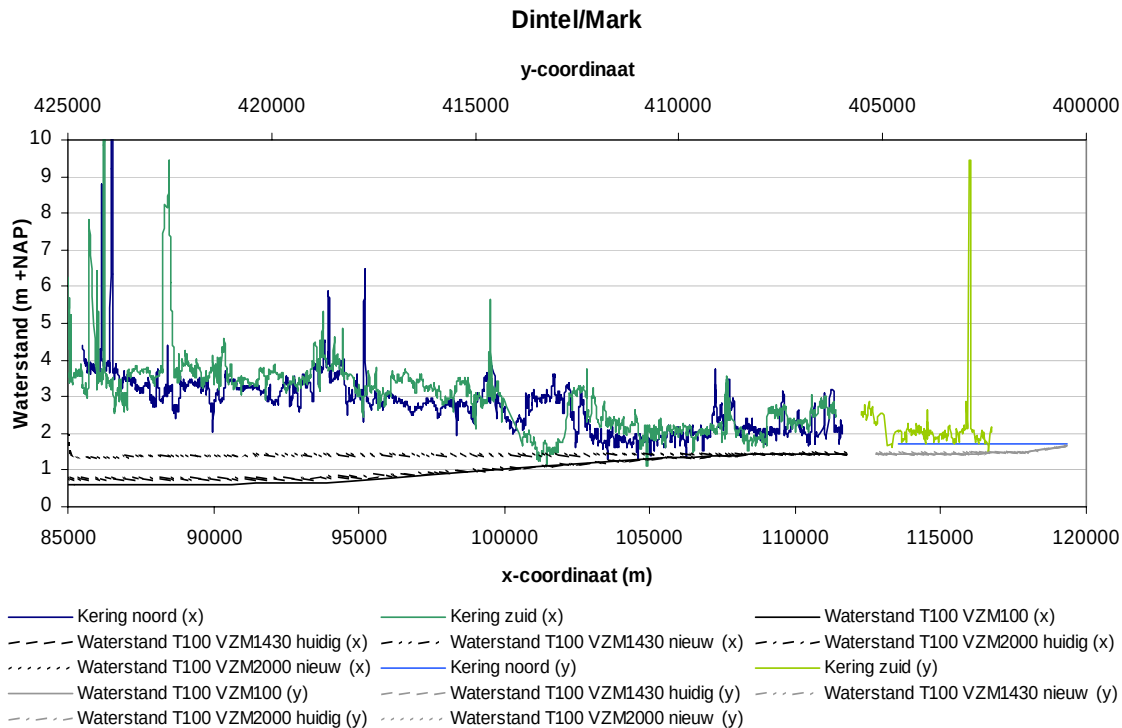
5.7.1. Overstromen van de keringen

Met Duflow zijn waterstanden berekend op verschillende locaties voor een breed spectrum aan combinaties. Door de waterstanden die zijn berekend met de Duflow methode uit te zetten in een figuur waarin ook de hoogtes van de waterkeringen in het systeem zijn gepresenteerd, kan een duidelijk overzicht verkregen worden van waar wateroverlast kan ontstaan. In figuur 5.12 zijn op deze manier de verhanglijnen in de Dintel en Mark gepresenteerd. In figuur 5.13 zijn de verhanglijnen in de Vliet gepresenteerd en in figuur 5.14 het Mark-Vliet kanaal.

In de onderstaande figuren zijn de verhanglijnen samengesteld uit de maximale waterstanden die zich voordoen in de rekenperiode. Belangrijk om te noemen is dat deze maximale waterstanden op de verschillende locaties niet altijd op dezelfde momenten ontstaan. Wanneer het Volkerak-

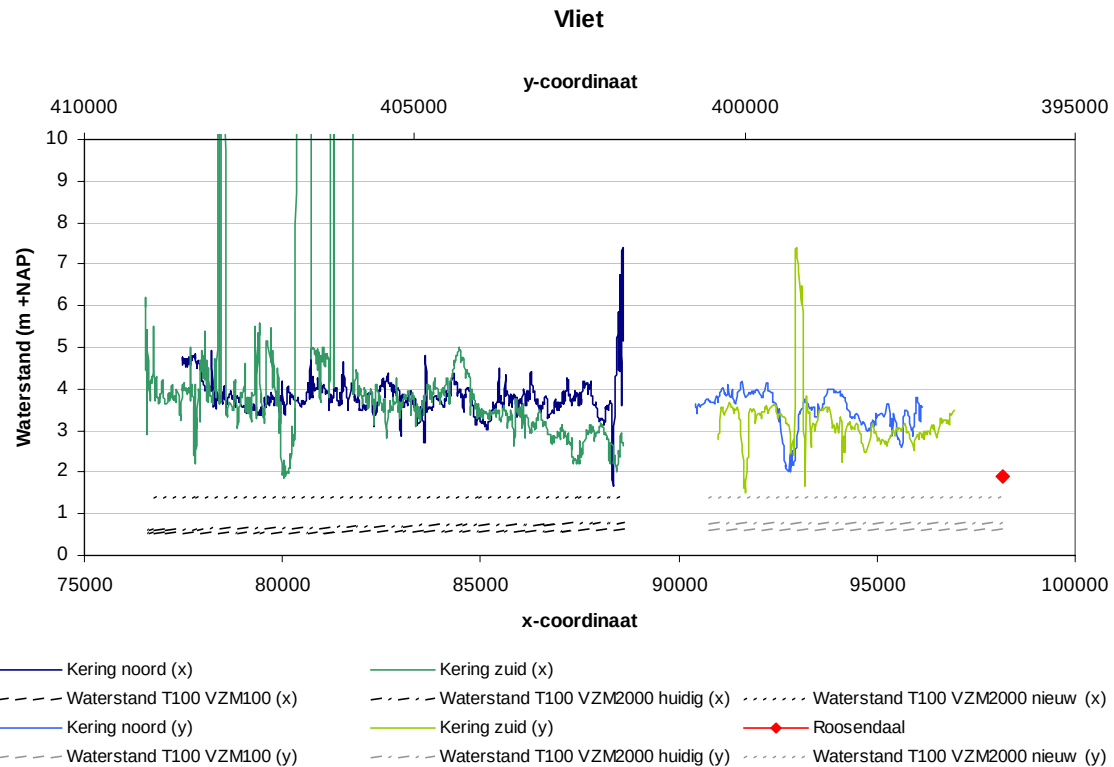
Zoommeer niet wordt ingezet worden de maximale waterstanden, zoals besproken in paragraaf 5.4, bovenstrooms veroorzaakt door de afvoerpiek, terwijl op de benedenstroomse locaties de waterstand bepaald wordt door de waterstandtop op het Volkerak-Zoommeer. Desondanks zijn deze maximale waterstanden als één verhanglijn⁷ gepresenteerd, aangezien dit voor alle locaties de hoogste waterstanden zijn die bij de gegeven combinatie van omstandigheden op kunnen treden.

In onderstaande figuren met de verhanglijnen voor de Dintel/Mark en de Vliet is het gebruik gemaakt van twee x-assen. Reden hiervoor is de bijna haakse bocht die beide rivieren in hun loop hebben. Het bovenstroomse deel van beide riviertjes loopt van zuid naar noord en is daarom het best te presenteren ten opzichte van de y-coördinaten. De benedenstroomse delen van de Dintel/Mark en de Vliet lopen globaal gezien van oost naar west en kunnen daarom het best gepresenteerd worden ten opzichte van de x-coördinaten. Door de splitsing van de x-as van de grafieken worden de lengtes van de takken in het systeem niet vertekend. Het Mark-Vliet kanaal loopt van noord naar zuid en is daarom alleen uitgezet tegen de y- coördinaten. De coördinaten in het systeem komen overeen met de coördinaten in figuur C.1 in bijlage C.

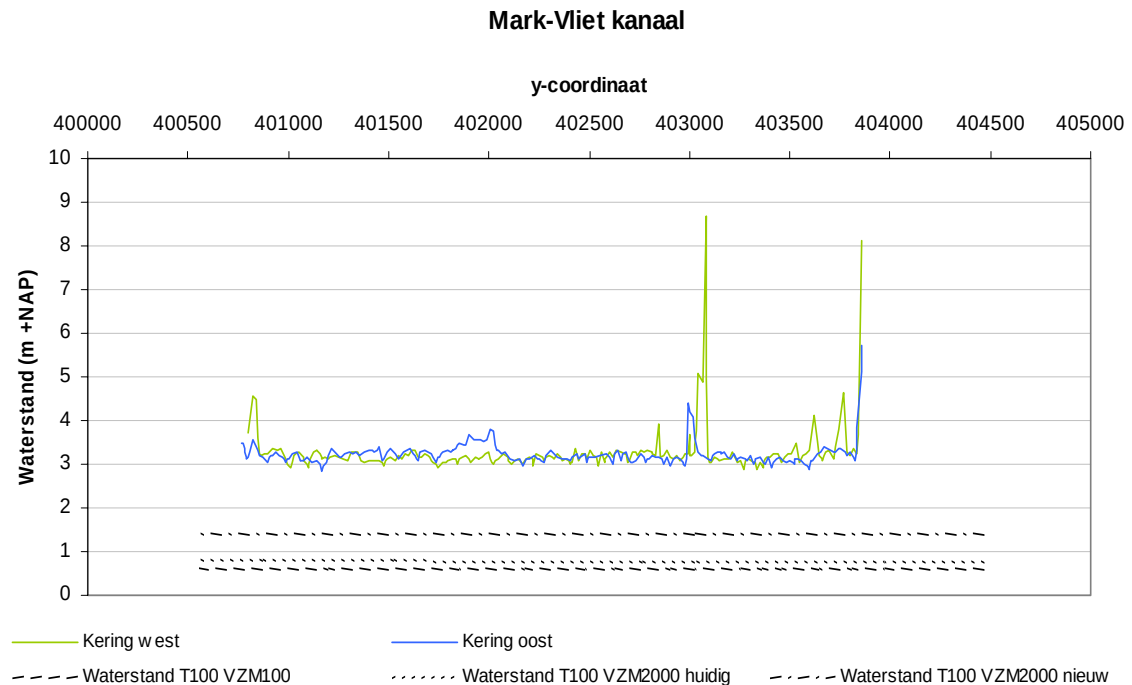


Figuur 5.12: Verhanglijnen in de Dintel en de Mark voor verschillende combinaties van afvoer en waterstand op het Volkerak-Zoommeer. Daarnaast zijn de keringen aan de noordzijde en de zuidzijde van het systeem weergegeven. De keringhoogtes zijn uit GIS verkregen.

⁷ Wat in dit hoofdstuk verhanglijnen worden genoemd, zijn officieel dus geen verhanglijnen, aangezien een verhanglijn de waterstanden in het systeem op één moment weergeeft. Desondanks wordt de term verhanglijn gebruikt voor de verzameling van maximale waterstanden in het Mark-Vliet systeem.



Figuur 5.13: Verhanglijnen in de Vliet voor verschillende combinaties van afvoer en waterstand op het Volkerak-Zoommeer. Daarnaast zijn de keringen aan de noordzijde en de zuidzijde van het systeem weergegeven. De keringhoogtes zijn uit GIS verkregen. Het laagste punt van de kade bij Roosendaal is apart weergegeven.



Figuur 5.14: Verhanglijnen in het Mark-Vliet kanaal voor verschillende combinaties van afvoer en waterstand op het Volkerak-Zoommeer. Daarnaast zijn de keringen aan de noordzijde en de zuidzijde van het systeem weergegeven. De keringhoogtes zijn uit GIS verkregen.

In figuur 5.12 is duidelijk te zien dat de waterstand op het Volkerak-Zoommeer bij inzet voor berging in een groter gebied een dominante rol gaat spelen in de bepaling van de verhanglijn in de

Dintel/Mark. De waterstand wordt in de Dintel/Mark duidelijk opgestuwd door de hoge waterstanden bij de monding bij inzet. Bovenstrooms van Nieuwveer ($x = 107000$) is het stuwingeffect nauwelijks nog waarneembaar. In de huidige situatie kan al wateroverlast ontstaan in de Mark (in de buurt van x -coördinaat 105000 bij gemaal Halle) bij een afvoergolf met een herhalingsstijd van 100 jaar. Door inzet van het Volkerak-Zoommeer voor berging ontstaat wateroverlast op een groter aantal punten langs de Mark. Voor deze punten wordt in paragraaf 6.3 de verandering van de kans op wateroverlast berekenen.

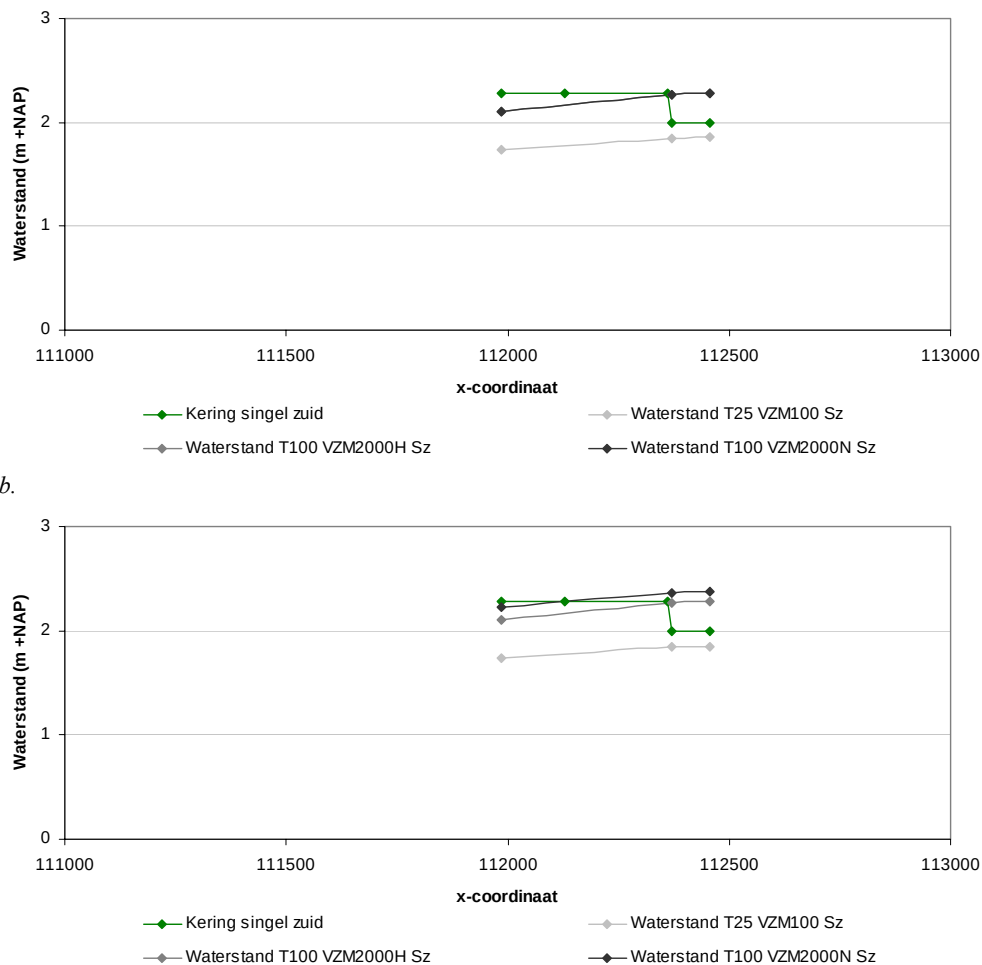
Uit de grafieken in de figuren 5.12, 5.13 en 5.14 blijkt dat alleen op de Mark wateroverlast op zal gaan treden in de boezem als gevolg van inzet van het Volkerak-Zoommeer bij een afvoer met een herhalingsstijd van 100 jaar. In de Dintel, de Vliet en het Mark-Vliet kanaal wordt het beschermingsniveau van 1/100 jaar gehandhaafd. De waterstanden in de Vliet en het Mark-Vliet kanaal worden over de gehele lengte opgestuwd, maar de waterstanden blijven voor herhalingsstijden van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer tot 2000 jaar binnen de keringen.

In de keringen langs de Vliet zitten wel 4 zwakke plekken waar de dijk over een aantal meter erg laag is; in de kering aan de noordzijde rond $x = 88300$ m (in de buurt van de splitsing met het Mark-Vliet kanaal) en in de kering aan de zuidzijde rond $x = 80000$ m (in de buurt van Steenberg), $y = 400000$ en $y = 399100$ m (beide net voor de splitsing met het Mark-Vliet kanaal). De dijken overstromen hier net niet als gevolg van de waterstand, maar rekening houdend met de waakhoogte zijn de dijkhoogtes hier wel kritiek.

Waterschap Brabantse Delta geeft aan dat er benedenstrooms langs de Vliet en Dintel wel wateroverlast optreedt in de uiterwaarden bij inzet van het Volkerak-Zoommeer, met schade in onbebouwde en bebouwde gebieden als gevolg [16]. Aangezien de waterstanden in de benedenstroomse gedeeltes lager zijn dan de waterstanden waarop het waterschap bovenstaande uitspraak heeft gebaseerd [16], is het de vraag of en in welke mate wateroverlast in de uiterwaarden op zal treden door inzet van het Volkerak-Zoommeer. Het is voor het berekenen van de gevolgen van de maatregel hoogwaterberging op het Volkerak-Zoommeer van belang de uitspraak van het waterschap te controleren aan de hand van de in dit onderzoek berekende waterstanden.

Naast de drie hierboven beschouwde takken zijn de waterstandveranderingen langs de singel van Breda belangrijk om te bespreken. Dit gebied is dichtbebouwd, waardoor grote schade kan ontstaan als de wateroverlast toe zou nemen. Onder de huidige aannames is het effect van de opstuwning voorbij Nieuwveer echter verwaarloosbaar. De waterstanden in de singel van Breda veranderen niet door inzet van het Volkerak-Zoommeer voor hoogwaterberging. Een belangrijke voetnoot betreft de invloed van de duur van de hoogwaterberging. Wanneer de waterstanden op het Volkerak-Zoommeer langer dan 2 dagen verhoogd zijn, neemt de stuwning toe. In figuur 5.15 zijn ter indicatie de waterstanden in de singel en de hoogtes van de kades uitgezet. De kadehoogtes zijn uit het rapport 'Hoogwaterlijnen Mark en Vliet' uit 1997 overgenomen. Recentere gegevens waren moeilijk te achterhalen. Figuur 5.15a laat de waterstanden bij een duur van 2 dagen zien. Figuur 5.15b laat de waterstanden bij een duur van 8 dagen zien.

a.



Figuur 5.15: Indicatie van de verhanglijnen in de zuidsingel van Breda voor verschillende combinaties van afvoer en waterstand op het Volkerak-Zoommeer. Daarnaast zijn de kadehoogtes weergegeven [21]. a: Singel Breda zuid met waterstanden bij een bergingsduur van 2 dagen. De waterstand in de huidige situatie is gelijk aan de waterstand in de situatie met inzet. b: Singel Breda zuid met waterstanden bij een bergingsduur van 8 dagen.

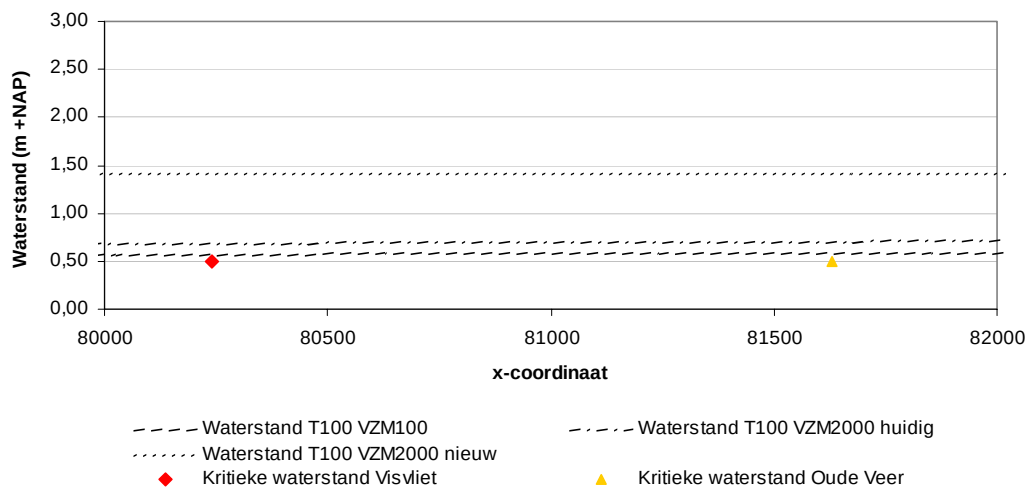
Uit figuur 5.15a valt op te maken dat de kades bij het zuidelijk deel van de singel bij een T100-afvoergolf al overstromen in de huidige situatie. Hieraan verandert niets door inzet van het Volkerak-Zoommeer bij een duur van 2 dagen, de waterstanden in de situatie met en zonder inzet van het Volkerak-Zoommeer zijn gelijk. Wordt de duur van de hoogwaterberging langer, dan migreert het punt waar de waterstand beïnvloed wordt door de berging stroomopwaarts. In figuur 5.15b is te zien dat de waterstand in de singel daardoor wel hoger wordt dan in de huidige situatie. Gezien de potentiële schade die dit veroorzaakt is het belangrijk de bergingsduur die wordt verwacht goed in de gaten te houden.

Op basis van de aannames en inzichten waarop voorliggend onderzoek is gebaseerd kan geconcludeerd worden dat de waterstand in de singel en dus de kans op wateroverlast niet verandert door inzet van het Volkerak-Zoommeer bij afvoeren met een herhalingsduur tot 100 jaar.

5.7.2. Stremming van de vijzelgemalen

In figuren 5.12 tot en met 5.15 is gepresenteerd waar de kritieke waterstand ten opzichte van de keringhoogtes zich voordoet. In paragraaf 3.1.4 is besproken dat binnen dit onderzoek nog naar een tweede oorzaak van wateroverlast in het Mark-Vliet systeem gekeken zal worden. Als de

waterstanden bij de vijzelgemalen Visvliet en Oude Veer de kritieke waterstand van 0.5 m +NAP overschrijdt, kunnen de gemalen niet meer lozen. In figuur 5.16 is ingezoomd op de rivier de Vliet, waarbij is aangegeven waar de twee gemalen staan.



Figuur 5.16: Verhanglijnen in een deel van de Vliet voor verschillende combinaties van afvoer en waterstand op het Volkerak-Zoommeer en de kritieke waterstand voor de vijzelgemalen Visvliet en Oude Veer [21].

De verhanglijn gebaseerd op een T100-afvoergolf en een waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een herhalingstijd van 100 jaar ligt zoals in figuur 5.16 te zien is al boven de kritieke waterstand van beide gemalen. Deze verhanglijn treedt in de huidige en nieuwe situatie met eenzelfde frequentie op, zoals uit tabel 5.1 is af te leiden. Alleen als het Volkerak-Zoommeer ingezet wordt terwijl de afvoer in het Mark-Vliet systeem veel kleiner is dan de afvoer met een herhalingstijd van een jaar treedt er stremming van de vijzelgemalen op bij inzet en niet wanneer het Volkerak-Zoommeer niet ingezet zou worden. Op basis van de analyses van het waterschap en HKV LIJN IN WATER kan echter geconcludeerd worden dat de kans klein is dat inzet van het Volkerak-Zoommeer samenvalt met zulke lage afvoeren. Er kan op basis van de uitgevoerde berekeningen geen kwantitatieve uitspraak gedaan worden, maar er kan wel geconcludeerd worden dat de toename van de kans op indirecte wateroverlast doordat de vijzelgemalen niet meer kunnen lozen zeer klein is. Er zal daarom verder alleen naar de kansverandering door het overstromen van de keringen langs de Mark gekeken worden.

5.8. Conclusies naar aanleiding van de DufLOW-resultaten

Op basis van nieuwe inzichten en de overschrijdingsfrequentielijnen die met Hydra-M zijn berekend, zijn de hoogtes van de waterstandtop op het Volkerak-Zoommeer alsmede de timing van de waterstandtop ten opzichte van de afvoerpiek in het Mark-Vliet systeem veranderd. Hierdoor blijkt dat er bij berging op het Volkerak-Zoommeer lagere waterstanden in het Mark-Vliet systeem verwacht kunnen worden dan waar waterschap Brabantse Delta vanuit ging [16].

Zoals verwacht kon worden, is de invloed van inzet van het Volkerak-Zoommeer voor berging het grootst op de waterstanden in de Dintel en de Vliet, de waterstand kan daar tot meer dan een halve meter toenemen door inzet van het Volkerak-Zoommeer. De waterstanden in de Roosendaalsche Vliet worden gedomineerd door de waterstanden in de Dintel/Mark en niet door de waterstanden in de Steenbergsche Vliet. De windinvloed die in de monding van de Dintel duidelijk

waarneembaar is, beïnvloedt daardoor ook de waterstanden in de Roosendaalsche Vliet, terwijl waterstanden in de Steenbergsche Vliet meerpeilgedomineerd zijn. Ondanks de toename van de waterstanden overstroomden de kades langs de Dintel, de Vliet en het Mark-Vliet kanaal niet. Er wordt aanbevolen om op basis van de in dit onderzoek gevonden kenmerken van het waterstandverloop op het Volkerak-Zoommeer te onderzoeken of er wel wateroverlast optreedt in de uiterwaarden langs de Dintel en Vliet.

Uit de berekeningen is gebleken dat bij inzet van het Volkerak-Zoommeer voor berging de waterstanden in de Mark tot 20 km verder stroomopwaarts beïnvloed worden door de waterstanden bij de mondingen. De grens verschuift van net voorbij Stampersgat tot voorbij Nieuwveer. In de singel van Breda verandert niets. Alleen langs de Mark tussen de aftakking van de Laakse Vaart en Nieuwveer ontstaan situaties van wateroverlast doordat de dijken overstroomden. De additionele wateroverlast die door de stremming van de vijzelgemalen wordt veroorzaakt is verwaarloosbaar. In hoofdstuk 6 zal daarom alleen voor de locaties langs de Mark waar wateroverlast optreedt berekend worden hoe de kans op wateroverlast verandert door inzet van het Volkerak-Zoommeer voor hoogwaterberging.

Een belangrijk aspect is de duur van de berging op het Volkerak-Zoommeer. Deze heeft een grote invloed op de maximale waterstanden die in het Mark-Vliet systeem op kunnen treden. Als de duur toeneemt kunnen tot stroomopwaarts van de singel te Breda extra situaties van wateroverlast ontstaan.



Hoofdstuk 6. Toename van de kans op wateroverlast

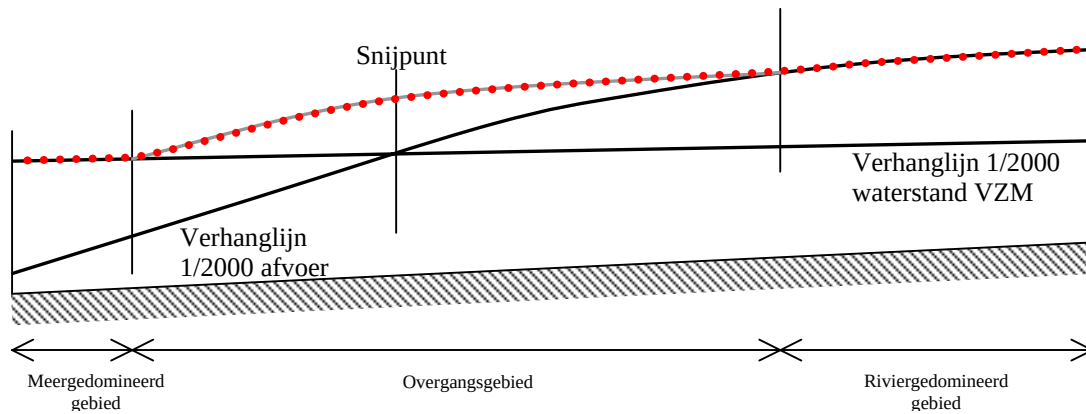
Om de toename van de kans op wateroverlast te kunnen kwantificeren moet een breed bereik aan combinaties van belastingen bekeken worden. De meest nauwkeurige methode om een kans op wateroverlast te bepalen is een probabilistische methode. In paragraaf 3.5.3 is aangegeven dat Hydra-VIJ een goed programma zou zijn om de kans op wateroverlast in het Mark-Vliet systeem te berekenen, maar dat het zeer tijdrovend zou zijn dit programma aan te passen. Daartoe is besloten om in dit onderzoek de IJsseldelta methode te gebruiken om een beeld te vormen van de totale kanstoename. De IJsseldelta methode is zoals de naam zegt ontwikkeld voor de IJsseldelta. Met deze methode kan een verhanglijn met een bepaalde kans op voorkomen berekend worden op een manier die de probabilistische methode benadert. Met de beperkte beschikbare afvoergegevens kunnen met deze methode toch overschrijdingsfrequentielijnen voor de waterstanden in het Mark-Vliet systeem bepaald worden.

Als eerste wordt in paragraaf 6.1 de theorie achter de IJsseldelta methode kort besproken, waarna de toepassing voor het Mark-Vliet systeem wordt behandeld. In paragraaf 6.2 worden de resulterende verhanglijnen gepresenteerd en bediscussieerd. Uit de waterstandberekeningen in hoofdstuk 5 is gebleken dat alleen vanuit de Mark de kans op wateroverlast toeneemt door inzet van het Volkerak-Zoommeer voor waterberging. In paragraaf 6.3 worden voor de knelpunten overschrijdingsfrequentielijnen bepaald, gebaseerd op de berekeningen volgens de IJsseldelta methode. Dit wordt zowel voor de situatie zonder aanwijzing van het Volkerak-Zoommeer als de situatie met aanwijzing van het Volkerak-Zoommeer voor hoogwaterberging gedaan. Uit een vergelijking van de overschrijdingsfrequenties op een bepaalde locatie zal blijken of en in welke mate de kans op wateroverlast daar toeneemt.

6.1. Toepassing van de IJsseldelta methode

De IJsseldelta methode is een deterministische methode met als doel een probabilistisch aanpak te benaderen. In plaats van het totale bereik aan belastingcombinaties die leiden tot een maatgevende situatie mee te nemen, zoals met Hydra-M wordt gedaan, baseert de IJsseldelta methode de verhanglijn bij een bepaalde herhalingstijd op de twee meest dominante belastinggevallen; extreme waterstand op het Volkerak-Zoommeer en extreme afvoer. Om een betere benadering van de probabilistische aanpak te krijgen, wordt bij het berekenen van de verhanglijnen in deze twee dominante belastingcombinaties uitgegaan van stationairiteit. Zowel de waterstand op het Volkerak-Zoommeer als de afvoer in het Mark-Vliet systeem worden stationair verondersteld. Dit resulteert in conservatieve resultaten. Gezien de onzekerheden in de bepaling van de invoer van de IJsseldelta methode, welke voornamelijk afkomstig zijn uit de onzekerheden in de berekening van de overschrijdingsfrequentielijnen van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer, is de conservatieve benadering een wenselijke eigenschap van de IJsseldelta methode in voorliggend onderzoek.

In figuur 6.1 is een schematische weergave van de IJsseldelta methode te zien. Als voorbeeld wordt uitgegaan van een verhanglijn met een herhalingstijd van 2000 jaar.



Figuur 6.1: Verhanglijn met een frequentie van 1/2000 jaar bepaald volgens de IJsseldelta methode [aangepast van 50].

De verhanglijn die ontstaat bij een afvoer van $T = 1/2000$ jaar gecombineerd met een waterstand op het Volkerak-Zoommeer van $T = 1$ jaar bepaalt de waterstand in het 'riviergedomineerde' gebied [50]. In dit gebied van het Mark-Vliet systeem heeft de waterstand op het Volkerak-Zoommeer een verwaarloosbare invloed op de rivierwaterstand. De verhanglijn die ontstaat wanneer een waterstand op het Volkerak-Zoommeer van $T = 1/2000$ jaar optreedt gecombineerd met een afvoer van $T = 1$ jaar bepaalt de waterstand in het 'meergedomineerde' gebied. In dit gebied bepaalt de waterstand op het Volkerak-Zoommeer vrijwel geheel de rivierwaterstand, de afvoer heeft hier een verwaarloosbare invloed [50]. In het zogenaamde overgangsgebied wordt de waterstand bepaald door beide belastinggevallen. In het snijpunt heeft de waterstand een kans op voorkomen die door beide belastinggevallen in gelijke mate wordt beïnvloed [50]. De waterstand die in het snijpunt van de verhanglijnen optreedt, heeft daardoor een herhalingstijd van minstens 1000 jaar ($2 \times 1/2000$ jaar), ervan uitgaand dat dit de enige twee combinaties zijn die tot deze waterstand leiden. Met de IJsseldelta methode is een manier ontwikkeld om van de twee verhanglijnen één verhanglijn te maken die op ieder punt in het systeem een herhalingstijd van 2000 jaar heeft. Dit wordt gedaan door de waterstand in het snijpunt te berekenen die hoort bij een herhalingstijd van 2000 jaar. Tussen de berekende waterstand in het snijpunt en het riviergedomineerde respectievelijk meergedomineerde gebied wordt de waterstand bepaald door middel van interpolatie [50].

In bijlage I is hoofdstuk 2 van het RIZA rapport 'Onderbouwing hydraulische randvoorwaarden 2001 voor de IJsseldelta' [50] opgenomen. Hierin wordt de IJsseldelta methode uitgelegd en onderbouwd. Hierop wordt in dit rapport verder niet ingegaan, de methode wordt met minimale aanpassingen rechtstreeks overgenomen uit voorgenoemd rapport. De aanpassingen worden besproken in deze paragraaf.

Voor het bepalen van de waterstand in het snijpunt worden de formules (1) tot en met (3) gebruikt [50]. Hierbij zijn de formules aangepast, zodat ze voor iedere willekeurige herhalingstijd gebruikt kunnen worden. Uitgangspunt hierbij is dat de methode alleen voor belastinggevallen met een gelijke herhalingstijd ingezet kan worden.

$$F_{tot}(H) = 1.25 \left(10^{-\left(\frac{H-\mu_W}{\sigma_W}\right)} + 10^{-\left(\frac{H-\mu_A}{\sigma_A}\right)} \right) \quad (1)$$

$$F_W(H_S) = 10^{-\left(\frac{H_S - \mu_W}{\sigma_W}\right)} = \frac{1}{T} \Rightarrow \mu_W = H_S + \sigma_W \log\left(\frac{1}{T}\right) \quad (2)$$

$$F_A(H_S) = 10^{-\left(\frac{H_S - \mu_A}{\sigma_A}\right)} = \frac{1}{T} \Rightarrow \mu_A = H_S + \sigma_A \log\left(\frac{1}{T}\right) \quad (3)$$

met $F_{tot}(H)$ = de totale overschrijdingsfrequentie van de waterstand H

H = de beschouwde waterstand

1.25 = toeslagfactor

μ_W = liggingparameter van de frequentieverdeling voor belastinggeval waterstand Volkerak-Zoommeer, welke gelijk is aan de waterstand behorende bij een gemiddelde overschrijdingsfrequentie van eens per jaar

μ_A = liggingparameter van de frequentieverdeling voor belastinggeval afvoer, welke gelijk is aan de waterstand behorende bij een gemiddelde overschrijdingsfrequentie van eens per jaar

σ_W = spreidingsparameter van de frequentieverdeling voor belastinggeval waterstand VZM

σ_A = spreidingsparameter van de frequentieverdeling voor belastinggeval afvoer

$F_W(H_S)$ = de overschrijdingsfrequentie van waterstand H_S voor belastinggeval waterstand VZM

$F_A(H_S)$ = de overschrijdingsfrequentie van waterstand H_S voor belastinggeval afvoer

H_S = de specifieke waterstand in het snijpunt van de T-verhanglijnen

T = de frequentie van de verhanglijnen, bijvoorbeeld 2000

Door de gewenste totale overschrijdingsfrequentie in formule (1) in te vullen, kan de daarbij horende waterstand berekend worden. Als het doel is een verhanglijn met een terugkeertijd van 2000 jaar te berekenen, wordt de waterstand in het snijpunt dus berekend door $F_{tot}(H) = 1/2000$ in te vullen. Vervolgens moeten de liggingparameters en spreidingsparameters berekend worden.

De liggingparameters worden berekend met behulp van de formules (2) en (3) [50]. De spreidingsparameters van de frequentieverdeling, ook wel decimeringhoogtes genoemd, geven de helling van de overschrijdingsfrequentielijn weer, respectievelijk van de waterstanden in de riviermonding voor belastinggeval waterstand Volkerak-Zoommeer (σ_W) en van de waterstanden in de rivier voor belastinggeval afvoer (σ_A). De decimeringhoogtes worden vastgesteld door te bepalen wat het verschil is tussen twee waterstanden waartussen een factor 10 in de overschrijdingsfrequentie zit [50]. Voor de waterstanden in de riviermonding is uitgegaan van de frequentielijn van de Dintelmonding zoals deze is bepaald met Hydra-M. Er zijn twee decimeringhoogtes bepaald, één voor de huidige situatie en één met inzet van het Volkerak-Zoommeer. Deze decimeringhoogtes verschillen doordat de overschrijdingsfrequentielijn van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer verandert door inzet van het Volkerak-Zoommeer. In bijlage I wordt nader besproken hoe de decimeringhoogtes voor de waterstand op het Volkerak-Zoommeer zijn bepaald. Voor de waterstanden in de rivier verschilt de decimeringhoogte van locatie tot locatie [50]. Voor een locatie waar een snijpunt optreedt is de decimeringhoogte bepaald uit het verschil in waterstand op die locatie bij een afvoer met een frequentie van 1/25 respectievelijk 1/250 jaar. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de Duflow berekeningen met een T25-afvoergolf en de hoogwaterlijn met een herhalingsstijd van 250 jaar in [21]. De uitwerking van de statistische parameters zijn in bijlage I opgenomen.

Met de IJsseldelta methode wordt een verhanglijn voor herhalingstijden van 25 jaar, 50 jaar, 100 jaar en 2000 jaar bepaald. Doordat ook een herhalingstijd groter dan de herhalingstijd van inzet van het Volkerak-Zoommeer wordt meegenomen, kan het verschil in de kans op wateroverlast tussen de huidige en nieuwe situatie bepaald worden, zoals zal blijken in paragraaf 6.3. Er is van het Mark-Vliet systeem geen afvoergolf met een herhalingstijd van 2000 jaar beschikbaar. In plaats daarvan wordt gebruik gemaakt van een verhanglijn met een frequentie van 1/2000 jaar uit het rapport 'Hoogwaterlijnen van het Mark-Vliet systeem' [21].

In tabel 6.1 zijn de berekeningen weergegeven die met Duflow zijn uitgevoerd om voor de vier overschrijdingsfrequenties verhanglijnen te bepalen.

Totale overschrijdingsfrequentie	Belastingsgeval afvoer		Belastinggeval waterstand VZM	
	T _{afvoergolf}	T _{waterstand VZM}	T _{afvoergolf}	T _{waterstand VZM}
1/25 jaar	1/25	1/1	1/1	1/25
1/50 jaar	1/50	1/1	1/1	1/50
1/100 jaar	1/100	1/1	1/1	1/100
1/2000 jaar	verhanglijn uit [21]		1/1 1/1	1/2000 huidig 1/2000 nieuw

Tabel 6.1: De combinaties die met Duflow berekend zijn om tot de samengestelde verhanglijn met een overschrijdingsfrequentie van 1/25 jaar, 1/50 jaar, 1/100 jaar, 1/2000 jaar in de huidige situatie en 1/2000 jaar in de situatie met berging.

Zoals in paragraaf 5.2 is besproken, is de T1-afvoergolf niet heel nauwkeurig, maar dit zal de berekende verhanglijn gezien de kleine afvoeren niet significant beïnvloeden. De verhanglijn behorende bij een extreme afvoer van 1/2000 jaar gecombineerd met een lage waterstand op het Volkerak-Zoommeer komt zoals gezegd uit [21]. Bij het bepalen van de verhanglijn met een overschrijdingsfrequentie van 1/2000 jaar in [21] is een waterstand op het Volkerak-Zoommeer aangehouden die niet gelijk is aan de waterstand behorende bij een overschrijdingsfrequentie van eens per jaar zoals de IJsseldelta methode voorschrijft. Er is aangenomen dat deze iets hogere waterstand op het Volkerak-Zoommeer een minieme invloed heeft op de uiteindelijke verhanglijn, doordat de zeer hoge afvoer de verhanglijn domineert.

Een belangrijk verschil ten opzichte van de oorspronkelijke IJsseldelta methode is dat in dit onderzoek niet uitgegaan wordt van een stationaire afvoer. Het aanpassen van de randvoorwaarden in Duflow werd als te tijdrovend beschouwd. Er is aangenomen dat het aanhouden van een stationaire waterstand op het Volkerak-Zoommeer en het gebruik van de toeslagfactor in formule (1) ervoor zorgen dat de onder deze voorwaarden berekende overschrijdingskansen nog steeds een goede benadering zijn van de probabilistische overschrijdingskansen. Doordat de waterstanden op het Volkerak-Zoommeer stationair verhoogd zijn, valt de maximale waterstand op het Volkerak-Zoommeer automatisch samen met de afvoerpiek, wat tot veel hogere waterstanden leidt dan wanneer wordt uitgegaan van een 2-daagse waterstandverhoging na de afvoerpiek. Op basis hiervan wordt er van uitgegaan dat de IJsseldelta methode nog steeds resulteert in conservatieve waterstanden.

De berekeningen zijn twee keer uitgevoerd. In eerste instantie zijn met DufLOW de verhanglijnen met extreme waterstanden op het Volkerak-Zoommeer berekend volgens de uitgangspunten van de IJsseldelta methode, uitgaande van een stationaire waterstand op het Volkerak-Zoommeer. Dit betekent dat ervan uitgegaan wordt dat er gedurende de hoogwatergolf in het Mark-Vliet systeem een constante waterstand op het Volkerak-Zoommeer optreedt met een herhalingstijd van respectievelijk 25, 50, 100 en 2000 jaar. Dit is een bovengrensbenadering; er wordt uitgegaan van een duur van de hoogwaterberging die veel langer is dan in werkelijkheid, waardoor veel meer stuwing optreedt. Zoals gezegd valt hoogwaterberging in deze aanpak automatisch samen met de afvoerpiek. Deze situatie beschrijft het ‘worst case’ scenario dat kan optreden.

Om ook een ondergrens te bepalen is de berekening van de verhanglijnen met extreme waterstanden op het Volkerak-Zoommeer herhaald voor een waterstandverloop van twee dagen op het Volkerak-Zoommeer, zoals in figuur 5.3 in paragraaf 5.3 is weergegeven. In dit scenario heeft alleen de waterstandtop een herhalingstijd van respectievelijk 25, 50, 100 en 2000 jaar. Doordat de waterstand op het Volkerak-Zoommeer slechts twee dagen verhoogd is, treedt veel minder opstuwing op, wat resulteert in lagere waterstanden. Onder deze voorwaarde benaderen de berekende overschrijdingskansen de probabilistische overschrijdingskansen niet goed. De resultaten van deze berekeningen geven echter wel inzicht in de minimale invloed die de waterstand bij de mondingen hebben op de waterstanden in het Mark-Vliet systeem.

6.2. Resulterende verhanglijnen

In bijlage I zijn voor zowel de bovengrensbenadering als de ondergrensbenadering de verhanglijnen zoals deze zijn berekend met DufLOW en de verhanglijn van de 1/2000 afvoergolf met een lage waterstand op het Volkerak-Zoommeer uit [21] weergegeven. In deze bijlage is tevens het bepalen van de snijpunten terug te vinden. Op basis van de berekende waarden voor de decimeringhoogtes, de liggingparameters en de waterstanden in de snijpunten zijn vervolgens met formule (1) de waterstanden in de snijpunten berekend die een herhalingstijd van respectievelijk 25, 50, 100 en 2000 jaar hebben.

Bij de bovengrensbenadering is voor een herhalingstijd van 2000 jaar in de situatie zonder inzet van het Volkerak-Zoommeer geen snijpunt gevonden. In deze situatie is de afvoer in het gehele systeem de dominante belasting, zelfs in de monding wordt de waterstand in het Mark-Vliet systeem vrijwel volledig bepaald door de afvoer. Voor de herhalingstijd van 2000 jaar in de nieuwe situatie, de situatie met inzet, is wel een snijpunt gevonden. Dit snijpunt is in figuur 6.2 (zie pagina 87) weergegeven als punt A. De snijpunten bij herhalingstijden van 25 jaar, 50 jaar en 100 jaar liggen dichtbij elkaar. Hun ligging is in figuur 6.2 (zie pagina 87) aangegeven met punt B.

Tabel 6.2 geeft een overzicht van de berekende parameters en waterstanden voor de bovengrensbenadering. Hierbij zijn de waterstanden voor de verhanglijnen met een herhalingstijd van 25, 50 en 100 jaar voor twee situaties berekend; de huidige situatie zonder inzet en de nieuwe situatie met inzet van het Volkerak-Zoommeer. De reden voor het onderscheid zit, zoals in paragraaf 6.1 al genoemd is, in de verschillende decimeringhoogtes die bij de twee situaties horen.

Scenario	Waterstand snijpunt H_s (m)	Plaats t.o.v. Trambrug (m)	μ_{afvoer} (m)	$\mu_{waterstand\ VZM}$ (m)	σ_{afvoer} (m)	$\sigma_{waterstand\ VZM}$ (m)	Waterstand ter plaats van snijpunt bij frequentie T (m)
$T = 25$ huidig	0,53	29158	0,283	0,336	0,178	0,14	0,60
$T = 25$ nieuw	0,53	29158	0,283	-0,048	0,178	0,42	0,64
$T = 50$ huidig	0,57	28832	0,268	0,335	0,179	0,14	0,64
$T = 50$ nieuw	0,57	28832	0,269	-0,133	0,179	0,42	0,68
$T = 100$ huidig	0,61	29110	0,254	0,331	0,178	0,14	0,67
$T = 100$ nieuw	0,61	29110	0,254	-0,219	0,178	0,42	0,72
$T = 2000$ nieuw	1,51	17387	0,740	0,137	0,199	0,42	1,62

Tabel 6.2: IJsseldelta methode uitgewerkt voor herhalings tijden van 25, 50, 100 en 2000 jaar. Uitgangspunt is een stationaire waterstand op het Volkerak-Zoommeer. In de huidige situatie wordt uitgegaan van de huidige overschrijdingsfrequentielijn voor het Volkerak-Zoommeer, in de nieuwe situatie wordt uitgegaan van de overschrijdingsfrequentielijn die ontstaat wanneer het Volkerak-Zoommeer met een frequentie van 1/1430 jaar ingezet wordt voor hoogwaterberging. Dit veroorzaakt een verschil in de decimeringshoogte en dus in de met de IJsseldelta methode bepaalde waterstand ter plaatse van het snijpunt.

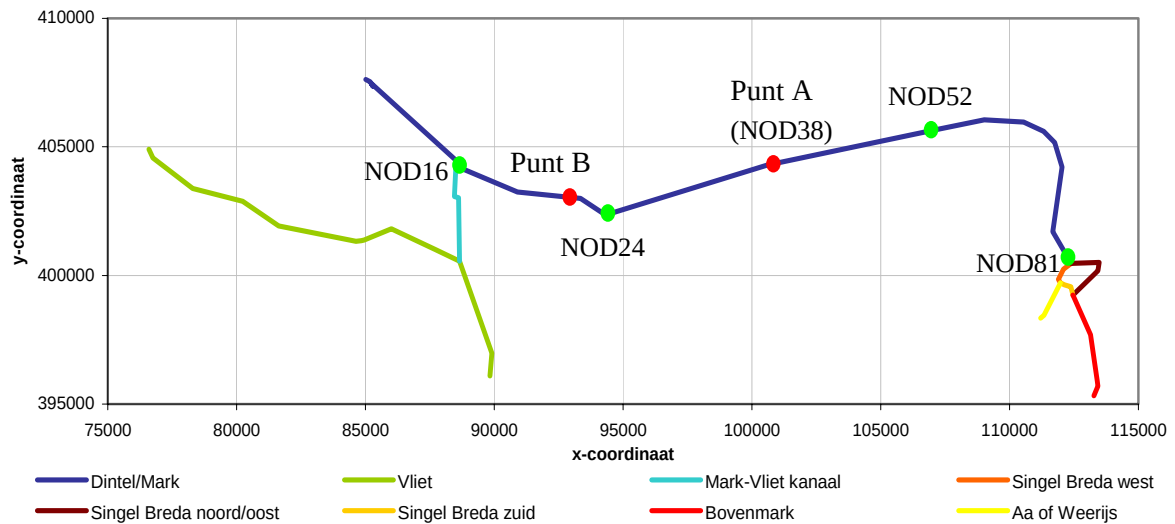
Bij de ondergrensbenadering liggen de snijpunten voor alle herhalings tijden erg dicht in de buurt van de benedenrand van het model (NOD1). Uit de berekeningen blijkt dat de randvoorwaarde in NOD 1 de waterstanden daar sterk beïnvloeden, waardoor de IJsseldelta methode niet goed toepasbaar is. Voor de ondergrensbenaderingen zijn daarom geen gecombineerde verhanglijnen berekend. Er kan echter toch een conclusie getrokken worden aan de hand van de twee losse verhanglijnen, gebaseerd op een T2000-afvoer en een T2000-waterstand op het Volkerak-Zoommeer, die voor zowel de situatie met als zonder berging op het Volkerak-Zoommeer berekend zijn met Duflow. In beide situaties liggen de verhanglijnen van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer over de gehele lengte van het Mark-Vliet systeem onder de verhanglijnen van de afvoer, zoals in bijlage I.2.1 is te zien. Op basis hiervan kan geconcludeerd worden dat wanneer uitgegaan wordt van een waterstandverhoging van twee dagen, de kans op wateroverlast niet verandert voor de waterstanden in het Mark-Vliet systeem.

Voor de berekeningen met als uitgangspunt de bovengrensbenadering zijn door middel van interpolatie de verhanglijnen met een gecombineerde herhalings tijd bepaald. De vier verhanglijnen met een totale herhalings tijd van respectievelijk 25, 50, 100 en 2000 jaar (nieuwe situatie), bepaald volgens de bovengrensbenadering, zijn in figuren 6.3, 6.4, 6.5 en 6.7 weergegeven. In figuur 6.6 is de verhanglijn met een totale herhalings tijd van 2000 jaar in de situatie zonder inzet van het Volkerak-Zoommeer gepresenteerd, deze verhanglijn is gelijk aan de verhanglijn in [21]. Bij de verhanglijnen met een herhalings tijd van 25, 50 en 100 jaar zit een verschil tussen de berekende waterstanden in de huidige en nieuwe situatie doordat de decimeringshoogte verschilt. Omdat het verschil maar klein is, wordt bij de berekening van de kanstoename alleen uitgegaan van de verhanglijn van de nieuwe situatie. Bijlage I bevat de complete berekeningen van de verhanglijnen.

De verhanglijnen die met de IJsseldelta methode worden berekend hebben als uitgangspunt dat de waterstand op het Volkerak-Zoommeer en de afvoer in het Mark-Vliet systeem ongecorrleerd

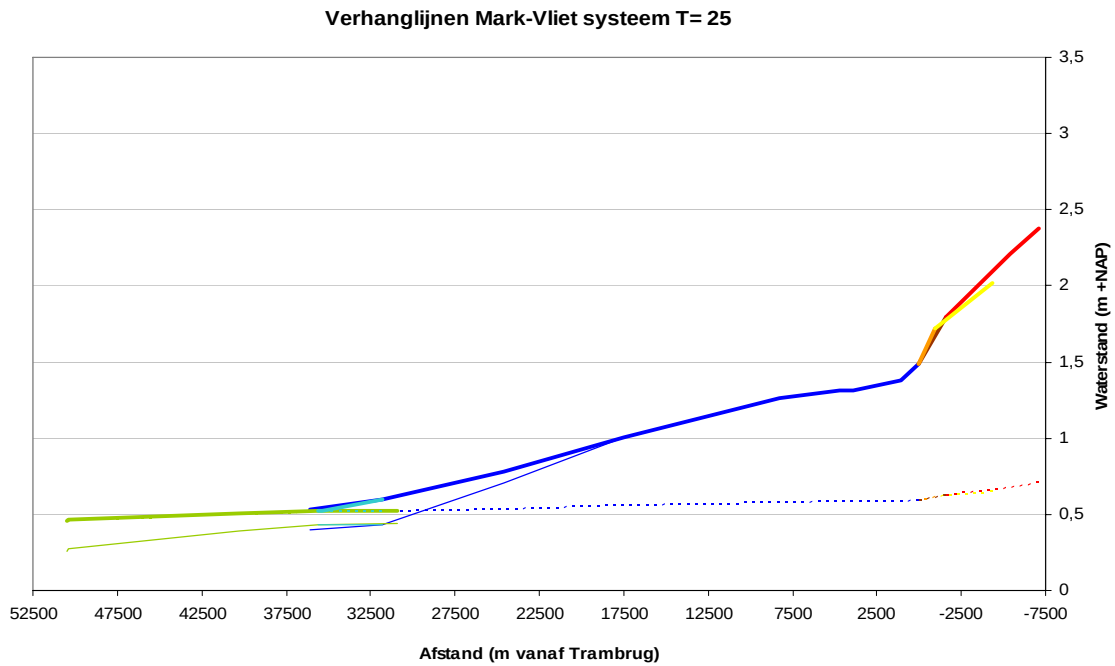
zijn. Dit is in paragraaf 3.5.3 besproken. De verhanglijnen geven een bovengrens van de optredende waterstanden weer.

De verschillende takken in het Mark-Vliet systeem zijn in de figuren 6.3 tot en met 6.7 weergegeven met verschillende kleuren. In figuur 6.2 is het Mark-Vliet systeem afgebeeld in deze kleuren, ter verduidelijking van de verhanglijnen. In deze figuur zijn ook de snijpunten van de verhanglijnen weergegeven, zoals in voorgaande tekst besproken.

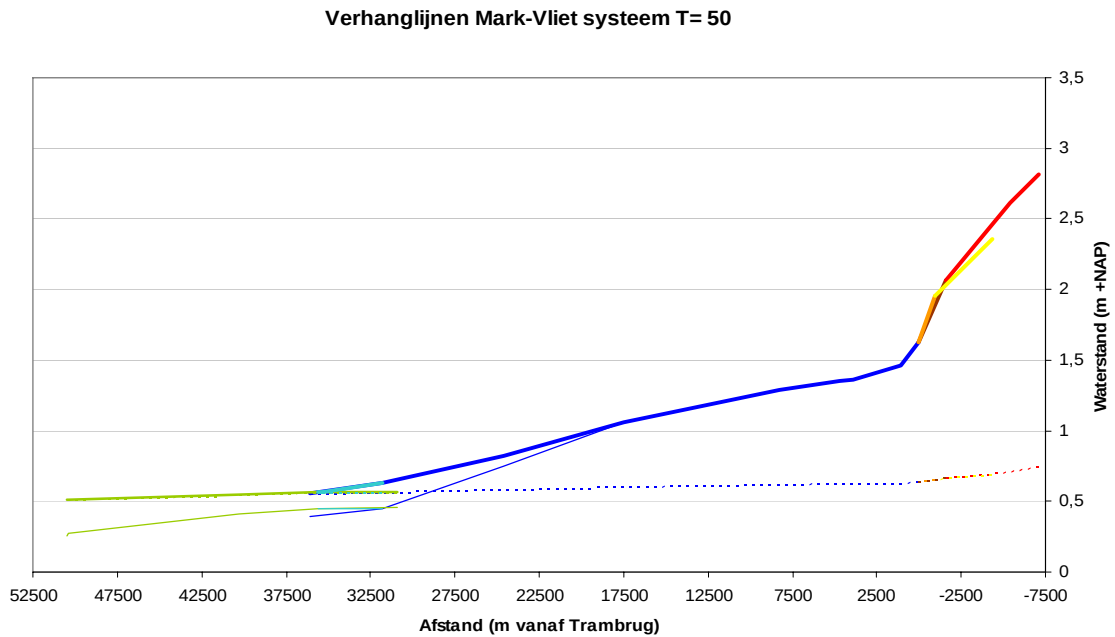


Figuur 6.2: Mark-Vliet systeem zoals geschematiseerd in Dufrow, gescheiden per tak. Punt A geeft de locatie van het snijpunt van de verhanglijnen met een herhalingsjijd van 2000 jaar aan, punt B geeft de locatie van het snijpunt van de verhanglijnen met een herhalingsjijd van 100 jaar weer.

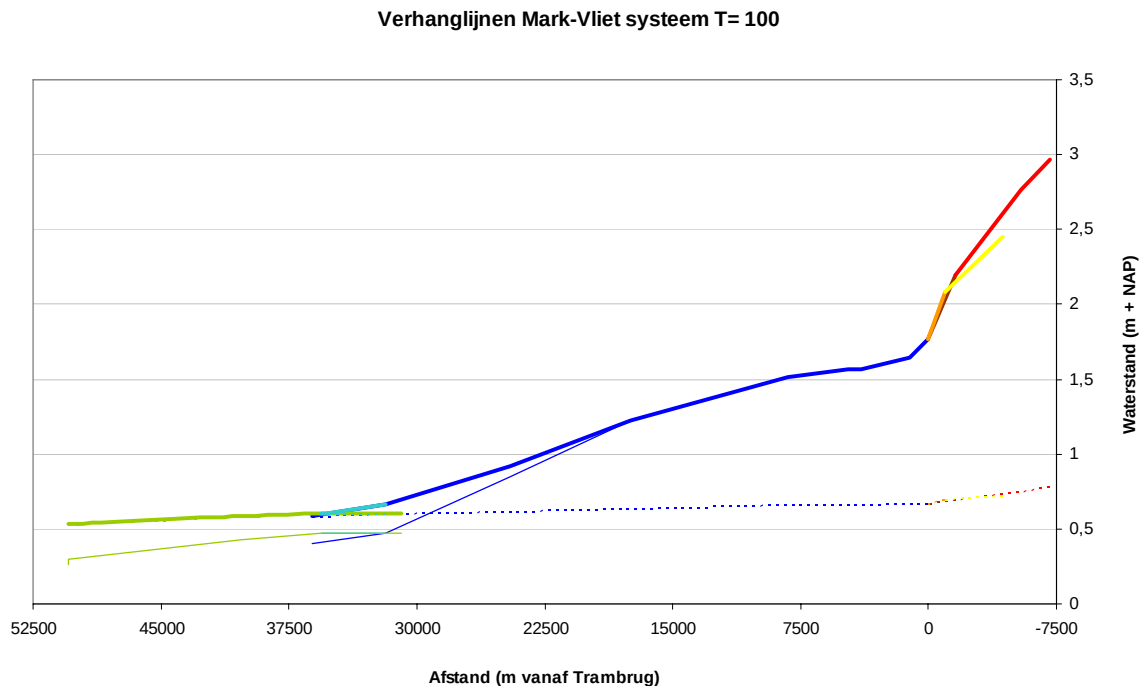
De grafieken in figuren 6.3 tot en met 6.7 zijn in tegenstelling tot de andere grafieken in dit rapport niet uitgezet tegen de werkelijke coördinaten van het Mark-Vliet systeem. Om een duidelijk beeld van de verhanglijnen te geven zijn de waterstanden uitgezet tegen de afstand vanaf Trambrug bij Breda, gemeten over de as van de rivier. Dit geeft een wat vertekend beeld van hoe de verschillende takken van het systeem ten opzichte van elkaar gelegen zijn, maar door de verhanglijnen op deze manier te presenteren kunnen alle takken wel weergegeven worden in één figuur.



Figuur 6.3: Verhanglijn (grafiek bestaande uit de dikke lijnen) met een totale herhalingstijd van 25 jaar zoals deze is bepaald met de IJsseldelta methode. Deze verhanglijn is opgebouwd uit de verhanglijn van de afvoer van T=25 (dunne lijn) en de verhanglijn van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer van T=25 (gestippelde lijn).

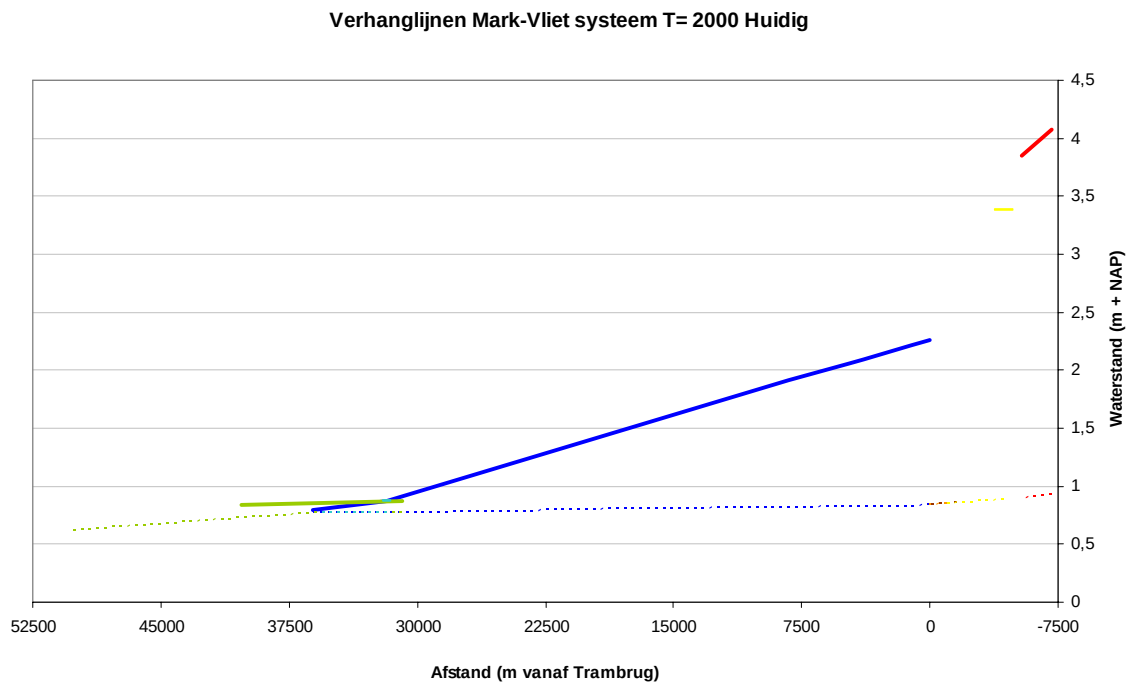


Figuur 6.4: Verhanglijn (grafiek bestaande uit de dikke lijnen) met een totale herhalingstijd van 50 jaar zoals deze is bepaald met de IJsseldelta methode. Deze verhanglijn is opgebouwd uit de verhanglijn van de afvoer van T=50 (dunne lijn) en de verhanglijn van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer van T=50 (gestippelde lijn).

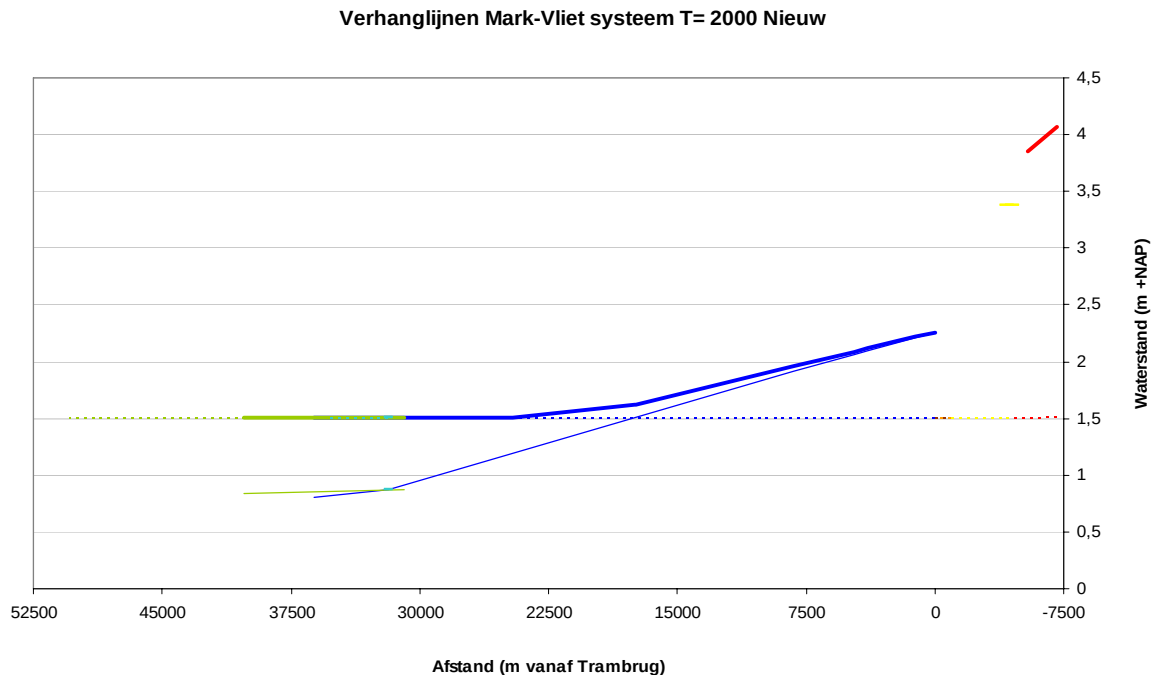


Figuur 6.5: Verhanglijn (grafiek bestaande uit de dikke lijnen) met een totale herhalingstijd van 100 jaar zoals deze is bepaald met de IJsseldelta methode. Deze verhanglijn is opgebouwd uit de verhanglijn van de afvoer van $T=100$ (dunne lijn) en de verhanglijn van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer van $T=100$ (gestippelde lijn).

In de verhanglijn van de afvoer met een herhalingstijd van 2000 jaar uit [21] missen voor een aantal takken gegevens. Hierdoor zijn de verhanglijnen in figuur 6.6 en 6.7 niet helemaal compleet. Gegevens van de singel van Breda missen in het geheel en de gegevens van de Aa of Weerij en het Mark-Vliet kanaal zijn beperkt tot één punt.



Figuur 6.6: In de huidige situatie, zonder hoogwaterberging op het Volkerak-Zoommeer, is de verhanglijn met een totale herhalingstijd van 2000 jaar gelijk aan de verhanglijn van de afvoer van $T=2000$ (dikke lijn) [3]. De verhanglijn van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer van $T=2000$ (gestippelde lijn) blijft continu onder de verhanglijn van de afvoer, deze beïnvloedt de waterstand in het Mark-Vliet systeem niet.



Figuur 6.7: In de nieuwe situatie, wanneer het Volkerak-Zoommeer ingezet kan worden voor hoogwaterberging, wordt de verhanglijn (grafiek bestaande uit de dikke lijnen) met een totale herhalingsstijd van 2000 jaar wel bepaald door de verhanglijn van de afvoer van T=2000 (dunne lijn) [3] en de verhanglijn van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer van T=2000 nieuw (gestippelde lijn) te combineren volgens de IJsseldelta methode.

Zoals al bleek uit de analyse van de Duflow-berekeningen in hoofdstuk 5 zijn de waterstanden in de Dintel, de Vliet en het Mark-Vliet kanaal gedomineerd door de waterstanden op het Volkerak-Zoommeer. In de Vliet bij Roosendaal leidt een verhoogde waterstand op het Volkerak-Zoommeer duidelijk tot hogere waterstanden. Bij een herhalingsstijd van 2000 jaar zal in de nieuwe situatie een waterstand van ongeveer 1.5 m + NAP bereikt worden, ten opzichte van een waterstand van 0.8 m + NAP in de huidige situatie bij omstandigheden met eenzelfde herhalingsstijd.

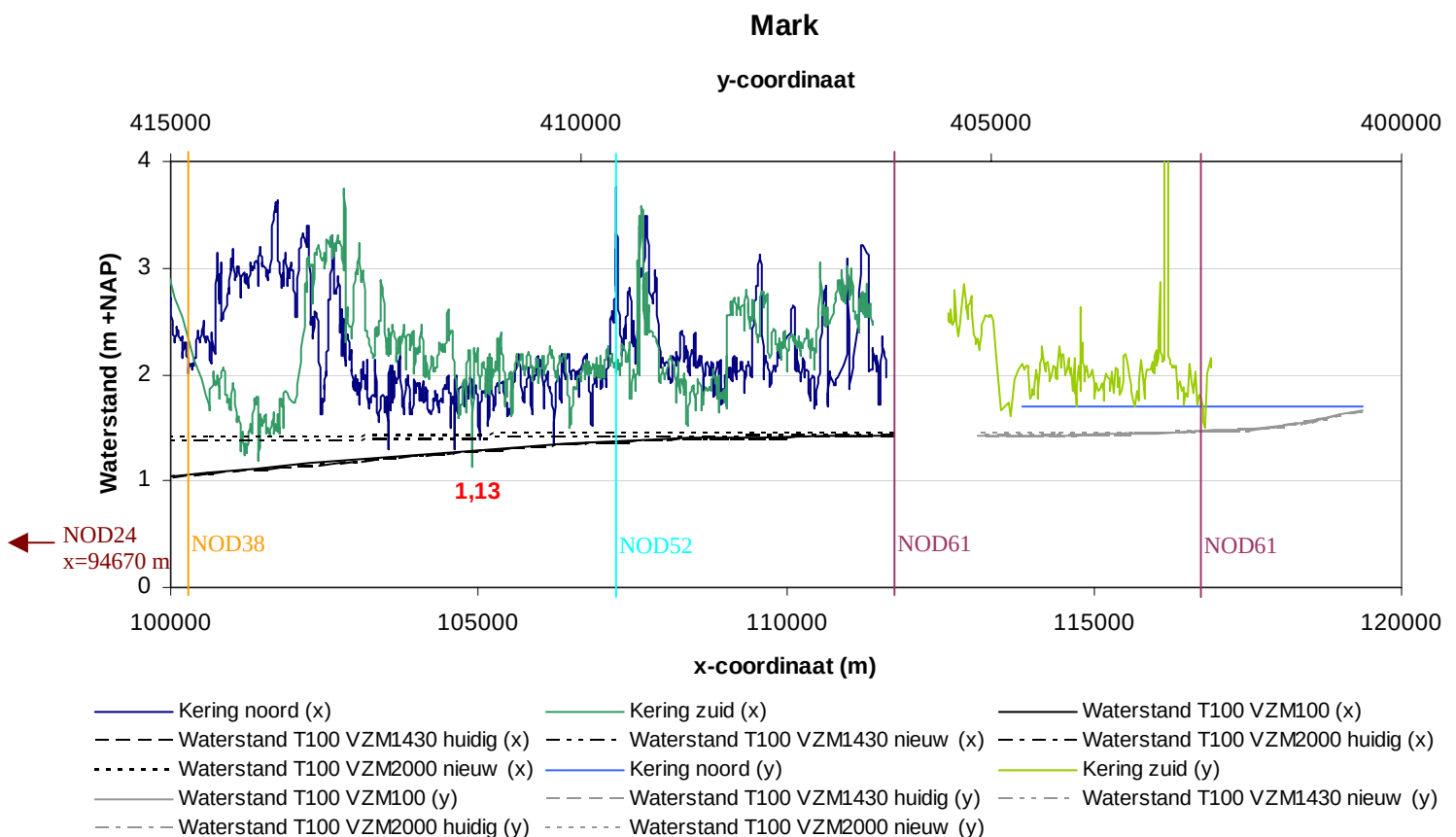
Het overgangsgebied, waar noch de waterstand op het Volkerak-Zoommeer noch de afvoer dominerend zijn, ligt bij de verhanglijnen met frequenties van 1/25, 1/50 en 1/100 jaar in de Mark tussen de splitsing van de Mark en het Mark-Vliet kanaal (node 16), en de haven van Oudenbosch (node 24). Het snijpunt van de verhanglijnen met herhalingsstijd T=2000 bevindt zich veel verder stroomopwaarts. Het overgangsgebied van deze herhalingsstijd ligt in de Mark tussen node 38 (bij de aftakking van de Laakse Vaart) en node 52 (ter hoogte van de bergboezems). In het verschuiven van de snijpunten en daarmee de overgangsgebieden bij het afnemen van de overschrijdingsfrequentie is een trend te zien: de invloed van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer neemt toe naarmate de overschrijdingsfrequentie kleiner wordt. Dit kan worden verklaard uit het feit dat het Mark-Vliet systeem steeds meer ‘overlast’ ondervindt van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer naarmate deze stijgt. Er kan steeds minder water geloosd worden en de opstuwing van water in het Mark-Vliet systeem door hoge waterstanden in de monding zal daardoor steeds verder stroomopwaarts doordringen.

Trambrug lijkt ongeveer de grens te zijn van het overgangsgebied in de meest extreme situatie waarmee gerekend is in dit onderzoek. In de singel en bovenstrooms daarvan is de invloed van de

waterstand op het Volkerak-Zoommeer niet merkbaar. De waterstanden in deze gebieden zijn afvoergedomineerde. De invloed is verder bovenstrooms merkbaar dan in de berekeningen met DufLOW, dit wordt toegeschreven aan de stationair verhoogde waterstand op het Volkerak-Zoommeer in de berekeningen volgens de IJsseldelta methode. Aan de hand van de met de IJsseldelta methode berekende samengestelde verhanglijnen kunnen voor de waterstanden in het Mark-Vliet systeem overschrijdingsfrequentielijnen worden opgesteld. Deze laatste stap in het bepalen van de kanstoename wordt in paragraaf 6.3 behandeld.

6.3. Overschrijdingsfrequentielijnen van het Mark-Vliet systeem

De overschrijdingsfrequenties van de waterstand zijn afhankelijk van de locatie in het Mark-Vliet systeem. In paragraaf 5.7.1 is aangetoond dat alleen in de Mark tussen de aftakking van de Laakse Vaart en Nieuwveer wateroverlast optreedt. Het maken van overschrijdingsfrequentielijnen wordt daarom beperkt tot de Mark. Figuur 6.8 bevat grafieken van de verhanglijnen en de keringen langs Mark over het gedeelte waar wateroverlast op kan treden. In de figuur is ook het laagste punt in de kering weergegeven, wat tevens het punt waar de kans op wateroverlast het grootst is.



Figuur 6.8: Verhanglijnen in een deel van de Mark voor verschillende combinaties van afvoer en waterstand op het Volkerak-Zoommeer. Daarnaast zijn de keringen aan de noordzijde en de zuidzijde van het systeem weergegeven. De keringhoogtes zijn uit GIS verkregen. Met rood is de hoogte (m +NAP) van het laagste punt in de kering aangegeven.

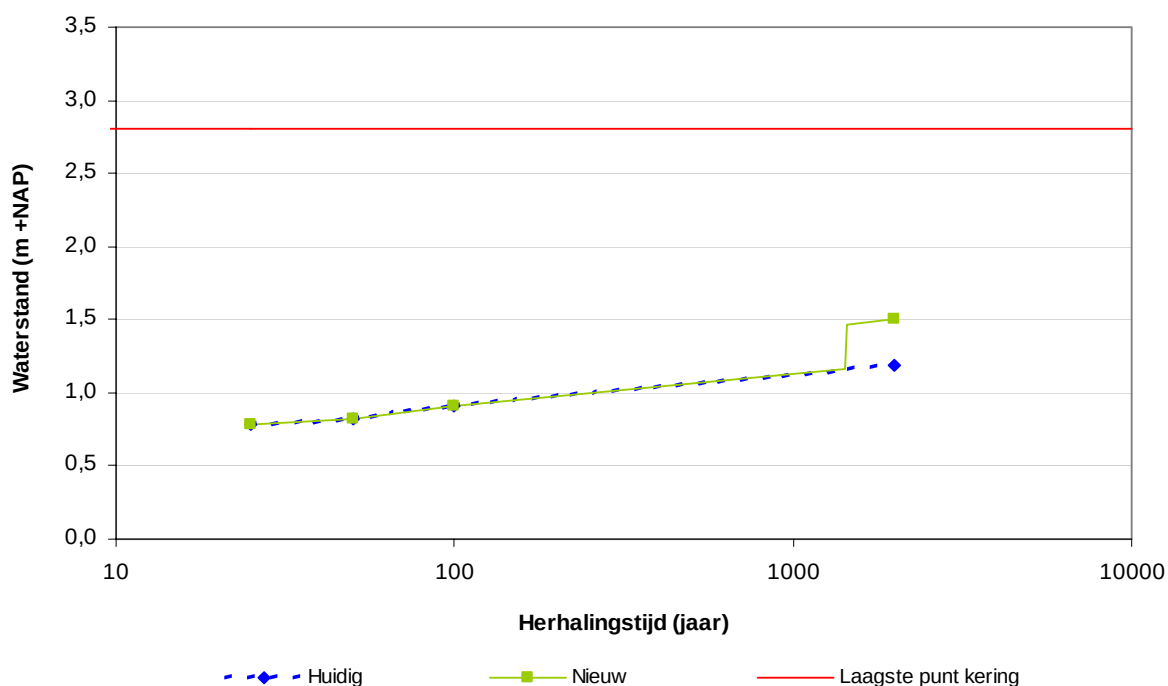
Het laagste punt in de keringen ligt ongeveer bij NOD46, halverwege tussen het toestromingspunt van de Laaksche Vaart (NOD38) en de bergboezems (NOD52). Voor dit punt en voor de locaties ter plaatse van Oudenbosch (NOD24), de Laaksche Vaart (NOD38), Nieuwveer (NOD52) en het

Mark-kanaal (NOD61) zijn overschrijdingsfrequentielijnen bepaald. De locaties zijn weergegeven in figuur 6.8. De overschrijdingsfrequentielijnen voor de huidige situatie zijn bepaald door de waterstanden die op die locatie optreden bij herhalingsstijden van 25, 50, 100 en 2000 jaar optreden uit te zetten tegen de herhalingsstijden en deze punten te verbinden. De gegevens zijn uit de IJsseldelta methode-berekeningen afkomstig. Van de overschrijdingsfrequentielijnen in de situatie waarin het Volkerak-Zoommeer ingezet wordt voor hoogwaterberging is bekend dat zij een vorm aan zullen nemen die vergelijkbaar is met de vorm van de overschrijdingsfrequentielijnen van de waterstanden op het Volkerak-Zoommeer die zijn gepresenteerd in figuren 4.7 tot en met 4.10 in paragraaf 4.2.3; bij een herhalingsstijd van 1430 jaar zal er een plotselinge stijging van de waterstand optreden. Aan de hand van deze informatie en de 4 punten die zijn berekend met de IJsseldelta methode zijn de overschrijdingsfrequentielijnen van de nieuwe situatie bepaald.

De in figuren 6.9 tot en met 6.13 gepresenteerde lijnen zijn benaderingen van de werkelijke overschrijdingsfrequentielijnen. Niet alleen is de methode waarmee ze bepaald zijn een benadering van de werkelijkheid, ze zijn ook op een beperkt aantal punten gebaseerd. De bepaalde frequentielijnen geven echter wel een duidelijk beeld van de veranderingen die optreden in de Mark door inzet van het Volkerak-Zoommeer. In de figuren waarin de overschrijdingsfrequentielijnen zijn weergegeven is ook de laagste keringhoogte op die locatie aangegeven. Vanaf de herhalingsstijd waar de overschrijdingsfrequentielijn de keringhoogte snijdt, zal op die locatie wateroverlast optreden. Wanneer de nieuwe overschrijdingsfrequentielijn de keringhoogte bij een andere herhalingsstijd snijdt dan de huidige overschrijdingsfrequentielijn, dan is de kans op wateroverlast op die locatie veranderd. Uit het verschil tussen de snijpunten van de twee frequentielijnen kan bepaald worden hoe de kans op wateroverlast verandert.

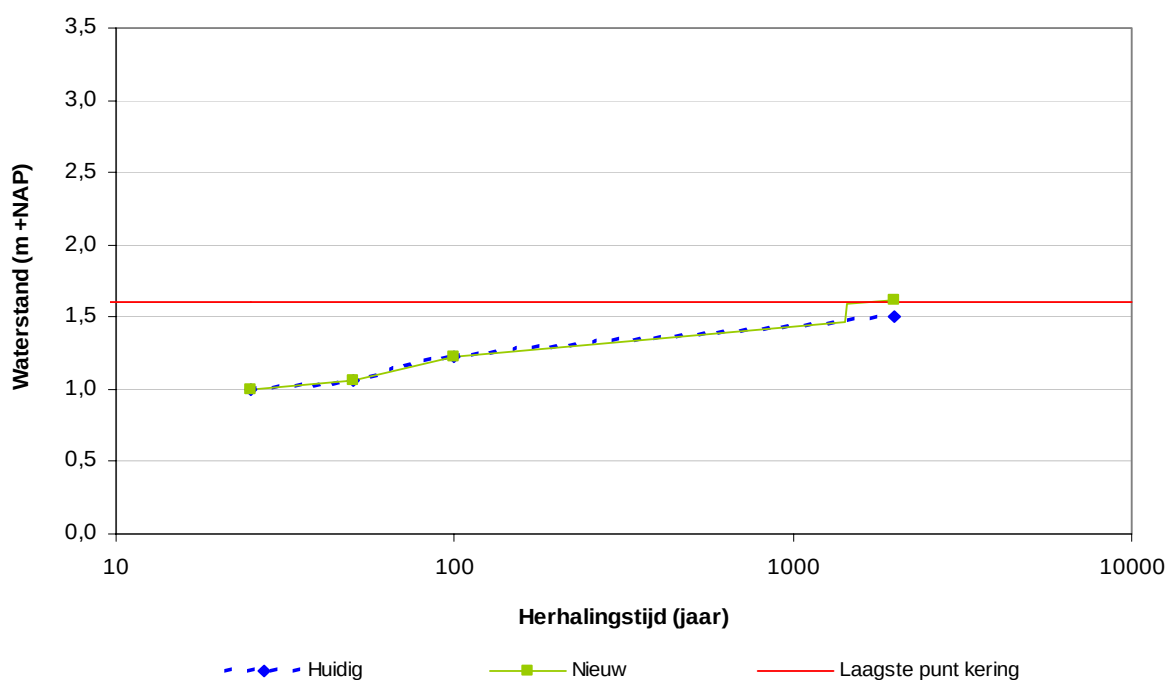
Er is in de berekeningen van de verandering van de kans op wateroverlast uitgegaan van een minder lage 'laagste' keringhoogte dan in figuur 6.8 is gepresenteerd, zoals te zien is in figuur 6.11. De keringhoogtes zijn uit GIS bepaald. Er zitten een aantal uitschieters over een zeer kleine lengte die niet overeenkomen met een logisch verloop van de keringhoogte. Er is in het bepalen van de overschrijdingsfrequenties daarom uitgegaan van een keringhoogte gelijk aan het tiende percentiel van de keringhoogtes over een lengte van een kilometer rond het laagste punt. Hetzelfde geldt voor de andere keringhoogtes die zijn weergegeven in figuren 6.9 tot en met 6.13.

Overschrijdingsfrequentielijnen Oudenbosch



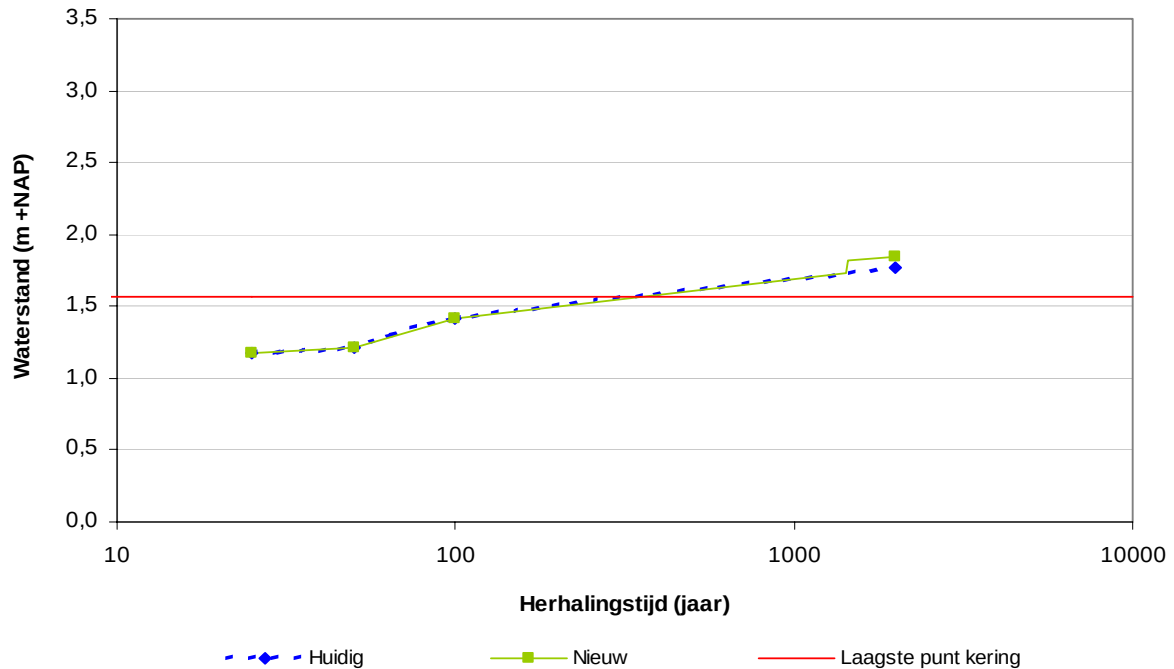
Figuur 6.9: Overschrijdingsfrequentielijnen van de waterstand in de Mark bij Oudenbosch (NOD24) in de situatie zonder hoogwaterberging (huidig) en de situatie waarbij het Volkerak-Zoommeer is aangewezen voor hoogwaterberging (nieuw). Ook is het laagste punt van de boezemkering bij Oudenbosch weergegeven.

Overschrijdingsfrequentielijnen Laaksche Vaart



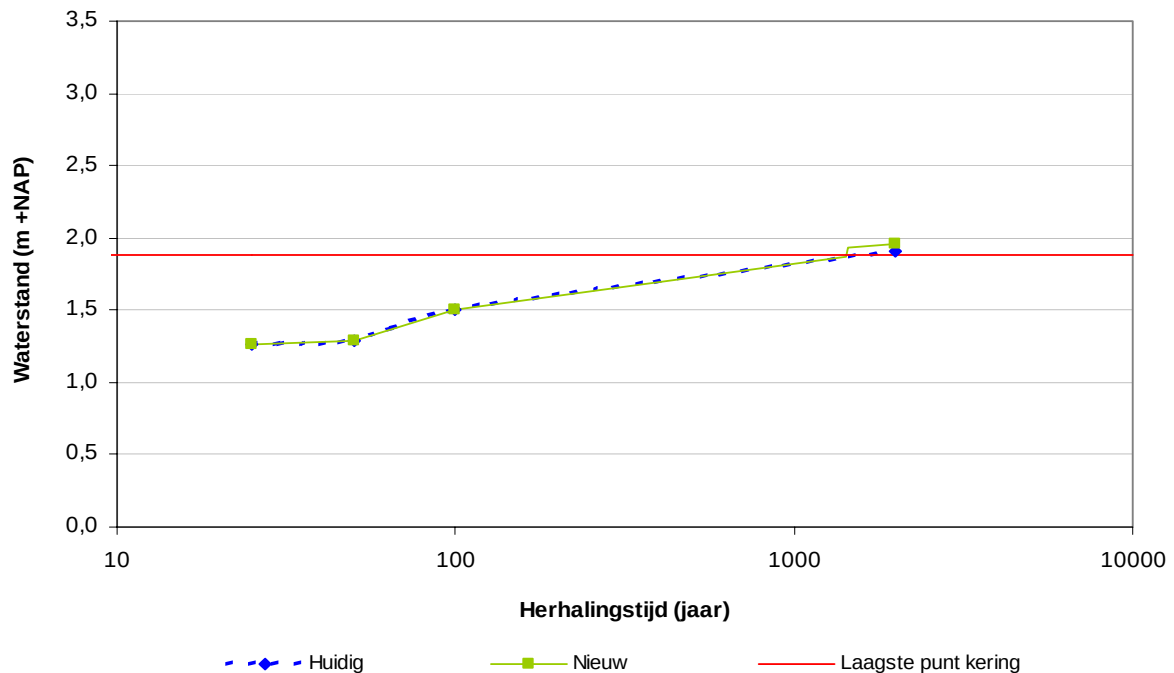
Figuur 6.10: Overschrijdingsfrequentielijnen van de waterstand in de Mark bij de aftakking van de Laaksche Vaart (NOD38) in de situatie zonder hoogwaterberging (huidig) en de situatie waarbij het Volkerak-Zoommeer is aangewezen voor hoogwaterberging (nieuw). Ook is het laagste punt van de boezemkering bij de Laaksche Vaart weergegeven.

Overschrijdingsfrequentielijnen laagste punt kering



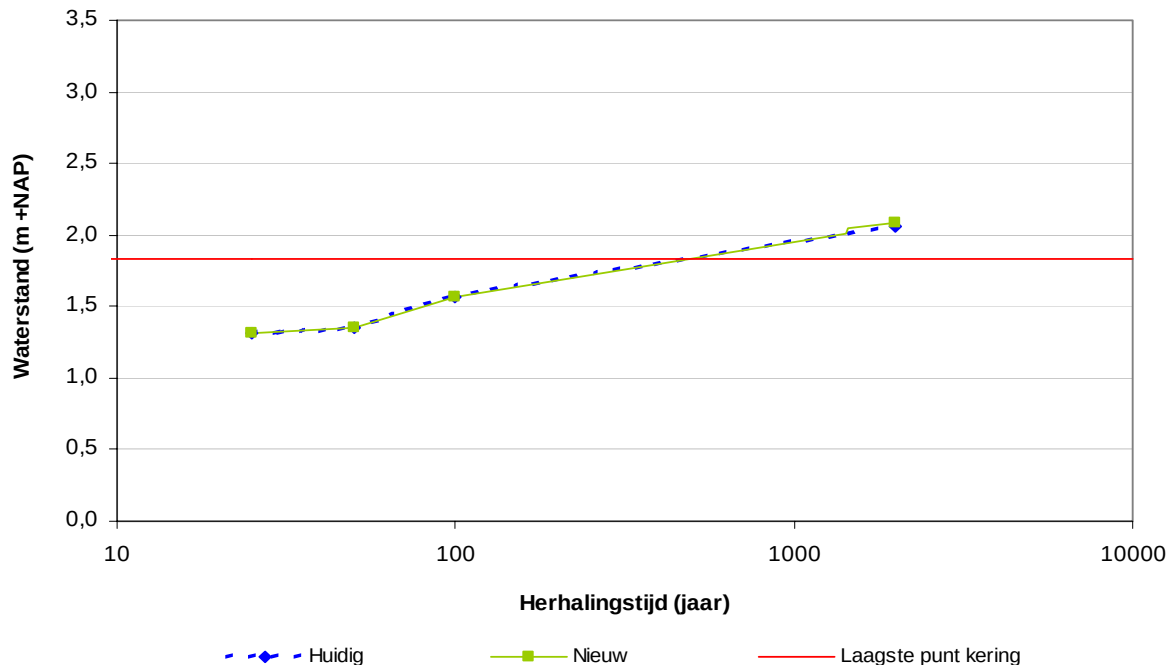
Figuur 6.11: Overschrijdingsfrequentielijnen van de waterstand in de Mark op het punt waar de boezemkering het laagst is in de situatie zonder hoogwaterberging (huidig) en de situatie waarbij het Volkerak-Zoommeer is aangewezen voor hoogwaterberging (nieuw). Ook is het laagste punt van de boezemkering weergegeven.

Overschrijdingsfrequentielijnen Nieuwveer



Figuur 6.12: Overschrijdingsfrequentielijnen van de waterstand in de Mark bij Nieuwveer (NOD52) in de situatie zonder hoogwaterberging (huidig) en de situatie waarbij het Volkerak-Zoommeer is aangewezen voor hoogwaterberging (nieuw). Ook is het laagste punt van de boezemkering bij Nieuwveer weergegeven.

Overschrijdingsfrequentielijnen Mark-kanaal



Figuur 6.13: Overschrijdingsfrequentielijnen van de waterstand in de Mark bij de aftakking van het Mark-kanaal (NOD61) in de situatie zonder hoogwaterberging (huidig) en de situatie waarbij het Volkerak-Zoommeer is aangewezen voor hoogwaterberging (nieuw). Ook is het laagste punt van de boezemkering bij het Mark-kanaal weergegeven.

Figuur 6.8 laat zien dat bij Oudenbosch noch in de huidige noch in de nieuwe situatie wateroverlast optreedt. Bij het laagste punt in de keringen treedt wel wateroverlast op, maar doordat de waterstand de keringhoogte al overschrijdt bij een herhalingstijd kleiner dan 1430 jaar, verandert de kans op wateroverlast daar niet door inzet van het Volkerak-Zoommeer. Op dit punt treedt met een herhalingstijd van ongeveer 800 jaar wateroverlast op. De kans op wateroverlast verandert ook niet ter plaatse van NOD 61, vlakbij de aftakking van het Mark-kanaal. De keringhoogte is daar laag vergeleken met de omgeving (zie de dip rond $y = 117000$ in figuur 6.8). Uit figuur 6.13 is afgelezen dat de waterstand de keringhoogte daar met een herhalingstijd van ongeveer 950 jaar overschrijdt.

Er zijn twee plaatsen waar de kans op wateroverlast wordt beïnvloed door inzet van het Volkerak-Zoommeer. Uit figuur 6.10 is af te lezen dat ter hoogte van de Laaksche Vaart de herhalingstijd van wateroverlast van 2660 jaar naar 1630 jaar verandert. Uit figuur 6.12 is af te lezen dat de in de huidige situatie wateroverlast met een herhalingstijd van 1840 jaar wateroverlast optreedt bij Nieuwveer, ter hoogte van de bergboezems. Door hoogwaterberging op het Volkerak-Zoommeer wordt deze herhalingstijd verlaagd naar 1430 jaar.

Met de IJsseldelta methode zijn indicatieve verhanglijnen bepaald. De IJsseldelta methode benaderend de probabilistische kans en bovendien is deze benadering gebaseerd op overschrijdingsfrequentielijnen van de waterstanden op het Volkerak-Zoommeer waarin een zekere marge van onzekerheid zit. Door de vele aannames kan niet bepaald worden hoe betrouwbaar de precieze uitkomsten zoals deze zijn gepresenteerd in de grafieken in figuren 6.9 tot

en met 6.13 zijn. Er kan wel geconcludeerd worden dat het verschil tussen de huidige en nieuwe situatie die ontstaat door aanwijzing van het Volkerak-Zoommeer voor hoogwaterberging goed wordt weergegeven. Op basis van deze veronderstelling kan geconcludeerd worden dat de invloed van waterberging op het Volkerak-Zoommeer de kans op wateroverlast niet verandert voor het **systeem**. Op het laagste punt in het systeem treedt bij omstandigheden met een herhalingsstijd vanaf ongeveer 800 jaar wateroverlast op, de toename van de kans op wateroverlast die inzet van het Volkerak-Zoommeer veroorzaakt is verwaarloosbaar.

De kans op wateroverlast wordt pas beïnvloed op locaties waar de herhalingsstijd van wateroverlast de inzetfrequentie van het Volkerak-Zoommeer overschrijdt. Dit betekent dat ondanks dat de kans dat er wateroverlast optreedt in het systeem niet verandert, sommige locaties wel een verhoogde kans op wateroverlast ondervinden. Dit is het geval bij locaties rond de aftakking van de Laaksche Vaart en in de buurt van Nieuwveer. Resultaat is dat de gevolgen van wateroverlast wel toenemen door inzet van het Volkerak-Zoommeer voor hoogwaterberging, doordat bij een lagere herhalingsstijd al meer locaties wateroverlast ondervinden dan in de huidige situatie. Het risico van wateroverlast zal als gevolg hiervan dus toenemen.



7. Discussie

In sectie 6.3 is het eindresultaat van voorliggend onderzoek gepresenteerd. Om tot dit eindresultaat te komen zijn een aantal stappen doorlopen waarbij telkens aannames zijn gemaakt die de betrouwbaarheid van de resultaten beïnvloeden. De belangrijkste aannames en de gevolgen daarvan worden in deze sectie op een rijtje gezet. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen onzekerheden in de modellering (sectie 7.1) en de onzekerheden in de gebruikte randvoorwaarden (sectie 7.2). In sectie 7.3 worden de resultaten bediscussieerd, deels op basis van de besproken onzekerheden. In sectie 7.4 wordt nog kort ingegaan op de verwachtingen op de lange termijn. Hoofdstuk 7 wordt afgesloten met een aantal praktische aanbevelingen in sectie 7.5.

7.1. Onzekerheden in de modellering

7.1.1. BretView

De waterstandbeweging op het Volkerak-Zoommeer is berekend met BretView. De keuze voor dit model was gebaseerd op het gewenste detailniveau, de beschikbare meetgegevens en de eenvoud van de invoer. Doordat de beschikbare meetgegevens voor het bepalen van de overschrijdingsfrequentielijnen beperkt waren, had het geen zin een zeer nauwkeurig model te gebruiken. BretView berekent op basis van een simpel model de waterstand uit een combinatie van het meerpeil en windopzet. Uit de validatie van het model bleek dat BretView de windopzet en daarmee de waterstanden significant overschat bij hoger dan gemiddelde windsnelheden. Hier zijn twee belangrijke aannames in BretView voor verantwoordelijk. Ten eerste wordt in BretView uitgegaan van evenwicht situaties, terwijl de windsnelheid en richting zo variabel zijn in de tijd dat de waterstand nooit een evenwicht bereikt. Ten tweede gaat BretView uit van één bodemhoogte in het hele meer. Het Volkerak-Zoommeer heeft een zeer diverse bodemligging variërend van 1 m +NAP tot -24 m +NAP. Het kiezen van één representatieve bodemhoogte waarmee deze bodem kan worden benaderd introduceert een grote onzekerheid in de resultaten. Uit een vergelijking met een ander onderzoek naar de windinvloeden op het Volkerak-Zoommeer [20] is gebleken dat de overschatting van de waterstanden bij een windsnelheid van 25 m/s oploopt tot 20 cm. Bij hogere windsnelheden is de overschatting groter, maar de invloed van deze omstandigheden op de totale kans is klein, aangezien grotere windsnelheden met steeds kleinere frequenties voorkomen. De invloed van deze onzekerheid op de waterstanden in het benedenstroomse deel van het Mark-Vliet systeem is groot wanneer de waterstand bij de Dintelmonding windgedomineerd is. Op de locaties waar in dit onderzoek de toename van de kans op wateroverlast is bepaald, bovenstrooms van Oudenbosch, is de invloed van de onzekerheden op de maximale waterstanden sterk afgenomen.

In BretView kan geen rekening gehouden worden met de invloed van stromingen door het doorvoeren van water door het Volkerak-Zoommeer. Deze stromingen beïnvloeden de verhanglijnen in het Volkerak-Zoommeer, maar er is weinig bekend over hoe de verhanglijnen veroorzaakt door de wind en de verhanglijnen veroorzaakt door de stromingen optellen tot de waterstand. Er kan daarom geen uitspraak gedaan worden over de gevolgen van deze aanname.

7.1.2. Hydra-M

Met Hydra-M zijn overschrijdingsfrequentielijnen voor de waterstand op het Volkerak-Zoommeer ter hoogte van de mondingen van het Mark-Vliet systeem bepaald. Hydra-M is een programma dat is ontwikkeld voor het IJsselmeergebied. Uit dit onderzoek is gebleken dat het programma redelijk goed aan te passen is voor het Volkerak-Zoommeer. De overschrijdingsfrequentielijnen zijn bepaald op basis van de waterstandberekeningen met BretView, de overschatting van de waterstanden in deze modellering werkt door in de overschrijdingsfrequentielijnen van de Dintelmonding, aangezien de waterstanden op deze locatie in situaties zonder hoogwaterberging op het Volkerak-Zoommeer windgedomineerd zijn. Bij de Vlietmonding zijn de waterstanden meerpeilgedomineerd. De overschrijdingsfrequentielijnen van deze locatie zijn veel ongevoeliger voor de onzekerheden in BretView.

In de situatie met aanwijzing van het Volkerak-Zoommeer voor hoogwaterberging zijn de waterstanden in beide mondingen ongevoelig voor de onzekerheden in BretView bij herhalingstijden van 1430 jaar of groter, doordat de waterstand in die situatie meerpeilgedomineerd is. Bij inzet van het Volkerak-Zoommeer is opwaaiing daarom niet van belang. In de overschrijdingsfrequentielijn van de waterstand bij de Dintelmonding van de situatie waarin het Volkerak-Zoommeer is aangewezen voor hoogwaterberging zijn dus alleen de waterstanden met overschrijdingsfrequenties groter dan de inzetfrequentie beïnvloed door opwaaiing.

Naast de fysieke randvoorwaarden zijn ook statistische randvoorwaarden ingevoerd in Hydra-M. Van het windklimaat boven het Volkerak-Zoommeer zijn weinig gegevens beschikbaar. Voor de windstatistiek is daarom uitgegaan van de windstatistiek van het IJsselmeergebied. Zware stormen zijn geen lokale gebeurtenissen [45] en de overheersende windrichting is in zowel het IJsselmeergebied als in de Zeeuwse Delta zuidwest. Het gebruik van de IJsselmeer-windstatistiek benadert de statistiek van windcondities boven het Volkerak-Zoommeer voldoende om een goed beeld te geven van de overschrijdingskansen. De meerpeilstatistiek introduceert echter wel een significante onzekerheid in de uitkomsten van Hydra-M. Deze statistiek is wel gebaseerd op metingen op het Volkerak-Zoommeer, maar het Volkerak-Zoommeer bestaat nog maar 19 jaar in haar huidige vorm en in die periode zijn op slechts twee locaties continue waterstandmetingen gedaan. De meerpeilstatistiek is bepaald aan de hand van een middeling van de waterstanden op deze twee locaties. De bepaalde overschrijdingsfrequentielijnen en overschrijdingsduurlijnen van het meerpeil bevatten hierdoor een onzekerheid die moeilijk kwantificeerbaar is. Deze onzekerheid kan verholpen worden met een uitbreiding van de beschikbare waterstandmetingen van het Volkerak-Zoommeer. De onzekerheden in de meerpeilstatistiek leiden ertoe dat de overschrijdingsfrequentielijnen die van de waterstanden op het Volkerak-Zoommeer zijn berekend slechts als indicatie beschouwd kunnen worden. De vormen van de overschrijdingsfrequentielijnen geven wel een duidelijk beeld van de veranderingen die optreden door hoogwaterberging op het Volkerak-Zoommeer. Voor de berekeningen in de benedenstroomse takken van het Mark-Vliet systeem is het bovendien van belang dat de waterstanden met windinvloed beschouwd worden, aangezien de Dintelmonding windgedomineerd is en de Vlietmonding meerpeilgedomineerd. Door de andere benedenstroomse randvoorwaarde ontstaan in de Steenbergsche Vliet daardoor andere waterstanden dan in de Dintel.

Bij het bepalen van de overschrijdingsfrequentielijnen is uitgegaan van onafhankelijkheid van de windsnelheid en het meerpeil. Door de complexe relatie tussen de twee variabelen, is het zeer lastig een correlatie te berekenen [47]. Deze aanname is overgenomen uit de aanpak voor het IJsselmeergebied.

7.1.3. Duflow

Met het 1D-programma Duflow zijn waterstanden in het Mark-Vliet systeem berekend. De Duflow-modellen van het Mark-Vliet systeem zijn rechtstreeks overgenomen uit voorgaand onderzoek. De modellen zijn geëxtrapoleerd uit een met metingen gekalibreerd en gevalideerd model [21]. Doordat het model rechtstreeks is overgenomen, is weinig bekend over de betrouwbaarheid van het model, bijvoorbeeld over hoe accuraat de afvoergolven zijn die in het systeem als randvoorwaarden zijn gebruikt. De modellen zijn bovendien zeer complex en gedetailleerd, wat gezien het detailniveau van de rekenmethode onnodig is. Dit resulteert in ondoorzichtigheid, waardoor het moeilijk te bepalen is hoe de modellen werken. Aangezien het basismodel is gekalibreerd wordt aangenomen dat de modellen redelijk betrouwbaar zijn.

7.1.4. IJsseldelta methode

Het zou ideaal geweest zijn als het programma Hydra-VIJ gebruikt had kunnen worden om overschrijdingsfrequentielijnen van de waterstanden in het Mark-Vliet systeem te berekenen. Het aanpassen van dit programma voor het Mark-Vliet systeem was echter te veel werk om uit te voeren in dit afstudeeronderzoek. Bovendien heeft een nauwkeurige probabilistische kansberekening geen zin als deze geschiedt op basis van gebrekkige statistiek door de beperkte beschikbaarheid van metingen. Als alternatief is de IJsseldelta methode gebruikt om overschrijdingsfrequentielijnen van de waterstanden in het Mark-Vliet systeem te bepalen. Deze deterministische methode benadert de probabilistische kans. De methode baseert deze probabilistische kans alleen op de twee meest dominerende belastingcombinaties in plaats van het hele spectrum aan combinaties, hiervoor is een veiligheid ingebouwd die een onderschatting ondervangt. Ondanks het feit dat de afvoer niet als stationair wordt beschouwd, is verondersteld dat de IJsseldelta methode nog altijd resulteert in een conservatieve benadering van de waterstanden behorende bij een bepaalde herhalingstijd. Doordat de waterstanden op het Volkerak-Zoommeer stationair verhoogd zijn, valt de ‘waterstandtop’ namelijk samen met de afvoerpiek, wat tot veel hogere waterstanden leidt dan wanneer wordt uitgegaan van de verwachte tweedaagse waterstandverhoging na de afvoerpiek.

Met de huidige mogelijkheden op het gebied van modellering worden resultaten verkregen die een goede indicatie vormen van hoe de kans op wateroverlast maximaal verandert door inzet van het Volkerak-Zoommeer. Zeer nauwkeurige kwantificering van de overschrijdingskansen is alleen mogelijk met betere modellering van zowel het Volkerak-Zoommeer als het Mark-Vliet systeem en vooral het beschikbaar komen van meer meetgegevens, zodat de onzekerheid in de statistiek afneemt. Het beschikbaar komen van meer meetgegevens is op de korte termijn echter niet mogelijk. Het is bovendien maar de vraag of de resultaten van het ontwikkelen van betere modellering van het gebied opwegen tegen de tijd en financiële middelen die dit kost.

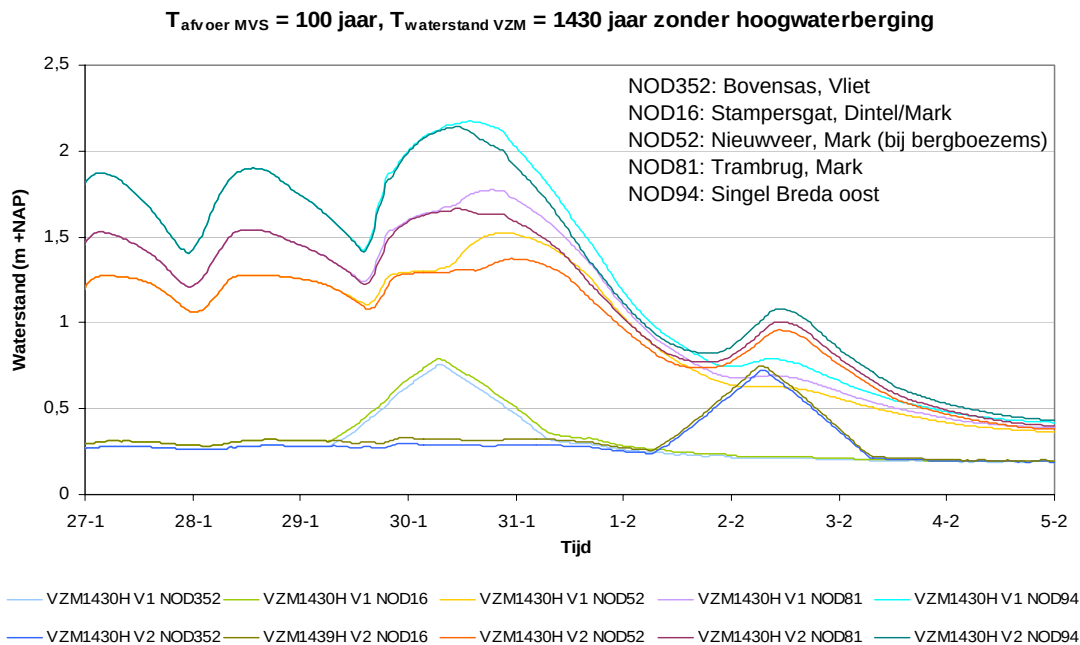
7.2. Onzekerheden in randvoorwaarden

In de berekeningen is uitgegaan van onafhankelijkheid van de afvoer in het Mark-Vliet systeem en het meerpeil op het Volkerak-Zoommeer. Op basis van de beschikbare gegevens is de correlatie tussen beide variabelen namelijk moeilijk vast te stellen. Naast de correlatie, zijn vooral de kenmerken van het waterstandverloop op het Volkerak-Zoommeer en van de afvoer door het Mark-Vliet systeem belangrijke randvoorwaarden. In deze sectie worden achtereenvolgend de invloed van de timing van de twee variabelen, de vorm van de afvoergolf en de duur van de waterstandverhoging besproken.

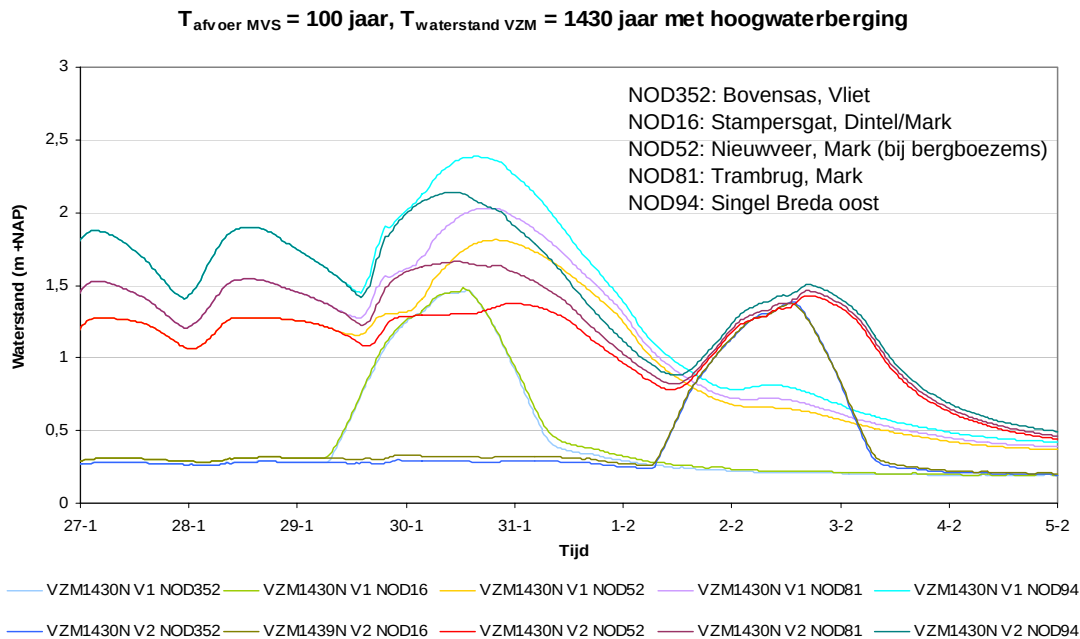
7.2.1. Timing van de waterstandtop Volkerak-Zoommeer ten opzichte van de afvoerpiek

Er is in dit onderzoek voor gekozen om te rekenen met een variant die gebaseerd is op de aanname dat de waterstandpiek op het Volkerak-Zoommeer na de afvoerpiek in het Mark-Vliet systeem komt. Hieraan is in het rapport gerefereerd als variant 2. Deze keuze heeft echter een mogelijk grote invloed op de maximale waterstanden die berekend zijn.

Om de invloed van de timing-aanname te bekijken zijn ook berekeningen gedaan met een variant waarbij de waterstandverhoging op het Volkerak-Zoommeer samenvalt met de afvoerpiek in het Mark-Vliet systeem (variant 1). In figuren 7.1 en 7.2 zijn voor beide varianten de waterstanden weergegeven voor respectievelijk een situatie zonder en met inzet van het Volkerak-Zoommeer voor hoogwaterberging. De timing van de twee varianten is in figuur 5.4, sectie 5.3 terug te vinden.



Figuur 7.1: Waterstanden in het Mark-Vliet systeem zoals berekend met Duflow bij een afvoergolf met een herhalingsdij van 100 jaar en een waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een herhalingsdij van 1430 jaar zonder inzet van het Volkerak-Zoommeer. De waterstanden zijn berekend voor zowel variant 1 als variant 2.



Figuur 7.2: Waterstanden in het Mark-Vliet systeem zoals berekend met Duflow bij een afvoergolf met een herhalingsdij van 100 jaar en een waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een herhalingsdij van 1430 jaar met inzet van het Volkerak-Zoommeer voor hoogwaterberging. De waterstanden zijn berekend voor zowel variant 1 als variant 2.

In variant 2 wordt de maximale waterstand op bovenstroomse locaties alleen bepaald door de afvoer. De verhoogde waterstand op het Volkerak-Zoommeer zorgt voor een extra, maar lagere, piek in de waterstand rond 2 februari. Wanneer uitgegaan zou worden van variant 1, waarbij de verhoogde waterstand op het Volkerak-Zoommeer samenvalt met de hoge waterstanden op het Volkerak-Zoommeer, wordt de maximale waterstand bepaald door zowel de afvoer als de opstuwing door hoge waterstanden op het Volkerak-Zoommeer. Dit resulteert, in tegenstelling tot variant 2, wel in een toename van de maximale waterstanden bovenstrooms bij inzet van het Volkerak-Zoommeer voor berging. Tot in de singel van Breda nemen de waterstanden toe als de pieken samenvallen.

Uit de vergelijking van de resultaten van de waterstandberekeningen van beide varianten kan opgemaakt worden dat wanneer uitgegaan wordt van een andere timing van de twee pieken ten opzichte van elkaar de maximale waterstanden significant veranderen. Wanneer de aanname dat inzet van het Volkerak-Zoommeer na de afvoerpiek komt onjuist blijkt te zijn, kan door uit te gaan van variant 2 de maximale waterstanden in het Mark-Vliet systeem veel lager verondersteld worden dan de waterstanden die werkelijk optreden. Uit de statistische analyse van HKV LIJN IN WATER is naar voren gekomen dat het realistischer is te veronderstellen dat de pieken na elkaar komen, maar dat op grond van de beperkte lengte van de geanalyseerde meetreeksen hierover nog de nodige onzekerheid bestaat [17]. Gezien de grote invloed van de timing van de pieken ten opzichte van elkaar op de maximale waterstanden in het Mark-Vliet systeem en de onzekerheden in de gevonden correlaties, wordt daarom aanbevolen om, zoals HKV LIJN IN WATER in [17] voorstelde, te bepalen of de veronderstelling aangaande de timing gegrond is.

7.2.2. De vorm van de afvoergolf

De vorm van de afvoergolf heeft invloed op de waterstanden in het Mark-Vliet systeem. Er is nu met een vorm gerekend die in 1995 is opgetreden, maar de vorm van de afvoergolf varieert keer op keer. De hoogste afvoerpiek die optreedt heeft een bepaalde herhalingsstijd waarop de afvoergolf is gedimensioneerd. De lagere piek van de afvoer die een dag of twee na de maatgevende piek optreedt in de gebruikte afvoergolf (zie figuur 5.2 in sectie 5.2) valt bij de in dit onderzoek gedefinieerde randvoorwaarden samen met de piek in de waterstand op het Volkerak-Zoommeer. Hierdoor ontstaan hogere waterstanden in het Mark-Vliet systeem dan wanneer er geen piek in de afvoer zou zitten ten tijde van inzet van het Volkerak-Zoommeer. Hoe de waterstanden in het Mark-Vliet systeem uitpakken, is afhankelijk van hoe dominant de invloed van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer is voor de locatie, het tijdstip en de omstandigheden waarnaar gekeken wordt.

Het onderzoeken van de invloed van de vorm van de afvoergolf op de uiteindelijke maximale waterstanden valt aan te bevelen. Door een gemiddelde afvoergolf te bepalen en deze op te schalen in plaats van de momentopname uit 1995 die nu is gebruikt kan de onzekerheid aangaande de invloed van de vorm van de afvoergolf weggenomen worden. Op basis van de resultaten van dit onderzoek wordt echter verwacht dat de verschillen in de maximale waterstanden door het gebruik van een gemiddelde afvoergolf minimaal zijn. Grofweg gezien kunnen de volgende drie situaties voorkomen:

1. Wanneer de waterstanden op het Volkerak-Zoommeer laag zijn, domineert de afvoer de waterstand in het Mark-Vliet systeem. De maximale waterstanden worden dan bepaald door de maatgevende afvoerpiek. De hoogte van de maatgevende afvoerpiek is niet afhankelijk van de vorm van de afvoergolf.
2. Op de benedenstroomse locaties zijn de pieken in de afvoer grotendeels uitgedempt, zoals ook blijkt uit figuur 5.2 in paragraaf 5.2. Wanneer het Volkerak-Zoommeer niet ingezet wordt voor hoogwaterberging kan er een situatie ontstaan waarin de waterstanden op het Volkerak-Zoommeer de waterstanden bij de benedenstroomse locaties domineren. Doordat de afvoerpieken op deze locaties uitgedempt zijn, zal de vorm van de afvoergolf de maximale waterstanden in deze situatie verwaarloosbaar beïnvloeden. Voor de bovenstroomse punten geldt de uitleg voor situatie 1.
3. Bij inzet van het Volkerak-Zoommeer is de waterstand op het Volkerak-Zoommeer dominant over een groot deel van het systeem. Daar waar de waterstand op het Volkerak-Zoommeer dominant is, speelt het wel of niet aanwezig zijn van een extra piekje in afvoer waarschijnlijk een verwaarloosbare rol. Bij de bovenstroomse locaties wordt de maximale waterstand net als in situatie 1 bepaald door de maatgevende afvoerpiek.

Er wordt dus verwacht dat de vorm van de afvoergolf in alle drie de situaties weinig uitmaakt voor de maximale waterstanden op alle locaties in het Mark-Vliet systeem.

7.2.3. Duur van hoogwaterberging

Uit de Dulfow-berekeningen en de berekeningen met de IJsseldelta methode is naar voren gekomen dat de duur van inzet van het Volkerak-Zoommeer zeer bepalend is voor de maximale waterstanden die optreden in het Mark-Vliet systeem en de stroomopwaartse invloed van de waterstanden bij de mondingen. Wanneer de waterstand op het Volkerak-Zoommeer langer dan

twee dagen verhoogd is, is de afwatering van het Mark-Vliet systeem langer gestremd. De opstuwing in het systeem neemt dan toe met als gevolg dat de maximale waterstanden ook toenemen. Bovendien reikt het overgangsgebied tussen het meergedomineerde en riviergedomineerde gebied dan, afhankelijk van de duur, tot in of voorbij de singels van Breda. De waterstanden in de singel nemen bij inzet van het Volkerak-Zoommeer dan wel toe, in tegenstelling tot een situatie waarin een tweedaagse verhoging optreedt. Hierdoor zullen de kans op en de gevolgen van wateroverlast in Breda toenemen. Gezien de schade die in dit dichtbebouwde gebied kan ontstaan, is dit niet wenselijk.

Alhoewel nu wordt uitgegaan van een tweedaagse duur van de hoogwaterberging, kan dit uitgangspunt in de toekomst misschien veranderen. Wanneer dit het geval is, moet rekening gehouden worden met een sterke toename van het risico van wateroverlast in het Mark-Vliet systeem. De waterstanden in het systeem tot voorbij Breda worden dan niet langer gedomineerd door de afvoer, waarop waterschap Brabantse Delta het beschermingsniveau bepaalt, maar door de extreme waterstanden op het Volkerak-Zoommeer.

7.3. Discussie van de resultaten

De invloed van de aannames in de modellering en de daarbij gebruikte randvoorwaarden zijn besproken in sectie 7.1 en 7.2. In deze sectie wordt ingegaan op de karakteristieken van de resultaten zelf.

Ten eerste een opmerking met betrekking tot de waterstanden die zijn berekend met DufLOW. In deze waterstanden is geen golfoploop meegenomen. Er moet rekening gehouden worden met een halve meter waakhogte bovenop de bepaalde waterstanden. De wateroverlastsituaties die in dit onderzoek zijn bepaald zijn alleen gebaseerd op overloop van de keringen.

Het is niet duidelijk hoe inzet van het Volkerak-Zoommeer en de afvoer van het Mark-Vliet systeem gecorreleerd zijn. Er is daarom als uitgangspunt genomen dat de kansverandering zowel voor een ongecorreleerde situatie als een volledig gecorreleerde situatie zou worden bepaald om een onder- en bovengrens te bepalen. Voor de volledig gecorreleerde situatie konden de overschrijdingskansen echter niet berekend worden door gebrek aan data. Het berekenen van de waterstanden in de gecorreleerde situatie zou met DufLOW geen probleem zijn als er een afvoergolf beschikbaar zou zijn met een herhalingsstijd groter dan de herhalingsstijd van inzet van het Volkerak-Zoommeer. Bij herhalingsstijden van 25, 50 en 100 jaar treden er geen verschillen op tussen de huidige en nieuwe situatie, dus met de modellen gebaseerd op deze afvoeren kan niets gezegd worden over de toename van de kans op wateroverlast door aanwijzing van het Volkerak-Zoommeer voor hoogwaterberging. Het is in voorliggend onderzoek daardoor alleen mogelijk om de bovengrens van de overschrijdingskansen, de zogenaamde ‘worst-case’, te berekenen. Dit is gedaan met behulp van de IJsseldelta methode. Wanneer op basis van een uitgebreid correlatie-onderzoek vastgesteld zou worden dat inzet van het Volkerak-Zoommeer voor berging en de afvoer in het Mark-Vliet systeem een sterke correlatie vertonen, dan wordt aanbevolen om de DufLOW-berekeningen uit te breiden met afvoergolven met een herhalingsstijd groter dan 1430 jaar.

In de discussie van de gevolgen van de aannames in BretView in paragraaf 7.1.1 is aangegeven dat de invloed van de onzekerheden in de waterstanden bij de mondingen stroomopwaarts in het Mark-Vliet systeem afneemt. Er wordt daarom aangenomen dat de onzekerheden in de bepalingen van de waterstanden op het Volkerak-Zoommeer geen significante rol spelen in de betrouwbaarheid van de overschrijdingsfrequentielijnen die zijn bepaald voor de waterstanden in de Mark bovenstrooms van Oudenbosch in de huidige situatie. Bij inzet voor hoogwaterberging zijn de onzekerheden in de waterstand op het Volkerak-Zoommeer sowieso verwaarloosbaar, aangezien deze dan meerpeilgedomineerd zijn. Ondanks dat de overschattingen van de waterstanden bij de mondingen door BretView voor de uiteindelijke resultaten klein geacht worden, bevatten de overschrijdingsfrequentielijnen van het Mark-Vliet systeem toch een zekere onzekerheid door de onzekerheden in de Hydra-M berekeningen. Deze zijn in paragraaf 7.1.2 besproken. Onder de huidige omstandigheden, waarin maar weinig meetgegevens beschikbaar zijn, kunnen naar verwachting echter geen significant betrouwbaardere resultaten verkregen worden dan de overschrijdingsfrequentielijnen in figuur 6.9 tot en met 6.13.

De resultaten van dit onderzoek geven ondanks de onzekerheden een goede indicatie van hoe de kans op wateroverlast maximaal verandert op de korte termijn door inzet van het Volkerak-Zoommeer. De resultaten voldoen om te bepalen in welke mate het risico verandert en dus of er sprake is van onevenredige effecten voor waterschap Brabantse Delta.

7.4. Gevolgen voor de lange termijn

In hoofdstuk 1 is dit onderzoek afgebakend. Er is daarbij bepaald dat alleen naar de kansverandering op de korte termijn wordt gekeken. Niet alleen is de kanstoename door inzet van het Volkerak-Zoommeer afhankelijk van hoe de inzetfrequentie op de lange termijn verandert. Ook de veranderingen in het Mark-Vliet systeem door onder andere de verwachte klimaatveranderingen spelen een rol [7]. Booij heeft aangetoond dat het modelleren van de klimaatveranderingen op regionale schaal zeer lastig is [22].

Er speelt nog een vraag die uit dit onderzoek is voortgekomen. Er is in dit onderzoek gekeken naar de invloed van de timing van de waterstandverhoging op het Volkerak-Zoommeer ten opzichte van de afvoerpiek. Maar worden de afvoerpieken in de Rijn en Maas vertraagd door de andere maatregelen binnen 'Ruimte voor de Rivier'? In dat geval kan het in de toekomst gebeuren dat de inzet van het Volkerak-Zoommeer nog later na de afvoerpiek in het Mark-Vliet systeem komt. Dit zou kunnen betekenen dat de maximale waterstanden in het Mark-Vliet systeem in het overgangsgebied tussen de meergedomineerde en riviergedomineerde gedeeltes afnemen.

Gezien de vele onzekerheden op de lange termijn, kan geconcludeerd worden dat er nog veel onderzoek nodig is voordat iets zinnigs gezegd kan worden over de verandering van de kans op wateroverlast vanuit het Mark-Vliet systeem op de lange termijn.

7.5. Aanbevelingen

Tijdens dit onderzoek zijn een aantal punten naar voren gekomen waarover onduidelijkheden bestaan of die verbetering vragen. In deze paragraaf worden een aantal korte praktische aanbevelingen gedaan waarmee deze verbeteringen aangebracht zouden kunnen worden.

1. Er is bepaald dat de onzekerheden aangaande de correlatie tussen Mark-Vliet systeem en inzet van het Volkerak-Zoommeer tot onzekerheden in de resultaten leiden, doordat de aanname van correlatie die in voorliggend onderzoek is gemaakt de maximale waterstanden sterk kan beïnvloeden (zie paragraaf 7.2.1). In navolging van HKV LIJN IN WATER wordt daarom aanbevolen om de correlatieanalyse uit [17] uit te breiden door langere afvoerreeksen voor de Maas, de Rijn en het Mark-Vliet systeem te generen.
2. Er wordt aanbevolen om in de toekomst de verwachting van de hoogwaterbergingsduur in de gaten te houden. Wanneer de duur van de waterstandverhoging op het Volkerak-Zoommeer toeneemt, neemt de opstuwing in het Mark-Vliet systeem ook toe. Dit kan de maximale waterstanden die in het systeem op kunnen treden sterk beïnvloeden. Mocht blijken dat de duur langer dan twee dagen wordt, dan wordt aanbevolen de kansberekening te herhalen uitgaande van hogere maximale waterstanden.

Bovenstaande twee aanbevelingen zijn respectievelijk gebaseerd op een aanname en een uitgangspunt die beide de maximale waterstanden die op kunnen treden in het Mark-Vliet systeem sterk kunnen beïnvloeden. Daarnaast zijn er nog een aantal punten waarvan wordt verwacht dat ze misschien niet zozeer de maximale waterstanden zullen beïnvloeden, maar dat ze toch een significante invloed zou kunnen hebben op de kans op wateroverlast. Vandaar dat het van belang is onderzoek te doen naar deze aspecten.

3. Er is in het onderzoek niet gekeken naar de invloed van de stremming van beken. Er wordt aanbevolen om te onderzoeken bij welke waterstanden de verschillende beken die op het Mark-Vliet systeem afwateren gestremd worden en of dit de kans op wateroverlast zal doen toenemen.
4. Er wordt aanbevolen om een correlatieanalyse uit te voeren voor de relatie tussen de afvoer van het Mark-Vliet systeem en het meerpeil in het Volkerak-Zoommeer. Correlatie tussen de afvoer en het meerpeil kan de overschrijdingskansen van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer beïnvloeden. Er wordt wel verwacht dat de invloed van deze correlatie veel kleiner is dan de invloed van de correlatie tussen inzet van het Volkerak-Zoommeer en de afvoerpiek, aangezien de invloed van de waterstanden bij de mondingen op de stroomopwaartse waterstanden veel kleiner zijn wanneer het Volkerak-Zoommeer niet ingezet wordt.
5. Er wordt aanbevolen om in verdere berekeningen met DufLOW een afvoergolf met een gemiddelde vorm te gebruiken om invloed van de vorm van de afvoergolf op de optredende maximale waterstanden uit te sluiten.

Twee aspecten die van invloed zijn op de kans op wateroverlast, maar die in voorliggend onderzoek niet zijn meegenomen zijn:

6. Waterschap Brabantse Delta geeft aan dat er benedenstrooms langs de Vliet en Dintel in de uiterwaarden wel wateroverlast optreedt bij inzet van het Volkerak-Zoommeer, met schade in onbebouwde en bebouwde gebieden als gevolg [16]. Aangezien de waterstanden in de

benedenstroomse gedeeltes bij inzet lager zullen zijn dan de waterstanden waarop het waterschap bovenstaande uitspraak heeft gebaseerd [16], wordt aanbevolen om te onderzoeken of en zo ja, in welke mate wateroverlast in de uiterwaarden op zal treden door inzet van het Volkerak-Zoommeer.

7. Er zijn een groot aantal factoren die de kans op wateroverlast vanuit het Mark-Vliet systeem beïnvloeden op de lange termijn. Er wordt aanbevolen hier onderzoek naar te doen, zodat bij het ontwerpen van maatregelen rekening gehouden kan worden met de verwachtingen op de lange termijn en er naar duurzame oplossingen voor wateroverlast gezocht kan worden.

Naast bovenstaande aanbevelingen worden nog twee technische aanbevelingen gedaan.

8. Voor onderzoek in de toekomst wordt aanbevolen vaker of constant metingen te verrichten op meer locaties op en langs het Volkerak-Zoommeer en in het Mark-Vliet systeem. Wanneer bijvoorbeeld de kans op wateroverlast op de lange termijn sterk toeneemt doordat de inzetfrequentie toeneemt, is het voor het bepalen van het te verwachte risico van belang nauwkeurigere berekeningen te kunnen maken dan op basis van de nu beschikbare metingen.
9. In de Duflow-modellen van het Mark-Vliet systeem zijn zeer veel details opgenomen. Om de gebruiksvriendelijkheid en de doorzichtigheid van de modellen te verbeteren, wordt aangeraden om de modellering van het Mark-Vliet systeem te versimpelen.



8. Conclusies

Het doel van dit onderzoek was het *‘kwantificeren van de kanstoename van wateroverlast in het stroomgebied van het Mark-Vliet systeem op de korte termijn, welke ontstaat na instelling van de maatregel hoogwaterberging op het Volkerak-Zoommeer’*. In deze conclusies worden de vier centrale vragen die zijn geformuleerd in sectie 1.4 om de doelstelling te halen één voor één beantwoord.

1. Hoe veranderen de overschrijdingsfrequenties van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer ter hoogte van de mondingen van het Mark-Vliet systeem op de korte termijn door instelling van de maatregel hoogwaterberging op het Volkerak-Zoommeer als de invloed van de windopzet op het Volkerak-Zoommeer wordt meegenomen?

Voor de overschrijdingsfrequenties van de waterstand in de Vlietmonding maakt het meenemen van de windopzet weinig verschil, de waterstand bij de Vlietmonding is altijd meerpeilgedomineerd. De overschrijdingsfrequentielijn van de waterstand inclusief windopzet is voor de Dintelmonding wél significant verschillend van de overschrijdingsfrequentielijn waarin was uitgegaan van de gemiddelde waterstand op het Volkerak-Zoommeer. Zowel in de huidige situatie als in de situatie waarin het Volkerak-Zoommeer is aangewezen voor waterberging treden bij gelijke herhalingstijden als gevolg van de opwaaiing hogere waterstanden op. Dit verschil geldt alleen voor omstandigheden met herhalingstijden waarbij geen hoogwaterberging plaatsvindt. De waterstand bij de Dintelmonding is onder gewone omstandigheden windgedomineerd. Doordat bij inzet het meerpeil veel hoger is en de windopzet afneemt bij toenemende waterdieptes, is de waterstand in de Dintelmonding ten tijde van hoogwaterberging meerpeilgedomineerd. Tijdens inzet van het Volkerak-Zoommeer is opwaaiing dus niet van belang.

Doordat het overgrote deel van het debiet van het Mark-Vliet systeem door de Dintel naar het Volkerak-Zoommeer stroomt en de windopzet de waterstand in de Dintelmonding sterk kan beïnvloeden, kan geconcludeerd worden dat het meenemen van de windinvloed op de waterstand belangrijk is voor het bepalen van de waterstanden in het Mark-Vliet systeem. Bovendien is het, ondanks dat de waterstanden in de mondingen tijdens hoogwaterberging niet bepaald worden door opwaaiing, voor het bepalen van het verschil tussen de huidige en de nieuwe situatie zeker van belang om de windopzet op het Volkerak-Zoommeer mee te nemen.

2. Hoe beïnvloedt de waterstand op het Volkerak-Zoommeer de waterstanden in het Mark-Vliet systeem?
 - a. Wat is de invloed van het tijdstip van inzet van het Volkerak-Zoommeer ten opzichte van de afvoerpiek in het Mark-Vliet systeem?
 - b. Hoever stroomopwaarts reikt de invloed van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer bij de mondingen?

Uit een vergelijking met waterstanden die door Arcadis zijn berekend, met dezelfde modellen maar andere randvoorwaarden op het Volkerak-Zoommeer [16], blijkt dat met de nieuwe inzichten die in voorliggend onderzoek zijn vergaard lagere waterstanden in het Mark-Vliet systeem

berekend worden. Er zijn op twee punten nieuwe inzichten verkregen ten opzichte van de berekeningen van Arcadis. Het eerste punt betreft de hoogtes van de waterstandtop. Uit de met Hydra-M berekende nieuwe overschrijdingsfrequentielijnen is gebleken dat de waterstand met een herhalingstijd van 2000 jaar bij inzet 2.1 m +NAP is. Arcadis is uitgegaan van ongeveer 2.4 m +NAP [16]. Het tweede punt betreft de timing van de waterstandtop op het Volkerak-Zoommeer ten opzichte van de afvoerpiek. Arcadis was uitgegaan van het samenvallen van de waterstandtop en de afvoerpiek [16], het worst-case scenario. Doordat in voorliggend onderzoek is aangenomen dat de waterstandtop op het Volkerak-Zoommeer twee dagen na de afvoerpiek optreedt [17], speelt opstuwing een veel minder grote rol dan was berekend door Arcadis.

Zoals verwacht kon worden, hebben hogere waterstanden op het Volkerak-Zoommeer bij de mondingen een verder reikende invloed op de waterstanden in het Mark-Vliet systeem. De invloed van de waterstanden bij de mondingen is in het Mark-Vliet systeem ongeveer 20 km verder stroomopwaarts waarneembaar door inzet van het Volkerak-Zoommeer; tot voorbij Nieuwveer. De waterstanden in de singel van Breda nemen dus niet toe. Dit geldt alleen wanneer de bergingsduur twee dagen is. Mocht de duur van de waterstandverhoging op het Volkerak-Zoommeer toenemen, dan worden de waterstanden tot voorbij Breda hoger door opstuwing.

3. Hoe verandert de kans op wateroverlast in het Mark-Vliet systeem op de korte termijn door inzet van het Volkerak-Zoommeer voor hoogwaterberging?

Langs de Dintel, de Vliet en het Mark-Vliet kanaal nemen de waterstanden sterk toe, maar de boezemkeringen overstroomden niet. Langs de Mark treedt in de huidige situatie al wateroverlast op bij een afvoer met een herhalingstijd van 100 jaar. Bij een afvoer met een herhalingstijd van 100 jaar bij inzet van het Volkerak-Zoommeer voor hoogwaterberging zal tussen Oudenbosch en Terheijden echter op meerdere locaties wateroverlast optreden vanuit de Mark. Voor dit traject zijn overschrijdingsfrequentielijnen van de waterstanden bepaald. De conclusie die op basis van deze lijnen getrokken kan worden is dat de kans op wateroverlast in de huidige situatie over het hele systeem gezien op de korte termijn niet toeneemt. De eerste wateroverlast treedt namelijk al op bij een herhalingstijd kleiner dan de herhalingstijd waarmee het Volkerak-Zoommeer ingezet zal worden. Lokaal neemt de kans op wateroverlast wel toe voor een tweetal gebieden. In de Mark rond de aftakking van de Laaksche Vaart gaat de herhalingstijd van wateroverlast omlaag van ongeveer 2600 jaar naar ongeveer 1600 jaar. In het gebied rond Nieuwveer gaat de herhalingstijd van wateroverlast van ongeveer 1800 jaar naar 1430 jaar. Deze getallen zijn schattingen met een significante mate van onzekerheid, maar ze geven wel een goed beeld van hoe de herhalingstijden van wateroverlast op de genoemde locaties veranderen. De berekende herhalingstijden zijn het resultaat van een conservatieve aanpak en vormen de bovengrens van de te verwachte toename van de kans op wateroverlast. Over de ondergrens kan geen betrouwbare uitspraak gedaan worden.

Naast het overstroomden van de boezemkeringen is in dit onderzoek ook gekeken naar de kans op indirecte wateroverlast door stremming van gemalen. De vele pompgemalen in het gebied zorgen pas voor grote wateroverlast als een maalstop wordt afgekondigd. Wanneer dit gebeurt, zijn op een aantal locaties de keringen al overstroomd. De kans op wateroverlast wordt daardoor niet vergroot door stremming van de pompgemalen. De twee vijzelgemalen die nog aanwezig zijn langs de Vliet kunnen niet meer werken als de waterstand ter plaatse boven de 0.5 m +NAP komt. De conclusie

is dat ook de toename van de kans op wateroverlast bij aanwijzing van het Volkerak-Zoommeer voor berging door stremming van de vijzelgemalen verwaarloosbaar is, aangezien deze gemalen al bij veel kleinere herhalingstijden overstromen.

Met dit onderzoek is voor het eerst een beeld van de totale kansverandering verkregen. De totale kans neemt zoals gezegd niet toe, de kans op wateroverlast wordt lokaal echter wel groter. Het risico van wateroverlast neemt hierdoor toe. Het risico van wateroverlast neemt bovendien toe doordat de waterstanden in het Mark-Vliet systeem door inzet van het Volkerak-Zoommeer hoger worden; in geval van wateroverlast zal er bij hoogwaterberging op het Volkerak-Zoommeer meer water over de keringen stromen.

4. Zijn probabilistische kansberekeningmethodes die zijn ontwikkeld voor de IJsseldelta en het IJsselmeer toepasbaar voor een vergelijkbaar regionaal systeem als het Mark-Vliet systeem?

Hoofddoel van dit onderzoek was te bepalen hoe de kans op wateroverlast in de Mark-Vliet boezem verandert door inzet van het Volkerak-Zoommeer voor hoogwaterberging. Hiervoor zijn een aantal methodes toegepast die ontwikkeld zijn voor het IJsselmeergebied en de IJsseldelta. Uit de stappen die in dit onderzoek zijn doorlopen kan veel geleerd worden over de toepasbaarheid van programma's ontwikkeld voor het IJsselmeer voor andere (regionale) systemen en over de mogelijkheden die er zijn aangaande het berekenen van probabilistische kansen voor regionale systemen. Het rapport verhaalt over hoe Hydra-M en de IJsseldelta methode zijn aangepast voor een regionaal systeem als de Mark en Vliet en de problemen die hierbij zijn overwonnen of ontstaan. Uiteindelijk bleek het mogelijk de methodes te gebruiken voor regionale systemen. In vergelijking met primaire wateren is van deze systemen echter vaak een beperkte hoeveelheid meetgegevens beschikbaar. Deze beperking beïnvloedt de betrouwbaarheid van de methodes voor het Mark-Vliet systeem. De resultaten van dit onderzoek geven ondanks de onzekerheden een goede indicatie van hoe de kans op wateroverlast maximaal verandert door inzet van het Volkerak-Zoommeer. De resultaten voldoen om te bepalen in welke mate het risico verandert en dus of er sprake is van onevenredige effecten voor waterschap Brabantse Delta.

Literatuur en websites

- [1] Planologische Kernbeslissing 'Ruimte voor de Rivier deel 3. Kabinetsstandpunt' (december 2005), http://www.ruimtevoorderivier.nl/index.asp?m_id=301, januari 2006
- [2] N. Slootjes (2005), "Hoogwaterberging Volkerak-Zoommeer. Verdiepingsslag voor Ruimte voor de Rivier." rapport L1586def, Rijkswaterstaat RIZA, Rotterdam
- [3] Figuur rivier:
http://www.kennislink.nl/upload/88665_962_1031140095470-rijn1_klein.jpg, maart 2006
- [4] A. Demon en F. Alberts (2005), 'De langetermijnvisie PKB Ruimte voor de Rivier. Deel 1. Toekomstbeeld en maatregelenpakket voor de lange termijn', RIZA Rijkswaterstaat, rapportnr. 2005.009
- [5] A.J.M. Smits et al. (2000), 'New concepts in river and water management in the Rhine river basin: How to live with the unexpected.' In: A.J.M. Smits, P.H. Nienhuis & R.S.E.W. Leuven (2000), 'New approaches to river management', geschreven naar aanleiding van de internationale conferentie 'New approaches to river management', Backhuys Publishers, Leiden
- [6] M.J.R. Cals en C. van Drimmelen (2000), 'Space for the river in coherence with landscape planning in the Rhine-Meuse delta.' In: Rijkswaterstaat RIZA (2001), 'River restoration in Europe: Practical approaches', proceedings van de 'conference on river restoration', RIZA rapport nr. 2001.023, pag. 189-195
- [7] A.J.M Smits, M.J.R. Cals en H.J. Drost (2000), 'Evolution of European river basin management.' In: Rijkswaterstaat RIZA (2001), 'River restoration in Europe: Practical approaches', proceedings van de 'conference on river restoration', RIZA rapport nr. 2001.023, pag. 41-48
- [8] KNMI, (2006) 'Klimaat in de 21e eeuw: vier scenario's voor Nederland', http://www.knmi.nl/klimaatsscenarios/knmi06/samenvatting/KNMI_NL_LR.pdf
- [9] F. Klijn en H. Duel (2000), 'Nature rehabilitation along Rhine river branches: dilemmas and strategies for the long term.' In: Rijkswaterstaat RIZA (2001), 'River restoration in Europe: Practical approaches', proceedings van de 'conference on river restoration', RIZA rapport nr. 2001.023, pag. 179-188
- [10] Planologische Kernbeslissing 'Ruimte voor de Rivier deel 1. Ontwerp Planologische Kernbeslissing en Nota van Toelichting' (mei 2005), http://www.ruimtevoorderivier.nl/index.asp?m_id=278, januari 2006

- [11] H.T.C. van Stokkom et al. (2005), 'Flood defense in the Netherlands. A new era, a new approach.' International Water Resources Association, Water International, jaargang 30, nummer 1
- [12] Gebiedskaart Volkerak-Zoommeer en omgeving:
<http://4umi.com/image/map/nl/zeeland.jpg>, februari 2006
- [13] Directoraat-generaal Rijkswaterstaat, DWW, RIKZ, RIZA (2001), 'Hydraulische Randvoorwaarden 2001 voor het toetsen van primaire waterkeringen', Delft
- [14] Interne communicatie: Nadine Slootjes, Rijkswaterstaat RIZA, afdeling WRE, Rotterdam, maart 2006
- [15] N. Slootjes en A. Hesselink (2005), 'Tijdelijke berging overtollig rivierwater in het Volkerak-Zoommeer', H₂O, Jrg. 38, nr. 21, pag. 41-43
- [16] Waterschap Brabantse Delta (2004), 'Afwateringssituatie West-Brabant in relatie tot gebruik Volkerak-Zoommeer voor waterberging' Rapport 04I001518
- [17] H.J. Barneveld en R.P. Versteeg (2004), 'Verdiepingsslag Volkerak-Zoommeer, gestremde afvoer West-Brabantse rivieren', HKV LJUN IN WATER, PR884
- [18] Rijkswaterstaat (2000), 'Anders omgaan met water: waterbeleid voor de 21e eeuw' Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, Den Haag
- [19] Projectorganisatie Ruimte voor de Rivier (1 juni 2006), 'Overzicht inspraakreacties: 15. Hinder en Schadevergoeding'
<http://www.ruimtevoorderivier.nl/upload/15.%20Hinder%20en%20schadevergoeding.pdf>, juni 2006
- [20] De Klerck, Lievense en Vroon (1 september 1987), Memo 'Windopzet Volkerak-Zoommeer'. Bron: Rijkswaterstaat directie Zeeland, L. Dekker, april 2006
- [21] Hoogheemraadschap van West-Brabant (1997), 'Hoogwaterlijnen Mark en Vliet', Bn.: HHA0202F.PERM
- [22] M.J. Booij (2002), 'Appropriate modelling of climate change impacts on river flooding', Proefschrift, Universiteit Twente, Enschede
- [23] Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2005), 'Veiligheid Nederland in Kaart, Hoofdrapport onderzoek overstromingsrisico's', Documentnummer DWW-2005-081
- [24] Gebiedskaart West-Brabant:
<http://www.nl.map24.com/>, mei 2006, Map24, copyright 2006 Mapsolute, Tele Atlas, AND

- [25] Kerngegevens van waterschap Brabantse Delta:
<http://www.brabantsedelta.nl/default.asp?id=60>, maart 2006
- [26] G. P. van de Ven (2001), 'Doorbraak in West-Brabant: een halve eeuw waterkeringszorg', uitgegeven in opdracht van het Hoogheemraadschap van West-Brabant, Van Kemenade, Breda
- [27] 'Nationaal Bestuursakkoord Water', uit een samenwerkingsverband tussen de Staat der Nederlanden, de provincies, het Samenwerkingsverband Interprovinciaal Overleg (IPO), de Vereniging van Nederlandse Gemeenten en de Unie van Waterschappen,
<http://www.ipo.nl/documents/nbw.pdf>, januari 2006
- [28] Nederlandse Hydrologische Vereniging (1998), "Water in the Netherlands" NHV-special 3, Van de Rhee, Rotterdam
- [29] Document waterschap Brabantse Delta:
25%20heemraadschap.pdf, <http://www.brabantsedelta.nl/Documenten/PDF/26-49%20heemraadschap.pdf> en <http://www.brabantsedelta.nl/Documenten/PDF/50-68%20heemraadschap.pdf>, februari 2006
- [30] J.G.C. Smits en P.J.A. Baan (2001), 'Een nieuwe Delta, een nieuw Mark-Vlietsysteem. Uitwerking voorkeursvarianten', WL | Delft Hydraulics, Q3105.00
- [31] WL | Delft Hydraulics en HKV LIJN IN WATER, (2002), 'Spankrachtstudie deelrapport 6, Nadere analyse en verdiepingsslagen in het Benedenrivierengebied', Project Q3062, Delft
- [32] Het Mark-Vliet systeem (maart 2006):
[a] <http://www.rewin.nl/uploaded/IMAGES/luchtfoto/Moerdijk/dintelmond%20kopie.jpg>
[b] <http://www.dinteloord.nl/DIN-Vliet-Gorzen.jpg>
[c] http://home-1.concepts.nl/~ginneken/stampersgat/18-2000_0718ak.jpg
[d] http://home.zonnet.nl/fransoomes/ulvenhout_in_beeld/images/beeldhoogwater/markda1.JPG
[e] http://www.baljuwhuis.be/resources/images/Mark_1.jpg
[f] <http://www.brabantsedelta.nl/Images/fotoarchief/groot/archiefDSCN0028.jpg>
[g] <http://projecten.nederlandleeftmetwater.nl/images/steenbergse%20Vliet.jpg>
[h] <http://www.brabantsedelta.nl/images/overig/Rdaalse%20vliet.jpg>
[i] <http://www.open.ou.nl/hon/HSL3627.jpg>
[j] <http://www.brabantsedelta.nl/Images/fotoarchief/groot/archief13436.jpg>
- [33] Waterschap Brabantse Delta over NOFDP project:
<http://www.brabantsedelta.nl/default.asp?id=2397&back=1&Menu=>, februari 2006
- [34] Het Volkerak-Zoommeer (juni 2006):
[a] <http://rijnoptermijn.wldelft.nl/images/full/fig62.jpg>

- [b] <http://www.rws.nl/rws/bwd/home/www/cgi-bin/image.cgi?id=205>
- [c] <http://www.wandelpaden.com/images/EENDR1.JPG>
- [d] <http://www.deltawerken.com/De-Markiezaatskade/57.html>, Bron: Rijkswaterstaat-Adviesdienst Geo-Informatie en ICT (AGI)
- [e] http://www.deltawerken.com/modules/mediagallery/files/15/thumb_880.jpg
- [35] De Deltawerken online: <http://www.deltawerken.com/Comparimenteringswerken/48.html>, maart 2006
- [36] P.H. Roeleveld (2006), 'Voorspuien Volkerak-Zoommeer', stageverslag vanuit de Technische Universiteit Delft, Rijkswaterstaat RIZA, Rotterdam
- [37] Opwaaiing: http://www.ipl.citg.tudelft.nl/lexicon/Definities_O/basis/basis_opwaaiing.htm, mei 2006
- [38] G. Hartsuiker (2005), 'Uitbreiding Waqua-schematisatie Markermeer, Fase 3: afleiden afvoer Eem t.b.v. productiesimulaties' Rapport A1382R3r2 van Alkyon en Meander in opdracht van Rijkswaterstaat RIZA
- [39] L. van Nieuwenhuizen, S. Jacobse en E. Arnold (2005), 'Toepassing Hydra-instrumentarium Zoete Wateren. Aansluiting van hydraulische belastingmodellen op rekenregels' Royal Haskoning in opdracht van Rijkswaterstaat RIZA, ref. 9R6011.A0/R0003/LVN/MJANS/NIJM
- [40] R. Westphal en J. Hartman (1999), 'Achtergronden hydraulische belastingen dijken IJsselmeergebied. Een ontwerpmethodiek' RIZA rapport 99.037, RIZA, Lelystad
- [41] E.H. Chhab en J.M. van Noortwijk (2002), 'Bayesiaanse statistiek voor de analyse van extreme waarden', RIZA rapport 2002.006, Rijkswaterstaat RIZA en HKVLIJN IN WATER, Lelystad
- [42] M. de Wit, L. van Hal en R. van der Veen (2004), 'Samenvallen hoogwaterpieken Maas en zijrivieren', RIZA werkdocument 2004.126x, Rijkswaterstaat RIZA in opdracht van Directie Limburg, Arnhem
- [43] Waterbase, Rijkswaterstaat RIZA en RIKZ, www.waterbase.nl, april 2006:
<http://www.waterbase.nl/index.cfm?page=start.locaties.databeschikbaarheid&taal=nl&loc=CKREEKRND%20CRAKZD%20&wbwns=1%7CWaterhoogte+in+cm+t.o.v.+normaal+amsterdams+peil+in+oppervlaktewater&whichform=1>
- [44] Dagmetingen weercondities Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI), <http://www.knmi.nl/klimatologie/daggegevens/download.cgi>, april 2006

- [45] H.C. van Twuiver en C.P.M. Geerse (1999), 'Achtergronden hydraulische belastingen dijken IJsselmeergebied. Deelrapport 3, Windstatistiek' RIZA rapport 99.040, RIZA, Lelystad
- [46] Waterstandmetingen:
<http://www.waterbase.nl/index.cfm?page=start.locaties&whichform=1&wbwns1=1%7CWaterhoogte+in+cm+t.o.v.+normaal+amsterdams+peil+in+oppervlaktewater&wbthemas=&search=>, april 2006
- [47] E.J. Blaakman, H. Buiteveld, H.C. van Twuiver en A. van Agthoven (1999), 'Achtergronden hydraulische belastingen dijken IJsselmeergebied. Deelrapport 2, Meerpeilstatistiek' RIZA rapport 99.039, RIZA, Lelystad
- [48] Stowa en MX.Systems (2004), DMS Duflow Manual voor versie 3.7
- [49] Stowa en MX.Systems (2006), DMS User's Guide voor versie 3.8
- [50] J. Hartman, H.E. Berger en R. Westphal (2005), 'Onderbouwing hydraulische randvoorwaarden 2001 voor de IJsseldelta', RIZA rapport 2002.018, Rijkswaterstaat RIZA WRV, Lelystad
- [51] Interne communicatie: Piet Polak, Waterschap de Brabantse Delta, Breda, maart 2006
- [52] Interne communicatie: Hans de Waal, Rijkswaterstaat RIZA, afdeling WRV te Lelystad, maart 2006
- [53] Ontwerpkeurkaart van de waterstaatkundige werken in West-Brabant:
<http://www.brabantsedelta.nl/Documenten/PDF/Ontwerpkeurkaart%20Waterstaatskundige%20Werken.pdf>, maart 2006
- [54] Beaufort windschaal:
<http://www.knmi.nl/voorl/verken/bft.html>, maart 2006
- [55] BretView.chm, Help file van het programma BretView, augustus 2005
- [56] Weergegevens van het KNMI:
http://www.knmi.nl/klimatologie/normalen1971-2000/station_pdf.html
 maart 2006
- [57] E.J. Blaakman (1999), 'Achtergronden hydraulische belastingen dijken IJsselmeergebied. Deelrapport 4, Probabilistische rekenmethode', RIZA rapport 99.041, RIZA, Lelystad
- [58] I.B.M. Lammers en R.P. Waterman (2005), 'Gebruikershandleiding Hydra-M versie 1.3', Rapportnr. PR105, HKV LJN IN WATER en Alkyon in opdracht van Rijkswaterstaat RIZA

- [59] Riemann integratie:
<http://nl.wikipedia.org/wiki/Integraalrekening>
maart 2006

- [60] Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut:
Frequentietabellen potentiële windsnelheid
<http://www.knmi.nl/samenw/hydra/cgi-bin/freqtab.cgi>
april 2006

- [61] ‘Wet op de Waterkering’. Wet van 21 december 1995, houdende algemene regels ter verzekering van de beveiliging door waterkeringen tegen overstromingen door het buitenwater en regeling van enkele daarmee verband houdende aangelegenheden, tekst geldend op: 16-01-2006

- [62] Probabilisme (september 2006):
<http://www.vandale.nl/opzoeken/woordenboek/?zoekwoord=probabilisme>

- [63] Hoogwater in de Bovenmark (juli 2006):
<http://www.brabantsedelta.nl/Images/fotoarchief/groot/archief10755.jpg>

Begrippen

Beschermingsniveau	Dit geeft aan tot welke herhalingstijd een buitendijksgebied is beschermd tegen wateroverlast.
Buitenwater	<i>‘Het oppervlaktewater waarvan de waterstand direct invloed ondergaat bij hoge stormvloed, bij hoog opperwater van een van de grote rivieren, bij hoog water van het IJsselmeer, bij hoog water van het Markermeer of bij een combinatie daarvan’ [61]</i>
Herhalingstijd	Een gebeurtenis met een herhalingstijd van 100 jaar heeft statistisch gezien een kans van voorkomen van eens in de 100 jaar. Dit wil niet zeggen dat er 100 jaar tussen twee gebeurtenissen zit, ze kunnen bij wijze van spreken ook 2 keer in een jaar optreden. Ook terugkeertijd genoemd. $\text{Herhalingstijd} = \frac{1}{\text{overschrijdingsfrequentie}}$
Kantelpunt windopzet	De waterstand kantelt onder invloed van de wind rond het zwaartepunt van de watermassa. In de windrichting waaruit de wind komt treedt afwaaiing op, de waterstand is daar lager dan het meerpeil. In de windrichting waar de wind naartoe waait treedt opwaaiing op, de waterstand daar is hoger dan het meerpeil.
Meerpeil	Het meerpeil wordt bepaald door de stilstaande inhoud van een meer. Het is dus de gemiddelde waterstand, zonder wind (en golf) invloeden. Het meerpeil is over het hele meer gelijk.
MHW	Maatgevend HoogWaterstand. Deze worden per locatie bepaald uit de MHW-afvoer, de afvoer met een herhalingstijd van 1/1250 (bovenrivieren), 1/2000 (overgangsgebieden) of 1/10000 jaar (benedenrivieren).
Nationaal Bestuursakkoord Water (NBW)	In het NBW zijn wateroverlastnormen voor regionale systemen vastgelegd. Deze zijn afhankelijk van de functie van het gebied [27].
Oploophoogte	Een dijk kan niet alleen overstroomd doordat de waterstand de dijkhoogte overschrijdt (overloop). Door windopzet en golven komt bovenop de waterstand een bepaalde oploophoogte die moet worden meegenomen in het ontwerp van dijken.
Overschrijdingsfrequentie(lijn)	Iedere waterstand die in een systeem kan optreden heeft een bepaalde kans van voorkomen die wordt uitgedrukt in een bepaalde frequentie (zoveel maal/jaar) waarmee deze waterstand wordt overschreden. De overschrijdingsfrequentielijn geeft voor alle mogelijk optredende waterstanden de kans dat deze waterstanden worden overschreden. $\text{Overschrijdingsfrequentie} = \frac{1}{\text{herhalingstijd}}$

Primaire waterkeringen	<i>‘Een waterkering, die beveiliging biedt tegen overstroming doordat deze ofwel behoort tot het stelsel dat een dijkkringgebied - al dan niet met hoge gronden omsluit, ofwel vóór een dijkkringgebied is gelegen’ [61]:</i> Categorie a, primaire keringen behorende tot een dijkkring en direct buitenwater keren; Categorie b, primaire keringen die voor dijkkringgebieden liggen en direct buitenwater keren; Categorie c, primaire keringen die niet direct buitenwater keren; Categorie d, primaire keringen in categorie a, b of c gelegen buiten de landsgrenzen.
Probabilisme, Probabilistische kans op wateroverlast	Probabilisme wordt wel de “<i>waarschijnlijkheidsleer</i>” [62] genoemd. De probabilistische kans op wateroverlast is een kans die is opgebouwd uit alle waarschijnlijke combinaties van omstandigheden die kunnen leiden tot wateroverlast.
Risico	Kans x gevolg (€)
Taakstelling	Het verschil tussen het vastgestelde toetspeil en de MHW behorende bij een debiet van 16.000 m³/s op de Rijn en 3.800 m³/s op de Maas. De taakstellingen voor alle waterkeringen in Nederland zijn vastgelegd in het <i>Hydraulische Randvoorwaardenboek 2001</i> [13].
Toetspeil	De maximale waterstand die een waterkering kan keren zonder te falen. De toetspeilen voor alle waterkeringen in Nederland zijn vastgelegd in het <i>Hydraulische Randvoorwaardenboek 2001</i> [13].
Verhanglijn	Lijn die de waterstanden langs de longitudinale as van een rivier weergeeft.
Wateroverlast	Wateroverlast is gedefinieerd als het overschrijden van een bepaalde kritieke waterstand waardoor materiele problemen ontstaan. Deze problemen kunnen verschillende oorzaken hebben. Zo kan in de boezem schade ontstaan doordat water over de keringen stroomt. Ook kan indirecte wateroverlast voorkomen, bijvoorbeeld door stremming van de gemalen en beken.
Windverhang	Scheefstand van het wateroppervlak op een meer als gevolg van de invloed van de wind.



BIJLAGEN

BIJLAGE A. WATERKERINGEN VAN WEST-BRABANT IN KAART	V
BIJLAGE B. GEMALEN IN DE MARK-VLIET BOEZEM	VII
BIJLAGE C. LANGSDOORSNEDEN MARK-VLIET SYSTEEM	IX
BIJLAGE D. WINDOPZET.....	XIII
BIJLAGE E. BRETVIEW	XV
E.1. DE MODELLERING	XV
<i>E.1.1. Van 2D naar 1D.....</i>	<i>XV</i>
<i>E.1.2. Aannames.....</i>	<i>XVI</i>
<i>E.1.3. De impulsbalans</i>	<i>XVI</i>
<i>E.1.4. De wet van massabehoud.....</i>	<i>XVII</i>
<i>E.1.5. Wel of geen droogval</i>	<i>XVIII</i>
E.2. BEREKENINGEN IN BRETVIEW	XIX
E.3. INVOER IN BRETVIEW VOOR HET VOLKERAK-ZOOMMEER	XIX
<i>E.3.1. Randvoorwaarden.....</i>	<i>XIX</i>
<i>E.3.2. Gebiedsinformatie.....</i>	<i>XXI</i>
E.4. BEPERKINGEN VAN BRETVIEW	XXIV
<i>E.4.1. Invloed van een variërende bodemhoogte</i>	<i>XXIV</i>
<i>E.4.2. Invloed van een variërende wind</i>	<i>XXIV</i>
<i>E.4.3. Invloed van stromingen.....</i>	<i>XXV</i>
<i>E.4.4. Gesloten, brede watersystemen.....</i>	<i>XXV</i>
E.5. VALIDATIE	XXV
BIJLAGE F. HYDRA-M	XXIX
F.1. DE HYDRA-FAMILIE	XXIX
F.2. DOEL EN WERKWIJZE VAN HYDRA-M.....	XXIX
F.3. DE ONTWERPMETHODIEK VOOR HET IJsselmeergebied	XXXI
<i>F.3.1. De meerpeilstatistiek.....</i>	<i>XXXII</i>
<i>F.3.2. De windstatistiek.....</i>	<i>XXXIII</i>
<i>F.3.3. De probabilistische rekenmethode.....</i>	<i>XXXIV</i>
<i>F.3.4. Modelling van de waterbeweging.....</i>	<i>XXXVIII</i>
F.4. HYDRA-M TOEGEPAST VOOR HET VOLKERAK-ZOOMMEER	XXXIX
<i>F.4.1. Fysieke gegevens.....</i>	<i>XXXIX</i>
<i>F.4.2. Statistische windgegevens</i>	<i>XL</i>
<i>F.4.3. Statistische meerpeilgegevens.....</i>	<i>XLI</i>

BIJLAGE G. INVOER HYDRA-M..... XLIX

G.1. OVERSCHRIJDINGSFREQUENTIELIJN VAN HET MEERPEIL	XLIX
G.2. OVERSCHRIJDINGSDUURLIJNEN VAN HET MEERPEIL.....	LVIII
G.3. WINTERHALFJAARKANSEN VAN DE WINDSNELHEID	LXVII
G.4. DAGKANSEN VAN DE WINDSNELHEID	LXVIII

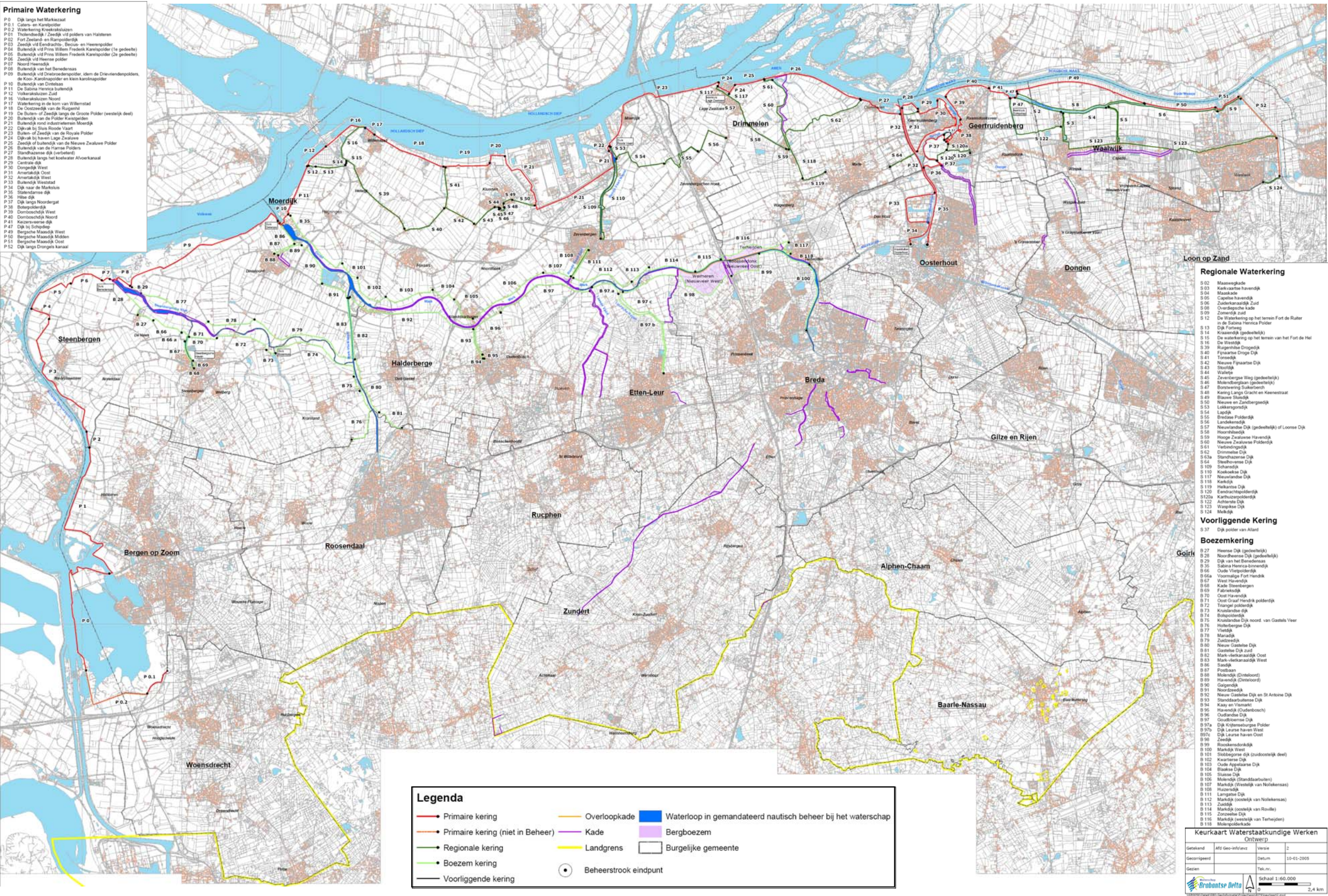
BIJLAGE H. DUFLOW LXIX

H.1. VERGELIJKING RESULTATEN DUFLOW MET EERDER ONDERZOEK.....	LXIX
H.2. DUFLOW-NETWERK VAN HET MARK-VLIET SYSTEEM.....	LXX
H.3. RANDVOORWAARDEN VAN VOLKERAK-ZOOMMEER IN DUFLOW	LXX

BIJLAGE I. IJSSELDELTA METHODE..... LXXV

I.1. THEORIE IJSSELDELTA METHODE	LXXV
I.2. BEREKENINGEN IJSSELDELTA METHODE	LXXXI
<i>I.2.1. Verhanglijnen.....</i>	<i>LXXXI</i>
<i>I.2.2. Decimeringhoogtes</i>	<i>XC</i>
<i>I.2.3. Liggingparameters.....</i>	<i>XCII</i>
<i>I.2.4. Bepaling van de totale verhanglijn</i>	<i>XCIV</i>

Bijlage A. Waterkeringen van West-Brabant in kaart



Figuur A.1: Ontwerpkeurkaart van de waterstaatkundige werken in beheer van het waterschap Brabantse Delta [53]

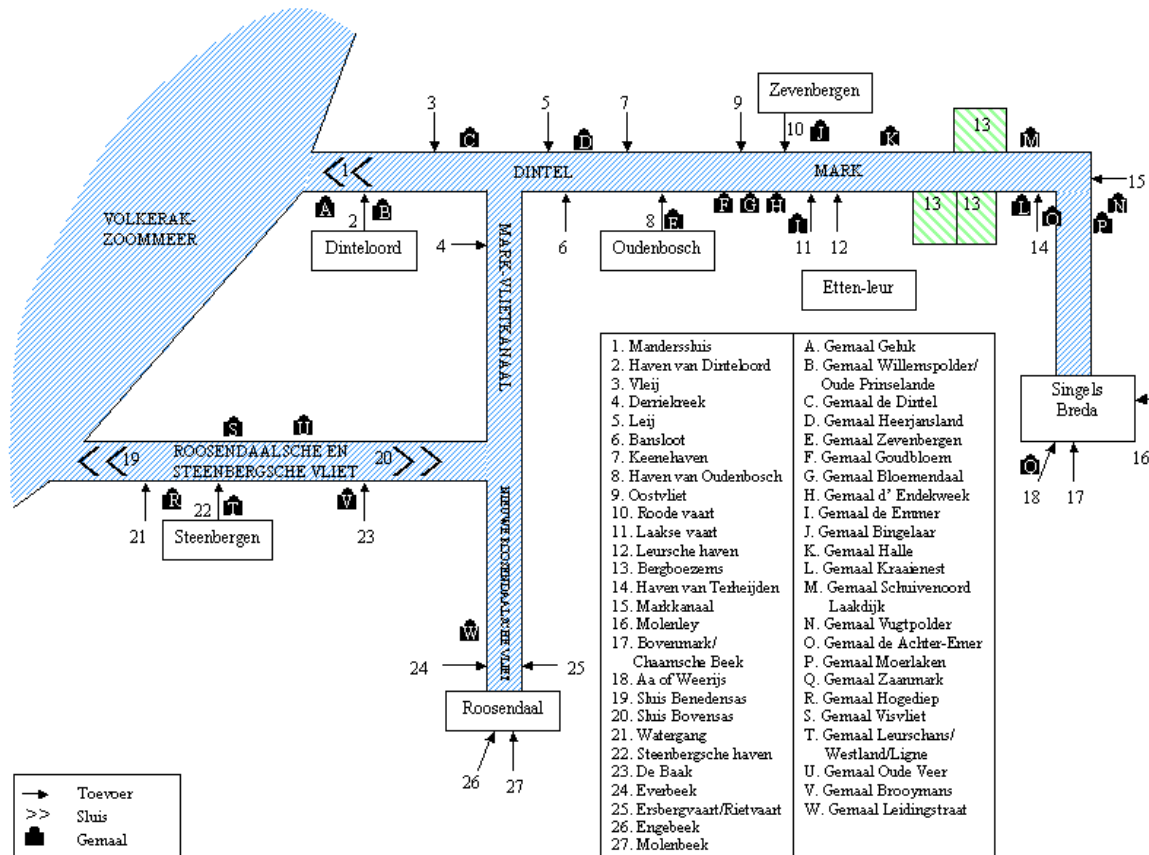
Bijlage B. Gemalen in de Mark-Vliet boezem

In figuur B.1 is het Mark-Vliet systeem weergegeven met de gemalen die op het systeem afwateren. In tabel B.1 is de pompcapaciteit van deze gemalen weergegeven. Aan de hand van de pompcapaciteit kan het overslagdebiet tijdens neerslaggebeurtenissen met een frequentie van 1/100 jaar of kleiner bepaald worden, wanneer wordt aangenomen dat de pompcapaciteit tijdens deze gebeurtenissen volledig wordt benut [21]. Naast gebeurtenissen met een herhalingstijd van minimaal 100 jaar wordt in dit onderzoek ook gemodelleerd met afvoeren van 1/25 en 1/50 jaar. In het rapport 'Hoogwaterlijnen Mark en Vliet' [21], worden de kenmerken van de afvoergolf van januari 1995 genoemd. Van deze afvoergolf is berekend dat deze een herhalingstijd van ongeveer 20 jaar heeft [21]. Het bijbehorende 7-daagse overslagdebiet staat in tabel B.1. Bij gebrek aan gegevens wordt het overslagdebiet van T=20 jaar aangehouden als de afvoer van de gemalen bij een afvoergolf van 1/25 jaar. Het uitgeslagen debiet van een afvoer met een herhalingstijd van 50 jaar is gelijk gesteld aan het gemiddelde tussen het overslagdebiet van T=20 en de maximale capaciteit van een gemaal in navolging van de methode uit [21]. Alle debieten zijn als 7-daagse afvoer weergegeven, aangezien van T=20 geen andere gegevens bekend zijn.

Gemaal (zie figuur B.1)		Pompcapaciteit [m ³ /min]	Overslagdebiet T=20 j 7-daags [m ³]	Overslagdebiet T=50 j 7-daags [m ³]	Overslagdebiet T≥100 j 7-daags [m ³]
A	Geluk	100	354600	681300	1008000
B	Oude Prinslandse	250	1124500	1822250	2520000
B	Willemspolder	30	178400	240400	302400
C	Dintel	180	1124900	1469650	1814400
D	Heerjansland	167	1311300	1497330	1683360
E	Zellebergen	126	1050840	1160460	1270080
F	Goudbloem	63	635040	635040	635040
G	Bloemendaal	240	1670300	2044750	2419200
H	D'endekweek	270	764091	1742846	2721600
I	De Emmer	100	785606	896803	1008000
J	Biggelaar	180	1016370	1415385	1814400
K	Halle	134	1177771	1264246	1350720
L	Kraaienest	135	633396	997098	1360800
M	Laakdijk	200	1047900	1531950	2016000
N	Vugthpolder	100	634815	821408	1008000
O	Achter Emer	61	202306	408593	614880
P	Moerlaken*	16	158704	159992	161280
Q	Zaanmark*	5	50150	50275	50400
R	Hogediep	95	276000	616800	957600
S	Visvliet**	55	324500	439450	554400
T	Ligne	185	656000	1260400	1864800
T	Westland	130	648000	979200	1310400
T	Leurschans	55	354000	454200	554400
U	Oude Veer**	55	295700	425050	554400
V	Brooymans	600	2242000	4145000	6048000
W	Leidingstraat	32	140000	231280	322560

* Schatting op basis van gemaal Vugthpolder ** Vijzelgemaal

Tabel B.1: Pompcapaciteit van de gemalen en overslagdebieten tijdens neerslaggebeurtenissen met verschillende herhalingstijden, uitgedrukt in een 7-daagse afvoer [21].



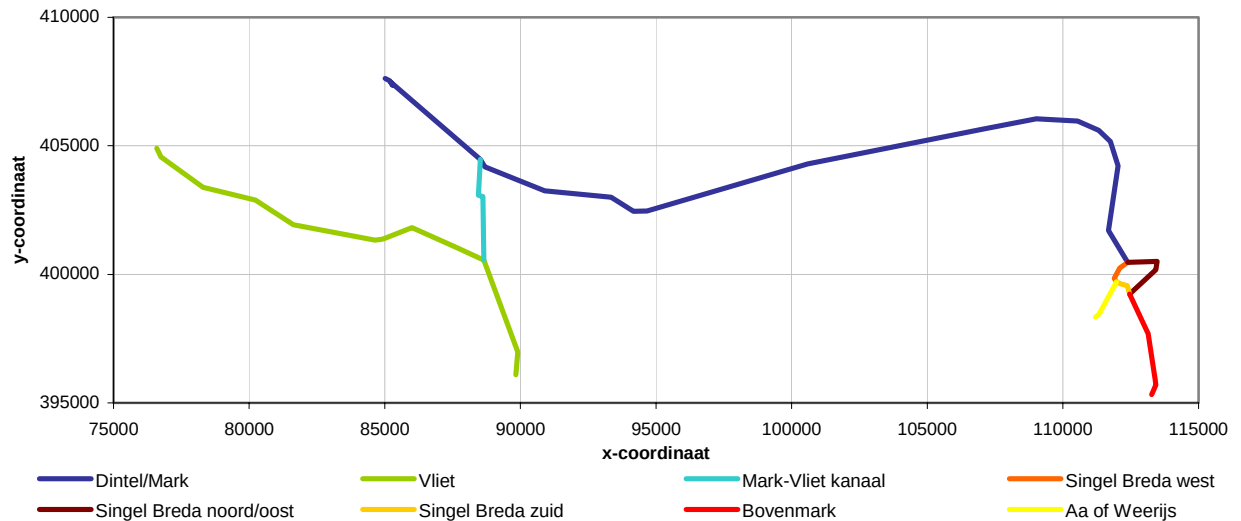
Figuur B.1: De gemalen in het Mark-Vliet systeem [aangepast van 21]

De totale capaciteit van de 26 gemalen die op het Mark-Vliet systeem overslaan bedraagt 3564 m³/min.

Gemaal Visvliet en gemaal Oude Veer zijn vijzelgemalen met een gezamenlijke capaciteit van 110 m³/min die lozen op de Steenbergse Vliet. Deze gemalen kunnen niet meer lozen bij een waterstand hoger dan 0.5 m +NAP in het Mark-Vliet systeem. De gemalen d'Endekweek en Geluk waren ook vijzelgemalen, maar deze zijn onlangs aangepast tot pompgemalen [51].

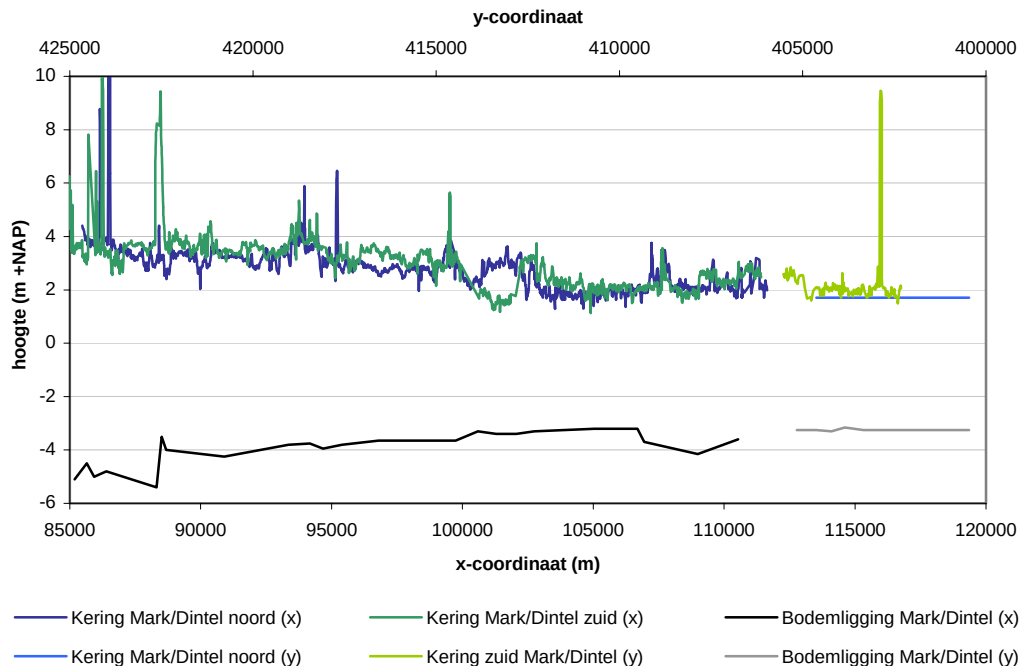
Bijlage C. Langsdoorsneden Mark-Vliet systeem

In figuur C.1 is het Mark-Vliet systeem geschematiseerd. Op basis van deze schematisering is het systeem in vier stukken verdeeld; de Mark/Dintel, het Mark-Vliet kanaal, de Vliet en de singel met gedeeltes van de benedenloop van de Bovenmark en de Aa of Weerijs.

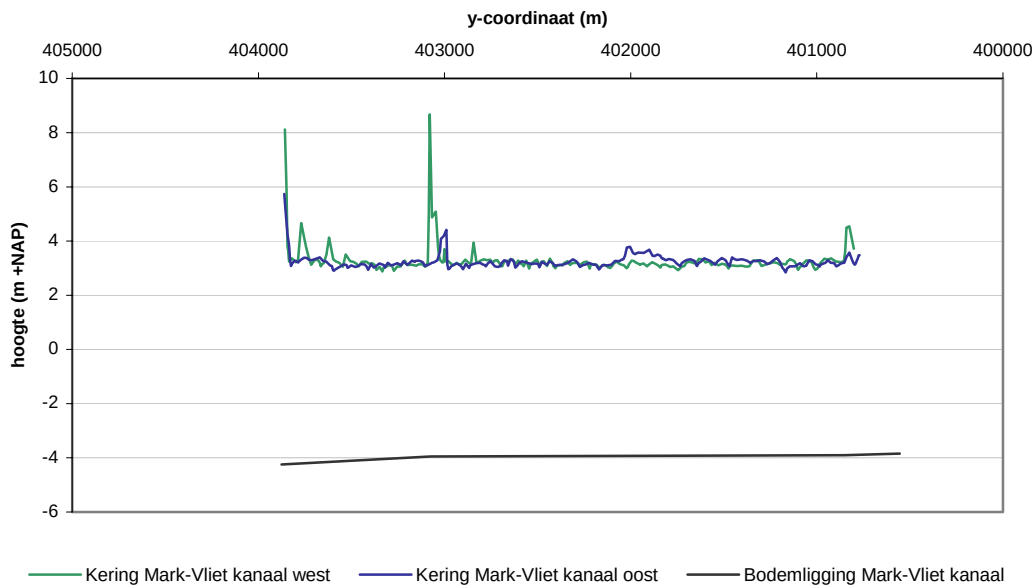


Figuur C.1: Verdeling van het Mark-Vliet systeem in vier deelsystemen

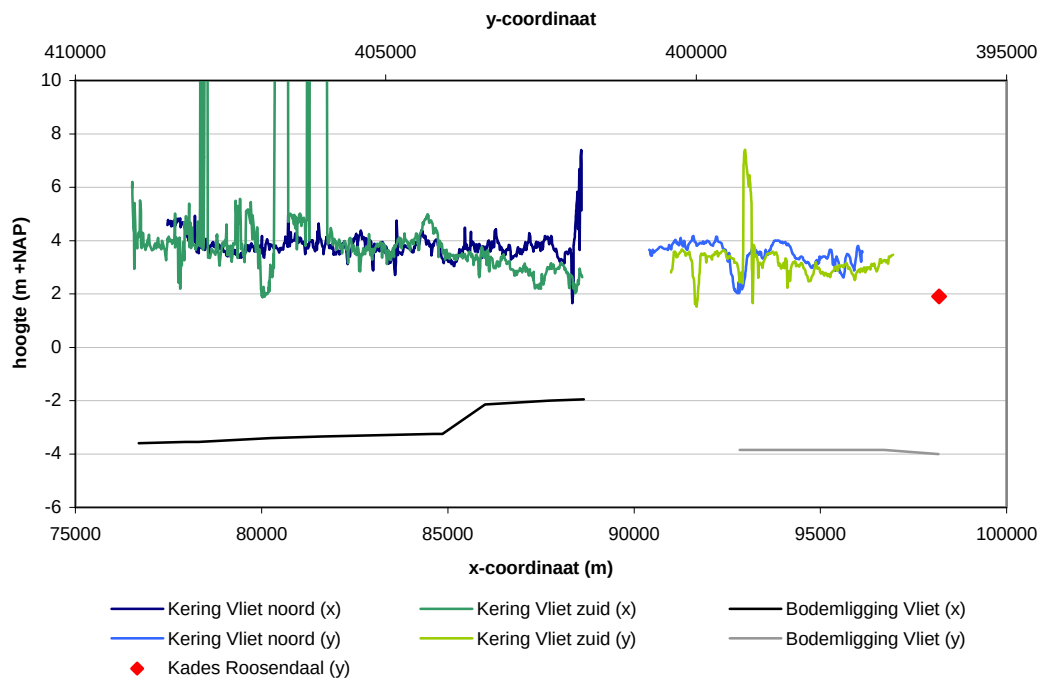
Figuur C.2, C.3, C.4 en C.5 laten het bodemverhang en de hoogtes van de dijken zien voor respectievelijk de Mark/Dintel, het Mark-Vliet kanaal, de Vliet en de singel van Breda inclusief de hieraan grenzende gedeeltes van de Bovenmark en de Aa of Weerijs zoals deze takken zijn weergegeven in figuur C.1. De bodemliggingen zijn uit de Duflow-modellen van waterschap Brabantse Delta gehaald. De dijkhoogtes zijn met behulp van GIS bepaald.



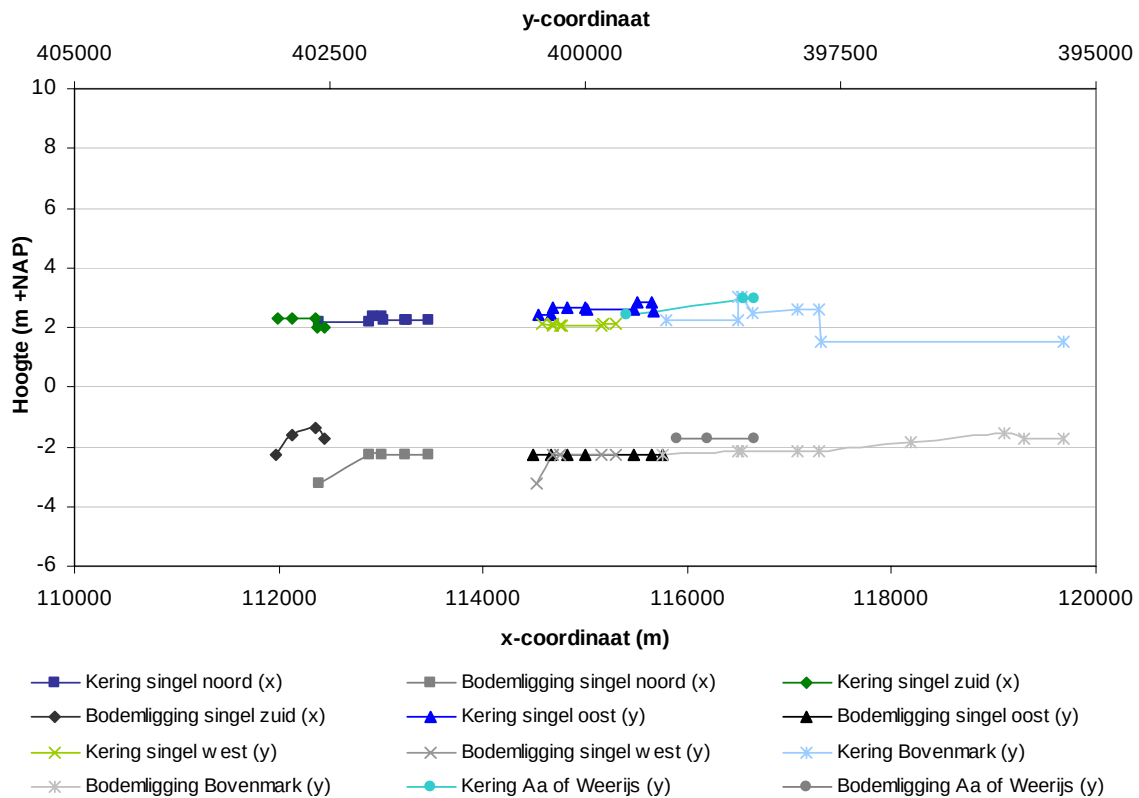
Figuur C.2: Langsdoorsnede van de Mark en Dintel, waarin de bodemligging en de dijkhoogtes ten noorden en ten zuiden van de rivier zijn weergegeven. (x) of (y) geeft aan of de plaatsbepaling in x- of y-coördinaten is gegeven.



Figuur C.3: Langsdoorsnede van het Mark-Vliet kanaal, waarin de bodemligging en de hoogtes van de dijken ten westen en ten oosten van het kanaal zijn weergegeven. De plaatsbepaling is in y-coördinaten is gegeven.



Figuur C.4: Langsdoorsnede van de Vliet, waarin de bodemligging en de hoogtes van de dijken ten noorden en ten zuiden van de rivier zijn weergegeven. (x) of (y) achter het label geeft aan of de plaatsbepaling in x- of y-coördinaten is gegeven. De dijk langs de Vliet loopt niet tot Roosendaal. Er is ter indicatie een schatting van de minimale hoogte van de kades bij Roosendaal weergegeven. Deze waarde is met GIS bepaald.



Figuur C.5: Langsdoorsnede van de singel inclusief de daaraan grenzende gedeeltes van de Aa of Weerijis en de Bovenmark, waarin de bodemligging en de hoogtes van de dijken ten noorden en ten zuiden van de rivier zijn weergegeven. (x) of (y) achter het label geeft aan of de plaatsbepaling in x- of y-coördinaten is gegeven.

Hoge pieken in de dijkhoogte duiden vaak een kruising met een beek of weg aan. Aangezien deze pieken niet van belang zijn voor wateroverlast situaties, zijn ze niet volledig afgebeeld in de grafieken hierboven.

Aangezien de takken van het Mark-Vliet systeem zowel van zuid naar noord als van oost naar west lopen, is in de presentatie van het systeem gekozen voor het opsplitsen van de delen die grotendeels horizontaal lopen en delen die verticaal lopen. Tot een aantal kilometer voor de splitsing met het Markkanaal (rond y-coördinaat = 405000 m) loopt de Mark van zuid naar noord. Benedenstrooms van dit punt wordt de loop globaal van oost naar west. In figuur C.2 zijn de twee delen apart aangegeven, zodat de plaats van het eerste deel op de bovenste x-as en het tweede deel op de onderste x-as afgelezen kan worden. Hetzelfde is gedaan voor de Vliet, waarbij de tak bij de aftakking van het Mark-Vliet kanaal (rond y-coördinaat = 408000 m) in tweeën is gedeeld. De singel is opgedeeld in vier delen, met hetzelfde principe. Deze vierdeling is ook in figuur C.1 te zien. In de legenda van de figuren is aangegeven welke grafiek bij welke x-as hoort. (x) geeft aan dat de grafiek is uitgezet tegen x-coördinaten, (y) geeft aan dat de grafiek is uitgezet tegen y-coördinaten.

Bijlage D. Windopzet

Tabel D.2 geeft de resultaten van een onderzoek van Rijkswaterstaat waarover De Klerck, Lievense en Vroon de memo ‘Windopzet Volkerak-Zoommeer’ [20] schreven. De tabel bevat de maximale verhoging of verlaging per locatie, afhankelijk van de windcondities. Ter verduidelijking is in tabel D.1 de omrekening van de Beaufort windschaal naar m/s weergegeven.

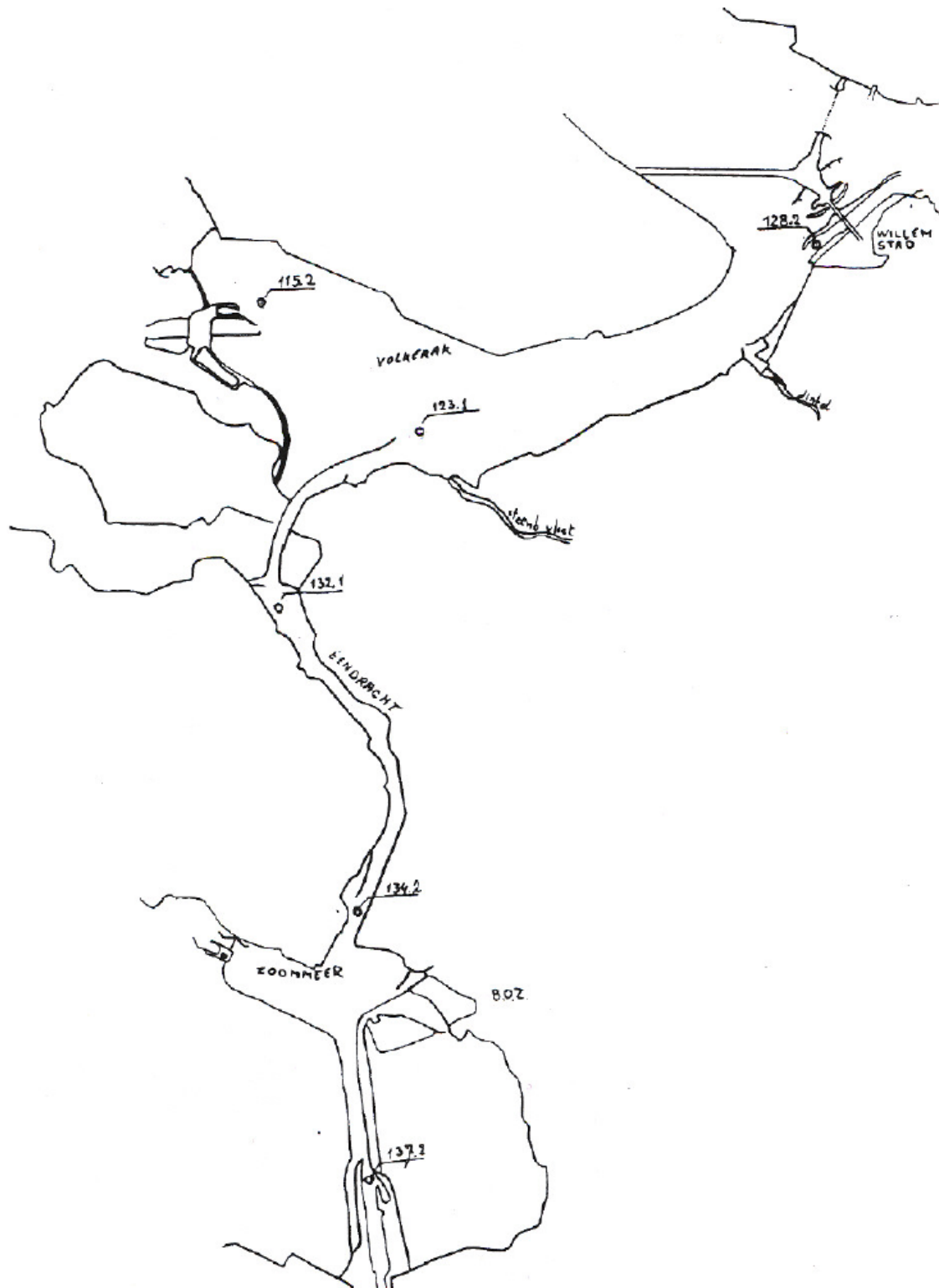
Bft	Gemiddelde windsnelheid in m/s
8	17.2 - 20.7
9	20.8 - 24.4
10	24.5 - 28.4

Tabel D.1: De Beaufort windschaal [54]

lokatie	windrichting max ; verhoging;	windkracht ; [beaufort]	verhoging ; [cm]	windrichting max ; verlaging;	windkracht ; [beaufort]	verlaging ; [cm]
115.2	135°(ZO)	8 9 10	7 10 13	315°(NW)	8 9 10	7 10 13
123.1	135°-180° (ZO-Z)	8 9 10	2 2 3	315°-360° (NW-N)	8 9 10	2 2 3
128.2	225°(ZW)	8 9 10	12 17 21	45°(NO)	8 9 10	12 17 22
132.1	0°-45° (N-NO)	8 9 10	6 9 11	180°-225° (Z-ZW)	8 9 10	6 9 11
134.2	0°(N)	8 9 10	13 19 24	180°(Z)	8 9 10	13 19 24
137.2	0°(N)	8 9 10	22 32 40	180°(Z)	8 9 10	22 33 42

Tabel D.2: Windopzet in het Volkerak-Zoommeer [20]

De locaties waarnaar in de tabel wordt verwezen zijn weergegeven in figuur D.1.



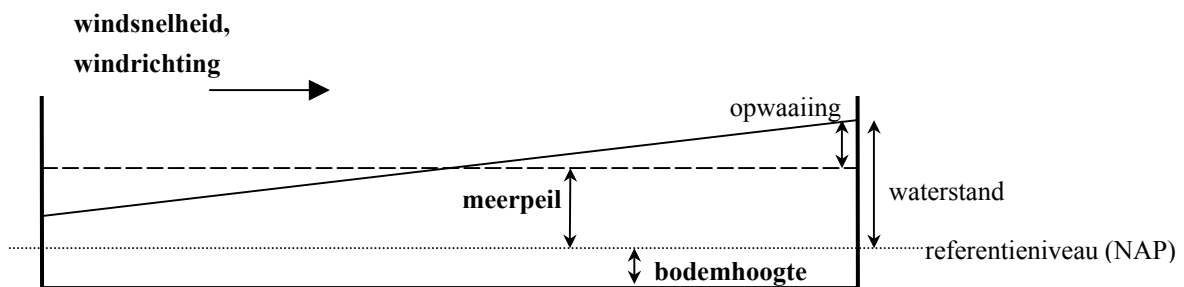
Figuur D.1: Locaties waarvoor de windopzet is berekend [20]

Bijlage E. BretView

Het computerprogramma BretView is ontworpen om snel te kunnen rekenen aan de invloed van wind op waterstanden in meren. Het programma geeft indicatieve resultaten, slechts bedoeld om een eerste indruk van windgedreven waterstanden en golven te krijgen [55]. De resultaten kunnen niet gebruikt worden in plaats van geavanceerde waterbewegingsmodellen, omdat BretView werkt met een zeer versimpeld model [55]. Dit model wordt hieronder besproken. BretView is de gebruikersschil rondom het rekenhart met de naam Bretpro.

E.1. De modellering

Op basis van een simpel bakmodel wordt aan de hand van de wetten van impulsbehoud en massabehoud berekend hoe hoog een waterstand wordt opgestuwd (opwaaiing) en hoe laag het water komt te staan op tegenoverliggende locaties (afwaaiing) [52]. Naast op- en afwaaiing berekent BretView ook de golfcondities. Hier wordt verder geen aandacht aan besteed aangezien alleen de waterstand in het Volkerak-Zoommeer van relevantie is voor de waterstanden in het regionale systeem. In figuur E.1 is een schematisering van het bakmodel met variabelen gegeven.

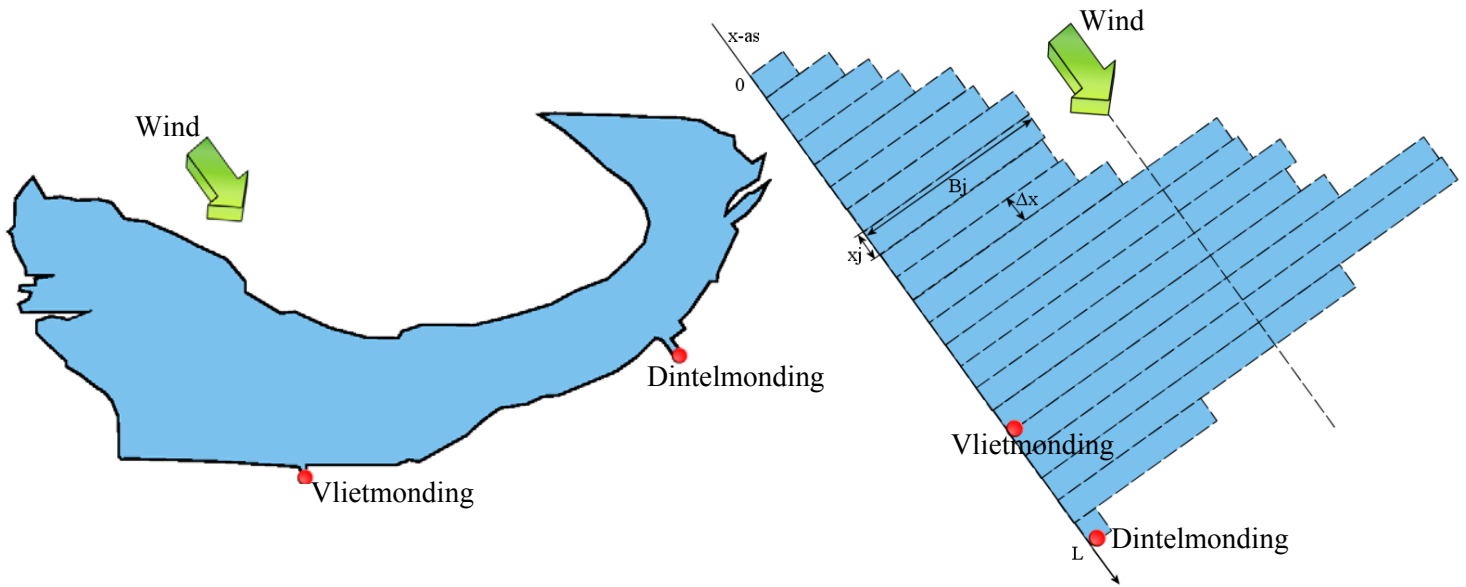


Figuur E.1: Het bakmodel dat aan de basis van BretView ligt. De op te leggen randvoorwaarden zijn dikgedrukt.

Het programma werkt met een eenvoudige invoer, namelijk een gebiedscontour, een constant bodemniveau, een reeks meerpeilen, een reeks windsnelheden en een reeks windrichtingen [55]. BretView bepaalt de waterstand over een 2D gebiedscontour. De contour wordt echter zo versimpeld dat met een 1D rekenmodel volstaan kan worden [52]. Dit wordt hieronder verder uitgelegd. Verder wordt ingegaan op de formules en aannames waarop het model is gebaseerd.

E.1.1. Van 2D naar 1D

Voor het 2D watersysteem wordt een gebiedscontour ingevoerd die vervolgens versimpeld wordt tot de schematisatie in figuur E.2b. Door altijd met de windrichting ‘mee’ te rekenen, zie figuur E.2, kan in BretView worden volstaan met een 1D-rekenmodel om de opwaaiing op het 2D watersysteem te berekenen [52]. De x-as loopt dus altijd over de windrichting. BretView berekent de waterstand per smal mootje zoals figuur E.2b laat zien. De waterstand in een lijn haaks op de x-as is daarom altijd constant [52].



Figuur E.2: Gebiedscontour in BretView, a: Schematisatie van de 2D gebiedscontour, b: Versimpeling naar een 1D rekenmodel [gebaseerd op 52].

E.1.2. Aannames

BretView gaat uit van de volgende aannames [52]:

- ~ Een gesloten bak met onsamendrukbaar water;
- ~ Een constante bodemhoogte;
- ~ Stationaire omstandigheden;
- ~ Ruimtelijke onafhankelijkheid;
- ~ Verwaarloosbare viscositeiten;
- ~ Een dieptegemiddeld 1D-model waarin de dieptegemiddelde stroomsnelheid $u = 0$ m/s verondersteld wordt en de x-as parallel aan de windrichting ligt.

Aan de hand van bovenstaande aannames berekent BretView de waterstanden uitgaande van de wetten van impuls en massabehoud.

E.1.3. De impulsbalans

De impulsbalans wordt gevormd door een waterdrukterm, een windschuifspanningsterm en een bodemschuifspanningsterm [52]:

$$\rho_w g h \frac{dh}{dx} = \tau_a - \tau_b \quad (\text{E1})$$

ρ_w = de dichtheid van water, 1000 kg/m^3

g = de versnelling van de zwaartekracht, $9,8 \text{ m/s}^2$

h = waterdiepte [m]

$\frac{dh}{dx}$ = verhang [-]

τ_a = windschuifspanning aan het wateroppervlak [N/m^2]

τ_b = bodemschuifspanning [N/m^2]

Er wordt verder aangenomen dat de bodemschuifspanning gerelateerd is aan de windschuifspanning volgens $\tau_b = (1 - \delta)\tau_a$, met δ een constante van de orde grootte 1.2 [52]. De impulsbalans wordt versimpeld tot [52]:

$$gh \frac{dh}{dx} = c \quad (E2)$$

$$\text{met } c = \frac{\delta \tau_a}{\rho_w g} \quad (E3)$$

$$\text{en } \tau_a = \rho_a C_{10} U_{10} |U_{10}| \quad (E4)$$

ρ_a = de dichtheid van lucht, 1290 kg/m³

C_{10} = wrijvingscoëfficiënt/ruwheidsfactor [-]

U_{10} = windsnelheid 10 m boven het wateroppervlak in positieve x-richting [m/s]

De algemene oplossing van (E2) luidt:

$$h(x) = \sqrt{2cx + K} \quad (E5)$$

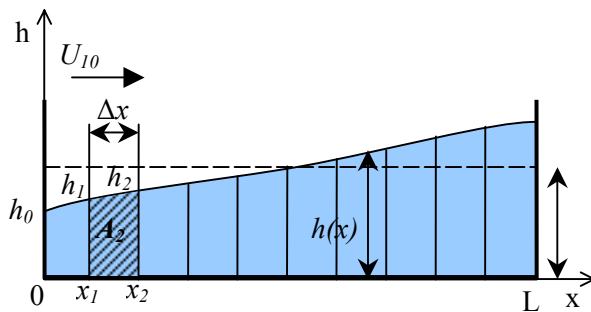
met K = nader te bepalen constante. Vergelijking E5 geeft de verhanglijn in het meer weer [52].

E.1.4. De wet van massabehoud

Als randvoorwaarde wordt de wet van massabehoud gebruikt. De wet van massabehoud voor het 2D gebiedscontour wordt gegeven door [52]:

$$\int_{x_0}^{x_L} h(x) B(x) dx = V \quad (E6)$$

Om deze integraal op te lossen is het watervolume geschematiseerd zoals in figuur E.3.



Figuur E.3: Opdeling van het watervolume [52]

Op basis van de schematisatie in figuur E.3 wordt de wet van massabehoud in de BretView modellering met de volgende vergelijking weergegeven [52]:

$$\sum_{j=1}^{n_L} B_j A_j = V = D \Delta x \sum_{j=1}^{n_L} B_j \quad (E7)$$

$$\text{met } A_j = \int_{x_{j-1}}^{x_j} h dx = \int_{x_{j-1}}^{x_j} \sqrt{2cx + K} dx = \frac{(h_{j-1}^2 + 2c\Delta x)^{2/3} - h_{j-1}^3}{3c} \quad (E8)$$

B_j = de constante breedte van een mootje met lengte Δx

A_j = het natte oppervlak in het x,z-vlak van een mootje met lengte Δx

V = watervolume in het meer

D = de waterdiepte zonder windinvloed

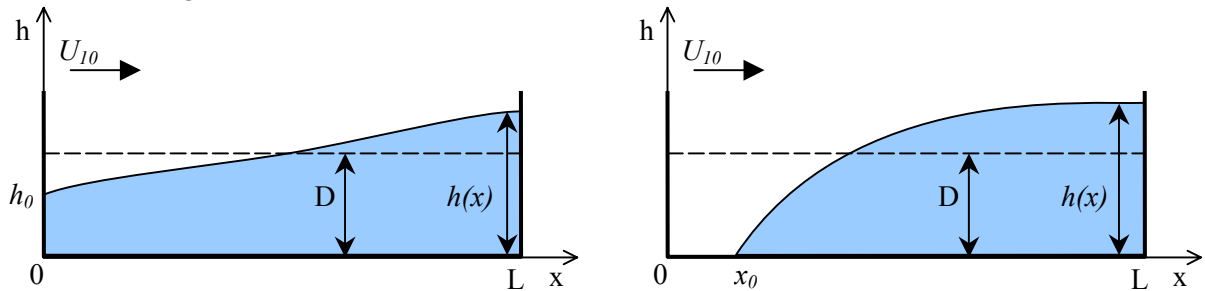
Δx = de lengte van een mootje, $\Delta x \rightarrow 0$

n_L = het aantal mootjes tussen $x = 0$ en $x = L$

h_j = de waterstand op de grenzen van de mootjes, $h_j = \sqrt{2cx_j + K}$

E.1.5. Wel of geen droogval

Met de afgeleide randvoorwaarde (E7) kan afhankelijk van de situatie een waarde voor K bepaald worden. Er kunnen zich twee situaties voordoen, een situatie zonder en een situatie met droogval [52]. Dit is in figuur E.4 te zien.



Figuur E.4: Schematisatie van scheefstand in BretView, a: zonder droogval, b: met droogval [gebaseerd op 52].

Voor de situatie zonder droogval zoals in figuur E.4a geldt [52]:

$$h(0) = \sqrt{2c \cdot 0 + K} = \sqrt{K} = h_0, \text{ waaruit volgt dat } K = h_0^2$$

Voor een situatie zonder droogval wordt de verhanglijn daarom beschreven door [52]:

$$h(x) = \sqrt{2cx + h_0^2} \quad (E9)$$

h_0 is in vergelijking E9 de enige onbekende. Deze waarde wordt via een iteratief proces bepaald aan de hand van de vergelijking (E7) [52].

Voor de situatie met droogval zoals in figuur E.4b geldt [52]:

$$h(x_0) = \sqrt{2cx_0 + K} = 0, \text{ waaruit volgt dat } K = -2cx_0$$

Voor een situatie met droogval wordt de verhanglijn daarom beschreven door [52]:

$$h(x) = \sqrt{2c(x - x_0)} \quad (\text{E10})$$

x_0 is in vergelijking E10 de enige onbekende. Deze waarde wordt net als h_0 via een iteratief proces bepaald aan de hand van de vergelijking (E7) [52].

E.2. Berekeningen in BretView

Voor het bepalen van de waterstand kan BretView op verschillende manieren toegepast worden. Ten eerste kan BretView berekeningen over het hele gebied maken, de zogenaamde veldberekeningen. Ook kan voor een enkele of meerdere individuele locaties de waterstand berekend worden. In deze berekeningen kan op drie verschillende manieren met de randvoorwaarden omgegaan worden. Ten eerste kan met een reeks meerpeilen, een reeks windsnelheden en een reeks windrichtingen een matrix worden doorgerekend met alle mogelijke combinaties. Ten tweede kan een tijdserie worden doorgerekend met in de tijd variërende randvoorwaarden. Bij deze tijdserie wordt voor ieder tijdstip wel weer uitgegaan van een stationaire situatie. Als laatste kan gekozen worden voor statistische berekeningen. Hierin kunnen overschrijdingsfrequenties worden aangegeven, waarbij BretView de waterstand uitrekent voor een vast meerpeil en een bepaald windklimaat.

Voor het bekijken van het effect van wind op het Volkerak-Zoommeer zijn matrix-veldberekeningen uitgevoerd. Hieruit is gebleken dat de wind een significante invloed heeft op de waterstanden bij de mondingen van de Dintel en Vliet. Voor de individuele locaties zijn vervolgens matrixberekeningen uitgevoerd, waarbij voor veel combinaties van de randvoorwaarden de waterstand op een locatie worden berekend. De invoer die voor deze berekeningen is gebruikt wordt in de volgende paragraaf besproken.

E.3. Invoer in BretView voor het Volkerak-Zoommeer

Zoals reeds gezegd is de invoer in BretView beperkt tot een gebiedscontour, een constant bodemniveau, en randvoorwaarden bestaand uit een reeks meerpeilen, een reeks windsnelheden en een reeks windrichtingen. Hoe deze invoer eruit ziet wordt in deze paragraaf besproken.

E.3.1. Randvoorwaarden

Er moet voor zowel de huidige situatie als de situatie met inzet van het Volkerak-Zoommeer een reeks meerpeilen ingevoerd worden. In de huidige situatie varieert het meerpeil tussen NAP en 0.6 m + NAP [56]. Uit voorgaand onderzoek van RIZA is gebleken dat met inzet van het Volkerak-Zoommeer het meerpeil toe kan nemen tot 2.5 m + NAP. De gebruikte reeksen van de meerpeilen zijn in tabel E.1 weergegeven.

	Huidige situatie	Situatie met waterberging op het Volkerak-Zoommeer
1.	NAP	NAP
2.	0.2 m + NAP	0.2 m + NAP
3.	0.4 m + NAP	0.5 m + NAP
4.	0.6 m + NAP	1 m + NAP
5.		1.5 m + NAP
6.		2 m + NAP
7.		2.5 m + NAP

Tabel E.1: Meerpeilreeksen in de huidige en nieuwe situatie voor de invoer van BretView

Voor de reeks windrichtingen en windsnelheden is aangenomen dat de wind uit alle richtingen kan komen boven het Volkerak-Zoommeer en dat de windsnelheden variëren van 0 m/s tot 42 m/s. Dit is gebaseerd op gegevens van het IJsselmeergebied [40]. Reden voor de keuze van de windgegevens van het IJsselmeergebied ligt in de aansluiting op het programma Hydra-M, dat is gebruikt voor het berekenen van de overschrijdingsfrequentielijn. Verdere uitleg is opgenomen in bijlage F. De windgegevens van het IJsselmeergebied kunnen niet zomaar overgenomen worden voor het Volkerak-Zoommeer. De verificatie van deze aanname is ook opgenomen in bijlage F. Voor de windrichtingen worden sectoren van 30 graden gebruikt om de uitvoer beperkt te houden. In tabel E.2 zijn de reeksen voor de windrichtingen en windsnelheden weergegeven. Beide reeksen zijn gelijk voor de huidige en nieuwe situatie.

	Windrichtingen	Windsnelheden
1.	0°	14 m/s
2.	30°	19 m/s
3.	60°	22 m/s
4.	90°	25 m/s
5.	120°	28 m/s
6.	150°	31 m/s
7.	180°	34 m/s
8.	210°	38 m/s
9.	240°	42 m/s
10.	270°	
11.	300°	
12.	330°	

Tabel E.2: Reeksen windrichtingen en windsnelheden voor de invoer van BretView

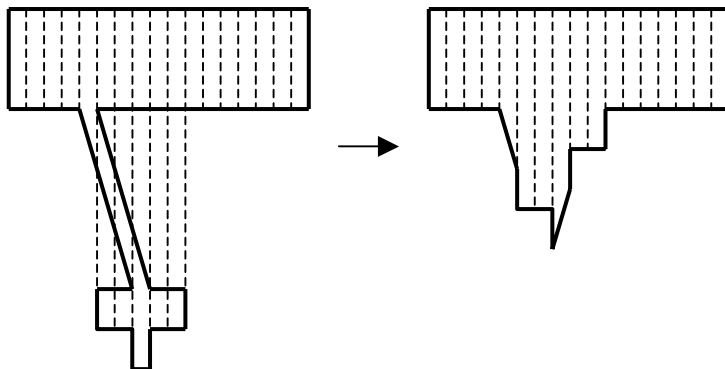
De windsnelheden die ingevoerd worden in BretView, de snelheden in tabel E.2, zijn windsnelheden 10 m boven land gemeten. Deze windsnelheden moeten nog worden omgerekend naar windsnelheden boven water. In BretView kan aangegeven worden of en hoe deze windtransformatie plaats moet vinden. Voor het Volkerak-Zoommeer is een windtransformatie op meso-niveau uitgevoerd in BretView, de windsnelheden zijn aan de hand van een van de windsnelheid afhankelijke ruwheid van het wateroppervlak getransformeerd naar windsnelheden boven water. BretView heeft de ruwheid van het wateroppervlak van het IJsselmeer gebruikt voor de transformatie.

Met 12 verschillende windrichtingen, 9 verschillende windsnelheden en 4 verschillende meerpeilen worden er voor 432 combinaties waterstanden berekend voor de huidige situatie. Voor de situatie met waterberging op het Volkerak-Zoommeer worden met 12 verschillende windrichtingen, 9 verschillende windsnelheden en 7 verschillende meerpeilen voor 756 combinaties waterstanden berekend.

E.3.2. Gebiedsinformatie

De gebiedsinformatie aangaande het Volkerak-Zoommeer is uit GIS-bestanden gehaald. Bij het bepalen van de coördinaten van het gebiedscontour is gekozen om alleen de contouren van het Volkerak en het Krammer te gebruiken. Hiervoor zijn twee redenen. Ten eerste zit het grootste bergend gebied in dit contour; de Eendracht, het Zoommeer en het Bathse Spuikanaal hebben een beperkte inhoud. De invloed van het buiten beschouwing gelaten gebied op de waterstand wordt beperkt geacht, zeker gezien de kleine doorstroombopening tussen de Eendracht en het Volkerak/Krammer.

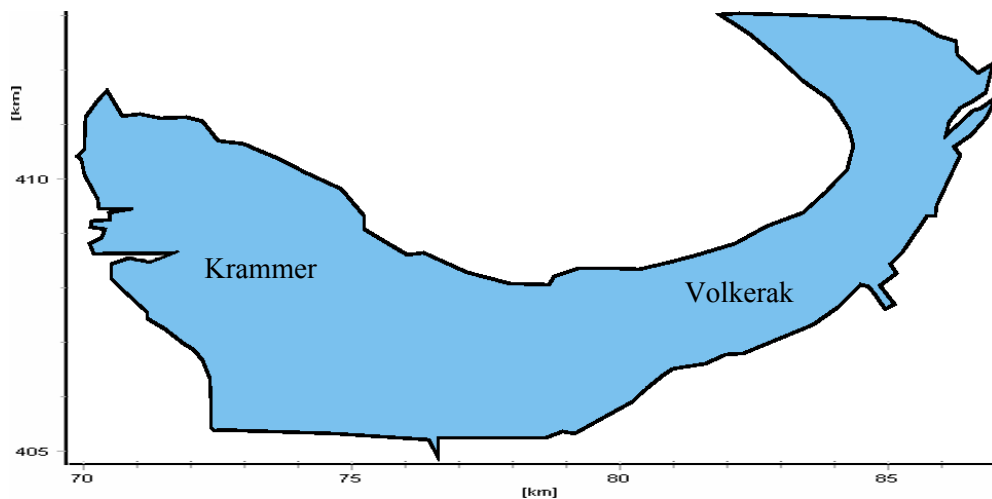
De tweede reden om alleen naar het Volkerak/Krammer te kijken zit in een beperking van BretView. In figuur E.5 is weergegeven hoe gerekend wordt met een gebiedscontour.



Figuur E.5: Versimpeling van het gebiedscontour door BretView. De wijze waarop het gebied in mootjes wordt verdeeld, is afhankelijk van de windrichting zoals in paragraaf E.1.1 is uitgelegd.

In figuur E.5 is te zien dat het gebied in mootjes wordt verdeeld, die vervolgens aan elkaar geplakt worden zodat alle tussenruimtes eruit zijn. Omdat smalle wateren zoals de Eendracht en het Bathse Spuikanaal aan de brede stukken worden geplakt, wordt de invloed van de wind daar overschat doordat de strijklengtes waarmee gerekend wordt te groot zijn. In een smal water zijn de strijklengtes kort en de invloed van de wind is daar beperkt. Bovendien is in BretView uitgegaan van onafhankelijkheid in tijd en ruimte van de rekenpunten. In vernauwingen gaan deze aannames niet op. De versimpeling van het gebiedscontour zorgt daarom voor een overschatting van de op- of afwaaiing in smalle wateren.

Aangezien BretView niet goed werkt voor smalle wateren en het achterwege gelaten gebied in verhouding klein is, is aangenomen dat het Volkerak/Krammer een goede representatie van het Volkerak-Zoommeer vormt als het gaat om windinvloeden. De gebiedscontour zoals ingevoerd in BretView is afgebeeld in figuur E.6.



Figuur E.6: De gebiedscontour van het Volkerak-Zoommeer zoals gehanteerd in BretView

Hierbij is de gebiedscontour van het Volkerak en Krammer op 1 m + NAP genomen als uitgangspunt. Bij extreme omstandigheden, de omstandigheden die tot wateroverlast kunnen leiden, staan deze platen echter onder water. De waterstand is dan minimaal een 1 m hoog, vandaar de keuze voor de gebiedscontour op deze hoogte.

Rond de coördinaten (85, 410) ligt in het meer een eiland met een bodemhoogte boven 1 m + NAP, maar dat is maar zeer klein van omvang. Eilanden kunnen in BretView gemodelleerd worden, er wordt dan als het ware een stuk uit de gebiedscontour geknipt. Gezien de eerdere aannames aangaande de gebiedscontour is er echter voor gekozen deze kleine verhoging niet te modelleren in BretView. Bij laag water zijn er in het Volkerak-Zoommeer een aantal platen die droog liggen.

Voor het bodemniveau dat in BretView wordt ingevoerd moet een enkele waarde worden gekozen. In tabel E.3 zijn de dieptegegevens van het Volkerak-Zoommeer samengevat. Deze gegevens zijn afkomstig uit een GIS-bestand. Deze diepte komt redelijk overeen met de gemiddelde diepte van 5.2 m ten opzichte van de gemiddelde waterstand voor het gehele Volkerak-Zoommeer uit de verdiepingsslag [2].

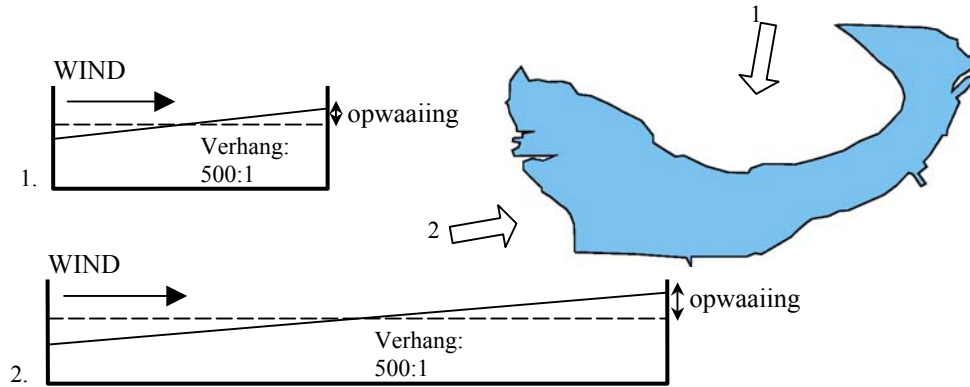
Gemiddelde diepte	4.7 m - NAP
Standaarddeviatie	4.5 m

Tabel E.3: Dieptegegevens Volkerak-Zoommeer

Gezien de grote diepteverschillen in het Volkerak-Zoommeer, zoals blijkt uit de grote standaard deviatie, kan het aannemen van een constante diepte tot grote onnauwkeurigheid in de resultaten leiden. Er wordt uitgegaan van de gemiddelde diepte voor de berekeningen in BretView, maar om de onzekerheid in deze aanname te ondervangen is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. In eerste instantie is een algemene gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Voor combinaties uit 4 windrichtingen (60°, 150°, 240° en 330°), 3 windsnelheden (14, 28 en 42 m/s) en een constant meerpeil (NAP) zijn waterstanden berekend over het hele Volkerak-Zoommeer. De bodemhoogte is met 1 m, 0.5 m

en 0.1m gevarieerd rond de gemiddelde bodemhoogte van 4.7 m – NAP. Hieruit kwamen de volgende punten naar voren:

- ~ De hoogste opwaaiing treedt bij iedere windsnelheid op als de wind uit het zuidwesten komt. Een zuidwesten of noordoosten wind zorgt voor grotere opstuwing dan wind uit de noordwest of zuidoost sector, doordat de geometrie van het meer dan een grotere opstuwing in de hand werkt, zoals in figuur E.7 schematisch is weergegeven;



Figuur E.7: Invloed van de geometrie op de opwaaiing, alle omstandigheden behalve de strijklengte gelijk

- ~ De hoogte van opwaaiing is zeer gevoelig voor toenemende windsnelheden. Bij zwakke wind (14 m/s) is de opwaaiing, vrijwel onafhankelijk van de bodemhoogte verandering, zeer gering. Bij hoge windsnelheden (28 m/s) wordt het water hoger opgestuwd, gemiddeld over de windrichtingen zal het verschil in opstuwing ongeveer 10 % van de bodemhoogte verandering zijn. Bij extreme windsnelheden (42 m/s) is de opstuwing groot in absolute zin, maar de gevoeligheid voor een verandering in de bodemhoogte is ook zeer groot;
- ~ De mate van gevoeligheid van de opstuwing voor een verandering in de bodemhoogte is afhankelijk van de richting van de bodemhoogte verandering. De hoogte van de opwaaiing is gevoeliger voor windcondities bij lagere waterdieptes dan bij hoge waterdieptes. Bij een conservatieve aanpak kan daarom beter voor een iets hoger dan gemiddelde bodemhoogte gekozen worden;

Wordt bij de keuze van de bodemhoogte een fout groter dan 0.5 m gemaakt, dan zullen onder extreme windcondities grote afwijkingen van de opwaaiing ontstaan. De waterstanden onder extreme windcondities zijn juist interessant voor het bepalen van de kans van voorkomen van maatgevende omstandigheden. Echter, windsnelheden van 42 m/s komen boven het Volkerak-Zoommeer minder dan eens in de 10.000 jaar voor en zullen daarom in alle waarschijnlijkheid niet leiden tot een maatgevende situatie. Tot windsnelheden van 30 m/s, een windsnelheid die statistische gezien eens in de 5000 jaar voor komt, kan de fout in de opwaaiing door een onnauwkeurigheid in de bodemhoogte van 1 m oplopen tot maximaal 15 %. Deze fout is echter nog steeds aanzienlijk.

Het kiezen van een enkele bodemhoogte is niet wenselijk door de grote onzekerheid die daarmee geïntroduceerd kan worden in de opwaaiing. Als oplossing is gekozen om de waterstanden en overschrijdingskansen voor het Volkerak-Zoommeer met drie bodemhoogtes te berekenen. Aan de hand van de uitkomsten van deze drie varianten kan een uitspraak gedaan worden over de gevoeligheid van de overschrijdingskansen voor de bodemhoogte keuze. De gemiddelde bodemhoogte zoals is bepaald uit GIS-bestanden is 4.7 m onder NAP. Aangezien de keuze van de

bodemhoogte een aanzienlijke fout kan introduceren in de resultaten, vooral wanneer de bodemhoogte te laag is gekozen, is gekozen voor een conservatieve keuze van de gemiddelde bodemhoogte. Er wordt daarom gerekend met een gemiddelde bodemhoogte van 4.5 m onder NAP. Er zullen daarnaast berekeningen worden uitgevoerd met bodemhoogtes van 3 m en 6 m onder NAP.

E.4. Beperkingen van BretView

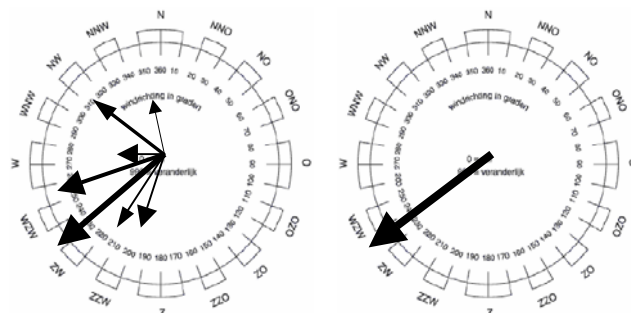
Door het grote aantal versimpelingen dat in BretView wordt gedaan, heeft het programma een aantal zwaktes en beperkingen. De belangrijkste worden hier besproken en er wordt ook ingegaan op de gevolgen die dit heeft voor de berekeningen van de waterstanden op het Volkerak-Zoommeer.

E.4.1. Invloed van een variërende bodemhoogte

Zoals al is besproken is het aannemen van een constante bodemhoogte een grove aanname voor het Volkerak-Zoommeer. Doordat er zowel oude getijdengeulen als drooggevalen platen liggen in dit oude estuarium, is de variabiliteit in de bodemhoogte erg groot. Uit de algemene gevoeligheidsanalyse is naar voren gekomen dat er met drie bodemhoogtes waterstanden en overschrijdingskansen berekend moeten worden om de gevoeligheid van de uitkomsten duidelijk te maken. In de algemene gevoeligheidsanalyse is echter niet gekeken naar de invloed van bodemhoogteverschillen op de waterstand, alleen naar de invloed van de keuze van een gemiddelde bodemhoogte. De opwaaiing van water is afhankelijk van de waterdiepte, zoals blijkt uit formules E9 en E10 in paragraaf E.1. Door de bodemhoogteverschillen niet mee te nemen, wordt dus een onnauwkeurigheid in de resultaten geaccepteerd. Onder andere het mechanisme shoaling wordt niet meegenomen, terwijl dit in het Volkerak-Zoommeer zeker van invloed is door de grote verschillen in bodemhoogte tussen het midden van het meer en de kanten. Dit is echter vooral belangrijk voor golfbewegingen op het Volkerak-Zoommeer en golfinvloeden worden niet meegenomen in dit onderzoek. Of de onnauwkeurigheid die ontstaat door het negeren van bodemhoogtevariëtes acceptabel is, zal worden nagegaan door de resultaten van BretView te valideren. Dit wordt verder besproken in paragraaf E.5.

E.4.2. Invloed van een variërende wind

De windrichting en windsnelheid zijn in de werkelijkheid variabel. De wind laat zo nu en dan af en draait rond de hoofdrichting. In BretView worden uurgemiddelde windsnelheden en een constante windrichting opgelegd. In figuur E.8 is met windrozen weergegeven hoe de wind in de werkelijkheid kan variëren en hoe dit in BretView is opgelegd. Het rekenen met een uurgemiddelde wind is echter een goede aanname. De waterkolom reageert traag op windinvloeden, een harde windstoot zal



Figuur E.8: Een uur aan windkarakteristieken zoals deze in de werkelijkheid op zouden kunnen treden versus de modellering van de wind in BretView

daardoor nauwelijks tot hogere opstuwing leiden. De opwaaiing van het water is uiteindelijk een resultaat van de gemiddelde windcondities.

De aanname van stationariteit leidt echter wel tot een onnauwkeurigheid in de modellering. BretView berekent de verhanglijn uitgaande van een evenwicht. Door de variatie in de windcondities wordt het water niet constant dezelfde richting opgestuwd en ook niet steeds met dezelfde kracht. Het traag reagerende water zal als gevolg nooit een evenwicht bereiken. Het gevolg van deze modellering is dat de opstuwing van water wordt overschat. Aangezien deze aanname tot een conservatieve benadering van de waterstand leidt, zijn de resultaten wel te gebruiken om waterstanden in het regionale systeem te berekenen zonder dat de veiligheid daardoor negatief wordt beïnvloed.

E.4.3. Invloed van stromingen

BretView kan geen stromingen meenemen. Normaliter zijn de stromingen in het Volkerak-Zoommeer verwaarloosbaar. Wanneer het systeem wordt ingezet voor berging en het water vanuit het Hollands Diep stroomt, wordt doorgevoerd naar de Oosterschelde en Westerschelde en later terug naar het Hollands Diep wordt gespuid, zijn er echter wel degelijk significante stromingen aanwezig in het meer. Ruim geschat wordt er ongeveer $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ doorgevoerd ten tijde van inzet voor berging. Deze stroming staat haaks op de windrichting die tot opstuwing in de monding van Dintel en Vliet leidt. Het gevolg van deze stroming is een verhang van de waterlijn die in een andere richting staat dan het windverhang. Het is onbekend hoe deze verhanglijnen elkaar beïnvloeden. Het is daardoor onbekend wat voor fout deze aanname in BretView introduceert. Er wordt aanbevolen de invloed van de stroming op de waterstand te onderzoeken.

E.4.4. Gesloten, brede watersystemen

BretView is alleen geschikt voor gesloten, brede watersystemen. De redenen hiervoor zijn gedeeltelijk al benoemd in de vorige paragraaf. Er kan alleen met een gesloten model worden gerekend, omdat BretView als een puntmodel werkt; er wordt geen rekening gehouden met afhankelijkheden van omstandigheden op een ander punt dan het punt dat berekend wordt. Er kan daarom geen rekening gehouden worden met mechanismen als golfindringing, diffractie en reflectie [55]. Deze beperking van BretView zal naar verwachting geen problemen opleveren. Het Volkerak/Krammer kan gezien worden als een gesloten en breed systeem. Bovendien zijn de ruimtelijke afhankelijkheden die worden genegeerd vooral van invloed op de golfbewegingen welke niet bekeken worden in dit onderzoek.

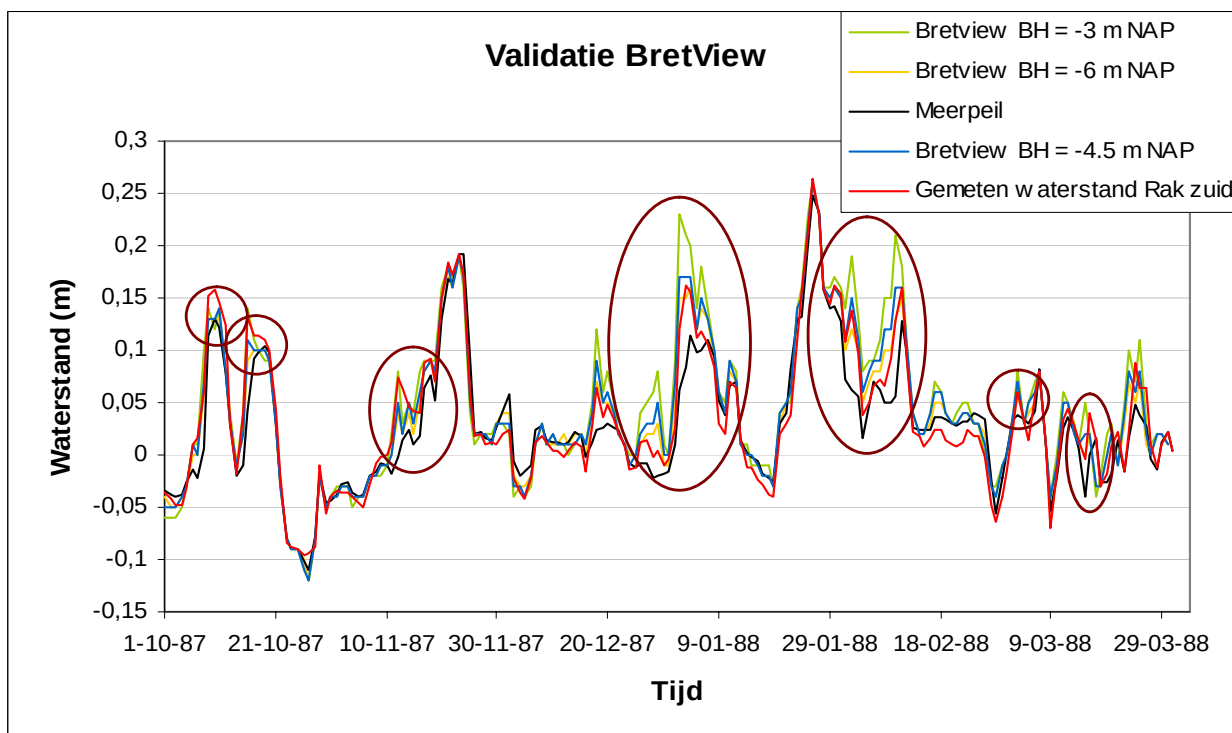
E.5. Validatie

Er worden bij het gebruik van BretView een aantal belangrijke aannames gedaan. De twee belangrijkste aannames waarvan de gevolgen onbekend zijn, zijn het buiten beschouwing laten van bodemhoogtevariëaties en het negeren van de Eendracht, het Zoommeer en het Bathse Spuikanaal bij de modellering. Door middel van het valideren van de resultaten met geobserveerde waterstanddata en windgegevens wordt bekeken of de resultaten van BretView acceptabel zijn.

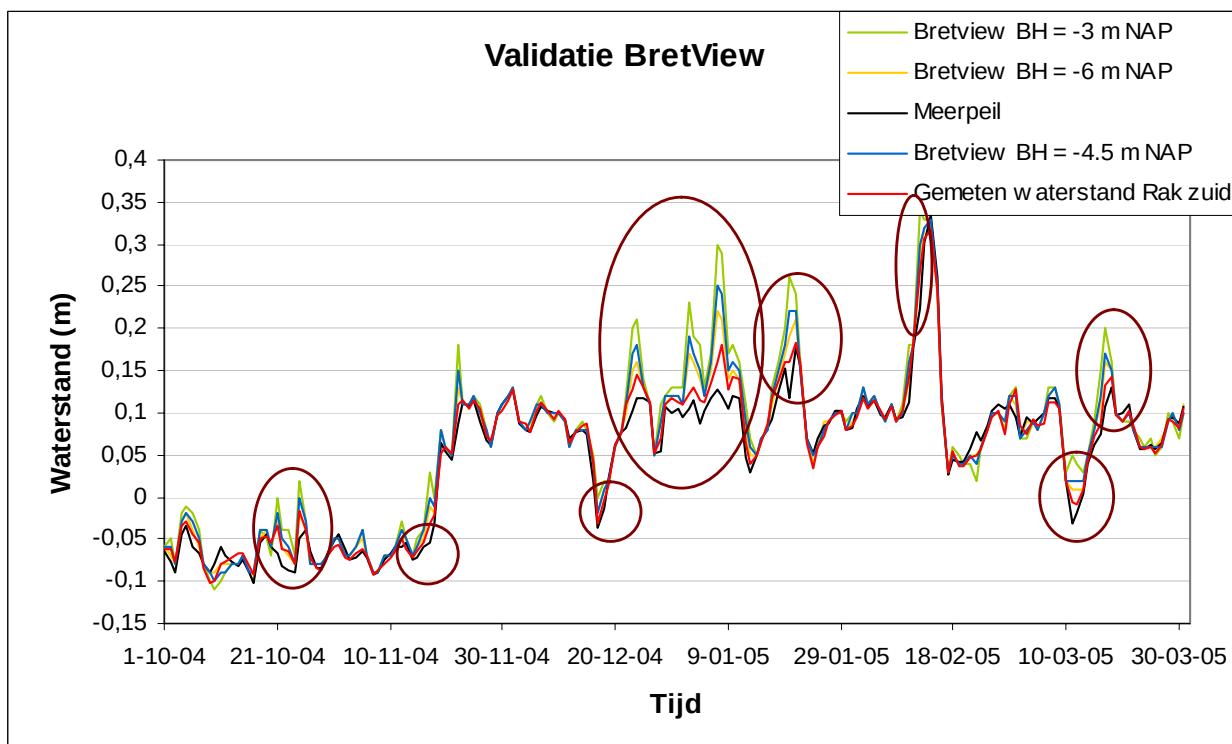
Het valideren van BretView is geschied via een vergelijking van de resultaten met metingen. De meetgegevens zijn afkomstig van Waterbase [43]. Deze site is in beheer van Rijkswaterstaat en bevat allerlei meetgegevens van nat Nederland, waaronder waterstandmetingen. In het Volkerak-Zoommeer zijn bij Kreekrak Noord metingen verricht, maar dit punt valt niet binnen de gebiedscontour die in BretView is ingevoerd. De enige locatie waar waterstandmetingen zijn verricht binnen de gebiedscontour is bij Rak Zuid, het meetpunt bij de Volkeraksluizen. De uitvoer van BretView wordt dan ook met deze waterstandmetingen vergeleken. De uurlijkse waterstandmetingen zijn daartoe verwerkt naar dagelijkse gemiddelden. Er zijn twee periodes geselecteerd die als vergelijkingsmateriaal dienen; het winterhalfjaar 1987-1988 en het winterhalfjaar 2004-2005.

Met BretView kunnen tijdreeks-berekeningen worden uitgevoerd, waarbij tijdreeksen van meerpeilen, windsnelheden en windrichtingen worden gecombineerd tot waterstanden op een bepaalde locatie. Om de uitvoer met de metingen te kunnen vergelijken zijn tijdreeksen van de randvoorwaarden voor de periodes 1 oktober 1987 tot 31 maart 1988 en 1 oktober 2004 tot 31 maart 2005 bepaald. Voor het meerpeilen zijn een tweetal reeksen waterstandmetingen, van Kreekrak noord en Rak zuid, gemiddeld. Er wordt aangenomen dat deze middeling een redelijke benadering is van het meerpeil op het Volkerak-Zoommeer. Voor daggegevens aangaande windsnelheden en windrichtingen zijn meetgegevens van het KNMI gebruikt [44]. Boven het Volkerak-Zoommeer worde echter geen windmetingen verricht. Naar aanleiding van een analyse van de windcondities boven het Volkerak-Zoommeer en Schiphol, welke in bijlage F, paragraaf F.4.2 wordt besproken, is besloten dat de windcondities bij Schiphol in extreme situaties vergelijkbaar zijn aan de windcondities bij het Volkerak-Zoommeer. Aangezien in deze situaties een dreiging van wateroverlast ontstaat, zijn dit de situaties waarop BretView betrouwbare waterstanden moet berekenen. Bij gemiddelde windcondities zijn windsnelheid en richting lokaal behoorlijk veranderlijk. Meetgegevens van Schiphol zijn dan niet te gebruiken voor waterstandberekeningen op het Volkerak-Zoommeer. Wel kan aangenomen worden dat als bij Schiphol de windsnelheden laag of gemiddeld zijn, op het Volkerak-Zoommeer ook gemiddelde windsnelheden heersen. De invloed van de wind is onder deze omstandigheden klein en de opwaaiing die BretView berekend zal dus verwaarloosbaar tot klein zijn, onafhankelijk van welke precieze windsnelheden en windrichtingen gebruikt worden.

In figuur E.9 en figuur E.10 zijn voor respectievelijk het winterhalfjaar '87/'88 en het winterhalfjaar '04/'05 de met BretView berekende waterstand bij de Volkeraksluizen en de gemeten waterstand uitgezet. De waterstand is in BretView berekend voor drie verschillende bodemhoogtes, 3 m – NAP, 4.5 m – NAP en 6 m – NAP. Deze lijnen zijn allen opgenomen in de figuren. Ook het meerpeil is weergegeven in de figuren. Wanneer de gemeten waterstand afwijkt van het meerpeil treedt er op- of afwaaiing op. In figuur E.9 en E.10 is aangegeven op welke tijdstippen de gemiddelde windsnelheid gelijk of hoger was dan windkracht 5. Op deze tijdstippen moet BretView afhankelijk van de windrichting opwaaiing of afwaaiing berekenen.



Figuur E.9: De gemeten waterstanden versus de berekende waterstanden bij de Volkeraksluizen in het winterhalfjaar van 1987/1988



Figuur E.10: De gemeten waterstanden versus de berekende waterstanden bij de Volkeraksluizen in het winterhalfjaar van 2004/2005

In figuur E.9 en E.10 valt op dat bij de aangegeven tijdstippen met hoge windsnelheden de waterstand bij Rak zuid (sterk) afwijkt van het meerpeil. De berekeningen van BretView laten op

deze tijdstippen ook windopzet zien. De waterstand in BretView verloopt bij extreme windcondities dus op een gelijke manier als de werkelijke waterstand.

Wat verder opvalt, is dat BretView bijna altijd de gemeten waterstand volgt. Alleen rond 28 oktober 1987 en tussen 15 en 20 februari 1988 laat de gemeten waterstand opwaaiing zien en de berekeningen afwaaiing en andersom. Reden hiervoor kan liggen in de windcondities van Schiphol, die voor die momenten sterk af kunnen wijken van de windcondities boven het Volkerak-Zoommeer.

De windopzet die in BretView wordt berekend overschat de gemeten windopzet echter wel, met uitzondering van de waterstand op 10 oktober 1987. Hoe hoger de windsnelheid, hoe hoger de windopzet en hoe groter de overschatting van BretView. Deze overschatting was verwacht; in sectie E.1 is uitgelegd dat BretView ervan uit gaat dat de windopzet in evenwicht is en de evenwichtwaterstand ligt hoger dan de werkelijke waterstand. Bovendien is gerekend met conservatieve bodemhoogtes. De overschatting is afhankelijk van de windsnelheid enkele centimeters, hier en daar zelfs oplopend tot tien centimeter. Ter vergelijking: de WAQUA-berekeningen hebben voor het IJsselmeer voor bijna alle locaties een maximale fout van 20 cm [40]. Dit geldt naar benadering ook voor BretView; onder regelmatig voorkomende extremen wordt een fout van 10 cm gemaakt, bij windcondities met zeer kleine herhalings tijden zal de fout ongeveer 20 cm worden. Verschil is dat WAQUA geen systematische overschatting berekend en BretView wel. De overschatting is afhankelijk van de bodemhoogte die is aangehouden in BretView. Met een bodemhoogte van 6 m – NAP wordt de waterstand het minst overschat.

Buiten de extreme windcondities om is te zien dat de berekende waterstand zo goed als gelijk is aan de gemeten waterstand. Benadrukt moet worden dat de reden hiervoor niet ligt in de juistheid van de modellering in BretView, maar in de toepassing van het meerpeil als randvoorwaarde. Onder milde windcondities is de werkelijke waterstand ongeveer gelijk aan het meerpeil en ook de berekende waterstanden wijken dan bijna niet af van de randvoorwaarde meerpeil.

Uit de validatie kan geconcludeerd worden dat BretView de trend van de gemeten waterstand goed modelleert. Het buiten beschouwing laten van bodemhoogtevariaties en het negeren van de Eendracht, het Zoommeer en het Bathse Spuikanaal in de modellering lijken niet te leiden tot onnauwkeurigheden in de waterstand. De werkelijke windopzet wordt bij hoge windsnelheden echter wel behoorlijk overschat, van enkele centimeters oplopend tot meer dan tien centimeter. De reden hiervoor ligt naar verwachting in de keuze voor de bodemhoogte, maar vooral in de stationariteit van BretView. Op basis van de tijdreeksen in figuur E.9 en E.10 kan geconcludeerd worden dat een bodemhoogte van 6 m – NAP de waterstand onder de huidige aannames het best benadert, omdat met de werkelijke gemiddelde bodemhoogte van 4.5 m – NAP de waterstand wordt overschat door de aanname van stationariteit. Voor dit onderzoek zijn de resultaten van BretView acceptabel, ondanks de overschatting van de windopzet. De absolute getallen zijn niet betrouwbaar, maar de trend wordt goed gemodelleerd. Zowel in de huidige als in de nieuwe situatie heeft BretView de windopzet overschat. Met de waterstanden die met BretView zijn berekend, kan daarom wel een goed beeld verkregen worden van het **verschil** tussen de huidige situatie en de nieuwe situatie.

Bijlage F. Hydra-M

Er zijn al overschrijdingsfrequentielijnen van de waterstand van het Volkerak-Zoommeer beschikbaar, zowel voor de huidige situatie als voor de situatie met inzet voor waterberging. Deze overschrijdingsfrequentielijnen zijn echter lijnen die de gemiddelde waterstand op het Volkerak-Zoommeer beschrijven. Om de overschrijdingsfrequentie van een waterstand op een bepaalde locatie te bepalen wordt het programma Hydra-M gebruikt.

F.1. De Hydra-familie

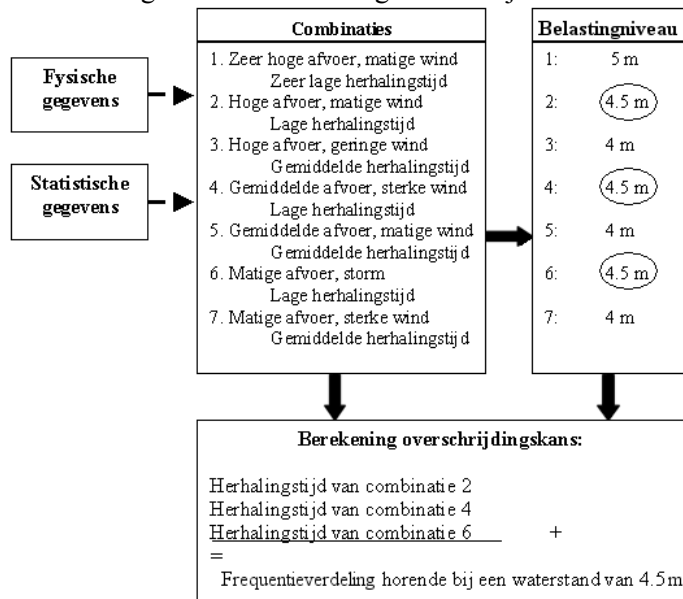
Door RIZA is een serie computermodellen ontwikkeld onder de verzamelnaam Hydra. Deze programma's zijn ter ondersteuning van dijkbeheerders ontwikkeld voor de toetsing van waterkeringen aan de hydraulische randvoorwaarden zoals vastgelegd in het Hydraulisch Randvoorwaardenboek [40]. In de modellen wordt aan de hand van gebiedsinformatie, fysische gegevens en statistiek een overschrijdingskans van de hydraulische belasting op een dijkvak bepaald. Hiermee kan de kruinhoogte bepaald of getoetst worden [40]. Het voordeel van de Hydraprogramma's is dat gerekend kan worden met een groot aantal combinaties van bedreigingen, waardoor de overschrijdingskans nauwkeurig bepaald kan worden [40].

Er zijn voor de verschillende waterlichamen verschillende Hydra-programma's ontwikkeld, aangezien in bijvoorbeeld de benedenrivieren andere bedreigingen een rol spelen dan in meren of voor de kust. Hydra-M is het programma dat is ontwikkeld om de bedreigingen van dijken rond het IJsselmeer en het Markermeer te bepalen. Dit programma kan worden aangepast om waterstanden met overschrijdingskansen te bepalen voor het Volkerak-Zoommeer.

F.2. Doel en werkwijze van Hydra-M

De hydraulische belasting op dijken rond meren wordt gevormd door waterstanden en golfcondities met een bepaalde kans van voorkomen. De grootte van deze belastingen worden bepaald door het meerpeil, de windsnelheid en de windrichting. Deze hydraulische randvoorwaarden zijn voor het IJsselmeergebied berekend met het waterbewegingsmodel WAQUA en het golfgroeimodel HISWA [57]. Naast de hydraulische randvoorwaarden moeten er ook statistische randvoorwaarden in Hydra-M worden ingevoerd. Met bepaalde kansverdelingen worden de frequenties van optreden van meerpeilen, windsnelheden en windrichtingen ingevoerd [58]. Uit de hydraulische en statistische randvoorwaarden worden de belastingcombinaties samengesteld. In Hydra-M speelt ook gebiedsinformatie een rol op de belasting van dijken. De aanwezigheid van dammen en/of voorland en het profiel van de dijk worden meegenomen. Aangezien in dit onderzoek niet de belasting van dijken, maar enkel de optredende waterstand van belang is, hoeft voor de berekeningen geen gebiedsinformatie ingevoerd te worden. Dit aspect van Hydra-M wordt daarom verder niet behandeld.

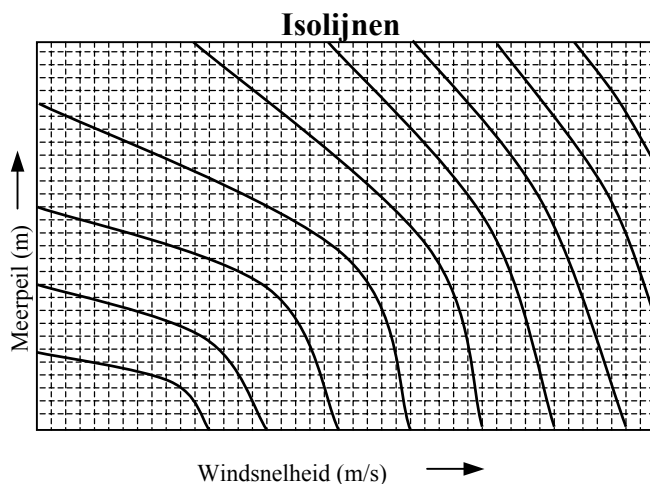
In Hydra-M worden combinaties van hoge afvoeren en matige wind, lage afvoeren en sterke wind en veel combinaties daartussenin doorgerekend. Het Hydramodel berekent voor alle combinaties het belastingniveau van het aangewezen dijkvak. Het belastingniveau bestaat uit een waterstand met of zonder golfoploop. Van alle combinaties die tot een zelfde belastingniveau leiden worden de herhalingsstijden opgeteld. Het resultaat van deze optelling is de frequentieverdeling van dit belastingniveau [40]. Om deze stappen te verduidelijken zijn ze in figuur F.1 geschematiseerd



weergegeven voor een beperkt aantal combinaties. Hydra-M doorloopt de methode zoals weergegeven in figuur F.1 voor alle mogelijk optredende waterstanden.

Figuur F.1: Schematisatie van een fictieve Hydramodellering

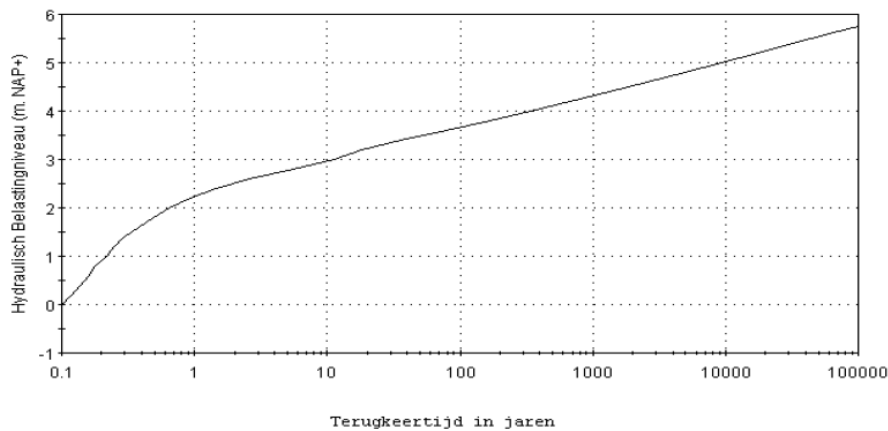
Vervolgens kan uit de frequentieverdelingen van alle belastingniveaus samen de overschrijdingskans van een bepaald belastingniveau worden bepaald [40]. Dit wordt geïllustreerd aan de hand van figuur F.2, waarin alle punten van een gelijk belastingniveau zijn verbonden met isolijnen.



Figuur F.2: Lijnen van gelijke waterstanden op basis van verschillende combinaties van meerpeilen en windsnelheden voor een bepaalde windrichting [aangepast van 40].

Een isolijn geeft dus een bepaald belastingniveau weer. In de ruimte boven een bepaalde isolijn bevinden zich de combinaties die dit belastingniveau overschrijden. De opgetelde overschrijdingskansen van alle combinaties in de ruimte boven een isolijn bepalen de overschrijdingskans van het desbetreffende belastingniveau. In de volgende paragraaf wordt de rekenmethode nader toegelicht. Het belastingniveau dat met Hydra-M wordt berekend is een probabilistische waarde, omdat het is opgebouwd uit alle mogelijke omstandigheden, of eigenlijk een vertegenwoordiging daarvan, die samen in een bepaalde kans van voorkomen resulteren. Het

eindresultaat van de berekening geeft Hydra-M weer in een overschrijdingsfrequentielijn zoals gepresenteerd in figuur F.3.



Figuur F.3: Uitvoer van Hydra-M [58]

Om de resultaten inzichtelijker te maken worden behalve een overschrijdingsfrequentielijn ook illustratiepunten gepresenteerd door Hydra-M. Deze punten geven weer welke de meest waarschijnlijke combinaties van randvoorwaarden zijn die tot een bepaalde hydraulische belasting kunnen leiden en geven op deze manier inzicht in welke omstandigheden de belasting kunnen veroorzaken. Deze waarschijnlijke combinaties zijn echter slechts een klein onderdeel van de mogelijke combinaties die tot de overschrijdingsfrequentie van dit belastingniveau bijdragen, ze dienen slechts ter illustratie [40, 58].

Er is een duidelijk verschil tussen Hydra-M en waterbewegingmodellen als WAQUA. De waterbewegingmodellen berekenen een deterministische waterstand afhankelijk van de condities die in het model zijn gestopt. Hydra-M gebruikt de deterministische waarden van de meerpeilen en windstatistieken uit de waterbewegingmodellen, samen met opgelegde statistische verdelingen, om met een probabilistische methode tot een overschrijdingsfrequentielijn van de mogelijk optredende waterstanden te komen. De basis hiervan is dat meerdere belastingcombinaties kunnen bijdragen aan de overschrijding van een bepaald belasting niveau. Er wordt in de volgende paragrafen dieper ingegaan op de rekenmethode en de benodigde invoer.

F.3. De ontwerpmethodiek voor het IJsselmeergebied

Hydra-M is gebruikt bij het vaststellen van de hydraulische belastingen voor het IJsselmeer, het Markermeer en de aangrenzende meren in het Hydraulisch Randvoorwaardenboek 2001 [13]. Er is hierbij een bepaalde ontwerpmethodiek gevolgd die beschreven staat in het rapport “Achtergronden Hydraulische Belastingen Dijken IJsselmeergebied” [40]. Deze ontwerpmethodiek wordt voor zover deze relevant is voor de toepassing van Hydra-M voor het Volkerak-Zoommeer hieronder besproken. Behalve de invoer van gebiedsinformatie wordt ook de modellering van windgolven hier buiten beschouwing gelaten.

F.3.1. De meerpeilstatistiek

Het meerpeil is gedefinieerd als de over een dag en het gehele IJsselmeer gemiddelde waterstand. De invoer voor de meerpeilstatistiek in Hydra-M is gebaseerd op metingen over een periode van 20 jaar. De metingen op twee tijdstippen van vier stations rond het IJsselmeer zijn gemiddeld om tot een meerpeil te komen. Lacunes in de meetreeksen zijn aangevuld met gesimuleerde meerpeilen, gegenereerd met het balansmodel BALANS [47]. Bovendien is de reeks verlengd van 20 naar 63 jaar met behulp van het model BEKKEN [40]. Voor de meerpeilreeks is naar aanleiding van een analyse van de seizoensinvloed uitgegaan van de hydrologische winterhalfjaren, lopend van oktober tot maart. Deze beperking is aangenomen omdat een afhankelijkheid tussen het seizoen en de meerpeilen was vastgesteld. De meerpeilen in de winter zijn maatgevend voor de extremen in een jaar [40].

Uit de meerpeilreeks zijn een overschrijdingsfrequentielijn en een overschrijdingsduurlijn bepaald. Hiertoe is eerst vastgesteld hoe vaak en hoe lang binnen de metingen en gesimuleerde meerpeilen een bepaald niveau overstegen wordt. Dit is gedaan voor ieder meerpeil, oplopend met stappen van 0.01 m [47]. Aan de hand van de gevonden overschrijdingsfrequenties en overschrijdingsduren zijn de gemiddelde overschrijdingsfrequentie per jaar en de gemiddelde duur per meerpeiltop per jaar vastgesteld voor ieder meerpeil [40]. Op de gevonden waarden is vervolgens een lijn gefit voor zowel de frequentielijn als de duurlijn, beide opgebouwd uit drie deelfuncties. Deze lijnen vormen het eerste deel van de overschrijdingsfrequentielijn en de overschrijdingsduurlijn. Het tweede deel van de overschrijdingslijnen kan niet uit metingen worden gehaald aangezien dit deel de omstandigheden die niet of nauwelijks voorkomen omvat. Het tweede deel van beide lijnen is daarom bepaald door de meerpeilreeks te extrapoleren naar extreme waarden.

Voor het extrapoleren van de frequenties van het meerpeil zijn extreme-waarde verdelingen gefit op de jaarmaxima van de meerpeilen. Uiteindelijk is voor ieder meerpeil de overschrijdingsfrequentielijn voor extreme waarden bepaald door de resultaten van de gefitte General Pearson type III, de Gumbel, de Normale en de Raleigh verdeling te middelen [47].

Voor het bepalen van de overschrijdingsduurlijn kan geen extreme-waarde verdeling gebruikt worden. Eerst zijn daarom de gemiddelde overschrijdingsduren per overschrijding bepaald. Uitgezet tegen de meerpeilniveaus konden een machtsfunctie en een exponentiele functie gebruikt worden om de overschrijdingsduren te fitten. Er is gekozen voor de machtsfunctie, waarmee vervolgens voor de extreme meerpeilen de overschrijdingsduren per meerpeiltop konden worden bepaald [47]. Door voor iedere meerpeiltop de gemiddelde frequentie van voorkomen per jaar maal de gemiddelde duur te berekenen, is uiteindelijk de overschrijdingsduur per jaar voor ieder meerpeil bepaald [40].

Via bovenstaande methode zijn in twee stappen voor zowel de frequentie van voorkomen als de duur van een meerpeiltop overschrijdingslijnen vastgesteld. Belangrijk bij het berekenen van de waterstand is de correlatie tussen meerpeil en wind. Deze is onderzocht en er is vastgesteld dat het meerpeil een samenhang laat zien met de heersende windrichting is. De meerpeilen zijn het hoogst als de wind uit de hoek tussen 225° en 45° komt, wat zijn oorsprong vind in de beperking van het lozen van het IJsselmeer op de Waddenzee door opstuwing van de Waddenzee. Omdat er geen sprake mag zijn van correlatie tussen wind en meerpeil, is een tweedeling in de meerpeilen

aangebracht. Er is gekeken naar “westelijke meerpeilen” en “oostelijke meerpeilen” [40]. De correlatie tussen meerpeil en windsnelheden was moeilijk vast te stellen en werd daarom onafhankelijk geacht [47].

F.3.2. De windstatistiek

Voor de windstatistiek zijn meetgegevens van het KNMI gebruikt, welke met het Rijkoort-Weibul model zijn verwerkt tot overschrijdingsfrequenties en kansen van voorkomen per dag. Deze twee soorten gegevens zijn beide nodig om de overschrijdingskansen per jaar van een bepaald belasting niveau via de Riemann-integratie te bepalen [45]. De Riemann-integratie methode wordt verder besproken in F.3.3. ‘De probabilistische rekenmethode’. Het Rijkoort-Weibul model is door Rijkoort en Wieringa in 1983 ontwikkeld voor de beschrijving van windsnelheidverdelingen in Nederland [45]. De belangrijkste kenmerken van het Rijkoort-Weibul model zijn:

- ~ dat het model voor elke locatie in Nederland overschrijdingskansen van windsnelheden kan bepalen [45];
- ~ dat het model deze overschrijdingskansen bepaalt door windgegevens van meerdere stations te gebruiken zodat regionale invloeden worden meegenomen. Door de gegevens te middelen over het hele gebied, wordt volgens Rijkoort en Wieringa het windklimaat beter gemodelleerd. Zeer plaatselijke stormen die een station makkelijk kunnen missen of juist precies kunnen raken worden zo verdisconteerd [45];
- ~ dat de uurgemiddelde potentiële wind, de windsnelheid 10 m boven open terrein, door een aangepaste, samengestelde Weibul-verdeling wordt beschreven [45];
- ~ dat rekening wordt gehouden met meteorologische-fysische aspecten door het toepassen van beschuttingscorrecties voor meetstations en het indelen in subgroepen van de windgegevens (dag/nacht, tweemaandelijks, richtingsectoren) om rekening te houden met inhomogeniteiten [45].

De windgegevens van de verschillende stations worden omgezet naar potentiële windsnelheden met behulp van beschuttingscorrecties. Vervolgens wordt onderscheid gemaakt tussen dag en nacht, tussen de tijd van het jaar, verdeeld in tweemaandelijkse perioden, en tussen de windrichting, verdeeld in sectoren van 30°. Zodoende worden zoals gezegd de inhomogeniteiten aangepakt. Per locatie worden er berekeningen uitgevoerd voor de verschillende subgroepen. Vervolgens worden de statistieken van deze onderdelen samengevoegd om per locatie de overschrijdingskansen van de wind te bepalen [45].

Om de extreme windsnelheden te berekenen worden de statistieken geëxtrapoleerd. Rijkoort en Wieringa hebben een extreme-waarden verdeling op basis van de samengestelde Weibul verdeling voorgesteld voor de extrapolatie [45]. Per windrichtingsector en tweemaandelijkse periode van de windgegevens worden de gegevens geëxtrapoleerd, waarna de gegevens van dag en nacht worden gecombineerd. Hierbij moeten lage windsnelheden en gegevens van op elkaar volgende windrichtingen en op elkaar volgende periodes gecorrigeerd worden om afhankelijkheid tussen de metingen uit te sluiten [45]. Resultaat van het Rijkoort-Weibul model is de ‘tenminste 1 maal kans’ van optreden van een uurgemiddelde windsnelheid per tweemaandelijkse periode [45]. Doordat de gegevens zijn gecorrigeerd voor afhankelijkheden, kan deze ‘tenminste 1 maal kans’ worden omgezet naar kansen per dag of de kans per winterhalfjaar. Voor de Riemann-integratie moet echter de overschrijdingsfrequentie in plaats van de overschrijdingskansen bepaald worden. Bij

het bepalen van de windstatistiek voor het IJsselmeergebied is ervan uitgegaan dat voor hoge windsnelheden in windgedomineerde situaties de frequentie gelijk is aan de kans [45].

Het Rijkoort-Weibul model is opgesteld met gegevens uit de periode 1962-1976. Omdat het erg bewerkelijk is om het model aan te passen met recente data, is bekeken of de windgegevens in de periode 1962-1976 vergelijkbaar zijn met de windgegevens uit de periode 1951-1991 voor de locatie Schiphol [45]. Windgegevens van de locatie Schiphol zijn namelijk gebruikt als invoer van WAQUA, waarmee voor Hydra-M de waterbeweging op de meren is berekend. De resultaten van deze analyse waren aanleiding om aan te nemen dat de statistiek waarop het Rijkoort-Weibul model is gebaseerd voldoende representatief is om te gebruiken [45].

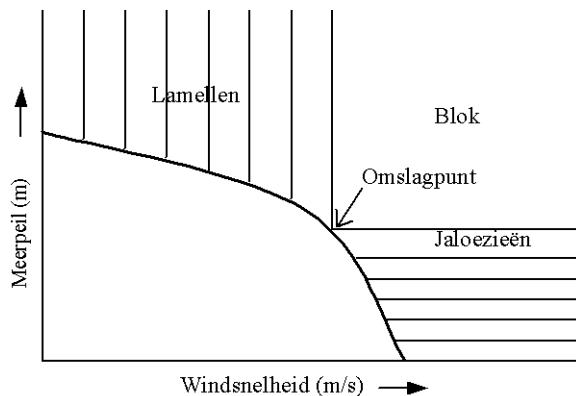
Omdat voor het bepalen van de waterbeweging windgegevens van Schiphol zijn gebruikt, is een analyse uitgevoerd aangaande de verschillen in de ruimtelijke variatie van het windveld boven Schiphol en het IJsselmeergebied. Er is aan de hand van waarnemingen en statistiek gekeken naar de verschillen tussen de locaties Schiphol, Den Helder en Terschelling tijdens 6 stormen. Tegen de verwachting in geven de waarnemingen gemiddeld een 1,5 m/s lager verschil in windsnelheid aan. Dit absolute verschil kan verklaard worden door de beperkte grootte van de steekproef [45]. Wel geven zowel de statistiek als de waarnemingen de trend weer dat de windsnelheden in Den Helder en op Terschelling groter zijn dan bij Schiphol. Op basis hiervan is vastgesteld dat voor zwaardere stormen uitgegaan mag worden van de plaatsafhankelijke windsnelheidsverschillen uit het Rijkoort-Weibul model [45]. De statistieke gegevens van Schiphol zijn met het Rijkoort-Weibul model omgerekend naar plaatselijke windsnelheden voor acht locaties in het IJsselmeergebied. Het gegenereerde windveld dient als invoer van WAQUA [45].

F.3.3. De probabilistische rekenmethode

De hydraulische randvoorwaarden worden bepaald met de programma's WAQUA (waterstanden) en HISWA (golfbewegingen). WAQUA wordt besproken in de volgende paragraaf. HISWA wordt niet besproken, aangezien alleen de waterstand relevant is voor dit onderzoek. Het berekenen van informatie voor alle locaties in het IJsselmeergebied met WAQUA is zeer tijdrovend. Om de benodigde tijd te beperken is slechts selectief modelinformatie gegenereerd. Voor ongeveer 1200 locaties zijn voor ieder van de 12 windrichtingsectoren 45 combinaties van meerpeil en windsnelheid berekenend. Aan de hand van interpolatie tussen deze 45 combinaties kan de waterstand voor elke willekeurige combinatie bepaald worden [57]. Hiertoe is per windrichtingsector een reproductiefunctie afgeleid, die de relatie tussen de hydraulische randvoorwaarden (meerpeil en windsnelheid) en de opwaaiing vastlegt. Omdat zich bij windsnelheden tussen 0 en 14 m/s zo nu en dan problemen voordoen met de reproductiefuncties, is er voor gekozen om voor dit bereik de waterstand uit interpolaties te bepalen [57].

In totaal zijn er ongeveer 1900 combinaties per windrichtingsector bepaald uit de 45 combinaties per windrichting samen met de reproductiefuncties en interpolaties. Deze combinaties vormen de invoer voor Hydra-M waaruit de overschrijdingsfrequenties bepaald worden [57]. In de vorige paragraaf is reeds aangegeven dat het bepalen van de overschrijdingsfrequenties met behulp van de

Riemann-integratie methode¹ is gedaan. Het gebruik van deze methode is gebaseerd op het bij elkaar zoeken van alle combinaties van hydraulische randvoorwaarden die tot hetzelfde belastingniveau leiden. Deze combinaties worden verbonden met een isolijn zoals in figuur F.2 in de vorige paragraaf is gepresenteerd. De ruimte boven de isolijn heeft een bepaalde frequentie-inhoud welke de overschrijdingsfrequentie van het belastingniveau bepaalt. De frequentie-inhoud van de ruimte boven de isolijn wordt met de Riemann-integratie methode berekend [57]. Daartoe wordt de ruimte opgedeeld in kleine deelintervallen zoals in figuur F.4.



Figuur F.4: Indeling van de ruimte boven een isolijn volgens de Riemann-integratie methode [57].

De ruimte boven een isolijn wordt in lamellen, jaloerieën en een blok ingedeeld omdat deze gedeeltes een andere tijdschaal hebben, afhankelijk van de dominerende randvoorwaarde [57]. De meerpeilgedomineerde combinaties, weergegeven met de lamellen, hebben een relatief lange duur, het meerpeil is een langzaam veranderende variabele. Belangrijk voor het berekenen van de frequentie-inhoud van de lamellen is de *frequentie* van optreden van *meerpeilverhogingen*. En omdat er tijdens één meerpeilverhoging meerdere milde stormen kunnen voorkomen die leiden tot een overschrijding van het belastingniveau, moet ook de *kans* dat gedurende de verhoging van het meerpeil een bepaalde *windsnelheid* wordt overschreden bekend zijn. De *duur* van de meerpeilverhoging beïnvloedt de kans dat een bepaalde windsnelheid zich voordoet [57].

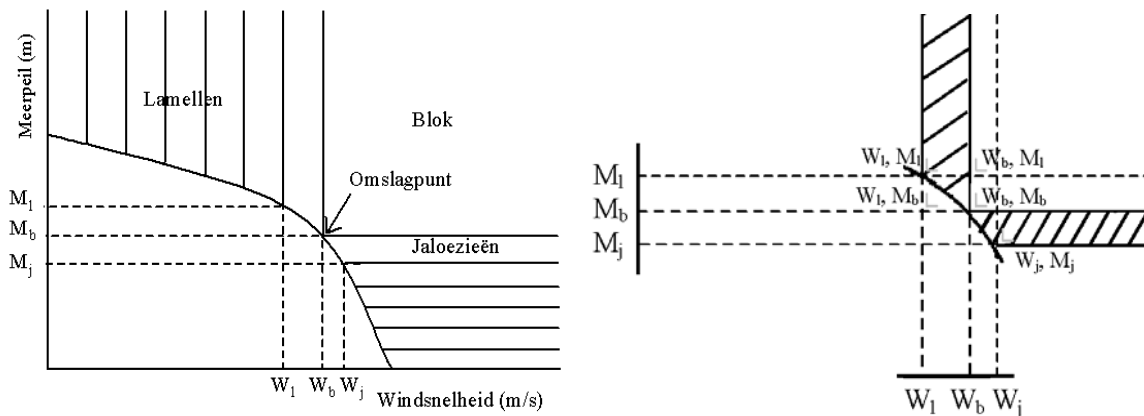
In windgedomineerde situaties, kan een hevige storm bij lage tot gemiddelde meerpeilen tot overschrijding van het belastingniveau leiden. De tijdschaal is in vergelijking met een stijgend meerpeil veel kleiner. De ruimte boven de isolijn waar de wind domineert is opgedeeld in jaloerieën. In deze situatie is de *frequentie* van voorkomen van een *storm* van belang voor het berekenen van de frequentie-inhoud. Daarnaast moet de *kans* dat een bepaald *meerpeil* optreedt bekend zijn. Dit wordt niet beïnvloed door verschillen in tijdschaal [57].

Voor ieder punt op de isolijn wordt nagegaan welke randvoorwaarde dominant is, om te bepalen hoe de overschrijdingsfrequentie bepaald moet worden. Daar waar de randvoorwaarden ongeveer gelijkwaardig zijn, is een overgangsgebied gedefinieerd. Op de isolijn wordt dit weergegeven met

¹ Bij de Riemann integratie methode wordt de oppervlakte onder, of voor het bepalen van de overschrijdingskans boven, een functie berekend door deze ruimte onder te verdelen in smalle deelintervallen. Van deze deelintervallen of wel rechthoekjes wordt de oppervlakte berekend en de sommatie van al deze oppervlakjes levert de oppervlakte van de totale ruimte. Hoe smaller de deelintervallen gekozen worden, hoe beter de sommatie de werkelijke oppervlakte benadert. [59]

het ‘omslagpunt’, zie figuur F.4. De ruimte daarboven valt in het blok [57]. Voor het omslagpunt geldt een vrij arbitrair criterium; als het meerpeil (in m ten opzichte van het streefpeil) meer dan de helft van het hydraulische belastingniveau (in m ten opzichte van het streefpeil) bedraagt, wordt het meerpeil als dominant aangewezen. Het omslagpunt zelf hoort nog bij de door meerpeilen gedomineerde ruimte [57]. Alle combinaties met meerpeilen groter dan het meerpeil op het omslagpunt (M_b) en windsnelheden groter dan de windsnelheid op het omslagpunt (W_b) liggen in het blok, zoals te zien is in figuur F.5 [57]. De overschrijdingsfrequentie binnen het blok is gebaseerd op het gelijktijdig optreden van een meerpeil groter dan M_b en een windsnelheid die minimaal één keer groter is dan W_b gedurende de periode dat het meerpeil de waarde M_b overschrijdt [57]. In vijf stappen wordt de overschrijdingsfrequentie binnen het blok bepaald [57]:

1. Bepaal de overschrijdingsfrequentie $OF_{M_b} =$ het gemiddeld aantal keren dat M_b wordt overschreden per winterhalfjaar;
2. Bepaal de overschrijdingsduren, het aantal dagen per winterhalfjaar dat een zeker meerpeil wordt overschreden;
3. Bepaal $N_{meerpeil} =$ de gemiddelde duur van een meerpeiltop groter dan $M_b =$ de overschrijdingsduur van M_b van een meerpeil/ de overschrijdingsfrequentie van M_b ;
4. Bepaal de kans dat de windsnelheid minimaal één keer boven W_b komt gedurende $N_{meerpeil}$. Daartoe moet $PD_{W_b} =$ de kans dat de gemiddelde windsnelheid per dag W_b minimaal één keer overschrijdt bepaald worden aan de hand van de uurgemiddelde windsnelheden uit het Rijkoort-Weibul model, zie ‘Windstatistiek’;
5. De overschrijdingsfrequentie van een blok kan met bovenstaande gegevens berekend worden: $OF_{M_b, W_b} = OF_{M_b} * (1 - (1 - PD_{W_b})^N)$



Figuur F.5: Lamellen, jaloezieën en een blok, ingezoomd op het omslagpunt [aangepast van 57].

Voor een lamel wordt de overschrijdingsfrequentie uitgerekend met behulp van de bij stap 5 vermelde bepaling van de overschrijdingsfrequentie van een blok. In het rechterdeel van figuur F.5 is een lamel, het rechtopstaande gearceerde deel tussen (W_l, M_l) en (W_b, M_b) , weergegeven. Er worden vier blokken aangeduid vanuit de hoeken (W_l, M_l) , (W_b, M_l) , (W_l, M_b) en (W_b, M_b) in deze figuur. De overschrijdingsfrequenties van deze blokken worden gebruikt om de overschrijdingsfrequentie van de lamel te bepalen [57]. Door voor een zelfde meerpeil de overschrijdingsfrequenties van elkaar af te trekken, $(OF_{W_l, M_l} - OF_{W_b, M_l})$ en $(OF_{W_l, M_b} - OF_{W_b, M_b})$, worden de overschrijdingsfrequenties voor de lamel vanaf meerpeil M_l en vanaf meerpeil M_b bepaald. De loop van de isolijn loopt tussen de twee bovengenoemde overschrijdingsfrequenties in. Er wordt aangenomen dat het halveren van het verschil tussen de overschrijdingsfrequentie

behorende bij M_l en bij M_b de isolijn goed benaderd [57]. De overschrijdingsfrequentie van een lamel wordt dan bepaald door de overschrijdingsfrequentie van de lamel boven M_l plus de helft tussen M_l en M_b [57]:

$$OF_{\text{lamel}} = (OF_{W_l, M_l} - OF_{W_b, M_l}) + ((OF_{W_l, M_l} - OF_{W_b, M_l}) - (OF_{W_l, M_b} - OF_{W_b, M_b}))/2$$

In het rechterdeel van figuur F.5 is ook een jaloezie weergegeven; het liggende gearceerde deel tussen (W_b, M_b) en (W_j, M_j) . In de jaloezie is de windsnelheid de dominante factor. De overschrijdingskans wordt daardoor bepaald uit het gemiddelde van de overschrijdingsfrequenties van W_b en W_j maal de kans dat er een meerpeil voorkomt dat tussen M_b en M_j ligt [57]. Voor de overschrijdingsfrequenties van W_b en W_j , wordt het gemiddeld aantal keer dat W_b en W_j in een winterhalfjaar worden overschreden bepaald. Voor het bepalen van de kans dat een meerpeil tussen M_b en M_j ligt kunnen de overschrijdingsduren OD_{M_b} en OD_{M_j} gebruikt worden. Het verschil tussen OD_{M_b} en OD_{M_j} geeft aan hoeveel dagen het meerpeil gemiddeld tussen M_b en M_j ligt. Door deze totale duur te delen door het totaal aantal dagen in een winterhalfjaar, wordt de kans dat het meerpeil tussen M_b en M_j ligt bepaald. De overschrijdingsfrequentie van een jaloezie wordt dan als volgt bepaald [57]:

$$OF_{\text{jaloerie}} = ((OF_{W_b} + OF_{W_j})/2) * (OD_{M_j} - OD_{M_b})/182.25$$

Bij de bepaling van de overschrijdingsfrequenties is tot nu toe geen rekening gehouden met de verschillende windrichtingen waarvoor de overschrijdingsfrequenties moeten worden berekend. De voorgaande vergelijkingen voor de overschrijdingsfrequenties zijn herschreven zodat ze voor iedere windrichting geldig zijn. Om de totale overschrijdingsfrequentie van een belastingniveau te bepalen, kunnen deze overschrijdingsfrequenties per windrichting gesommeerd worden [57].

De overschrijdingsfrequentie afhankelijk van windrichtingen voor een blok of lamel is [57]:

$$OF(mp, w) = P(r=R) \cdot OF(mp)_{\text{totaal}} \cdot P(w | r=R)_{\geq l, N}$$

mp = de statistische randvoorwaarde meerpeil;

w = de statistische randvoorwaarde windsnelheid;

r = de statistische randvoorwaarde windrichtingsector, $r = 1, \dots, 12$.

$P(r=R) \cdot OF(mp)_{\text{totaal}}$ geeft de kans op optredende meerpeilen naar rato van de optredende windrichtingen weer. Deze term bepaalt hoe vaak een bepaald meerpeil het niveau mp overschrijdt terwijl de wind uit de richting R komt [57]. $P(w | r=R)_{\geq l, N}$ geeft de voorwaardelijke kans dat een bepaalde windsnelheid w wordt overschreden bij een bepaalde windrichting R . Het gaat om een kans die minstens één maal optreedt gedurende de duur van een zekere meerpeiltop N [57].

De overschrijdingsfrequentie afhankelijk van windrichtingen voor een jaloezie is [57]:

$$OF(mp, w) = (P(w) \wedge r=R) \cdot P(mp | r=R)$$

$(P(w) \wedge r=R)$ geeft de gemiddelde kans per jaar dat een bepaalde windsnelheid w wordt overschreden terwijl deze uit een bepaalde windsector komt [57]. $P(mp | r=R)$ is de voorwaardelijke kans dat een bepaald meerpeil mp wordt overschreden onder de voorwaarde dat

de wind uit richtingsector R komt. Hiertoe zijn de meerpeilen opgedeeld naar windrichtingen. De reden hiervan wordt hieronder toegelicht [57].

De totale overschrijdingsfrequentie van een belastingniveau kan met één van de bovenstaande vergelijkingen worden bepaald, afhankelijk van de dominante randvoorwaarden, door de 12 overschrijdingsfrequenties per windrichting op te tellen [57]. De hierboven beschreven methode kan onder bepaalde omstandigheden fouten opleveren, zoals bij een afluiddige wind. Dit is opgelost in Hydra-M door de verdeling van de ruimte boven de isolijnen aan te passen [57]. Een andere aanpassing was nodig om aan de voorwaarde van de Riemann-integratie methode te voldoen. Deze methode vereist onafhankelijkheid tussen de randvoorwaarden. Er is op het IJsselmeer echter sprake van correlatie tussen de meerpeilen en de windrichting, zoals is besproken in de F.3.2. Om de onafhankelijkheid van de variabelen te garanderen zijn de meerpeilen opgesplitst naar windrichtingsectoren ‘west’ en ‘oost’.

F.3.4. Modelleren van de waterbeweging

Het 2D programma WAQUA is gebruikt voor de modellering van de waterbeweging op het IJsselmeer. Deze modellering is gebaseerd op de wetten van behoud van massa en impuls [40]. De belangrijkste variabelen die de waterbeweging beïnvloeden zijn de windschuifspanning, de verhangkrachten en toevoer en afvoer van water. Er wordt uitgegaan van een non-stationaire situatie, waarin het verhang nooit tijd genoeg heeft om een evenwicht te bereiken [40]. Dit in tegenstelling tot het programma Bretpro, zie bijlage E. Het gebied wordt beschreven als een kromlijning rekenrooster waarvan de maasgrootte bepaald wordt uit een optimalisatie van de rekentijd en de nauwkeurigheid. Deze maasgrootte kan van punt tot punt verschillen, afhankelijk van de gewenste nauwkeurigheid [40]. Het WAQUA model is afgeregeld voor het IJsselmeer met behulp van geobserveerde waarden van de windsnelheid en richting, de af- en aanvoer en waterstanden [40].

Er is met negen verschillende windsnelheden gerekend. Dit was een afweging tussen het genereren van voldoende informatie en de rekentijd. De hoogst gekozen snelheid komt minder vaak voor dan eens in de 10.000 jaar, de strengste veiligheidsnorm op het IJsselmeer [40]. Het stormverloop is verdeeld in een voorflank van 9 uur en een topduur van 2 uur. De achterflank van de storm is niet meegenomen aangezien de meest gevaarlijke situatie dan al gepasseerd is. Voor de meerpeilen is een maximum peil aangenomen dat $1.3 \cdot 10^5$ keer per jaar voorkomt. Het minimum peil is het streefpeil in de winter. Lager komen de peilen zelden [40]. Er is gerekend met 5 meerpeilen. Deze zijn bepaald uit de relatie tussen de waterdiepte en de opwaaiing [40]. De meerpeilen kunnen variëren tijdens de 11 uur durende storm door aan- en afvoer van water en het beheer van de keersluis bij Ramspol. Deze variaties zijn echter klein, waardoor het meerpeil constant wordt verondersteld gedurende de stormduur. De opwaaiing tegen het einde van de stormtop is maatgevend [40]. Bij afwaaiing is de maximale waterstand gelijk aan het opgelegde meerpeil. Voor deze situatie is het niet nodig om waterbewegingsberekeningen te maken.

In paragraaf F.3.3 is reeds uitgelegd dat de berekeningen van WAQUA zijn uitgebreid met reproductiefuncties om de rekentijd te beperken. Uitgangspunt is dat het IJsselmeergebied versimpeld kan worden tot een rechthoekige bak met horizontale bodem met bepaalde ruwheid onder stationaire omstandigheden. Meerpeil en windcondities zijn dus constant [40]. De ruwheid,

bodemhoogte en afmetingen van de bak worden zo gekozen dat het versimpelde model de met WAQUA berekende waterstanden goed benaderd. Voor iedere dijklocatie en windrichting is een reproductiefunctie afgeleid om de tussenliggende combinaties te kunnen berekenen [40]. Alle reproductiefuncties zijn getoetst op nauwkeurigheid. Voor dijklocaties gelegen nabij het zwaartepunt van het IJsselmeer voldoen de reproductiefuncties niet. Er is daar gebruik gemaakt van directe interpolatie uit de berekeningen van WAQUA. Ook op andere plaatsen wordt gekozen voor directe interpolatie wanneer de reproductiefunctie een te grote afwijking van de WAQUA resultaten laat zien [40]. Uit de WAQUA berekeningen, de reproductiefuncties en aanvullende interpolaties kan voor iedere locatie langs het IJsselmeer de waterstand berekend worden uit een willekeurige combinatie van een meerpeil en een windsnelheid voor een windrichting.

F.4. Hydra-M toegepast voor het Volkerak-Zoommeer

Hydra-M wordt in het kader van dit onderzoek toegepast voor het Volkerak-Zoommeer om de overschrijdingskansen van waterstanden te bepalen. Hydra-M is specifiek ontwikkeld voor het IJsselmeergebied. Gevolg is dat het programma niet rechtstreeks overgenomen kan worden. In deze paragraaf wordt daarom besproken welke aspecten aangepast moeten worden en onder welke aannames het programma gebruikt kan worden.

F.4.1. Fysieke gegevens

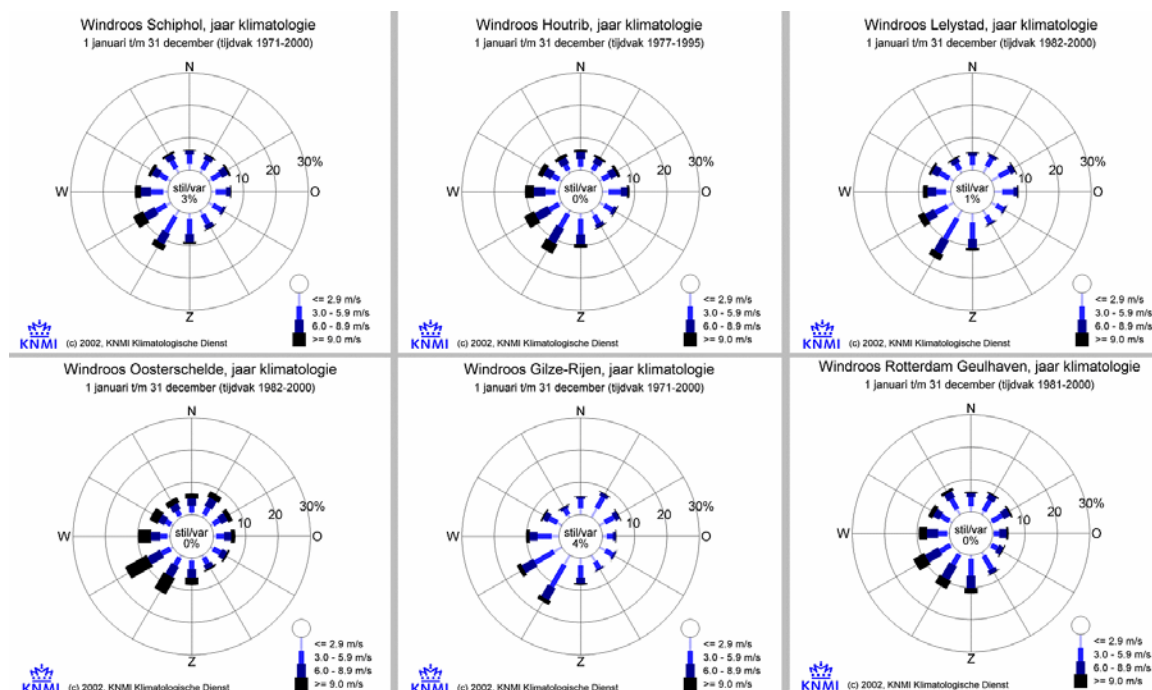
Voor het IJsselmeergebied is de waterbeweging gemodelleerd met WAQUA. De resultaten van deze modellering zijn gebruikt als invoer voor de fysieke kant van Hydra-M. Voor het Volkerak-Zoommeer is het programma BretView gebruikt om de waterbeweging te modelleren. Dit proces staat beschreven in bijlage E. De uitvoer van BretView vormt de invoer van de fysieke gegevens in Hydra-M. De modellering met BretView is veel verder versimpeld dan de modellering met WAQUA. Er wordt onder andere stationariteit verondersteld; de waterstand is op alle tijdstippen in evenwicht en er wordt geen stormverloop meegenomen. Ook stromingen in het Volkerak-Zoommeer worden genegeerd. De resultaten van de waterbewegingmodellering voor het Volkerak-Zoommeer zijn daarom minder nauwkeurig dan voor het IJsselmeergebied. Het gevolg voor de berekeningen met Hydra-M is dat minder waarde gehecht kan worden aan de overschrijdingskansen die berekend worden als zijnde absolute waarden. De overschrijdingskansen die in dit onderzoek worden berekend zijn enkel geschikt om een vergelijking tussen twee situaties te maken, de situatie met en zonder inzet van het Volkerak-Zoommeer. De resultaten van BretView, alle mogelijke combinaties van meerpeilen en windcondities die tot een bedreigende waterstand kunnen leiden, zijn weggeschreven naar een database. Hydra-M kan de benodigde fysieke gegevens direct uit deze database halen.

De randvoorwaarden die zijn gebruikt voor het berekenen van de waterstanden met BretView zijn beschreven in bijlage E. De fysieke gegevens die voor het IJsselmeergebied zijn gebruikt zijn niet gelijk aan de fysieke kenmerken van het meerpeil, de windsnelheid en windrichtingen van het Volkerak-Zoommeergebied. Toch zijn alleen voor het meerpeil nieuwe fysieke gegevens in BretView gebruikt. Voor de windgegevens zijn de randvoorwaarden van het IJsselmeergebied gebruikt. De reden hiervoor ligt in het 'hergebruiken' van de statistische gegevens, zoals in de volgende paragraaf wordt uitgelegd.

F.4.2. Statistische windgegevens

De statistische gegevens die voor het IJsselmeergebied zijn gebruikt zijn niet gelijk aan de statistische kenmerken van het meerpeil, de windsnelheid en windrichtingen van het Volkerak-Zoommeergebied. Net als voor de fysieke windgegevens wordt voor de windstatistiek echter wel uitgegaan van de statistieke windcondities zoals deze voor het IJsselmeergebied zijn bepaald. Reden hiervoor is een beperking van de benodigde aanpassingstijd van Hydra-M.

Voor het windklimaat boven het IJsselmeergebied is uitgegaan van metingen bij Schiphol. De windstatistiek die is toegepast voor het IJsselmeer is ook gebaseerd op metingen van Schiphol. Deze gegevens zijn met het Rijkcoort-Weibul model omgerekend naar waarden voor het IJsselmeergebied. Aan de hand van een vergelijking van de windgegevens boven het Volkerak-Zoommeer, het IJsselmeergebied en Schiphol is vastgesteld of het gebruiken van windgegevens die zijn gebruikt voor het IJsselmeergebied voor het Volkerak-Zoommeergebied acceptabel is. De windcondities boven het Volkerak-Zoommeer zijn onbekend, er worden daar geen metingen verricht. Om de windcondities boven het Volkerak-Zoommeer te vergelijken zijn in figuur F.6 de windrozen van omliggende meetpunten opgenomen. Uit de gegevens van het KNMI is gebleken dat het gemiddelde van de meetpunten Oosterschelde, Gilze Rijen en Rotterdam Geulhaven op het eerste gezicht redelijk op de windrozen rond het IJsselmeergebied lijkt.



Figuur F.6: Windrozen voor Schiphol, Houtrib (IJsselmeer), Lelystad (IJsselmeer), Oosterschelde (Zeeuwse Delta), Gilze Rijen (West-Brabant) en Rotterdam Geulhaven (ten noorden van Volkerak-Zoommeer) [60].

Uit een vergelijking van de geobserveerde stormen bij Tholen (vlakbij het Volkerak-Zoommeer), Lelystad (vlakbij het IJsselmeer) en Schiphol is gebleken dat van de tien meest extreme windsnelheden die op de locaties zijn gemeten tussen 1982 en 2002 vier metingen overeenkomen tussen Tholen en Lelystad en drie tussen Tholen en Schiphol. Tabel F.1 geeft een overzicht van deze stormen.

Datum	Tholen			Lelystad			Schiphol		
	Tijdstip	Windrichting (graden)	Windsnelheid (m/s)	Tijdstip	Windrichting (graden)	Windsnelheid (m/s)	Tijdstip	Windrichting (graden)	Windsnelheid (m/s)
27 nov. 1983	3:00	240	24.4	6:00	220	22.9	-	-	-
25 jan. 1990	16:00	240	24.0	19:00	230	26.1	18:00	240	28.0
27 okt. 2002	13:00	250	23.0	14:00	250	23.4	16:00	260	23.6
26 feb. 1990	10:00	250	22.2	10:00	240	21.4	9:00	230	22.1

Tabel F.1: Vier overeenkomende data met extreme windsnelheden uit de top 10 extreme windsnelheden van 1982-2002 [36].

Uit de (beperkte) gegevens in tabel F.1 valt op te maken dat de extreme windsnelheden rond dezelfde orde van grootte liggen op de locaties. Ook de overheersende windrichtingen onder extreme condities komen redelijk overeen. In ‘Achtergronden hydraulische belastingen dijken IJsselmeergebied. Deelrapport 3, Windstatistiek’ [45] wordt deze vinding onderschreven. Zware stormen zoals die in tabel F.1 zijn vaak geen lokale gebeurtenissen, waardoor gesteld kan worden dat de overschrijdingsfrequenties van windsnelheden overeenkomen voor de verschillende locaties [45]. Omdat juist zware stormen tot maatgevende situaties van de waterstand leiden, kan aangenomen worden dat de windstatistiek voor de verschillende locaties onderling gebruikt kan worden.

Er kan geconcludeerd worden dat alhoewel het gebruiken van de windgegevens van het IJsselmeergebied voor het Volkerak-Zoommeer een grove aanname is, de gegevens qua orde grootte en qua verdeling voldoende op elkaar lijken om met de gegevens van het IJsselmeergebied een goed beeld te schetsen van de overschrijdingskansen van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer. De overschrijdingskansen die gevonden worden voor het Volkerak-Zoommeer kunnen door de onnauwkeurigheid in de invoer echter niet als absolute waarde beschouwd worden.

De statistische windgegevens zoals deze voor het IJsselmeergebied zijn bepaald zijn opgenomen in bijlage G. Het gaat om de dagkansen en winterhalfjaarkansen van de windsnelheid per windrichtingsector.

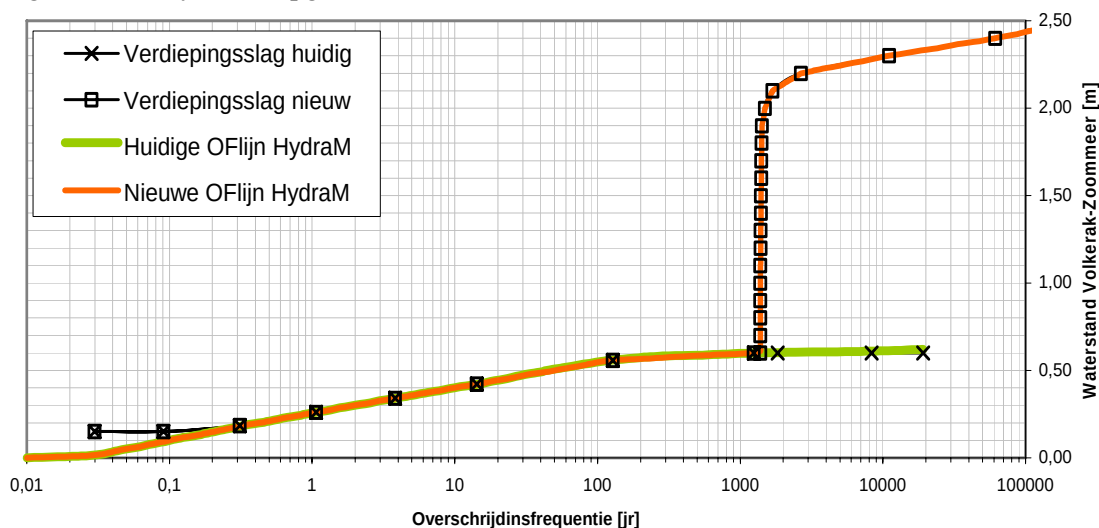
F.4.3. Statistische meerpeilgegevens

De statistische meerpeilgegevens die voor het IJsselmeergebied zijn gebruikt zijn niet bruikbaar voor de meerpeilen op het Volkerak-Zoommeer. In tegenstelling tot de windgegevens, die boven het IJsselmeer en het Volkerak-Zoommeer een zekere gelijkenis tonen, zijn de meerpeilen uniek voor een meer. Het meerpeil wordt bepaald door de plaatselijke neerslag en verdamping, maar ook door de aanvoer en afvoer van water. Vaak wordt een meerpeil binnen een bepaalde band gehouden. Op het Volkerak-Zoommeer wordt het meerpeil met peilbeheer tussen de 0.1 m – NAP en 0.15 m + NAP gehouden. Alleen onder extreme omstandigheden komt het waterpeil hoger, met in de huidige situatie een bovengrens van 0.5 m + NAP [2]. Doordat de meerpeilen uniek zijn voor een meer moeten statistische gegevens aangaande het meerpeil van het Volkerak-Zoommeer worden bepaald. Hydra-M heeft een overschrijdingsfrequentielijn en een overschrijdingsduurlijn van het meerpeil om de overschrijdingsfrequentielijn van de waterstand op een bepaalde locatie te berekenen. Voor het bepalen van het effect van de inzet van het Volkerak-Zoommeer voor

waterberging moet bovendien voor zowel de huidige situatie als de situatie met inzet als waterberging statistische gegevens worden ingevoerd.

Voor de huidige situatie is een overschrijdingsfrequentielijn beschikbaar, zie hiervoor figuur 1.6 in paragraaf 1.2.2 [2]. Deze overschrijdingsfrequentielijn is opgesteld aan de hand van twee waterstanden met bijbehorende overschrijdingsfrequenties en de minimum en maximum peilen die gehandhaafd worden op het Volkerak-Zoommeer [2]. Voor de situatie met inzet van het Volkerak-Zoommeer is ook een overschrijdingsfrequentielijn opgesteld in de verdiepingsslag voor Ruimte voor de Rivier [2], zoals in paragraaf 1.2.2 is beschreven. Deze frequentielijn is eveneens weergegeven in figuur 1.6 in paragraaf 1.2.2. De overschrijdingsfrequentielijnen voor de huidige en de nieuwe situatie zijn gemaakt aan de hand van de gemiddelde waterstand op het Volkerak-Zoommeer, wat (in theorie) overeenkomt met het meerpeil. Deze overschrijdingslijnen kunnen in Hydra-M ingevoerd worden als statistische verdeling van de meerpeilen op het Volkerak-Zoommeer.

Een probleem dat zich voordoet met deze overschrijdingsfrequentielijnen, is dat ze geen overschrijdingsfrequenties voor meerpeilen lager dan 0.15 m + NAP bevatten. Voor Hydra-M is het gewenst dat de lijnen minimaal vanaf een meerpeil van 0 m NAP lopen, aangezien dit het gemiddelde meerpeil is. Alle meerpeilen boven 0 m NAP komen minder dan gemiddeld voor en zijn daardoor van belang voor de extreme waterstanden die op kunnen treden. Om dit probleem op te lossen zijn de overschrijdingsfrequentielijnen uit de verdiepingsslag doorgetrokken richting 0 m NAP zoals in figuur F.7 is te zien. In bijlage G zijn de overschrijdingsfrequenties zoals deze zijn ingevoerd in Hydra-M opgenomen.



Figuur F.7: Overschrijdingsfrequentielijnen uit de verdiepingsslag doorgetrokken [aangepast van 2].

Naast de overschrijdingsfrequentielijnen zijn ook overschrijdingsduurlijnen benodigd om in Hydra-M de meerpeilstatistiek te definiëren. Van de huidige situatie nog van de nieuwe situatie zijn overschrijdingsduurlijnen beschikbaar. De duurlijn in de huidige situatie kan gebaseerd worden op waterstandmetingen. Er zijn van twee locaties metingen beschikbaar die de 19 jaar dat het Volkerak-Zoommeer bestaat beslaan; Rak zuid en Kreekrak noord. Het meerpeil is bepaald door de reeksen met metingen van de twee locaties per dag te middelen. Er is vervolgens voor ieder meerpeil, oplopend met stappen van 0.01 m, bepaald hoe vaak en hoe lang dit meerpeil

overschreden werd in dagen per overschrijding. Hieruit is de gemiddelde duur van een meerpeiloverschrijding vastgesteld voor ieder meerpeil. Deze overschrijdingsduren zijn uitgezet tegen het meerpeil, waarna vier deelfuncties gefit zijn die het eerste deel van de overschrijdingsduurlijn vormen. De volgende vier deelbereiken zijn bepaald:

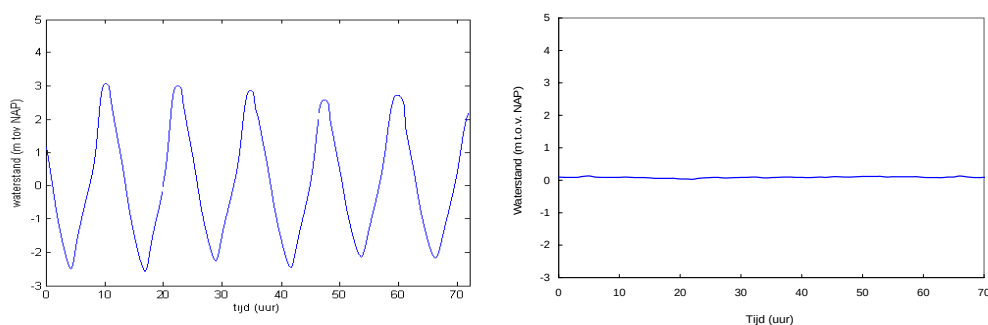
$$\begin{aligned} y_1 &= -1114896x^4 + 21480x^3 + 15406x^2 - 1622x + 113.5 && \text{voor } 0 \leq x \leq 0.07 \text{ m NAP} \\ y_2 &= 3429031x^4 - 1176238x^3 + 140774x^2 - 7627x + 221.7 && \text{voor } 0.05 \leq x \leq 0.11 \text{ m NAP} \\ y_3 &= -4994013x^4 + 2485576x^3 - 447542x^2 + 33840x - 861.6 && \text{voor } 0.09 \leq x \leq 0.16 \text{ m NAP} \\ y_4 &= 7228x^4 - 8361x^3 + 3647x^2 - 721x + 55.7 && \text{voor } 0.14 \leq x \leq 0.35 \text{ m NAP} \end{aligned}$$

De bovenstaande vier polynomen vormen dus deel 1 van de overschrijdingsduurlijn. Daar waar de bereiken overlappen zijn de deelfuncties gemiddeld.

Voor het bepalen van het tweede deel van de duurlijn, met daarin de duur van extreme meerpeilen, is een andere methode gebruikt. De gemiddelde overschrijdingsduren per overschrijding per meerpeil zijn uitgezet tegen de meerpeilen voor hoge meerpeilen. Deze zogenaamde gemiddelde overschrijdingsduren per top zijn bepaald door de gemiddelde overschrijdingsduur te delen door het gemiddeld aantal keer dat een bepaald meerpeil is overschreden in een jaar. Vervolgens is een dalende, limiterende functie gefit, waarmee de overschrijdingsduren geëxtrapoleerd kunnen worden.

De overschrijdingsduur van de meerpeilen lijkt naar 0 te limiteren, wat logisch is; de duur wordt korter naarmate de meerpeilen extremer worden, totdat de meerpeilen niet of bijna nooit voorkomen [47]. Op het IJsselmeer blijft het meerpeil echter minstens een halve dag verhoogd, omdat het spuien beperkt wordt tot laag tij wanneer de Waddenzee wordt opgestuwd tegen de uitlaatwerken. Er is daarom voor het IJsselmeer gekozen voor een machtsfunctie die naar 0.5 limiteert in plaats van naar 0 [47]. Op het IJsselmeer wordt het spuien alleen beperkt als de wind uit het westen komt. Tussen de variabelen meerpeil en windrichting mag geen afhankelijkheid bestaan in de invoer van Hydra-M, de duurlijn is daarom apart afgeleid voor de windsectoren 'west' en 'oost' [47].

Het Volkerak-Zoommeer kan, net als het IJsselmeer, niet onbeperkt spuien door de invloed van het getij op de Westerschelde. Op het Volkerak-Zoommeer kan in tegenstelling tot het IJsselmeer echter altijd alleen tijdens laag tij gespuid worden, dit is onafhankelijk van de windrichting. De Bathse Spuisluis spuit namelijk onder vrij verval en zoals in figuur F.8 te zien is, kan alleen tijdens laag tij gespuid worden [36].



Figuur F.8: Waterstandmeting van de Westerschelde bij Bath tijdens normale getijcycli [36] naast een waterstandmeting op het Volkerak-Zoommeer bij Kreekrak Noord onder normale omstandigheden [46]

Uit de spuibeperkingen blijkt geen afhankelijkheid van de windrichting. Om te controleren of het meerpeil en de windrichting onafhankelijk zijn, zijn de meetgegevens geanalyseerd, waarvan de resultaten in tabel F.2 zijn gepresenteerd.

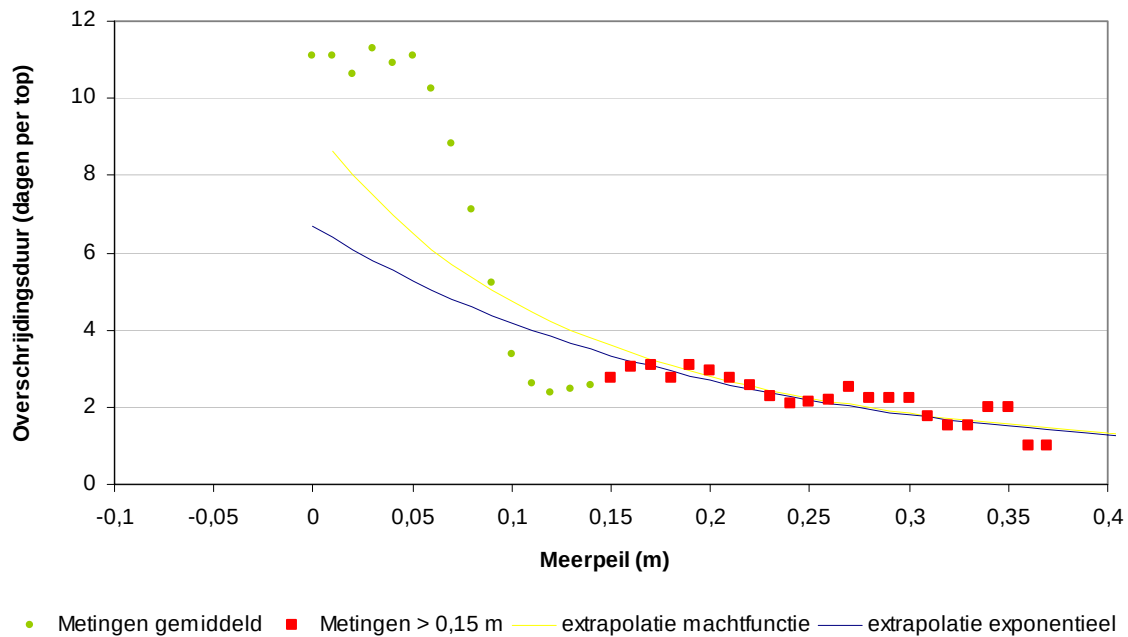
Windrichting (graden)	Gemiddelde meerpeil van meerpeilen > 0.01 m + NAP	Afwijking (m) van totaalgemiddelde	Afwijking (%) van gemiddeld meerpeil (4.57 m)
0-30	0.069 + NAP	-0.003	-0.1
30-60	0.071 + NAP	-0.001	0.0
60-90	0.074 + NAP	0.002	0.0
90-120	0.073 + NAP	0.001	0.0
120-150	0.073 + NAP	0.001	0.0
150-180	0.075 + NAP	0.003	0.1
180-210	0.072 + NAP	0.000	0.0
210-240	0.077 + NAP	0.005	0.1
240-270	0.066 + NAP	-0.006	-0.1
270-300	0.074 + NAP	0.002	0.0
300-330	0.076 + NAP	0.004	0.1
330-360	0.062 + NAP	-0.010	-0.2
TOTAAL	0.072 + NAP		

Tabel F.2: Analyse van de afhankelijkheid van meerpeilmetingen ten opzichte van de windrichting

Voor alle meerpeilen groter dan het gemiddelde meerpeil van 0.01 m + NAP is bepaald uit welke hoek de wind kwam. Vervolgens is per windsector van 30° het gemiddelde bepaald van de metingen waarbij de wind uit die hoek kwam. Het gemiddelde meerpeil per windrichtingsector is vergeleken met het gemiddelde meerpeil van alle windrichtingen samen voor meerpeilen groter dan 0.01 m + NAP. De afwijkingen van de naar windrichting opgedeelde gemiddelde meerpeilen zijn hooguit 1 cm ten opzichte van het totale gemiddelde. Daarnaast is berekend met hoeveel procent het gemiddelde meerpeil per windrichting afwijkt van het gemiddelde meerpeil over alle windrichtingen. Het gemiddelde meerpeil is met een bodemhoogte van 4.5 m – NAP gelijk aan 4.57 m. De gemiddelde meerpeilen per windrichting wijken procentueel gezien niet merkbaar af van het totaal gemiddelde.

Dezelfde analyse is uitgevoerd voor meerpeilen groter dan 0.15 m + NAP. De afhankelijkheid van de windrichting kan namelijk vooral bij extreme omstandigheden een grote rol spelen, wanneer de wind een grote invloed heeft. Ondanks het kleine aantal metingen met waarden groter dan 0.15 m + NAP, kan op basis van deze analyse geconcludeerd worden dat de verschillen tussen de windrichtingen ook onder extreme omstandigheden verwaarloosbaar zijn. Er is daarom geen onderscheid gemaakt tussen de overschrijdingsduren naar windrichting, aangezien deze het meerpeil niet beïnvloedt.

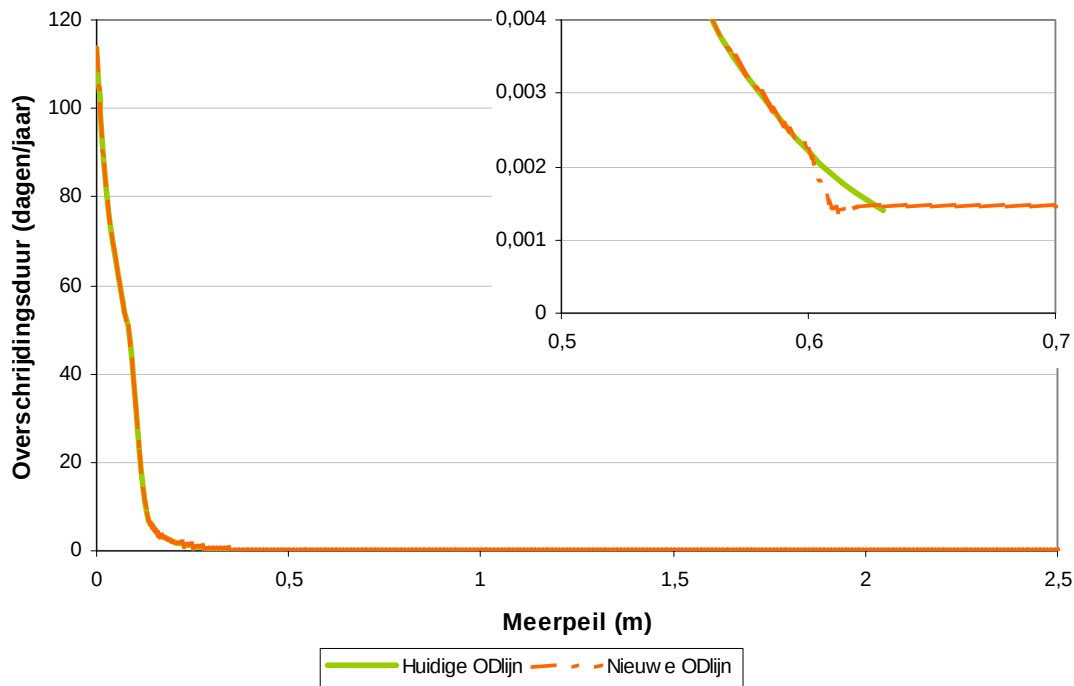
Voor het Volkerak-Zoommeer is een machtsfunctie en een exponentiele functie limiterend naar 0.5 gefit op de gemiddelde overschrijdingsduren per top voor meerpeilen hoger dan 0.15 m + NAP. In figuur F.9 zijn de functies weergegeven. Op basis van visuele toetsing is vastgesteld dat de exponentiele functie met de vorm $y_{\text{exp}} = 0.5 + 6.2e^{-5.2x}$ de beste fit vormt.



Figuur F.9: Extrapoleren van extreme meerpeilen met een exponentiele en machtsfunctie

Met de vastgestelde exponentiele functie worden de overschrijdingsduren per top voor extreme meerpeilen bepaald, waarna deze vermenigvuldigd met de overschrijdingsfrequenties (de huidige overschrijdingsfrequentielijn in figuur F.8) van de meerpeilen het tweede deel van de overschrijdingsduurlijn vormen. De twee deellijnen van de overschrijdingsduurlijn overlappen bij de meerpeilen 0.30, 0.31 en 0.32 m NAP, de overschrijdingsduur op die punten is bepaald door deel 1 en deel 2 te middelen.

De duurlijn in de nieuwe situatie is gebaseerd op de duurlijn van de huidige situatie. Tot meerpeilen van 0.6 m + NAP verandert er door hoogwaterberging niets aan de overschrijdingsduur van het Volkerak-Zoommeer. Meerpeilen hoger dan 0.6 m + NAP komen alleen voor tijdens inzet van het Volkerak-Zoommeer voor waterberging. In het kader van de door RIZA uitgevoerde verdiepingsslag van de maatregel Volkerak-Zoommeer [2] zijn waterstandberekeningen uitgevoerd met Sobek voor verschillende combinaties van zeewaterstanden en rivierafvoeren van Maas en Rijn. Uit dit onderzoek is gebleken dat de duur van de meerpeilverhoging gedurende inzet voor alle combinaties ongeveer 2 uur is. Tot meerpeilen van 0.6 m + NAP zal de gemiddelde duur per top dus limiteren naar 0.5 dagen volgens de vastgestelde exponentiele functie. Vanaf meerpeilen van 0.6 m + NAP zal de gemiddelde duur per top echter gelijk zijn aan 2 dagen. Deze gemiddelde duren per top, berekend volgens de exponentiele functie voor meerpeilen lager dan 0.6 m + NAP en vastgesteld op 2 dagen voor meerpeilen hoger dan 0.6 m + NAP, zijn vermenigvuldigd met de nieuwe overschrijdingsfrequentielijn (zie figuur F.8). De aldus bepaalde gemiddelde overschrijdingsduren per meerpeil per jaar vormen deel 2 van de overschrijdingsduurlijn in de nieuwe situatie. Het combineren van deel 1 en deel 2 is op gelijke wijze uitgevoerd als voor de huidige situatie. In figuur F.10 zijn de overschrijdingsduurlijnen weergegeven voor de huidige en nieuwe situatie. De overschrijdingsduurlijnen welke zijn ingevoerd in Hydra-M zijn in bijlage G opgenomen.



Figuur F.10: Overschrijdingsduurlijnen voor de huidige en nieuwe situatie op het Volkerak-Zoommeer

Voor de meerpeilstatistiek is uitgegaan van het hydrologisch winterhalfjaar van 1 oktober tot 31 maart, zodat de meerpeilreeksen aansluiten op de windstatistieken van het IJsselmeergebied, waarbij ook is uitgegaan van winterhalfjaren. Aangezien de extreme meerpeilen voornamelijk in de winter voorkomen, leidt de beperking van de gegevens tot het winterhalfjaar niet tot het weglaten van statistisch belangrijke extremen.

Het gebruik van de Riemann-integratie methode in Hydra-M vereist dat de variabelen meerpeil, windrichting en windsnelheid onafhankelijk zijn. Er is geconstateerd, op basis van de redenering aangaande spuibeperkingen en een analyse van de meetgegevens per windrichting, dat er geen correlatie tussen het meerpeil en de windrichting is. De correlatie tussen meerpeil en windsnelheid is volgens Blaakman *et al* [47] moeilijk vast te stellen. Daarom wordt net als voor het IJsselmeergebied aangenomen dat deze twee randvoorwaarden onafhankelijk van elkaar zijn.

De statistische randvoorwaarden zijn gebaseerd op reeks gemeten of gemodelleerde meerpeilen. Hierbij zijn een aantal beperkingen belangrijk die tot een zekere onzekerheid in de berekening leiden. De eerste beperking ligt in het feit dat het Volkerak-Zoommeer pas negentien jaar bestaat. De onzekerheid van de statistiek die is bepaald aan de hand van deze korte meetreeks is daarom vrij groot, de onzekerheid van statistiek wordt kleiner met een toenemend aantal metingen [41]. In deze periode van negentien jaar zijn op slechts twee locaties continu waterstandmetingen verricht. Door middeling van de waterstanden op deze locaties is het meerpeil van het Volkerak-Zoommeer bepaald. Voor een juiste bepaling van het meerpeil is het wenselijk om over minstens vier locaties te middelen. De twee beschikbare locaties beslaan wel het hele meer en laten een overeenkomende trend zien in de beweging van de waterstand over het meer.

De overschrijdingsfrequentielijnen zijn gebaseerd op een klein aantal punten [2], zij zijn wel realistisch maar met een grote onzekerheid. Aangezien de fysieke gegevens die als invoer voor

Hydra-M zijn gebruikt ook op de nodige aannames zijn gebaseerd, is het niet nodig om de statistische gegevens zeer nauwkeurig te bepalen. Het is hierdoor wel zaak om in het oog te houden dat de resultaten van de berekeningen met Hydra-M geen andere betekenis hebben dan een indicatie van de gevolgen van inzet voor waterberging voor de overschrijdingskans van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer.

Bijlage G. Invoer Hydra-M

G.1. Overschrijdingsfrequentielijn van het meerpeil

Onderstaande tabellen bevatten de waarden die de overschrijdingsfrequentielijnen van het meerpeil bepalen voor de huidige en de nieuwe situatie. De frequentielijnen zijn voor zowel de huidige situatie als de nieuwe situatie, de situatie met waterberging op het Volkerak-Zoommeer, afkomstig uit de verdiepingsslag 'Hoogwaterberging Volkerak-Zoommeer' [2]. De frequentielijnen zijn aangepast zodat ze als invoer van Hydra-M gebruikt konden worden.

Meerpeil ($m + NAP$)	Overschrijdingsfrequenties huidig (keren/jaar)
0,00	10,20000000
0,01	9,03119662
0,02	7,97204192
0,03	7,08817422
0,04	6,43823872
0,05	6,07388750
0,06	6,03977952
0,07	6,37358062
0,08	7,10596352
0,09	8,26060782
0,10	10,10210000
0,11	7,83550000
0,12	5,71200000
0,13	3,97950000
0,14	2,60018806
0,15	1,75104145
0,16	1,25486852
0,17	1,14278367
0,18	1,01197230
0,19	0,88944001
0,20	0,78643155
0,21	0,68612887
0,22	0,58628434
0,23	0,49110027
0,24	0,43170860
0,25	0,37661021
0,26	0,32891665
0,27	0,29054334
0,28	0,26178401
0,29	0,24121562
0,30	0,22593401
0,31	0,21212013
0,32	0,19593720
0,33	0,17475881
0,34	0,14872814
0,35	0,12264850
0,36	0,10820512
0,37	0,06091335
0,38	0,05346389
0,39	0,04690260
0,40	0,04112896
0,41	0,03605255

0,42	0,03159235
0,43	0,02767599
0,44	0,02423903
0,45	0,02122422
0,46	0,01858081
0,47	0,01626388
0,48	0,01423377
0,49	0,01245546
0,50	0,01089809
0,51	0,00953451
0,52	0,00834082
0,53	0,00729602
0,54	0,00638168
0,55	0,00558160
0,56	0,00488158
0,57	0,00426917
0,58	0,00373344
0,59	0,00326483
0,60	0,00285495
0,61	0,00249647
0,62	0,00218295
0,63	0,00190876
0,64	0,00166899
0,65	0,00145931
0,66	0,00127596
0,67	0,00111563
0,68	0,00097544
0,69	0,00085286
0,70	0,00074568
0,71	0,00065196
0,72	0,00057001
0,73	0,00049837
0,74	0,00043573
0,75	0,00038096
0,76	0,00033307
0,77	0,00029120
0,78	0,00025460
0,79	0,00022259
0,80	0,00019461
0,81	0,00017014
0,82	0,00014875
0,83	0,00013005
0,84	0,00011370
0,85	0,00009941
0,86	0,00008691
0,87	0,00007599
0,88	0,00006643
0,89	0,00005808
0,90	0,00005078
0,91	0,00004440
0,92	0,00003881
0,93	0,00003393
0,94	0,00002967
0,95	0,00002594
0,96	0,00002268
0,97	0,00001983
0,98	0,00001733
0,99	0,00001515

1,00	0,00001325
1,01	0,00001158
1,02	0,00001013
1,03	0,00000885
1,04	0,00000774
1,05	0,00000677
1,06	0,00000592
1,07	0,00000517
1,08	0,00000452
1,09	0,00000395
1,10	0,00000346
1,11	0,00000302
1,12	0,00000264
1,13	0,00000231
1,14	0,00000202
1,15	0,00000177
1,16	0,00000154
1,17	0,00000135
1,18	0,00000118
1,19	0,00000103
1,20	0,00000090
1,21	0,00000079
1,22	0,00000069
1,23	0,00000060
1,24	0,00000053
1,25	0,00000046
1,26	0,00000040
1,27	0,00000035
1,28	0,00000031
1,29	0,00000027
1,30	0,00000024
1,31	0,00000021
1,32	0,00000018
1,33	0,00000016
1,34	0,00000014
1,35	0,00000012
1,36	0,00000011
1,37	0,00000009
1,38	0,00000008
1,39	0,00000007
1,40	0,00000006
1,41	0,00000005
1,42	0,00000005
1,43	0,00000004
1,44	0,00000004
1,45	0,00000003
1,46	0,00000003
1,47	0,00000002
1,48	0,00000002
1,49	0,00000002
1,50	0,00000002
1,51	0,00000001
1,52	0,00000001
1,53	0,00000001
1,54	0,00000001
1,55	0,00000001
1,56	0,00000001
1,57	0,00000001

1,58	0,00000001
1,59	0,00000000
1,60	0,00000000
1,61	0,00000000
1,62	0,00000000
1,63	0,00000000
1,64	0,00000000
1,65	0,00000000
1,66	0,00000000
1,67	0,00000000
1,68	0,00000000
1,69	0,00000000
1,70	0,00000000
1,71	0,00000000
1,72	0,00000000
1,73	0,00000000
1,74	0,00000000
1,75	0,00000000
1,76	0,00000000
1,77	0,00000000
1,78	0,00000000
1,79	0,00000000
1,80	0,00000000

Tabel G.1: Overschrijdingsfrequenties en overschrijdingsduren van het meerpeil op het Volkerak-Zoommeer in de huidige situatie

Meerpeil (m +NAP)	Overschrijdingsfrequenties nieuw (keren/jaar)
0,00	10,20000000
0,01	9,03119662
0,02	7,97204192
0,03	7,08817422
0,04	6,43823872
0,05	6,07388750
0,06	6,03977952
0,07	6,37358062
0,08	7,10596352
0,09	8,26060782
0,10	10,10210000
0,11	7,83550000
0,12	5,71200000
0,13	3,97950000
0,14	2,60018806
0,15	1,75104145
0,16	1,25486852
0,17	1,14278367
0,18	1,01197230
0,19	0,88944001
0,20	0,78643155
0,21	0,68612887
0,22	0,58628434
0,23	0,49110027
0,24	0,43170860
0,25	0,37661021
0,26	0,32891665
0,27	0,29054334
0,28	0,26178401
0,29	0,24121562

0,30	0,22593401
0,31	0,21212013
0,32	0,19593720
0,33	0,17475881
0,34	0,14872814
0,35	0,12264850
0,36	0,10820512
0,37	0,06091335
0,38	0,05346389
0,39	0,04690260
0,40	0,04112896
0,41	0,03605255
0,42	0,03159235
0,43	0,02767599
0,44	0,02423903
0,45	0,02122422
0,46	0,01858081
0,47	0,01626388
0,48	0,01423377
0,49	0,01245546
0,50	0,01089809
0,51	0,00953451
0,52	0,00834082
0,53	0,00729602
0,54	0,00638168
0,55	0,00558160
0,56	0,00488158
0,57	0,00426917
0,58	0,00373344
0,59	0,00326483
0,60	0,00285495
0,61	0,00072227
0,62	0,00072227
0,63	0,00072227
0,64	0,00072227
0,65	0,00072227
0,66	0,00072227
0,67	0,00072227
0,68	0,00072227
0,69	0,00072227
0,70	0,00072227
0,71	0,00072227
0,72	0,00072227
0,73	0,00072227
0,74	0,00072227
0,75	0,00072227
0,76	0,00072227
0,77	0,00072227
0,78	0,00072227
0,79	0,00072227
0,80	0,00072227
0,81	0,00072227
0,82	0,00072227
0,83	0,00072227
0,84	0,00072227
0,85	0,00072227
0,86	0,00072227
0,87	0,00072227

0,88	0,00072227
0,89	0,00072227
0,90	0,00072227
0,91	0,00072227
0,92	0,00072227
0,93	0,00072227
0,94	0,00072226
0,95	0,00072226
0,96	0,00072226
0,97	0,00072226
0,98	0,00072226
0,99	0,00072226
1,00	0,00072226
1,01	0,00072208
1,02	0,00072190
1,03	0,00072173
1,04	0,00072155
1,05	0,00072138
1,06	0,00072120
1,07	0,00072103
1,08	0,00072085
1,09	0,00072068
1,10	0,00072050
1,11	0,00072033
1,12	0,00072016
1,13	0,00072000
1,14	0,00071983
1,15	0,00071966
1,16	0,00071949
1,17	0,00071932
1,18	0,00071915
1,19	0,00071898
1,20	0,00071882
1,21	0,00071862
1,22	0,00071842
1,23	0,00071822
1,24	0,00071802
1,25	0,00071782
1,26	0,00071763
1,27	0,00071743
1,28	0,00071723
1,29	0,00071703
1,30	0,00071684
1,31	0,00071667
1,32	0,00071650
1,33	0,00071634
1,34	0,00071617
1,35	0,00071601
1,36	0,00071584
1,37	0,00071567
1,38	0,00071551
1,39	0,00071534
1,40	0,00071518
1,41	0,00071499
1,42	0,00071480
1,43	0,00071462
1,44	0,00071443
1,45	0,00071425

1,46	0,00071406
1,47	0,00071387
1,48	0,00071369
1,49	0,00071350
1,50	0,00071332
1,51	0,00071310
1,52	0,00071289
1,53	0,00071267
1,54	0,00071246
1,55	0,00071225
1,56	0,00071203
1,57	0,00071182
1,58	0,00071160
1,59	0,00071139
1,60	0,00071118
1,61	0,00071100
1,62	0,00071081
1,63	0,00071063
1,64	0,00071045
1,65	0,00071027
1,66	0,00071009
1,67	0,00070990
1,68	0,00070972
1,69	0,00070954
1,70	0,00070936
1,71	0,00070915
1,72	0,00070895
1,73	0,00070874
1,74	0,00070853
1,75	0,00070833
1,76	0,00070812
1,77	0,00070792
1,78	0,00070771
1,79	0,00070751
1,80	0,00070730
1,81	0,00070670
1,82	0,00070611
1,83	0,00070551
1,84	0,00070492
1,85	0,00070432
1,86	0,00070373
1,87	0,00070314
1,88	0,00070255
1,89	0,00070196
1,90	0,00070137
1,91	0,00069804
1,92	0,00069473
1,93	0,00069146
1,94	0,00068822
1,95	0,00068501
1,96	0,00068183
1,97	0,00067868
1,98	0,00067556
1,99	0,00067246
2,00	0,00066940
2,01	0,00066256
2,02	0,00065503
2,03	0,00064686

2,04	0,00063889
2,05	0,00063112
2,06	0,00062353
2,07	0,00061612
2,08	0,00060889
2,09	0,00060113
2,10	0,00059288
2,11	0,00056643
2,12	0,00054223
2,13	0,00051737
2,14	0,00049469
2,15	0,00047171
2,16	0,00045077
2,17	0,00042979
2,18	0,00040901
2,19	0,00039016
2,20	0,00037434
2,21	0,00032344
2,22	0,00028472
2,23	0,00024386
2,24	0,00021325
2,25	0,00018362
2,26	0,00015906
2,27	0,00013866
2,28	0,00012041
2,29	0,00010454
2,30	0,00009026
2,31	0,00007634
2,32	0,00006401
2,33	0,00005361
2,34	0,00004507
2,35	0,00003813
2,36	0,00003250
2,37	0,00002753
2,38	0,00002305
2,39	0,00001924
2,40	0,00001624
2,41	0,00001415
2,42	0,00001226
2,43	0,00001081
2,44	0,00000950
2,45	0,00000835
2,46	0,00000725
2,47	0,00000626
2,48	0,00000540
2,49	0,00000467
2,50	0,00000411
2,51	0,00000369
2,52	0,00000329
2,53	0,00000292
2,54	0,00000258
2,55	0,00000229
2,56	0,00000203
2,57	0,00000181
2,58	0,00000162
2,59	0,00000142
2,60	0,00000126
2,61	0,00000113

2,62	0,00000100
2,63	0,00000089
2,64	0,00000078
2,65	0,00000069
2,66	0,00000062
2,67	0,00000055
2,68	0,00000049
2,69	0,00000043
2,70	0,00000038
2,71	0,00000034
2,72	0,00000030
2,73	0,00000026
2,74	0,00000023
2,75	0,00000020
2,76	0,00000018
2,77	0,00000016
2,78	0,00000014
2,79	0,00000012
2,80	0,00000011
2,81	0,00000010
2,82	0,00000009
2,83	0,00000008
2,84	0,00000007
2,85	0,00000006
2,86	0,00000006
2,87	0,00000005
2,88	0,00000004
2,89	0,00000004
2,90	0,00000004
2,91	0,00000003
2,92	0,00000003
2,93	0,00000003
2,94	0,00000002
2,95	0,00000002
2,96	0,00000002
2,97	0,00000002
2,98	0,00000002
2,99	0,00000001
3,00	0,00000001

Tabel G.2: Overschrijdingsfrequenties van het meerpeil in de situatie met aanwijzing van hoogwaterberging op het Volkerak-Zoommeer

G.2. Overschrijdingsduurlijnen van het meerpeil

Onderstaande tabellen bevatten de waarden die de overschrijdingsduurlijnen van het meerpeil bepalen voor de huidige en de nieuwe situatie. De overschrijdingsduren voor de huidige situatie zijn gebaseerd op metingen [46] in de winterhalfjaren van 1987 tot en met 2005. Metingen van de locaties Kreekrak noord en Rak zuid zijn gemiddeld om het meerpeil te bepalen. De overschrijdingsduurlijn in de nieuwe situatie, de situatie met waterberging op het Volkerak-Zoommeer, is aangevuld met waterstandberekeningen waarin de waterstand op het Volkerak-Zoommeer is berekend tijdens waterberging.

Meerpeil (m +NAP)	Overschrijdingsduren huidig (dagen/jaar)
0,00	113,50000000
0,01	98,83093104
0,02	87,21585664
0,03	78,38229424
0,04	71,79018624
0,05	66,65929688
0,06	61,53573080
0,07	56,26619367
0,08	50,71285376
0,09	43,13906649
0,10	33,27990000
0,11	22,61853169
0,12	14,11199232
0,13	8,61061907
0,14	6,08631720
0,15	5,17660938
0,16	3,98061120
0,17	3,48760488
0,18	2,90911328
0,19	2,43820288
0,20	2,05680000
0,21	1,74856568
0,22	1,49889568
0,23	1,29492048
0,24	1,12550528
0,25	0,98125000
0,26	0,85448928
0,27	0,73929248
0,28	0,63146368
0,29	0,52854168
0,30	0,41856185
0,31	0,35233144
0,32	0,28932733
0,33	0,28217603
0,34	0,23174504
0,35	0,18453198
0,36	0,15729318
0,37	0,08560363
0,38	0,07268204
0,39	0,06171962
0,40	0,05242163

0,41	0,04453641
0,42	0,03784952
0,43	0,03217854
0,44	0,02736850
0,45	0,02328788
0,46	0,01982514
0,47	0,01688582
0,48	0,01438987
0,49	0,01226957
0,50	0,01046757
0,51	0,00893538
0,52	0,00763194
0,53	0,00652251
0,54	0,00557770
0,55	0,00477264
0,56	0,00408625
0,57	0,00350070
0,58	0,00300087
0,59	0,00257395
0,60	0,00220909
0,61	0,00189707
0,62	0,00163008
0,63	0,00140147
0,64	0,00120561
0,65	0,00103771
0,66	0,00089368
0,67	0,00077006
0,68	0,00066389
0,69	0,00057265
0,70	0,00049421
0,71	0,00042672
0,72	0,00036862
0,73	0,00031858
0,74	0,00027547
0,75	0,00023829
0,76	0,00020622
0,77	0,00017854
0,78	0,00015463
0,79	0,00013398
0,80	0,00011614
0,81	0,00010070
0,82	0,00008735
0,83	0,00007579
0,84	0,00006579
0,85	0,00005712
0,86	0,00004961
0,87	0,00004310
0,88	0,00003746
0,89	0,00003256
0,90	0,00002831
0,91	0,00002462
0,92	0,00002142
0,93	0,00001864
0,94	0,00001622
0,95	0,00001412
0,96	0,00001229
0,97	0,00001071
0,98	0,00000932

0,99	0,00000812
1,00	0,00000708
1,01	0,00000617
1,02	0,00000538
1,03	0,00000469
1,04	0,00000409
1,05	0,00000356
1,06	0,00000311
1,07	0,00000271
1,08	0,00000236
1,09	0,00000206
1,10	0,00000180
1,11	0,00000157
1,12	0,00000137
1,13	0,00000120
1,14	0,00000104
1,15	0,00000091
1,16	0,00000079
1,17	0,00000069
1,18	0,00000061
1,19	0,00000053
1,20	0,00000046
1,21	0,00000040
1,22	0,00000035
1,23	0,00000031
1,24	0,00000027
1,25	0,00000023
1,26	0,00000020
1,27	0,00000018
1,28	0,00000016
1,29	0,00000014
1,30	0,00000012
1,31	0,00000010
1,32	0,00000009
1,33	0,00000008
1,34	0,00000007
1,35	0,00000006
1,36	0,00000005
1,37	0,00000005
1,38	0,00000004
1,39	0,00000004
1,40	0,00000003
1,41	0,00000003
1,42	0,00000002
1,43	0,00000002
1,44	0,00000002
1,45	0,00000002
1,46	0,00000001
1,47	0,00000001
1,48	0,00000001
1,49	0,00000001
1,50	0,00000001
1,51	0,00000001
1,52	0,00000001
1,53	0,00000001
1,54	0,00000000
1,55	0,00000000
1,56	0,00000000

1,57	0,00000000
1,58	0,00000000
1,59	0,00000000
1,60	0,00000000
1,61	0,00000000
1,62	0,00000000
1,63	0,00000000
1,64	0,00000000
1,65	0,00000000
1,66	0,00000000
1,67	0,00000000
1,68	0,00000000
1,69	0,00000000
1,70	0,00000000
1,71	0,00000000
1,72	0,00000000
1,73	0,00000000
1,74	0,00000000
1,75	0,00000000
1,76	0,00000000
1,77	0,00000000
1,78	0,00000000
1,79	0,00000000
1,80	0,00000000

Tabel G.3: Overschrijdingsduren van het meerpeil op het Volkerak-Zoommeer in de huidige situatie

Meerpeil <i>(m +NAP)</i>	Overschrijdingsduren nieuw <i>(dagen/jaar)</i>
0,00	113,50000000
0,01	98,83093104
0,02	87,21585664
0,03	78,38229424
0,04	71,79018624
0,05	66,65929688
0,06	61,53573080
0,07	56,26619367
0,08	50,71285376
0,09	43,13906649
0,10	33,27990000
0,11	22,61853169
0,12	14,11199232
0,13	8,61061907
0,14	6,08631720
0,15	5,17660938
0,16	3,98061120
0,17	3,48760488
0,18	2,90911328
0,19	2,43820288
0,20	2,05680000
0,21	1,74856568
0,22	1,49889568
0,23	1,29492048
0,24	1,12550528
0,25	0,98125000
0,26	0,85448928
0,27	0,73929248
0,28	0,63146368

0,29	0,52854168
0,30	0,41856185
0,31	0,35233144
0,32	0,28932733
0,33	0,28217603
0,34	0,23174504
0,35	0,18453198
0,36	0,15729318
0,37	0,08560363
0,38	0,07268204
0,39	0,06171962
0,40	0,05242163
0,41	0,04453641
0,42	0,03784952
0,43	0,03217854
0,44	0,02736850
0,45	0,02328788
0,46	0,01982514
0,47	0,01688582
0,48	0,01438987
0,49	0,01226957
0,50	0,01046757
0,51	0,00893538
0,52	0,00763194
0,53	0,00652251
0,54	0,00557770
0,55	0,00477264
0,56	0,00408625
0,57	0,00350070
0,58	0,00300087
0,59	0,00257395
0,60	0,00220909
0,61	0,00144454
0,62	0,00144454
0,63	0,00144454
0,64	0,00144454
0,65	0,00144454
0,66	0,00144454
0,67	0,00144454
0,68	0,00144454
0,69	0,00144454
0,70	0,00144454
0,71	0,00144454
0,72	0,00144454
0,73	0,00144454
0,74	0,00144454
0,75	0,00144454
0,76	0,00144454
0,77	0,00144454
0,78	0,00144454
0,79	0,00144454
0,80	0,00144454
0,81	0,00144454
0,82	0,00144454
0,83	0,00144454
0,84	0,00144454
0,85	0,00144454
0,86	0,00144454

0,87	0,00144454
0,88	0,00144454
0,89	0,00144454
0,90	0,00144454
0,91	0,00144454
0,92	0,00144453
0,93	0,00144453
0,94	0,00144453
0,95	0,00144453
0,96	0,00144452
0,97	0,00144452
0,98	0,00144452
0,99	0,00144451
1,00	0,00144451
1,01	0,00144416
1,02	0,00144381
1,03	0,00144346
1,04	0,00144311
1,05	0,00144276
1,06	0,00144241
1,07	0,00144205
1,08	0,00144170
1,09	0,00144135
1,10	0,00144100
1,11	0,00144067
1,12	0,00144033
1,13	0,00143999
1,14	0,00143965
1,15	0,00143932
1,16	0,00143898
1,17	0,00143864
1,18	0,00143830
1,19	0,00143797
1,20	0,00143763
1,21	0,00143723
1,22	0,00143684
1,23	0,00143644
1,24	0,00143605
1,25	0,00143565
1,26	0,00143525
1,27	0,00143486
1,28	0,00143446
1,29	0,00143407
1,30	0,00143367
1,31	0,00143334
1,32	0,00143301
1,33	0,00143268
1,34	0,00143234
1,35	0,00143201
1,36	0,00143168
1,37	0,00143135
1,38	0,00143102
1,39	0,00143069
1,40	0,00143035
1,41	0,00142998
1,42	0,00142961
1,43	0,00142924
1,44	0,00142886

1,45	0,00142849
1,46	0,00142812
1,47	0,00142775
1,48	0,00142737
1,49	0,00142700
1,50	0,00142663
1,51	0,00142620
1,52	0,00142577
1,53	0,00142535
1,54	0,00142492
1,55	0,00142449
1,56	0,00142406
1,57	0,00142364
1,58	0,00142321
1,59	0,00142278
1,60	0,00142236
1,61	0,00142199
1,62	0,00142163
1,63	0,00142126
1,64	0,00142090
1,65	0,00142054
1,66	0,00142017
1,67	0,00141981
1,68	0,00141945
1,69	0,00141908
1,70	0,00141872
1,71	0,00141831
1,72	0,00141789
1,73	0,00141748
1,74	0,00141707
1,75	0,00141666
1,76	0,00141625
1,77	0,00141583
1,78	0,00141542
1,79	0,00141501
1,80	0,00141460
1,81	0,00141341
1,82	0,00141221
1,83	0,00141102
1,84	0,00140983
1,85	0,00140865
1,86	0,00140746
1,87	0,00140628
1,88	0,00140510
1,89	0,00140392
1,90	0,00140274
1,91	0,00139607
1,92	0,00138947
1,93	0,00138292
1,94	0,00137644
1,95	0,00137002
1,96	0,00136366
1,97	0,00135736
1,98	0,00135111
1,99	0,00134492
2,00	0,00133879
2,01	0,00132511
2,02	0,00131005

2,03	0,00129371
2,04	0,00127778
2,05	0,00126223
2,06	0,00124706
2,07	0,00123225
2,08	0,00121778
2,09	0,00120226
2,10	0,00118577
2,11	0,00113286
2,12	0,00108446
2,13	0,00103474
2,14	0,00098938
2,15	0,00094342
2,16	0,00090154
2,17	0,00085957
2,18	0,00081803
2,19	0,00078031
2,20	0,00074867
2,21	0,00064687
2,22	0,00056944
2,23	0,00048772
2,24	0,00042650
2,25	0,00036724
2,26	0,00031813
2,27	0,00027733
2,28	0,00024083
2,29	0,00020907
2,30	0,00018052
2,31	0,00015268
2,32	0,00012801
2,33	0,00010722
2,34	0,00009014
2,35	0,00007626
2,36	0,00006500
2,37	0,00005506
2,38	0,00004609
2,39	0,00003848
2,40	0,00003248
2,41	0,00002830
2,42	0,00002452
2,43	0,00002162
2,44	0,00001901
2,45	0,00001670
2,46	0,00001450
2,47	0,00001252
2,48	0,00001080
2,49	0,00000933
2,50	0,00000821
2,51	0,00000738
2,52	0,00000657
2,53	0,00000583
2,54	0,00000517
2,55	0,00000458
2,56	0,00000406
2,57	0,00000362
2,58	0,00000323
2,59	0,00000285
2,60	0,00000251

2,61	0,00000225
2,62	0,00000200
2,63	0,00000177
2,64	0,00000157
2,65	0,00000139
2,66	0,00000123
2,67	0,00000110
2,68	0,00000098
2,69	0,00000087
2,70	0,00000076
2,71	0,00000068
2,72	0,00000060
2,73	0,00000052
2,74	0,00000046
2,75	0,00000041
2,76	0,00000036
2,77	0,00000031
2,78	0,00000028
2,79	0,00000025
2,80	0,00000022
2,81	0,00000019
2,82	0,00000018
2,83	0,00000016
2,84	0,00000014
2,85	0,00000013
2,86	0,00000011
2,87	0,00000010
2,88	0,00000009
2,89	0,00000008
2,90	0,00000007
2,91	0,00000007
2,92	0,00000006
2,93	0,00000005
2,94	0,00000005
2,95	0,00000004
2,96	0,00000004
2,97	0,00000004
2,98	0,00000003
2,99	0,00000003
3,00	0,00000003

Tabel G.4: Overschrijdingsduren van het meerpeil in de situatie met aanwijzing van hoogwaterberging op het Volkerak-Zoommeer

G.3. Winterhalfjaarkansen van de windsnelheid

Windrichting Windsnelheid	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
0	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00
1	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00
2	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00
3	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00
4	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00
5	9.9998E-01	9.9999E-01	9.9989E-01	9.9985E-01	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	9.9999E-01	9.9999E-01	9.9992E-01
6	9.9956E-01	9.9980E-01	9.9869E-01	9.9803E-01	9.9996E-01	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	9.9989E-01	9.9986E-01	9.9898E-01
7	9.9567E-01	9.9797E-01	9.9156E-01	9.8684E-01	9.9914E-01	9.9999E-01	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	9.9929E-01	9.9890E-01	9.9334E-01
8	9.7631E-01	9.8822E-01	9.6537E-01	9.4630E-01	9.9182E-01	9.9987E-01	1.0000E+00	1.0000E+00	9.9999E-01	9.9698E-01	9.9469E-01	9.7229E-01
9	9.1720E-01	9.5494E-01	8.9977E-01	8.5031E-01	9.5684E-01	9.9859E-01	9.9997E-01	9.9997E-01	9.9989E-01	9.9036E-01	9.8165E-01	9.1779E-01
10	7.9651E-01	8.7635E-01	7.8032E-01	6.9115E-01	8.5835E-01	9.9059E-01	9.9971E-01	9.9975E-01	9.9929E-01	9.7508E-01	9.5097E-01	8.1405E-01
11	6.2092E-01	7.4106E-01	6.1475E-01	4.9639E-01	6.8243E-01	9.5966E-01	9.9791E-01	9.9845E-01	9.9677E-01	9.4553E-01	8.9314E-01	6.6324E-01
12	4.2871E-01	5.6423E-01	4.3364E-01	3.1241E-01	4.6832E-01	8.8079E-01	9.8978E-01	9.9310E-01	9.8880E-01	8.9626E-01	8.0286E-01	4.9042E-01
13	2.6254E-01	3.8255E-01	2.7257E-01	1.7275E-01	2.7748E-01	7.4107E-01	9.6425E-01	9.7694E-01	9.6894E-01	8.2423E-01	6.8335E-01	3.2926E-01
14	1.4404E-01	2.3100E-01	1.5302E-01	8.4571E-02	1.4419E-01	5.5979E-01	9.0585E-01	9.3953E-01	9.2886E-01	7.3066E-01	5.4683E-01	2.0271E-01
15	7.1705E-02	1.2511E-01	7.7176E-02	3.6929E-02	6.6941E-02	3.7815E-01	8.0469E-01	8.7109E-01	8.6176E-01	6.2168E-01	4.1023E-01	1.1608E-01
16	3.2772E-02	6.1345E-02	3.5193E-02	1.4455E-02	2.8172E-02	2.3026E-01	6.6668E-01	7.6917E-01	7.6661E-01	5.0680E-01	2.8883E-01	6.2716E-02
17	1.3880E-02	2.7463E-02	1.4582E-02	5.0811E-03	1.0846E-02	1.2797E-01	5.1265E-01	6.4217E-01	6.5012E-01	3.9611E-01	1.9165E-01	3.2327E-02
18	5.4848E-03	1.1295E-02	5.5079E-03	1.6031E-03	3.8365E-03	6.5682E-02	3.6687E-01	5.0613E-01	5.2463E-01	2.9764E-01	1.2057E-01	1.6010E-02
19	2.0313E-03	4.2848E-03	1.8998E-03	4.5310E-04	1.2489E-03	3.1409E-02	2.4607E-01	3.7766E-01	4.0352E-01	2.1585E-01	7.2446E-02	7.6423E-03
20	7.0677E-04	1.5028E-03	5.9922E-04	1.1447E-04	3.7408E-04	1.4070E-02	1.5599E-01	2.6824E-01	2.9702E-01	1.5174E-01	4.1873E-02	3.5165E-03
21	2.3115E-04	4.8797E-04	1.7308E-04	2.5794E-05	1.0301E-04	5.9209E-03	9.4181E-02	1.8251E-01	2.1032E-01	1.0385E-01	2.3438E-02	1.5575E-03
22	7.0987E-05	1.4680E-04	4.5876E-05	5.1773E-06	2.6045E-05	2.3427E-03	5.4502E-02	1.1968E-01	1.4405E-01	6.9442E-02	1.2775E-02	6.6290E-04
23	2.0426E-05	4.0932E-05	1.1188E-05	9.2505E-07	6.0372E-06	8.7135E-04	3.0373E-02	7.6024E-02	9.5927E-02	4.5488E-02	6.8058E-03	2.7069E-04
24	5.4925E-06	1.0580E-05	2.5178E-06	1.4729E-07	1.2809E-06	3.0442E-04	1.6353E-02	4.6979E-02	6.2388E-02	2.9243E-02	3.5511E-03	1.0595E-04
25	1.3767E-06	2.5354E-06	5.2417E-07	2.1025E-08	2.4831E-07	9.9795E-05	8.5246E-03	2.8328E-02	3.9773E-02	1.8467E-02	1.8155E-03	3.9723E-05
26	3.2101E-07	5.6328E-07	1.0107E-07	2.1939E-09	4.3945E-08	3.0662E-05	4.3083E-03	1.6705E-02	2.4924E-02	1.1462E-02	9.0883E-04	1.4265E-05
27	6.9526E-08	1.1619E-07	1.8246E-08	2.2495E-10	6.9012E-09	8.8203E-06	2.1128E-03	9.6483E-03	1.5385E-02	6.9911E-03	4.4501E-04	4.9057E-06
28	1.3969E-08	2.2257E-08	3.4171E-09	0.0000E+00	1.0541E-09	2.3729E-06	1.0057E-03	5.4638E-03	9.3677E-03	4.1905E-03	2.1289E-04	1.6156E-06
29	2.5870E-09	3.9221E-09	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	5.9640E-07	4.6483E-04	3.0358E-03	5.6320E-03	2.4680E-03	9.9418E-05	5.0956E-07
30	4.2466E-10	1.4379E-10	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.3985E-07	2.0858E-04	1.6556E-03	3.3452E-03	1.4281E-03	4.5265E-05	1.5384E-07
31	4.2312E-11	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	3.0623E-08	9.0866E-05	8.8649E-04	1.9635E-03	8.1184E-04	2.0110E-05	4.4224E-08
32	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	6.0201E-09	3.8419E-05	4.6609E-04	1.1390E-03	4.5346E-04	8.7079E-06	1.2646E-08
33	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	7.4843E-10	1.5761E-05	2.4064E-04	6.5294E-04	2.4889E-04	3.6750E-06	1.5358E-09
34	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	6.2714E-06	1.2199E-04	3.6987E-04	1.3425E-04	1.5114E-06	1.9298E-11
35	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	2.4191E-06	6.0722E-05	2.0700E-04	7.1187E-05	6.0564E-07	0.0000E+00
36	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	9.0418E-07	2.9670E-05	1.1443E-04	3.7110E-05	2.3648E-07	0.0000E+00
37	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	3.2723E-07	1.4229E-05	6.2467E-05	1.9024E-05	8.9744E-08	0.0000E+00
38	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.1498E-07	6.6959E-06	3.3665E-05	9.5910E-06	3.2682E-08	0.0000E+00
39	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	3.8603E-08	3.0912E-06	1.7907E-05	4.7566E-06	1.1798E-08	0.0000E+00
40	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.2508E-08	1.3996E-06	9.3983E-06	2.3210E-06	0.0000E+00	0.0000E+00
41	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	4.1906E-09	6.2130E-07	4.8657E-06	1.1142E-06	0.0000E+00	0.0000E+00
42	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	2.1426E-09	2.7029E-07	2.4844E-06	5.2669E-07	0.0000E+00	0.0000E+00

Tabel G.5: Kansen in een winterhalfjaar van de windsnelheid [45]

G.4. Dagkansen van de windsnelheid

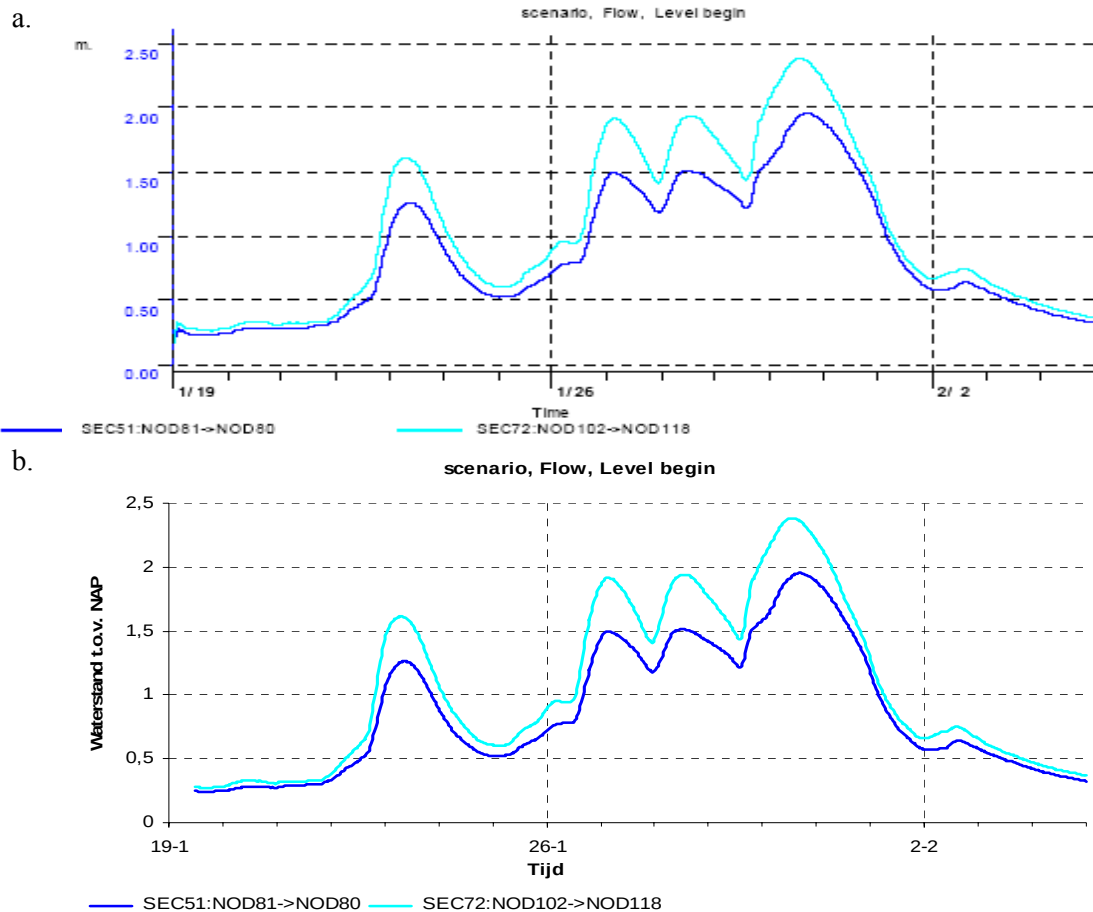
Windrichting P(R=r) Windsnelheid	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
0	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00
1	9,8520E-01	9,6930E-01	9,4900E-01	9,6610E-01	9,8910E-01	9,8640E-01	9,8380E-01	9,7390E-01	9,8260E-01	9,7920E-01	9,9920E-01	9,9480E-01
2	9,2420E-01	8,8530E-01	8,4160E-01	8,7400E-01	9,3860E-01	9,3510E-01	9,3260E-01	9,1200E-01	9,3240E-01	9,1910E-01	9,8850E-01	9,6040E-01
3	8,2530E-01	7,7500E-01	7,1750E-01	7,5340E-01	8,5110E-01	8,5420E-01	8,5770E-01	8,3200E-01	8,6140E-01	8,3660E-01	9,5580E-01	8,8930E-01
4	7,0700E-01	6,5790E-01	5,9500E-01	6,2590E-01	7,4090E-01	7,5740E-01	7,7080E-01	7,4500E-01	7,8020E-01	7,4610E-01	8,9870E-01	7,9210E-01
5	5,8390E-01	5,4430E-01	4,8170E-01	5,0300E-01	6,2090E-01	6,5500E-01	6,8000E-01	6,5720E-01	6,9590E-01	6,5590E-01	8,2220E-01	6,8170E-01
6	4,6520E-01	4,3890E-01	3,8010E-01	3,9030E-01	5,0030E-01	5,5310E-01	5,9020E-01	5,7230E-01	6,1270E-01	5,7000E-01	7,3320E-01	5,6790E-01
7	3,5640E-01	3,4390E-01	2,9100E-01	2,9110E-01	3,8560E-01	4,5530E-01	5,0400E-01	4,9210E-01	5,3280E-01	4,9030E-01	6,3820E-01	4,5700E-01
8	2,6150E-01	2,6060E-01	2,1520E-01	2,0730E-01	2,8240E-01	3,6410E-01	4,2310E-01	4,1740E-01	4,5770E-01	4,1720E-01	5,4220E-01	3,5400E-01
9	1,8270E-01	1,9000E-01	1,5270E-01	1,4000E-01	1,9510E-01	2,8160E-01	3,4840E-01	3,4900E-01	3,8810E-01	3,5070E-01	4,4920E-01	2,6240E-01
10	1,2100E-01	1,3250E-01	1,0340E-01	8,9110E-02	1,2630E-01	2,0960E-01	2,8080E-01	2,8710E-01	3,2440E-01	2,9070E-01	3,6230E-01	1,8530E-01
11	7,5560E-02	8,7750E-02	6,6410E-02	5,3030E-02	7,6160E-02	1,4940E-01	2,2090E-01	2,3200E-01	2,6690E-01	2,3720E-01	2,8370E-01	1,2420E-01
12	4,4330E-02	5,4900E-02	4,0130E-02	2,9320E-02	4,2690E-02	1,0170E-01	1,6930E-01	1,8380E-01	2,1590E-01	1,9010E-01	2,1510E-01	7,8860E-02
13	2,4360E-02	3,2240E-02	2,2670E-02	1,4950E-02	2,2200E-02	6,5840E-02	1,2610E-01	1,4260E-01	1,7130E-01	1,4930E-01	1,5760E-01	4,7500E-02
14	1,2520E-02	1,7700E-02	1,1890E-02	6,9950E-03	1,0700E-02	4,0520E-02	9,1180E-02	1,0820E-01	1,3330E-01	1,1490E-01	1,1140E-01	2,7220E-02
15	6,0080E-03	9,0440E-03	5,7690E-03	2,9850E-03	4,7740E-03	2,3660E-02	6,3940E-02	8,0200E-02	1,0160E-01	8,6450E-02	7,5750E-02	1,4920E-02
16	2,6950E-03	4,2940E-03	2,5780E-03	1,1560E-03	1,9720E-03	1,3110E-02	4,3480E-02	5,8070E-02	7,5740E-02	6,3640E-02	4,9580E-02	7,8610E-03
17	1,1310E-03	1,8910E-03	1,0580E-03	4,0460E-04	7,5280E-04	6,8790E-03	2,8660E-02	4,1070E-02	5,5260E-02	4,5830E-02	3,1240E-02	3,9960E-03
18	4,4540E-04	7,7180E-04	3,9780E-04	1,2740E-04	2,6540E-04	3,4190E-03	1,8320E-02	2,8380E-02	3,9460E-02	3,2330E-02	1,8980E-02	1,9650E-03
19	1,6470E-04	2,9180E-04	1,3700E-04	3,6000E-05	8,6300E-05	1,6070E-03	1,1360E-02	1,9170E-02	2,7580E-02	2,2360E-02	1,1160E-02	9,3430E-04
20	5,7260E-05	1,0220E-04	4,3180E-05	9,0940E-06	2,5840E-05	7,1400E-04	6,8380E-03	1,2660E-02	1,8900E-02	1,5190E-02	6,3610E-03	4,2910E-04
21	1,8720E-05	3,3180E-05	1,2470E-05	2,0490E-06	7,1140E-06	2,9930E-04	3,9940E-03	8,1900E-03	1,2700E-02	1,0150E-02	3,5320E-03	1,8990E-04
22	5,7500E-06	9,9790E-06	3,3050E-06	4,1130E-07	1,7990E-06	1,1820E-04	2,2650E-03	5,1880E-03	8,3840E-03	6,6730E-03	1,9160E-03	8,0790E-05
23	1,6540E-06	2,7820E-06	8,0600E-07	7,3490E-08	4,1690E-07	4,3940E-05	1,2470E-03	3,2220E-03	5,4440E-03	4,3210E-03	1,0180E-03	3,2990E-05
24	4,4490E-07	7,1920E-07	1,8140E-07	1,1700E-08	8,8460E-08	1,5350E-05	6,6690E-04	1,9620E-03	3,4810E-03	2,7570E-03	5,3050E-04	1,2910E-05
25	1,1150E-07	1,7230E-07	3,7760E-08	1,6700E-09	1,7150E-08	5,0310E-06	3,4630E-04	1,1720E-03	2,1950E-03	1,7320E-03	2,7100E-04	4,8400E-06
26	2,6000E-08	3,8290E-08	7,2810E-09	1,7430E-10	3,0350E-09	1,5460E-06	1,7470E-04	6,8720E-04	1,3650E-03	1,0720E-03	1,3560E-04	1,7380E-06
27	5,6310E-09	7,8980E-09	1,3140E-09	1,7870E-11	4,7660E-10	4,4460E-07	8,5570E-05	3,9560E-04	8,3890E-04	6,5240E-04	6,6400E-05	5,9770E-07
28	1,1310E-09	1,5130E-09	2,4620E-10	0,0000E+00	7,2800E-11	1,1960E-07	4,0710E-05	2,2360E-04	5,0930E-04	3,9060E-04	3,1760E-05	1,9680E-07
29	2,0950E-10	2,6660E-10	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	3,0060E-08	1,8810E-05	1,2410E-04	3,0570E-04	2,2980E-04	1,4830E-05	6,2090E-08
30	3,4400E-11	9,7730E-12	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	7,0500E-09	8,4400E-06	6,7620E-05	1,8140E-04	1,3290E-04	6,7530E-06	1,8740E-08
31	3,4270E-12	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	1,5440E-09	3,6770E-06	3,6190E-05	1,0640E-04	7,5550E-05	3,0000E-06	5,3880E-09
32	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	3,0350E-10	1,5550E-06	1,9020E-05	6,1690E-05	4,2190E-05	1,2990E-06	1,5410E-09
33	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	3,7730E-11	6,3770E-07	9,8210E-06	3,5360E-05	2,3160E-05	5,4820E-07	1,8710E-10
34	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	2,5370E-07	4,9790E-06	2,0030E-05	1,2490E-05	2,2550E-07	2,3510E-12
35	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	9,7880E-08	2,4780E-06	1,1210E-05	6,6220E-06	9,0350E-08	0,0000E+00
36	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	3,6580E-08	1,2110E-06	6,1950E-06	3,4520E-06	3,5280E-08	0,0000E+00
37	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	1,3240E-08	5,8070E-07	3,3820E-06	1,7700E-06	1,3390E-08	0,0000E+00
38	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	4,6520E-09	2,7330E-07	1,8220E-06	8,9220E-07	4,8750E-09	0,0000E+00
39	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	1,5620E-09	1,2610E-07	9,6930E-07	4,4250E-07	1,7600E-09	0,0000E+00
40	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	5,0610E-10	5,7110E-08	5,0870E-07	2,1590E-07	0,0000E+00	0,0000E+00
41	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	1,0000E-10	8,0000E-08	8,0000E-08	5,0000E-08	0,0000E+00	0,0000E+00
42	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	5,0000E-11	3,0000E-08	3,0000E-08	1,0000E-08	0,0000E+00	0,0000E+00

Tabel G.6: Dagkansen van de windsnelheid [45]

Bijlage H. Duflow

H.1. Vergelijking resultaten Duflow met eerder onderzoek

Omdat met een andere versie van Duflow wordt gewerkt, waarbij een aantal instellingen net iets anders kunnen zijn, is een vergelijking gemaakt tussen berekeningen gemaakt door Arcadis in 2004 en berekeningen gemaakt met hetzelfde model in versie 3.8 van Duflow. In figuur H.1 zijn de resultaten van beide berekeningen voor Trambrug, in de Mark net boven de singel van Breda, gepresenteerd.



Figuur H.1: Vergelijking waterstanden uit berekeningen Arcadis (a) en uit nieuwe berekeningen met hetzelfde model in Duflow versie 3.8 (b) voor Trambrug bij node 81 en Julianabrug bij node 102 op basis van scenario 2 uit [16]

Uit figuur H.1 blijkt dat de modellen bijna dezelfde resultaten geven. In tabel H.1 zijn de maximale waterstanden op de twee locaties voor beide berekeningen weergegeven.

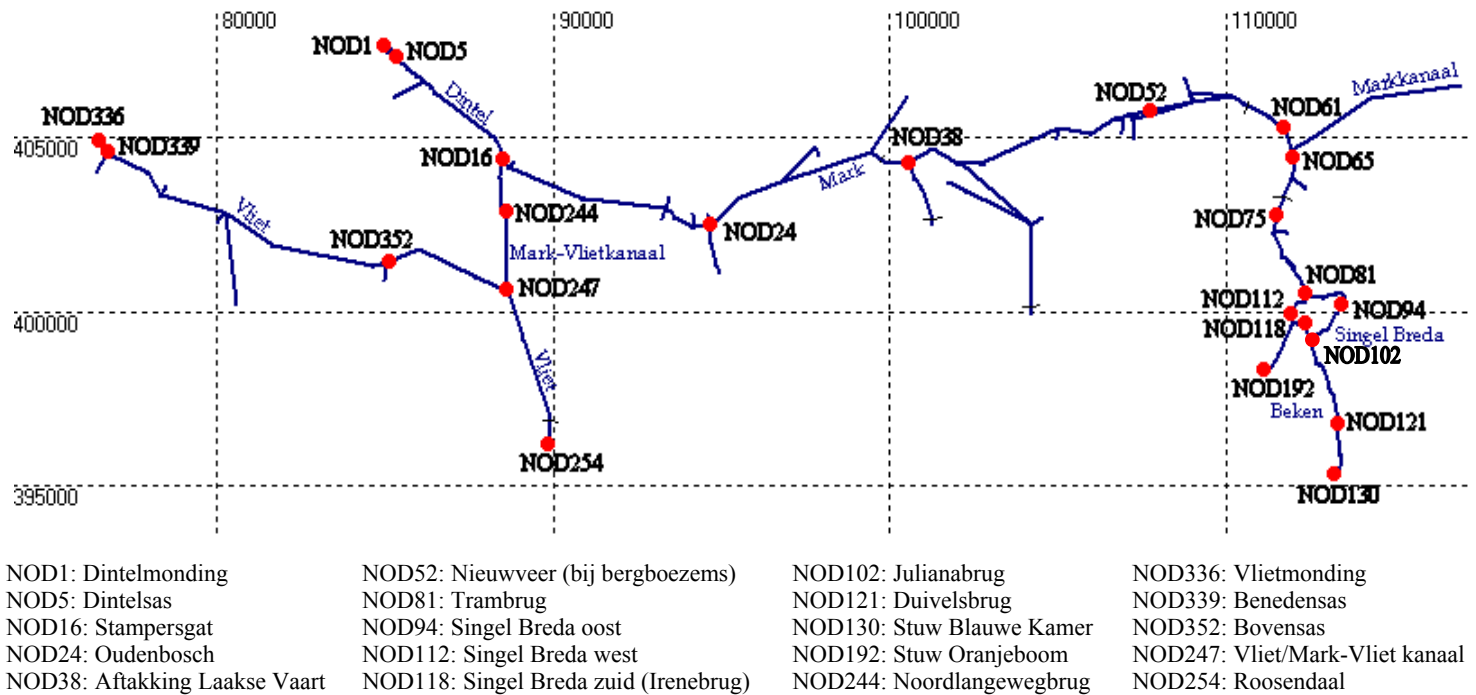
	Maximale waterstand	
	Trambrug	Julianabrug
Arcadis [16]	1,96 m	2,39 m
Nieuw berekend	1,95 m	2,38 m

Tabel H.1: Maximale waterstanden

De maximale waterstanden die door Arcadis waren bepaald zijn iets hoger dan de maximale waterstanden die met versie 3.8 zijn berekend.

H.2. Duflow-netwerk van het Mark-Vliet systeem

In figuur H.2 is het netwerk van het Mark-Vliet systeem zoals dit in Duflow is geschematiseerd weergegeven. In de figuur zijn de belangrijkste nodes aangegeven. De namen van deze locaties staan onder het netwerk.



Figuur H.2: Duflow-netwerk van het Mark-Vliet systeem met een aantal nodes die het systeem representeren. In node 1 geldt de randvoorwaarde waterstand in de Dintelmonding en in node 336 geldt de randvoorwaarde waterstand in de Vlietmonding zoals besproken in paragraaf 5.1.3.

De node nummers in figuur H.2 komen overeen met de node nummers in hoofdstuk 5 en 6.

H.3. Randvoorwaarden van Volkerak-Zoommeer in Duflow

In onderstaande tabel zijn de randvoorwaarden die in NOD1 en NOD336 in respectievelijk de Dintelmonding en de Vlietmonding zijn opgelegd in Duflow, afhankelijk van de overschrijdingsfrequentie van de waterstand op die locaties. Tabel H.2 laat de overschrijdingsfrequenties voor de waterstand in de Dintelmonding en de Vlietmonding zien voor een overschrijdingsfrequentie van 1/100 jaar, 1/1430 jaar in de huidige situatie en 1/1430 jaar in de situatie waarin het Volkerak-Zoommeer is aangewezen voor hoogwaterberging. Bij deze waterstandverhoging wordt uitgegaan van een verlate inzet van het Volkerak-Zoommeer ten opzichte van de afvoerpiek. In deze variant, variant 2 genoemd, valt de waterstandtop op het Volkerak-Zoommeer op 2 februari. Ook is een voorbeeld van de waterstandbeweging op het Volkerak-Zoommeer weergegeven uitgaande van variant 1, waarbij zowel de afvoerpiek als de waterstandtop op 31 januari vallen.

		Dintel, variant 2			Vliet, variant 2			Variant 1 (Dintel)
Overschrijdingsfrequentie (1/jaar)		1/100 H & N	1/1430 H	1/1430 N	1/100 H & N	1/1430 H	1/1430 N	1/1430 H
Top (m +NAP)		0,58	0,74	1,92	0,53	0,60	1,91	0,74
Datum	Tijd	Level (m)	Level (m)	Level (m)	Level (m)	Level (m)	Level (m)	Level (m)
	19-01-95 0:00	0:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
	20-01-95 0:00	0:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
	21-01-95 0:00	0:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
	22-01-95 0:00	0:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
	23-01-95 0:00	0:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
	24-01-95 0:00	0:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
	25-01-95 0:00	0:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
	26-01-95 0:00	0:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
	27-01-95 0:00	0:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
	28-01-95 0:00	0:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
	29-01-95 0:00	0:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
	29-01-95 1:00	1:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
	29-01-95 2:00	2:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
	29-01-95 3:00	3:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
	29-01-95 4:00	4:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
	29-01-95 5:00	5:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
	29-01-95 6:00	6:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
	29-01-95 7:00	7:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,175
	29-01-95 8:00	8:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,199
	29-01-95 9:00	9:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,224
	29-01-95 10:00	10:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,248
	29-01-95 11:00	11:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,273
	29-01-95 12:00	12:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,298
	29-01-95 13:00	13:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,322
	29-01-95 14:00	14:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,347
	29-01-95 15:00	15:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,371
	29-01-95 16:00	16:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,396
	29-01-95 17:00	17:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,420
	29-01-95 18:00	18:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,445
	29-01-95 19:00	19:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,470
	29-01-95 20:00	20:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,494
	29-01-95 21:00	21:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,519
	29-01-95 22:00	22:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,543
	29-01-95 23:00	23:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,568
	30-01-95 0:00	0:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,593
	30-01-95 1:00	1:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,617
	30-01-95 2:00	2:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,642
	30-01-95 3:00	3:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,666
	30-01-95 4:00	4:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,691
	30-01-95 5:00	5:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,715
	30-01-95 6:00	6:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,740
	30-01-95 7:00	7:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,715
	30-01-95 8:00	8:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,691
	30-01-95 9:00	9:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,666
	30-01-95 10:00	10:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,642
	30-01-95 11:00	11:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,617
	30-01-95 12:00	12:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,593
	30-01-95 13:00	13:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,568
	30-01-95 14:00	14:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,543
	30-01-95 15:00	15:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,519
	30-01-95 16:00	16:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,494
	30-01-95 17:00	17:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,470
	30-01-95 18:00	18:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,445
	30-01-95 19:00	19:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,420
	30-01-95 20:00	20:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,396
	30-01-95 21:00	21:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,371
	30-01-95 22:00	22:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,347
	30-01-95 23:00	23:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,322
	31-01-95 0:00	0:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,298

Verandering van de kans op wateroverlast in het Mark-Vliet systeem

31-01-95 1:00	1:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,273
31-01-95 2:00	2:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,248
31-01-95 3:00	3:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,224
31-01-95 4:00	4:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,199
31-01-95 5:00	5:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,175
31-01-95 6:00	6:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
31-01-95 7:00	7:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
31-01-95 8:00	8:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
31-01-95 9:00	9:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
31-01-95 10:00	10:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
31-01-95 11:00	11:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
31-01-95 12:00	12:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
31-01-95 13:00	13:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
31-01-95 14:00	14:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
31-01-95 15:00	15:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
31-01-95 16:00	16:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
31-01-95 17:00	17:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
31-01-95 18:00	18:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
31-01-95 19:00	19:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
31-01-95 20:00	20:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
31-01-95 21:00	21:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
31-01-95 22:00	22:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
31-01-95 23:00	23:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
1-02-95 0:00	0:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
1-02-95 1:00	1:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
1-02-95 2:00	2:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
1-02-95 3:00	3:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
1-02-95 4:00	4:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
1-02-95 5:00	5:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
1-02-95 6:00	6:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
1-02-95 7:00	7:00:00	0,168	0,175	0,224	0,166	0,169	0,223	0,150
1-02-95 8:00	8:00:00	0,186	0,199	0,298	0,182	0,188	0,297	0,150
1-02-95 9:00	9:00:00	0,204	0,224	0,371	0,198	0,206	0,370	0,150
1-02-95 10:00	10:00:00	0,222	0,248	0,445	0,213	0,225	0,443	0,150
1-02-95 11:00	11:00:00	0,240	0,273	0,519	0,229	0,244	0,517	0,150
1-02-95 12:00	12:00:00	0,258	0,298	0,593	0,245	0,263	0,590	0,150
1-02-95 13:00	13:00:00	0,275	0,322	0,666	0,261	0,281	0,663	0,150
1-02-95 14:00	14:00:00	0,293	0,347	0,740	0,277	0,300	0,737	0,150
1-02-95 15:00	15:00:00	0,311	0,371	0,814	0,293	0,319	0,810	0,150
1-02-95 16:00	16:00:00	0,329	0,396	0,888	0,308	0,338	0,883	0,150
1-02-95 17:00	17:00:00	0,347	0,420	0,961	0,324	0,356	0,957	0,150
1-02-95 18:00	18:00:00	0,365	0,445	1,035	0,340	0,375	1,030	0,150
1-02-95 19:00	19:00:00	0,383	0,470	1,109	0,356	0,394	1,103	0,150
1-02-95 20:00	20:00:00	0,401	0,494	1,183	0,372	0,413	1,177	0,150
1-02-95 21:00	21:00:00	0,419	0,519	1,256	0,388	0,431	1,250	0,150
1-02-95 22:00	22:00:00	0,437	0,543	1,330	0,403	0,450	1,323	0,150
1-02-95 23:00	23:00:00	0,455	0,568	1,404	0,419	0,469	1,397	0,150
2-02-95 0:00	0:00:00	0,473	0,593	1,478	0,435	0,488	1,470	0,150
2-02-95 1:00	1:00:00	0,490	0,617	1,551	0,451	0,506	1,543	0,150
2-02-95 2:00	2:00:00	0,508	0,642	1,625	0,467	0,525	1,617	0,150
2-02-95 3:00	3:00:00	0,526	0,666	1,699	0,483	0,544	1,690	0,150
2-02-95 4:00	4:00:00	0,544	0,691	1,773	0,498	0,563	1,763	0,150
2-02-95 5:00	5:00:00	0,562	0,715	1,846	0,514	0,581	1,837	0,150
2-02-95 6:00	6:00:00	0,580	0,740	1,920	0,530	0,600	1,910	0,150
2-02-95 7:00	7:00:00	0,562	0,715	1,846	0,514	0,581	1,837	0,150
2-02-95 8:00	8:00:00	0,544	0,691	1,773	0,498	0,563	1,763	0,150
2-02-95 9:00	9:00:00	0,526	0,666	1,699	0,483	0,544	1,690	0,150
2-02-95 10:00	10:00:00	0,508	0,642	1,625	0,467	0,525	1,617	0,150
2-02-95 11:00	11:00:00	0,490	0,617	1,551	0,451	0,506	1,543	0,150
2-02-95 12:00	12:00:00	0,473	0,593	1,478	0,435	0,488	1,470	0,150
2-02-95 13:00	13:00:00	0,455	0,568	1,404	0,419	0,469	1,397	0,150
2-02-95 14:00	14:00:00	0,437	0,543	1,330	0,403	0,450	1,323	0,150
2-02-95 15:00	15:00:00	0,419	0,519	1,256	0,388	0,431	1,250	0,150
2-02-95 16:00	16:00:00	0,401	0,494	1,183	0,372	0,413	1,177	0,150
2-02-95 17:00	17:00:00	0,383	0,470	1,109	0,356	0,394	1,103	0,150
2-02-95 18:00	18:00:00	0,365	0,445	1,035	0,340	0,375	1,030	0,150

2-02-95 19:00	19:00:00	0,347	0,420	0,961	0,324	0,356	0,957	0,150
2-02-95 20:00	20:00:00	0,329	0,396	0,888	0,308	0,338	0,883	0,150
2-02-95 21:00	21:00:00	0,311	0,371	0,814	0,293	0,319	0,810	0,150
2-02-95 22:00	22:00:00	0,293	0,347	0,740	0,277	0,300	0,737	0,150
2-02-95 23:00	23:00:00	0,275	0,322	0,666	0,261	0,281	0,663	0,150
3-02-95 0:00	0:00:00	0,258	0,298	0,593	0,245	0,263	0,590	0,150
3-02-95 1:00	1:00:00	0,240	0,273	0,519	0,229	0,244	0,517	0,150
3-02-95 2:00	2:00:00	0,222	0,248	0,445	0,213	0,225	0,443	0,150
3-02-95 3:00	3:00:00	0,204	0,224	0,371	0,198	0,206	0,370	0,150
3-02-95 4:00	4:00:00	0,186	0,199	0,298	0,182	0,188	0,297	0,150
3-02-95 5:00	5:00:00	0,168	0,175	0,224	0,166	0,169	0,223	0,150
3-02-95 6:00	6:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
3-02-95 7:00	7:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
3-02-95 8:00	8:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
3-02-95 9:00	9:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
3-02-95 10:00	10:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
3-02-95 11:00	11:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
3-02-95 12:00	12:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
3-02-95 13:00	13:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
3-02-95 14:00	14:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
3-02-95 15:00	15:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
3-02-95 16:00	16:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
3-02-95 17:00	17:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
3-02-95 18:00	18:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
3-02-95 19:00	19:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
3-02-95 20:00	20:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
3-02-95 21:00	21:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
3-02-95 22:00	22:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
3-02-95 23:00	23:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
4-02-95 0:00	0:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
5-02-95 0:00	0:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
6-02-95 0:00	0:00:00	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150

Tabel H.2. De waterstandbeweging in de tijd op de gegeven locatie op het Volkerak-Zoommeer zoals ingevoerd in DufLOW. Voor 19 tot en met 28 januari en 4 tot en met 6 februari is alleen het eerste uur weergegeven, aangezien de waterstand op deze dagen niet afweek van de 0,15 m +NAP.

Bijlage I. IJsseldelta methode

I.1. Theorie IJsseldelta methode

De volgende vijf pagina's zijn letterlijk overgenomen uit de volgende bron: J. Hartman, H.E. Berger en R. Westphal (2005), 'Onderbouwing hydraulische randvoorwaarden 2001 voor de IJsseldelta', RIZA rapport 2002.018, Rijkswaterstaat RIZA WRV, Lelystad [50]

2. Aanpak bepaling HR 2001

2.1 Werking watersysteem

Hoge waterstanden op de benedenloop van de IJssel, dat wil zeggen bovenstrooms van de IJsselmonding in het Ketelmeer nabij kmr 1002, worden veroorzaakt door allerlei mogelijke combinaties van storm op het IJsselmeer en afvoer van de IJssel.

Op het Ketelmeer nabij de IJsselmonding wordt het toetspeil (dit is voor de dijkringen in de IJsseldelta de waterstand die met een kans 1/2000 per jaar wordt overschreden) vrijwel uitsluitend bepaald door opstuwung van het water van het IJsselmeer en het Ketelmeer door een orkaan. Tijdens een orkaan is de waterstand dermate hoog, dat tevens de gevoeligheid van de afvoer op de waterstand niet erg groot is. De kansbijdrage van een hoge afvoer op de 1/2000 waterstand is hier verwaarloosbaar klein. Kortom, hier is alleen de wind op het IJsselmeer bepalend voor de toetspeilen.

Ver stroomopwaarts op de IJssel is de invloed van stormen op het IJsselmeer nauwelijks meer merkbaar (bovenstrooms van kmr 957 bij Olst). Naarmate de afvoer hoger is treedt deze ongevoeligheid, als gevolg van de stuwing van de afvoer (stuwkromme), steeds verder stroomafwaarts op in de richting van het Ketelmeer. Voldoende ver stroomopwaarts voorbij kmr 990 (De Zande) is de kansbijdrage van de storm op de 1/2000 waterstand al verwaarloosbaar klein. Hier is alleen de IJsselaflow bepalend voor de toetspeilen.

In het tussengelegen overgangsgebied van de IJsseldelta zijn zowel storm als afvoer bepalend voor het toetspeil. In de bepaling van de hydraulische randvoorwaarden voor de IJsseldelta zullen zowel wind als afvoer een rol spelen.

2.2 Statistische methode

In deze paragraaf wordt de gebruikte statistische methode beschreven. De nadruk ligt in deze paragraaf op de uitgangspunten, de aannamen en de gevolgde werkwijze. De kwantitatieve uitwerking vindt plaats in hoofdstuk 3.

2.2.1. De belastinggevallen

De basis van de berekening van de toetspeilen is gelegen in verhanglijnen die horen bij twee zogenaamde belastinggevallen. Deze zijn:

- Belastinggeval Wind: de 1/2000 waterstand aan de oostzijde van het Ketelmeer, tengevolge van een orkaan op het IJsselmeer bij een min of meer gemiddeld meerpeil, in combinatie met een enigszins verhoogde IJsselaflow met een overschrijdingsfrequentie van circa 1 keer per jaar. Aan de bijbehorende verhanglijn is een overschrijdingsfrequentie van 1/2000 toegekend.
- Belastinggeval Afvoer: de 1/2000 afvoer van de IJssel in combinatie met een enigszins verhoogde waterstand op het Ketelmeer met een overschrijdingsfrequentie van circa 1 keer per jaar. De waterstand op het Ketelmeer is het gevolg van een enigszins verhoogd meerpeil

door de extreme IJsselafvoer en enige opstuwing door wind. Aan de bijbehorende verhanglijn is een overschrijdingsfrequentie van 1/2000 toegekend.

Met behulp van een hydraulisch model zijn voor alle locaties en voor beide gevallen de waterstanden berekend, die resulteren in twee verhanglijnen (waterstandsverlopen als functie van de afstand).

De waterstanden van beide verhanglijnen hebben dus op alle locaties langs de IJsseldelta een overschrijdingsfrequentie van 1/2000.

Opmerking. Er is ook nog een derde belastinggeval denkbaar, namelijk Meerpeil:

- de 1/2000 waterstand op het Ketelmeer nabij de IJsselmonding, tengevolge van een 1/2000 extreem hoog meerpeil van het IJsselmeer en een enigszins verhoogde windsnelheid boven het IJsselmeer (enige opstuwing op het Ketelmeer) in combinatie met een behoorlijk verhoogde IJsselafvoer (zonder verhoogde afvoer is geen extreem hoog meerpeil mogelijk).

Dit belastinggeval is echter buiten beschouwing gelaten. Deze situatie is op voorhand als veel minder bedreigend te beoordelen dan de twee andere belastinggevallen Wind en Afvoer.

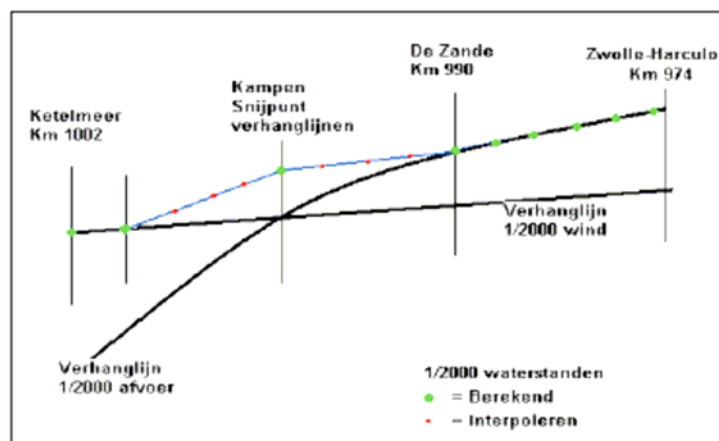
Voor een prinscheschets van de toegepaste methode wordt verwezen naar figuur 2.1.

Benedenstrooms bij het Ketelmeer/IJsselmond (nabij kmr 1002) is uitsluitend het belastinggeval Wind bepalend voor de 1/2000 waterstand. Het toetspeil wordt hier vrijwel volledig bepaald door de verhanglijn van het belastinggeval Wind.

Bovenstrooms van een bepaalde kilometerraai, is uitsluitend het belastinggeval Afvoer bepalend voor de 1/2000 waterstand. Op basis van [Hartman, 1995] wordt verwacht dat dit bij kmr 990 (De Zande) zal zijn. Het toetspeil bovenstrooms van dit punt wordt volledig bepaald door de verhanglijn van het belastinggeval Afvoer.

Voor het tussenliggende traject tussen kmr 1002 en kmr 990 spelen zowel de wind als de afvoer, d.w.z. beide verhanglijnen, een rol bij de bepaling van de 1/2000 waterstand. Op dit traject is voor 1 markante locatie c.q. op het snijpunt van beide verhanglijnen, op grond van een statistische beschouwing, het toetspeil berekend. Voor de overige punten op het tussenliggende traject zijn de toetspeilen niet berekend, maar bepaald via visueel/grafische interpolatie.

.....
Figuur 2.1:
Prinscheschets van de toegepaste
(statistische) methode



2.2.2. De overschrijdingsfrequentie van de waterstand op het snijpunt van de twee verhanglijnen

In het snijpunt van de beide verhanglijnen Wind en Afvoer is de bedreiging door een orkaan even groot als de bedreiging door extreme afvoer. In dit snijpunt is de overschrijdingsfrequentie van de waterstand derhalve minstens 1/1000 keer per jaar ($2 \times 1/2000$). Omdat de hier gevolgde statistische methode met 2 belastinggevallen een benadering van de werkelijkheid is, en allerlei mogelijke andere combinaties van minder extreme wind en afvoer en het meerpeil niet expliciet in beschouwing zijn genomen, is de frequentie van de waterstand in het snijpunt verder verhoogd met een factor 1.25 van 1/1000 naar 1/800 (conform [Hartman, 1995]).

Omdat de normfrequentie van de IJsseldelta 1/2000 is, zal het toetspeil in ieder geval hoger dienen te zijn dan de waterstand in het snijpunt. Op welke wijze deze verhoging van de waterstand is berekend, wordt in de volgende paragraaf uiteengezet.

2.2.3. De bepaling van het toetspeil op het snijpunt van de verhanglijnen

Er is aangenomen dat op iedere locatie langs de IJssel de verdeling van de overschrijdingsfrequentie van de waterstanden, op- beneden en boven beide 1/2000 verhanglijnen, bij benadering voldoet aan een logaritmische verdeling. In dat geval is de samengestelde (totale) overschrijdingsfrequentie van een willekeurige waterstand in het snijpunt van de verhanglijnen Wind en Afvoer te berekenen met de onderstaande formule (2.1).

$$F_{Tot}(H) = 1.25 * \{ 10^{-\frac{(H-\mu_W)}{\sigma_W}} + 10^{-\frac{(H-\mu_A)}{\sigma_A}} \} \quad (2.1)$$

Hierin is:

- $F_{Tot}(H)$: de totale overschrijdingsfrequentie van waterstand H
- H : de beschouwde waterstand
- 1.25 : de gehanteerde toeslagfactor op de overschrijdingsfrequentie
- σ_W, σ_A : spreidingsparameter van de frequentieverdeling (decimeringhoogte) voor respectievelijk de belastinggevallen Wind en Afvoer
- μ_W, μ_A : liggingparameter van de frequentieverdeling (is: waterstand 1 keer/jaar) voor respectievelijk de belastinggevallen Wind en Afvoer

De decimeringhoogte (σ_W, σ_A) is een maat voor de helling van de frequentieverdeling van de waterstanden (in het vlak waterstand versus overschrijdingsfrequentie) en is gelijk aan het verschil tussen 2 waterstanden die een factor 10 in overschrijdingsfrequentie van elkaar verschillen.

De liggingparameter (μ_W, μ_A) is een maat voor de positie van de frequentieverdeling (in het vlak waterstand versus overschrijdingsfrequentie) en is gelijk aan de waterstand met een gemiddelde overschrijdingsfrequentie van 1 keer per jaar.

De totale overschrijdingsfrequentie is de som van de beide overschrijdingsfrequenties voor de belastinggevallen Wind en Afvoer, die vervolgens wordt vergroot met een toeslagfactor (1.25).

Voor de waterstand in het snijpunt van de 1/2000 verhanglijnen volgt

uit formule (2.1) een overschrijdingsfrequentie van: $1.25 * \{1/2000 + 1/2000\} = 1/800$ keer per jaar.

Als de 4 statistische parameters bekend zijn (σ_W ; σ_A en μ_W ; μ_A), dan is met formule 2.1 ook voor iedere willekeurige waterstand H de totale overschrijdingsfrequentie $F_{Tot}(H)$ te berekenen; ook voor waterstanden die hoger zijn dan de waterstand in het snijpunt met overschrijdingsfrequentie 1/800. De waterstand die precies de totale overschrijdingsfrequentie 1/2000 oplevert, is dan de 1/2000 waterstand in het snijpunt van de verhanglijnen.

2.2.4. Bepaling van de 4 statistische parameters

De 4 statistische parameters (σ_W ; σ_A en μ_W ; μ_A), die nodig zijn voor de berekening van de 1/2000 waterstand op het snijpunt van de twee verhanglijnen, zijn als volgt bepaald:

De decimeringhoogte σ_W (belastinggeval Wind)

- er is aangenomen dat de decimeringhoogte voor het belastinggeval Wind op alle locaties langs de benedenloop van de IJssel een constante waarde heeft en dat die gelijk is aan de decimeringhoogte bij de IJsselmond in het Ketelmeer dicht nabij kmr 1002 (splittingspunt Kattendiep en Keteldiep).
- Deze decimeringhoogte is bepaald uit de frequentieverdeling van de waterstand bij de IJsselmond in het Kattendiep. Deze verdeling is berekend met het programma Hydra-M dat ook wordt gebruikt voor de veiligheidstoetsing van de dijken rondom het IJsselmeer.

De decimeringhoogte σ_A (belastinggeval Afvoer)

- de decimeringhoogte voor het belastingsgeval Afvoer varieert langs de IJssel en is dus afhankelijk van de locatie.
- De decimeringhoogten zijn per locatie bepaald aan de hand van een aantal berekeningen voor de gevoeligheid van de waterstand op de IJssel voor extreme Rijnafoeren te Lobith en op basis van de werklijn (frequentieverdeling) van de Rijn te Lobith.
De werklijn van de Rijn geeft voldoende informatie om het verschil tussen de 1/1000 Rijnafoer en de 1/10000 Rijnafoer te bepalen. Dit verschil wordt hier de decimeringafvoer van de Rijn genoemd.
- De onderzochte Rijnafoeren zijn 15000 m³/s, 16000 m³/s en 18000 m³/s. De drie berekeningen geven informatie over de gemiddelde waterstandverandering op de IJssel per 1000 m³/s verandering in de Rijnafoer in de buurt van de maatgevende Rijnafoer.
- Combinatie van de decimeringsafvoer van de Rijn met de verandering van de waterstand op de IJssel per 1000 m³/s levert de gezochte decimeringhoogten (σ_A) langs de IJssel voor het belastingsgeval Afvoer. Daarmee is dan ook de gezochte decimeringhoogte in het snijpunt van de twee verhanglijnen bekend.

De liggingparameter μ_W (belastinggeval Wind)

De individuele overschrijdingsfrequentie van de berekende waterstand ter plaatse van het snijpunt van de 2 verhanglijnen is, als gevolg van de gekozen uitgangspunten, gelijk aan 1/2000 (exclusief de factortoeslag). Deze individuele overschrijdingsfrequentie volgt uit onderstaande formule (2.2).

$$F_W(H_S) = 10^{-\left(\frac{H_S - \mu_W}{\sigma_W}\right)} = \frac{1}{2000} \quad (2.2)$$

Hierin is:

- $F_W(H_S)$: de overschrijdingsfrequentie van waterstand H_S voor belastinggeval Wind
 H_S : de specifieke (bekende) waterstand in het snijpunt van de 1/2000 verhanglijnen

De waterstand (H_S) op de verhanglijn is reeds bekend. De decimeringhoogte (σ_W) is hiervoor al bepaald, zodat de liggingparameter (μ_W) als enige onbekende volgt uit formule (2.2) en berekend wordt met de onderstaande formule (2.3):

$$\mu_W = H_S + \sigma_W \log\left(\frac{1}{2000}\right) \quad (2.3)$$

De liggingparameter μ_A (belastinggeval Afvoer)

De liggingparameter μ_A voor het belastinggeval Afvoer, wordt op dezelfde manier berekend als de hiervoor is aangegeven voor het belastinggeval Wind.

De 4 statistische parameters (σ_W , σ_A en μ_W , μ_A) die nodig zijn in formule (2.1), voor de berekening van de (totale) overschrijdingsfrequentie van een willekeurige waterstand ter plaatse van het snijpunt van de twee verhanglijnen, zijn met de gevolgde werkwijze volledig bepaald. De waterstand met een overschrijdingsfrequentie 1/2000 is dan het gezochte toetspeil.

Daarmee is een belangrijke stap gezet in de bepaling van de toetspeilen van de IJsseldelta. De bepaling van de overige toetspeilen vindt dan plaats op basis van een visueel/grafische interpolatie.

I.2. Berekeningen IJsseldelta methode

Ten eerste worden de berekende verhanglijnen gegeven in de vorm van tabellen. In paragraaf I.2.3 en I.2.4 wordt de bepaling van de statistische parameters, de decimeringhoogte en liggingsparameters, besproken. Paragraaf I.2.5 bevat de gegevens van de totale verhanglijnen zoals deze zijn bepaald met de IJsseldelta methode. De nodes komen overeen met figuur H.2 in bijlage H.

I.2.1. Verhanglijnen

De verhanglijnen zoals deze zijn berekend met Duflow voor een frequentie van 1/25 jaar zijn in tabel I.1 te zien. De verhanglijnen zoals deze zijn berekend met Duflow voor een frequentie van 1/50 jaar zijn in tabel I.2 te zien. De verhanglijnen zoals deze zijn berekend met Duflow voor een frequentie van 1/100 jaar zijn in tabel I.3 te zien. In tabel I.4 en tabel I.5 is de verhanglijn behorende bij een afvoergolf van 1/2000 jaar uit [21] gecombineerd met de met Duflow berekende verhanglijnen bij een waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een frequentie van 1/2000 jaar voor respectievelijk de huidige situatie en de situatie met inzet van het Volkerak-Zoommeer. Alle verhanglijnen in tabel I.1 tot en met tabel I.5 zijn berekend volgens de bovengrensbepaling.

Node	Locatie	x-coördinaat (m)	Verhanglijn afvoer 1/25 (m + NAP)	Verhanglijn waterstand 1/25 (m + NAP)
NOD130	Bovenmark, stuw Blauwe Kamer	-7100	2,38	0,72
NOD121	Bovenmark, Ulvenhoutselaan	-5400	2,21	0,68
NOD192	Aa of Weerij, stuw Oranjeboombrug	-4330	2,02	0,66
NOD118	Singel Breda zuid	-1945	1,88	0,64
NOD94	Singel Breda oost	-1600	1,80	0,63
NOD112	Singel Breda west	-955	1,72	0,62
NOD81	Overgang Mark -> Singel, Trambrug	0	1,49	0,60
NOD75	Mark, bovenstrooms van het Markkanaal	1100	1,38	0,59
NOD65	Mark, bovenstrooms van het Markkanaal	3910	1,31	0,59
NOD61	Mark, benedenstrooms van het Markkanaal	4710	1,31	0,59
NOD52	Mark, Nieuwveer (ter hoogte van bergboezems)	8260	1,26	0,58
NOD38	Mark, bij Laakse Vaart	17470	1,00	0,56
NOD24	Mark, bij haven Oudenbosch	24570	0,70	0,54
NOD16	Overgang Mark/ Dintel, aftakking Mark-Vliet kanaal	31820	0,43	0,53
NOD5	Dintel, sluis Dintelsas	36120	0,40	0,53
NOD1	Dintelmonding	36691	0,30	0,50
NOD244	Mark-Vliet kanaal	35320	0,43	0,53
NOD247	Roosendaalsche Vliet en Mark-Vliet kanaal	35570	0,43	0,52
NOD254	Roosendaalsche Vliet, Haven Roosendaal	30890	0,44	0,52
NOD352	Steenbergsche Vliet, sluis Bovensas	40270	0,39	0,51
NOD339	Steenbergsche Vliet, sluis Benedensas	50435	0,27	0,47
NOD336	Vlietmonding	50460	0,26	0,46

Tabel I.1: Verhanglijnen van het Mark-Vliet systeem; één voor een afvoergolf van 1/25 jaar met een waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een frequentie van 1 keer per jaar en één voor een waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een frequentie van 1/25 keer per jaar met een afvoergolf van 1/1 jaar. Beide verhanglijnen zijn berekend met Duflow. Er wordt uitgegaan van een stationaire waterstand op het Volkerak-Zoommeer.

Het snijpunt van de verhanglijnen met een frequentie van 1/25 jaar bevindt zich tussen node 24 en 16. Door middel van lineaire interpolatie is vastgesteld dat het snijpunt bij x-coördinaat 29158 ligt. De waterstand op dit punt is 0,53 m + NAP.

Node	Locatie	x-coördinaat (m)	Verhanglijn afvoer 1/50 (m + NAP)	Verhanglijn waterstand 1/50 (m + NAP)
NOD130	Bovenmark, stuw Blauwe Kamer	-7100	2,82	0,75
NOD121	Bovenmark, Ulvenhoutselaan	-5400	2,61	0,71
NOD192	Aa of Weerij, stuw Oranjeboombrug	-4330	2,36	0,69
NOD118	Singel Breda zuid	-1945	2,18	0,68
NOD94	Singel Breda oost	-1600	2,07	0,67
NOD112	Singel Breda west	-955	1,96	0,66
NOD81	Overgang Mark -> Singel, Trambrug	0	1,62	0,64
NOD75	Mark, bovenstrooms van het Markkanaal	1100	1,46	0,63
NOD65	Mark, bovenstrooms van het Markkanaal	3910	1,36	0,63
NOD61	Mark, benedenstrooms van het Markkanaal	4710	1,36	0,63
NOD52	Mark, Nieuwveer (ter hoogte van bergboezems)	8260	1,29	0,62
NOD38	Mark, bij Laakse Vaart	17470	1,06	0,60
NOD24	Mark, bij haven Oudenbosch	24570	0,75	0,58
NOD16	Overgang Mark/ Dintel, aftakking Mark-Vliet kanaal	31820	0,45	0,57
NOD5	Dintel, sluis Dintelsas	36120	0,39	0,56
NOD1	Dintelmonding	36691	0,30	0,54
NOD244	Mark-Vliet kanaal	35320	0,45	0,56
NOD247	Roosendaalsche Vliet en Mark-Vliet kanaal	35570	0,45	0,56
NOD254	Roosendaalsche Vliet, Haven Roosendaal	30890	0,46	0,57
NOD352	Steenbergsche Vliet, sluis Bovensas	40270	0,41	0,55
NOD339	Steenbergsche Vliet, sluis Benedensas	50435	0,28	0,51
NOD336	Vlietmonding	50460	0,26	0,51

Tabel I.2: Verhanglijnen van het Mark-Vliet systeem; één voor een afvoergolf van 1/50 jaar met een waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een frequentie van 1 keer per jaar en één voor een waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een frequentie van 1/50 keer per jaar met een afvoergolf van 1/1 jaar. Beide verhanglijnen zijn berekend met DufLOW. Er wordt uitgegaan van een stationaire waterstand op het Volkerak-Zoommeer.

Het snijpunt van de verhanglijnen met een frequentie van 1/50 jaar bevindt zich ook tussen node 24 en 16. Door middel van lineaire interpolatie is vastgesteld dat het snijpunt bij x-coördinaat 28832 ligt. De waterstand op dit punt is 0,57 m + NAP.

Node	Locatie	x-coördinaat (m)	Verhanglijn afvoer 1/100 (m + NAP)	Verhanglijn waterstand 1/100 (m + NAP)
NOD130	Bovenmark, stuw Blauwe Kamer	-7100	2,97	0,78
NOD121	Bovenmark, Ulvenhoutselaan	-5400	2,76	0,75
NOD192	Aa of Weerij, stuw Oranjeboombrug	-4330	2,45	0,73
NOD118	Singel Breda zuid	-1945	2,31	0,71
NOD94	Singel Breda oost	-1600	2,20	0,70
NOD112	Singel Breda west	-955	2,09	0,70
NOD81	Overgang Mark -> Singel, Trambrug	0	1,77	0,68
NOD75	Mark, bovenstrooms van het Markkanaal	1100	1,64	0,67
NOD65	Mark, bovenstrooms van het Markkanaal	3910	1,56	0,66
NOD61	Mark, benedenstrooms van het Markkanaal	4710	1,56	0,66
NOD52	Mark, Nieuwveer (ter hoogte van bergboezems)	8260	1,51	0,66
NOD38	Mark, bij Laakse Vaart	17470	1,22	0,64
NOD24	Mark, bij haven Oudenbosch	24570	0,84	0,62
NOD16	Overgang Mark/ Dintel, aftakking Mark-Vliet kanaal	31820	0,47	0,60
NOD5	Dintel, sluis Dintelsas	36120	0,40	0,59
NOD1	Dintelmonding	36691	0,30	0,58
NOD244	Mark-Vliet kanaal	35320	0,47	0,60
NOD247	Roosendaalsche Vliet en Mark-Vliet kanaal	35570	0,47	0,60
NOD254	Roosendaalsche Vliet, Haven Roosendaal	30890	0,47	0,60
NOD352	Steenbergsche Vliet, sluis Bovensas	40270	0,43	0,59
NOD339	Steenbergsche Vliet, sluis Benedensas	50435	0,30	0,54
NOD336	Vlietmonding	50460	0,26	0,53

Tabel I.3: Verhanglijnen van het Mark-Vliet systeem; één voor een afvoergolf van 1/100 jaar met een waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een frequentie van 1 keer per jaar en één voor een waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een frequentie van 1/100 keer per jaar met een afvoergolf van 1/1 jaar. Beide verhanglijnen zijn berekend met DufLOW. Er wordt uitgegaan van een stationaire waterstand op het Volkerak-Zoommeer.

Het snijpunt van de verhanglijnen met een frequentie van 1/100 jaar bevindt zich tussen node 24 en 16. Door middel van lineaire interpolatie is vastgesteld dat het snijpunt bij x-coördinaat 29110 ligt. De waterstand op dit punt is 0,61 m + NAP.

De verhanglijn behorende bij een extreme afvoer van 1/2000 jaar gecombineerd met een lage waterstand op het Volkerak-Zoommeer is overgenomen uit het rapport 'Hoogwaterlijnen van het Mark-Vliet systeem' [21]. De waterstand op het Volkerak-Zoommeer die bij dit onderzoek is aangehouden bij het berekenen van de waterstanden in het Mark-Vliet systeem is niet gelijk aan de waterstand behorende bij een overschrijdingsfrequentie van eens per jaar. Er is aangenomen dat deze iets hogere waterstand een minieme invloed heeft op de uiteindelijke verhanglijn doordat de zeer hoge afvoer de verhanglijn domineert.

Node	Locatie	x-coördinaat (m)	Verhanglijn afvoer 1/2000 (m + NAP)	Verhanglijn waterstand 1/2000 huidig (m + NAP)
NOD130	Bovenmark, stuw Blauwe Kamer	-7100	4,07	0,94
NOD121	Bovenmark, Ulvenhoutselaan	-5400	3,85	0,91
NOD192	Aa of Weerijs, stuw Oranjeboombrug	-4330	3,38	0,89
NOD118	Singel Breda zuid	-1945		0,88
NOD94	Singel Breda oost	-1600		0,87
NOD112	Singel Breda west	-955		0,86
NOD81	Overgang Mark -> Singel, Trambrug	0	2,26	0,85
NOD75	Mark, bovenstrooms van het Markkanaal	1100		0,84
NOD65	Mark, bovenstrooms van het Markkanaal	3910		0,84
NOD61	Mark, benedenstrooms van het Markkanaal	4710		0,84
NOD52	Mark, Nieuwveer (ter hoogte van bergboezems)	8260	1,91	0,83
NOD38	Mark, bij Laakse Vaart	17470		0,82
NOD24	Mark, bij haven Oudenbosch	24570		0,80
NOD16	Overgang Mark/ Dintel, aftakking Mark-Vliet kanaal	31820	0,87	0,78
NOD5	Dintel, sluis Dintelsas	36120	0,80	0,79
NOD244	Mark-Vliet kanaal	35320		0,78
NOD247	Roosendaalsche Vliet en Mark-Vliet kanaal	35570		0,78
NOD254	Roosendaalsche Vliet, Haven Roosendaal	30890	0,87	0,78
NOD352	Steenbergsche Vliet, sluis Bovensas	40270	0,84	0,74
NOD339	Steenbergsche Vliet, sluis Benedensas	50435		0,62

Tabel I.4: Verhanglijnen van het Mark-Vliet systeem; één voor een afvoergolf van 1/2000 jaar met een lage waterstand op het Volkerak-Zoommeer [21] en één voor een waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een frequentie van 1/2000 keer per jaar met een afvoergolf van 1/1 jaar. De verhanglijn met de extreme waterstand op het Volkerak-Zoommeer is berekend met DufLOW uitgaand van de huidige situatie, zonder inzet van het Volkerak-Zoommeer voor waterberging. Er wordt uitgegaan van een stationaire waterstand op het Volkerak-Zoommeer.

De verhanglijnen met een frequentie van 1/2000 jaar in de huidige situatie, dus zonder inzet van het Volkerak-Zoommeer voor waterberging, snijden elkaar niet. De verhanglijn van de afvoer ligt op alle locaties hoger, de waterstand wordt dan ook volledig bepaald door de afvoer.

Node	Locatie	x-coördinaat (m)	Verhanglijn afvoer 1/2000 (m + NAP)	Verhanglijn waterstand 1/2000 nieuw (m + NAP)
NOD130	Bovenmark, stuw Blauwe Kamer	-7100	4,07	1,513
NOD121	Bovenmark, Ulvenhoutselaan	-5400	3,85	1,512
NOD192	Aa of Weerij, stuw Oranjeboombrug	-4330	3,38	1,511
NOD118	Singel Breda zuid	-1945		1,511
NOD94	Singel Breda oost	-1600		1,510
NOD112	Singel Breda west	-955		1,510
NOD81	Overgang Mark -> Singel, Trambrug	0	2,26	1,509
NOD75	Mark, bovenstrooms van het Markkanaal	1100		1,509
NOD65	Mark, bovenstrooms van het Markkanaal	3910		1,508
NOD61	Mark, benedenstrooms van het Markkanaal	4710		1,508
NOD52	Mark, Nieuwveer (ter hoogte van bergboezems)	8260	1,91	1,508
NOD38	Mark, bij Laakse Vaart	17470		1,507
NOD24	Mark, bij haven Oudenbosch	24570		1,507
NOD16	Overgang Mark/ Dintel, aftakking Mark-Vliet kanaal	31820	0,87	1,507
NOD5	Dintel, sluis Dintelsas	36120	0,80	1,507
NOD244	Mark-Vliet kanaal	35320		1,507
NOD247	Roosendaalsche Vliet en Mark-Vliet kanaal	35570		1,506
NOD254	Roosendaalsche Vliet, Haven Roosendaal	30890	0,87	1,506
NOD352	Steenbergsche Vliet, sluis Bovensas	40270	0,84	1,507
NOD339	Steenbergsche Vliet, sluis Benedensas	50435		1,508

Tabel I.5: Verhanglijnen van het Mark-Vliet systeem; één voor een afvoergolf van 1/2000 jaar met een lage waterstand op het Volkerak-Zoommeer [21] en één voor een waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een frequentie van 1/2000 keer per jaar met een afvoergolf van 1/1 jaar. De verhanglijn met de extreme waterstand op het Volkerak-Zoommeer is berekend met DufLOW uitgaand van de nieuwe situatie, met inzet van het Volkerak-Zoommeer voor waterberging. Er wordt uitgegaan van een stationaire waterstand op het Volkerak-Zoommeer.

Het snijpunt van de verhanglijnen met een frequentie van 1/2000 jaar in de nieuwe situatie, dus met inzet van het Volkerak-Zoommeer voor hoogwaterberging met een frequentie van 1/1430 jaar, bevindt zich tussen node 52 en 38. Door middel van lineaire interpolatie is vastgesteld dat het snijpunt bij x-coördinaat 17387 ligt. De waterstand op dit punt is 1,51 m + NAP.

Naast de bovengrensberekeningen zijn ook verhanglijnen berekend via een ondergrensbenadering, waarbij de waterstand op het Volkerak-Zoommeer niet stationair is. Deze verhanglijnen zijn weergegeven in tabel I.6 tot en met I.10. De verhanglijnen zoals deze zijn berekend met DufLOW voor een frequentie van 1/25 jaar zijn in tabel I.6 te zien. De verhanglijnen zoals deze zijn berekend met DufLOW voor een frequentie van 1/50 jaar zijn in tabel I.7 te zien. De verhanglijnen zoals deze zijn berekend met DufLOW voor een frequentie van 1/100 jaar zijn in tabel I.8 te zien. In tabel I.9 en tabel I.10 is de verhanglijn behorende bij een afvoergolf van 1/2000 jaar uit [21] gecombineerd met de met DufLOW berekende verhanglijnen bij een waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een frequentie van 1/2000 jaar voor respectievelijk de huidige situatie en de situatie met inzet van het Volkerak-Zoommeer.

Node	Locatie	x-coördinaat (m)	Verhanglijn afvoer 1/25 (m + NAP)	Verhanglijn waterstand 1/25 (m + NAP)
NOD130	Bovenmark, stuw Blauwe Kamer	-7100	2,38	0,45
NOD121	Bovenmark, Ulvenhoutselaan	-5400	2,21	0,45
NOD192	Aa of Weerijds, stuw Oranjeboombrug	-4330	2,02	0,45
NOD118	Singel Breda zuid	-1945	1,88	0,44
NOD94	Singel Breda oost	-1600	1,80	0,44
NOD112	Singel Breda west	-955	1,72	0,44
NOD81	Overgang Mark -> Singel, Trambrug	0	1,49	0,44
NOD75	Mark, bovenstrooms van het Markkanaal	1100	1,38	0,44
NOD65	Mark, bovenstrooms van het Markkanaal	3910	1,31	0,44
NOD61	Mark, benedenstrooms van het Markkanaal	4710	1,31	0,44
NOD52	Mark, Nieuwveer (ter hoogte van bergboezems)	8260	1,26	0,43
NOD38	Mark, bij Laakse Vaart	17470	1,00	0,43
NOD24	Mark, bij haven Oudenbosch	24570	0,70	0,42
NOD16	Overgang Mark/ Dintel, aftakking Mark-Vliet kanaal	31820	0,43	0,42
NOD5	Dintel, sluis Dintelsas	36120	0,40	0,42
NOD1	Dintelmonding	36691	0,30	0,50
NOD244	Mark-Vliet kanaal	35320	0,43	0,42
NOD247	Roosendaalsche Vliet en Mark-Vliet kanaal	35570	0,43	0,41
NOD254	Roosendaalsche Vliet, Haven Roosendaal	30890	0,44	0,42
NOD352	Steenbergsche Vliet, sluis Bovensas	40270	0,39	0,41
NOD339	Steenbergsche Vliet, sluis Benedensas	50435	0,27	0,41
NOD336	Vlietmonding	50460	0,26	0,46

Tabel I.6: Verhanglijnen van het Mark-Vliet systeem; één voor een afvoergolf van 1/25 jaar met een waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een frequentie van 1 keer per jaar en één voor een waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een frequentie van 1/25 keer per jaar met een afvoergolf van 1/1 jaar. Beide verhanglijnen zijn berekend met Duflow. Er wordt uitgegaan van een 2-daagse waterstandverhoging op het Volkerak-Zoommeer.

Het snijpunt van de verhanglijnen met een frequentie van 1/25 jaar bevindt zich tussen node 16 en 5. Door middel van lineaire interpolatie is vastgesteld dat het snijpunt bij x-coördinaat 33721 ligt. De waterstand op dit punt is 0,42 m + NAP.

Node	Locatie	x-coördinaat (m)	Verhanglijn afvoer 1/50 (m + NAP)	Verhanglijn waterstand 1/50 (m + NAP)
NOD130	Bovenmark, stuw Blauwe Kamer	-7100	2,82	0,46
NOD121	Bovenmark, Ulvenhoutselaan	-5400	2,61	0,46
NOD192	Aa of Weerij, stuw Oranjeboombrug	-4330	2,36	0,46
NOD118	Singel Breda zuid	-1945	2,18	0,46
NOD94	Singel Breda oost	-1600	2,07	0,45
NOD112	Singel Breda west	-955	1,96	0,45
NOD81	Overgang Mark -> Singel, Trambrug	0	1,62	0,45
NOD75	Mark, bovenstrooms van het Markkanaal	1100	1,46	0,45
NOD65	Mark, bovenstrooms van het Markkanaal	3910	1,36	0,45
NOD61	Mark, benedenstrooms van het Markkanaal	4710	1,36	0,45
NOD52	Mark, Nieuwveer (ter hoogte van bergboezems)	8260	1,29	0,45
NOD38	Mark, bij Laakse Vaart	17470	1,06	0,44
NOD24	Mark, bij haven Oudenbosch	24570	0,75	0,43
NOD16	Overgang Mark/ Dintel, aftakking Mark-Vliet kanaal	31820	0,45	0,43
NOD5	Dintel, sluis Dintelsas	36120	0,39	0,43
NOD1	Dintelmonding	36691	0,30	0,54
NOD244	Mark-Vliet kanaal	35320	0,45	0,43
NOD247	Roosendaalsche Vliet en Mark-Vliet kanaal	35570	0,45	0,43
NOD254	Roosendaalsche Vliet, Haven Roosendaal	30890	0,46	0,43
NOD352	Steenbergsche Vliet, sluis Bovensas	40270	0,41	0,43
NOD339	Steenbergsche Vliet, sluis Benedensas	50435	0,28	0,42
NOD336	Vlietmonding	50460	0,26	0,51

Tabel I.7: Verhanglijnen van het Mark-Vliet systeem; één voor een afvoergolf van 1/50 jaar met een waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een frequentie van 1 keer per jaar en één voor een waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een frequentie van 1/50 keer per jaar met een afvoergolf van 1/1 jaar. Beide verhanglijnen zijn berekend met DufLOW. Er wordt uitgegaan van een 2-daagse waterstandverhoging op het Volkerak-Zoommeer.

Het snijpunt van de verhanglijnen met een frequentie van 1/50 jaar bevindt zich ook tussen node 16 en 5. Door middel van lineaire interpolatie is vastgesteld dat het snijpunt bij x-coördinaat 33526 ligt. De waterstand op dit punt is 0,43 m + NAP.

Node	Locatie	x-coördinaat (m)	Verhanglijn afvoer 1/100 (m + NAP)	Verhanglijn waterstand 1/100 (m + NAP)
NOD130	Bovenmark, stuw Blauwe Kamer	-7100	2,97	0,47
NOD121	Bovenmark, Ulvenhoutselaan	-5400	2,76	0,46
NOD192	Aa of Weerij, stuw Oranjeboombrug	-4330	2,45	0,46
NOD118	Singel Breda zuid	-1945	2,31	0,46
NOD94	Singel Breda oost	-1600	2,20	0,46
NOD112	Singel Breda west	-955	2,09	0,46
NOD81	Overgang Mark -> Singel, Trambrug	0	1,77	0,46
NOD75	Mark, bovenstrooms van het Markkanaal	1100	1,64	0,46
NOD65	Mark, bovenstrooms van het Markkanaal	3910	1,56	0,45
NOD61	Mark, benedenstrooms van het Markkanaal	4710	1,56	0,45
NOD52	Mark, Nieuwveer (ter hoogte van bergboezems)	8260	1,51	0,45
NOD38	Mark, bij Laakse Vaart	17470	1,22	0,45
NOD24	Mark, bij haven Oudenbosch	24570	0,84	0,44
NOD16	Overgang Mark/ Dintel, aftakking Mark-Vliet kanaal	31820	0,47	0,44
NOD5	Dintel, sluis Dintelsas	36120	0,40	0,44
NOD1	Dintelmonding	36691	0,30	0,58
NOD244	Mark-Vliet kanaal	35320	0,47	0,44
NOD247	Roosendaalsche Vliet en Mark-Vliet kanaal	35570	0,47	0,44
NOD254	Roosendaalsche Vliet, Haven Roosendaal	30890	0,47	0,44
NOD352	Steenbergsche Vliet, sluis Bovensas	40270	0,43	0,43
NOD339	Steenbergsche Vliet, sluis Benedensas	50435	0,30	0,43
NOD336	Vlietmonding	50460	0,26	0,53

Tabel I.8: Verhanglijnen van het Mark-Vliet systeem; één voor een afvoergolf van 1/100 jaar met een waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een frequentie van 1 keer per jaar en één voor een waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een frequentie van 1/100 keer per jaar met een afvoergolf van 1/1 jaar. Beide verhanglijnen zijn berekend met Duflow. Er wordt uitgegaan van een 2-daagse waterstandverhoging op het Volkerak-Zoommeer.

Het snijpunt van de verhanglijnen met een frequentie van 1/100 jaar bevindt zich tussen node 16 en 5. Door middel van lineaire interpolatie is vastgesteld dat het snijpunt bij x-coördinaat 33857 ligt. De waterstand op dit punt is 0,44 m + NAP.

De verhanglijn behorende bij een extreme afvoer van 1/2000 jaar gecombineerd met een lage waterstand op het Volkerak-Zoommeer is overgenomen uit het rapport 'Hoogwaterlijnen van het Mark-Vliet systeem' [21]. De waterstand op het Volkerak-Zoommeer die bij dit onderzoek is aangehouden bij het berekenen van de waterstanden in het Mark-Vliet systeem is niet gelijk aan de waterstand behorende bij een overschrijdingsfrequentie van eens per jaar. Er is aangenomen dat deze iets hogere waterstand een minieme invloed heeft op de uiteindelijke verhanglijn doordat de zeer hoge afvoer de verhanglijn domineert.

Node	Locatie	x-coördinaat (m)	Verhanglijn afvoer 1/2000 (m + NAP)	Verhanglijn waterstand 1/2000 huidig (m + NAP)
NOD130	Bovenmark, stuw Blauwe Kamer	-7100	4,07	0,48
NOD121	Bovenmark, Ulvenhoutselaan	-5400	3,85	0,48
NOD192	Aa of Weerij, stuw Oranjeboombrug	-4330	3,38	0,48
NOD118	Singel Breda zuid	-1945		0,47
NOD94	Singel Breda oost	-1600		0,47
NOD112	Singel Breda west	-955		0,47
NOD81	Overgang Mark -> Singel, Trambrug	0	2,26	0,47
NOD75	Mark, bovenstrooms van het Markkanaal	1100		0,47
NOD65	Mark, bovenstrooms van het Markkanaal	3910		0,47
NOD61	Mark, benedenstrooms van het Markkanaal	4710		0,47
NOD52	Mark, Nieuwveer (ter hoogte van bergboezems)	8260	1,91	0,47
NOD38	Mark, bij Laakse Vaart	17470		0,46
NOD24	Mark, bij haven Oudenbosch	24570		0,46
NOD16	Overgang Mark/ Dintel, aftakking Mark-Vliet kanaal	31820	0,87	0,46
NOD5	Dintel, sluis Dintelsas	36120	0,80	0,46
NOD244	Mark-Vliet kanaal	35320		0,46
NOD247	Roosendaalsche Vliet en Mark-Vliet kanaal	35570		0,46
NOD254	Roosendaalsche Vliet, Haven Roosendaal	30890	0,87	0,46
NOD352	Steenbergsche Vliet, sluis Bovensas	40270	0,84	0,45
NOD339	Steenbergsche Vliet, sluis Benedensas	50435		0,44

Tabel 1.9: Verhanglijnen van het Mark-Vliet systeem; één voor een afvoergolf van 1/2000 jaar met een lage waterstand op het Volkerak-Zoommeer [21] en één voor een waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een frequentie van 1/2000 keer per jaar met een afvoergolf van 1/1 jaar. De verhanglijn met de extreme waterstand op het Volkerak-Zoommeer is berekend met Dufrow uitgaand van de huidige situatie, zonder inzet van het Volkerak-Zoommeer voor waterberging. Er wordt uitgegaan van een 2-daagse waterstandverhoging op het Volkerak-Zoommeer.

De verhanglijnen met een frequentie van 1/2000 jaar in de huidige situatie, dus zonder inzet van het Volkerak-Zoommeer voor waterberging, snijden elkaar niet. De verhanglijn van de afvoer ligt op alle locaties hoger, de waterstand wordt dan ook volledig bepaald door de afvoer.

Node	Locatie	x-coördinaat (m)	Verhanglijn afvoer 1/2000 (m + NAP)	Verhanglijn waterstand 1/2000 nieuw (m + NAP)
NOD130	Bovenmark, stuw Blauwe Kamer	-7100	4,07	0,54
NOD121	Bovenmark, Ulvenhoutselaan	-5400	3,85	0,54
NOD192	Aa of Weerij, stuw Oranjeboombrug	-4330	3,38	0,54
NOD118	Singel Breda zuid	-1945		0,54
NOD94	Singel Breda oost	-1600		0,53
NOD112	Singel Breda west	-955		0,53
NOD81	Overgang Mark -> Singel, Trambrug	0	2,26	0,53
NOD75	Mark, bovenstrooms van het Markkanaal	1100		0,53
NOD65	Mark, bovenstrooms van het Markkanaal	3910		0,53
NOD61	Mark, benedenstrooms van het Markkanaal	4710		0,53
NOD52	Mark, Nieuwveer (ter hoogte van bergboezems)	8260	1,91	0,53
NOD38	Mark, bij Laakse Vaart	17470		0,53
NOD24	Mark, bij haven Oudenbosch	24570		0,53
NOD16	Overgang Mark/ Dintel, aftakking Mark-Vliet kanaal	31820	0,87	0,52
NOD5	Dintel, sluis Dintelsas	36120	0,80	0,52
NOD244	Mark-Vliet kanaal	35320		0,52
NOD247	Roosendaalsche Vliet en Mark-Vliet kanaal	35570		0,52
NOD254	Roosendaalsche Vliet, Haven Roosendaal	30890	0,87	0,53
NOD352	Steenbergsche Vliet, sluis Bovensas	40270	0,84	0,53
NOD339	Steenbergsche Vliet, sluis Benedensas	50435		0,52

Tabel I.10: Verhanglijnen van het Mark-Vliet systeem; één voor een afvoergolf van 1/2000 jaar met een lage waterstand op het Volkerak-Zoommeer [21] en één voor een waterstand op het Volkerak-Zoommeer met een frequentie van 1/2000 keer per jaar met een afvoergolf van 1/1 jaar. De verhanglijn met de extreme waterstand op het Volkerak-Zoommeer is berekend met DufLOW uitgaand van de nieuwe situatie, met inzet van het Volkerak-Zoommeer voor waterberging. Er wordt uitgegaan van een 2-daagse waterstandverhoging op het Volkerak-Zoommeer.

De verhanglijnen met een frequentie van 1/2000 jaar in de nieuwe situatie, dus met inzet van het Volkerak-Zoommeer voor waterberging, snijden elkaar niet. De verhanglijn van de afvoer ligt op alle locaties hoger, de waterstand wordt dan ook volledig bepaald door de afvoer.

I.2.2. Decimeringhoogtes

De decimeringhoogtes worden vastgesteld door te bepalen wat het verschil is tussen twee waterstanden waartussen een factor 10 in de overschrijdingsfrequentie zit [50]. Voor de waterstanden in de riviermonding wordt uitgegaan van de frequentielijn van de Dintelmonding zoals deze is bepaald met Hydra-M. De frequentielijn van de Dintel- en Vlietmonding verschillen, waardoor voor de twee takken een verschillende decimeringhoogte berekend kan worden. Aangezien het vergrootte deel van het debiet van het systeem via de Dintel naar het Volkerak-Zoommeer stroomt en slechts een klein deel via de Vliet, is het realistisch om de frequentielijn van de Dintelmonding als uitgangspunt van de verhanglijn te nemen.

De overschrijdingsfrequentielijnen voor de Dintelmonding zijn in hoofdstuk 4 in figuur 4.7 gepresenteerd. Tabel I.11 bevat de overschrijdingsfrequenties die met deze figuur overeenkomen.

Er worden twee decimeringhoogtes bepaald, één voor de huidige situatie en één met inzet van het Volkerak-Zoommeer. Voor de huidige situatie is de decimeringhoogte van $T = 1/100$ naar $T = 1/1000$ aangehouden. Voor de nieuwe situatie laat de overschrijdingsfrequentielijn een grote sprong zien bij de inzetfrequentie van het Volkerak-Zoommeer. Deze sprong is bij het bepalen van de decimeringhoogte buiten beschouwing gelaten, aangezien deze de waterstand op het snijpunt niet zal beïnvloeden. De decimeringhoogte is bepaald uit een middeling van een geschatte decimeringhoogte van het deel van de frequentielijn voorbij de sprong (van $1/2000$ naar $1/20000$ jaar) en een berekende decimeringhoogte van het deel voor de sprong in de frequentielijn (van $1/100$ naar $1/1000$ jaar). De decimeringhoogtes van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer zijn gepresenteerd in tabellen I.12 en I.13.

Overschrijdings-frequentie	Waterstand huidig (m + NAP)	Waterstand nieuw (m + NAP)
1	0,3	0,3
1/25	0,5	0,5
1/50	0,54	0,54
1/100	0,58	0,58
1/1000	0,72	0,83
		sprong
1/2000	0,77	2,12
1/4374	-	2,2
1/20000 (schatting)	-	2,7

Tabel I.11: Overschrijdingsfrequentielijn van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer bij de Dintelmonding in de situatie met en zonder inzet van het Volkerak-Zoommeer voor hoogwaterberging zoals berekend met Hydra-M

Decimeringhoogte waterstand Volkerak-Zoommeer in de huidige situatie		
Waterstand $T=1/100$ (m + NAP)	Waterstand $T=1/1000$ (m + NAP)	Decimeringhoogte (m)
0,58	0,72	0,14

Tabel I.12: De decimeringhoogte van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer bij de Dintelmonding in de situatie zonder inzet van het Volkerak-Zoommeer

Decimeringhoogte waterstand Volkerak-Zoommeer in de nieuwe situatie		
Waterstand $T=1/100$ (m + NAP)	Waterstand $T=1/1000$ (m + NAP)	Decimeringhoogte 1 (m)
0,58	0,83	0,25
Waterstand $T=1/2000$ (m + NAP)	Schatting waterstand $1/20000$ (m + NAP)	Decimeringhoogte 2 (m)
2,12	2,7	0,58
		Gemiddelde decimeringhoogte (m)
		0,42

Tabel I.13: De decimeringhoogte van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer bij de Dintelmonding in de situatie met inzet van het Volkerak-Zoommeer

Voor de waterstanden in de rivier verschilt de decimeringhoogte van locatie tot locatie [1]. Voor de locatie waar het snijpunt optreedt kan de decimeringhoogte bepaald worden uit het verschil in

waterstand op die locatie bij een afvoer van 25 respectievelijk 250 jaar. Hiervoor is, naast de T25-afvoergolf in Duflow, de hoogwaterlijn met een herhalingsjijd van 250 jaar gebruikt uit het rapport ‘Hoogwaterlijnen Mark en Vliet’ [21]. In tabel I.14 zijn voor de nodes waar tussen het snijpunt ligt bij de verschillende frequenties de decimeringhoogtes gepresenteerd. Hieruit zijn door middel van lineaire interpolatie de decimeringhoogtes voor de verschillende snijpunten bepaald.

Decimeringhoogte afvoer, locatiegebonden			
<i>Locatie</i>	<i>Waterstand T25 (m + NAP)</i>	<i>Waterstand T250 (m + NAP)</i>	<i>Decimeringhoogte afvoer 1/100 (m)</i>
NOD16	0,43	0,6	0,17
NOD24	0,70	0,9	0,20
Snijpunt 1/25			0,178
Snijpunt 1/50			0,179
Snijpunt 1/100			0,178
<i>Locatie</i>	<i>Waterstand T25 (m + NAP)</i>	<i>Waterstand T250 (m + NAP)</i>	<i>Decimeringhoogte afvoer 1/2000 nieuw (m)</i>
NOD38	1,00	1,2	0,197
NOD52	1,26	1,7	0,437
Snijpunt 1/2000 nieuw			0,199

Tabel I.14: De decimeringhoogtes van de afvoer voor de locaties van de snijpunten van de verhanglijnen met frequenties van 1/100 en 1/2000 jaar

Bij de berekeningen wordt dus uitgegaan van de volgende decimeringhoogtes

$$\sigma_{W_huidig} = 0,14 \text{ m}$$

$$\sigma_{W_nieuw} = 0,42 \text{ m}$$

$$\sigma_{A_T25} = 0,178 \text{ m}$$

$$\sigma_{A_T50} = 0,179 \text{ m}$$

$$\sigma_{A_T100} = 0,178 \text{ m}$$

$$\sigma_{A_T2000} = 0,199 \text{ m}$$

I.2.3. Liggingparameters

De liggingparameters worden berekend met behulp van de formules (2) en (3) [50].

$$\mu_W = H_S + \sigma_W \log(T) \quad (2)$$

$$\mu_A = H_S + \sigma_A \log(T) \quad (3)$$

μ_W = liggingparameter van de frequentieverdeling voor belastinggeval waterstand Volkerak-Zoommeer, welke gelijk is aan de waterstand behorende bij een gemiddelde overschrijdingsfrequentie van eens per jaar

μ_A = liggingparameter van de frequentieverdeling voor belastinggeval afvoer, welke gelijk is aan de waterstand behorende bij een gemiddelde overschrijdingsfrequentie van eens per jaar

σ_W = decimeringhoogte voor belastinggeval waterstand VZM

σ_A = decimeringhoogte voor belastinggeval afvoer

H_S = de specifieke waterstand in het snijpunt van de T-verhanglijnen

T = de frequentie van de verhanglijnen, bijvoorbeeld 1/2000

Bij het berekenen van de liggingparameters worden de in de paragraaf hierboven bepaalde decimeringhoogtes gebruikt. De waterstanden in de snijpunten (H_s) zijn berekend in paragraaf I.2.1. Aangezien de huidige en nieuwe situatie op het Volkerak-Zoommeer twee verschillende decimeringhoogtes kent, worden de liggingparameters voor beide scenario's berekend. De verhanglijnen die berekend zijn voor een herhalingstijd van 1/2000 jaar snijden echter alleen in de nieuwe situatie. Er kan dan ook geen huidige situatie voor deze herhalingstijd berekend worden. De liggingparameters zijn in tabel I.15 gepresenteerd.

Liggingparameter waterstand VZM huidige situatie			
<i>Frequentie (T)</i>	<i>Waterstand snijpunt (H_s)</i> (m + NAP)	<i>Liggingparameter waterstand VZM huidige situatie</i> (m)	
1/25	0,532		0,336
1/50	0,573		0,335
1/100	0,611		0,331

Liggingparameter waterstand VZM nieuwe situatie			
<i>Frequentie (T)</i>	<i>Waterstand snijpunt (H_s)</i> (m + NAP)	<i>Liggingparameter waterstand VZM nieuwe situatie</i> (m)	
1/25	0,532		-0,048
1/50	0,573		-0,133
1/100	0,611		-0,219
1/2000	1,507		0,137

Liggingparameter afvoer			
<i>Frequentie (T)</i>	<i>Waterstand snijpunt (H_s)</i> (m + NAP)	<i>Liggingparameter afvoer</i> (m)	
1/25	0,532		0,283
1/50	0,573		0,268
1/100	0,611		0,254
1/2000	1,507		0,849

Tabel I.15: De liggingparameters van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer en de liggingparameter van de afvoer voor de verhanglijnen met frequenties van 1/100 en 1/2000 jaar

Samenvattend, kan bij de berekeningen uitgegaan worden van de volgende decimeringhoogtes:

$$\begin{aligned}
 \mu_{W_T25_huidig} &= 0,336 \text{ m} \\
 \mu_{W_T50_huidig} &= 0,335 \text{ m} \\
 \mu_{W_T100_huidig} &= 0,331 \text{ m} \\
 \mu_{W_T25_nieuw} &= -0,048 \text{ m} \\
 \mu_{W_T50_nieuw} &= -0,133 \text{ m} \\
 \mu_{W_T100_nieuw} &= -0,219 \text{ m} \\
 \mu_{W_T2000_nieuw} &= 0,137 \text{ m} \\
 \mu_{A_T25} &= 0,283 \text{ m} \\
 \mu_{A_T50} &= 0,268 \text{ m} \\
 \mu_{A_T100} &= 0,254 \text{ m} \\
 \mu_{A_T2000} &= 0,849 \text{ m}
 \end{aligned}$$

I.2.4. Bepaling van de totale verhanglijn

Uit de in paragraaf I.2.1 bepaalde snijpunten en de in paragrafen I.2.2 en I.2.3 bepaalde statistische parameters zijn de waterstanden in de snijpunten bepaald voor de totale verhanglijnen; de verhanglijnen met een herhalingstijd T die ontstaan uit de combinatie van een afvoergedomineerde verhanglijn met herhalingstijd T en een meergedomineerde verhanglijn met herhalingstijd T . Hiervoor is formule (1) gebruikt [50].

$$F_{tot}(H) = 1.25 \left(10^{-\left(\frac{H-\mu_W}{\sigma_W}\right)} + 10^{-\left(\frac{H-\mu_A}{\sigma_A}\right)} \right) \quad (1)$$

met $F_{tot}(H)$ = de totale overschrijdingsfrequentie van de waterstand H

H = de beschouwde waterstand

1.25 = toeslagfactor

μ_W = liggingparameter van de frequentieverdeling voor belastinggeval waterstand Volkerak-Zoommeer, welke gelijk is aan de waterstand behorende bij een gemiddelde overschrijdingsfrequentie van eens per jaar

μ_A = liggingparameter van de frequentieverdeling voor belastinggeval afvoer, welke gelijk is aan de waterstand behorende bij een gemiddelde overschrijdingsfrequentie van eens per jaar

σ_W = spreidingsparameter van de frequentieverdeling voor belastinggeval waterstand VZM

σ_A = spreidingsparameter van de frequentieverdeling voor belastinggeval afvoer

Door voor F_{tot} respectievelijk 1/100 en 1/2000 in te vullen samen met de bijbehorende statistische parameters is de waterstand H behorende bij deze totale overschrijdingsfrequentie berekend. De resultaten van deze berekeningen zijn in tabel I.16 gepresenteerd.

Scenario	Waterstand snijpunt H_s (m)	Plaats t.o.v. Trambrug (m)	Waterstand bij frequentie T (m)
T = 1/25 huidig	0,532	29158	0,595
T = 1/25 nieuw	0,532	29158	0,639
T = 1/50 huidig	0,573	28832	0,636
T = 1/50 nieuw	0,573	28832	0,680
T = 1/100 huidig	0,611	29110	0,674
T = 1/100 nieuw	0,611	29110	0,718
T = 1/2000 nieuw	1,507	17387	1,621

Tabel I.16: IJsseldelta methode uitgewerkt voor herhalingstijden van 1/100 en 1/2000 jaar. In de huidige situatie wordt uitgegaan van de huidige overschrijdingsfrequentielijn voor het Volkerak-Zoommeer, in de nieuwe situatie wordt uitgegaan van de overschrijdingsfrequentielijn die ontstaat wanneer het Volkerak-Zoommeer 1/1430 jaar ingezet wordt voor hoogwaterberging.

Aan de hand van de waterstanden in tabel I.16 zijn de verhanglijnen door middel van interpolatie berekend. Tabellen I.17 tot en met I.20 geven de totale verhanglijnen.

Node	x- coördinaat (m)	Verhanglijn afvoer 1/25 (m + NAP)	Verhanglijn waterstand 1/25 (m + NAP)	Totale verhanglijn 1/25 huidig (m + NAP)	Totale verhanglijn 1/25 nieuw (m + NAP)
NOD130	-7100	2,38	0,72	2,38	2,38
NOD121	-5400	2,21	0,68	2,21	2,21
NOD192	-4330	2,02	0,66	2,02	2,02
NOD118	-1945	1,88	0,64	1,88	1,88
NOD94	-1600	1,80	0,63	1,80	1,80
NOD112	-955	1,72	0,62	1,72	1,72
NOD81	0	1,49	0,60	1,49	1,49
NOD75	1100	1,38	0,59	1,38	1,38
NOD65	3910	1,31	0,59	1,31	1,31
NOD61	4710	1,31	0,59	1,31	1,31
NOD52	8260	1,26	0,58	1,26	1,26
NOD38	17470	1,00	0,56	1,00	1,00
NOD24	24570	0,70	0,54	0,75	0,78
Snijpunt	29158			0,59	0,64
NOD16	31820	0,43	0,53	0,57	0,60
NOD5	36120	0,40	0,53	0,53	0,53
NOD1	36691	0,30	0,50	0,30	0,50
NOD244	35320	0,43	0,53	0,53	0,53
NOD247	35570	0,43	0,52	0,52	0,52
NOD254	30890	0,44	0,52	0,52	0,52
NOD352	40270	0,39	0,51	0,51	0,51
NOD339	50435	0,27	0,47	0,47	0,47
NOD336	50460	0,26	0,46	0,46	0,46

Tabel I.17: Verhanglijnen van het Mark-Vliet systeem; één met een frequentie van 1/25 jaar zonder inzet van het Volkerak-Zoommeer en één met een frequentie van 1/25 keer per jaar met inzet van het Volkerak-Zoommeer voor waterberging.

Node	x- coördinaat (m)	Verhanglijn afvoer 1/50 (m + NAP)	Verhanglijn waterstand 1/50 (m + NAP)	Totale verhanglijn 1/50 huidige (m + NAP)	Totale verhanglijn 1/50 nieuw (m + NAP)
NOD130	-7100	2,82	0,75	2,82	2,82
NOD121	-5400	2,61	0,71	2,61	2,61
NOD192	-4330	2,36	0,69	2,36	2,36
NOD118	-1945	2,18	0,68	2,18	2,18
NOD94	-1600	2,07	0,67	2,07	2,07
NOD112	-955	1,96	0,66	1,96	1,96
NOD81	0	1,62	0,64	1,62	1,62
NOD75	1100	1,46	0,63	1,46	1,46
NOD65	3910	1,36	0,63	1,36	1,36
NOD61	4710	1,36	0,63	1,36	1,36
NOD52	8260	1,29	0,62	1,29	1,29
NOD38	17470	1,06	0,60	1,06	1,06
NOD24	24570	0,75	0,58	0,79	0,82
Snijpunt	28832			0,64	0,68
NOD16	31820	0,45	0,57	0,60	0,63
NOD5	36120	0,39	0,56	0,56	0,56
NOD1	36691	0,30	0,54	0,54	0,54
NOD244	35320	0,45	0,56	0,56	0,56
NOD247	35570	0,45	0,56	0,56	0,56
NOD254	30890	0,46	0,57	0,57	0,57
NOD352	40270	0,41	0,55	0,55	0,55
NOD339	50435	0,28	0,51	0,51	0,51
NOD336	50460	0,26	0,51	0,51	0,51

Tabel I.18: Verhanglijnen van het Mark-Vliet systeem; één met een frequentie van 1/50 jaar zonder inzet van het Volkerak-Zoommeer en één met een frequentie van 1/50 keer per jaar met inzet van het Volkerak-Zoommeer voor waterberging.

Node	x- coördinaat (m)	Verhanglijn afvoer 1/100 (m + NAP)	Verhanglijn waterstand 1/100 (m + NAP)	Totale verhanglijn 1/100 huidig (m + NAP)	Totale verhanglijn 1/100 nieuw (m + NAP)
NOD130	-7100	2,97	0,78	2,97	2,97
NOD121	-5400	2,76	0,75	2,76	2,76
NOD192	-4330	2,45	0,73	2,45	2,45
NOD118	-1945	2,31	0,71	2,31	2,31
NOD94	-1600	2,20	0,70	2,20	2,20
NOD112	-955	2,09	0,70	2,09	2,09
NOD81	0	1,77	0,68	1,77	1,77
NOD75	1100	1,64	0,67	1,64	1,64
NOD65	3910	1,56	0,66	1,56	1,56
NOD61	4710	1,56	0,66	1,56	1,56
NOD52	8260	1,51	0,66	1,51	1,51
NOD38	17470	1,22	0,64	1,22	1,22
NOD24	24570	0,84	0,62	0,89	0,92
Snijpunt	29110			0,67	0,72
NOD16	31820	0,47	0,60	0,64	0,67
NOD5	36120	0,40	0,59	0,59	0,59
NOD1	36691	0,30	0,58	0,58	0,58
NOD244	35320	0,47	0,60	0,60	0,60
NOD247	35570	0,47	0,60	0,60	0,60
NOD254	30890	0,47	0,60	0,60	0,60
NOD352	40270	0,43	0,59	0,59	0,59
NOD339	50435	0,30	0,54	0,54	0,54
NOD336	50460	0,26	0,53	0,53	0,53

Tabel I.19: Verhanglijnen van het Mark-Vliet systeem; één met een frequentie van 1/100 jaar zonder inzet van het Volkerak-Zoommeer en één met een frequentie van 1/100 keer per jaar met inzet van het Volkerak-Zoommeer voor waterberging.

Node	x- coördinaat (m)	Verhanglijn afvoer 1/2000 (m + NAP)	Verhanglijn waterstand 1/2000 (m + NAP)	Totale verhanglijn 1/2000 nieuw (m + NAP)
NOD130	-7100	4,07	1,51	4,07
NOD121	-5400	3,85	1,51	3,85
NOD192	-4330	3,38	1,51	3,38
NOD81	0	2,26	1,51	2,26
NOD75	1100	2,21	1,51	2,22
NOD65	3910	2,09	1,51	2,12
NOD61	4710	2,06	1,51	2,09
NOD52	8260	1,91	1,51	1,96
Snijpunt	17387			1,62
NOD38	17470	1,50	1,51	1,62
NOD24	24570	1,19	1,51	1,51
NOD16	31820	0,87	1,51	1,51
NOD5	36120	0,80	1,51	1,51
NOD254	30890	0,87	1,51	1,51
NOD352	40270	0,84	1,51	1,51

Tabel I.20: Verhanglijn van het Mark-Vliet systeem met een frequentie van 1/2000 jaar uitgaande van inzet van het Volkerak-Zoommeer voor hoogwaterberging.