

Opdrachtgever: RWS-WVL

Probabilistisch model frequentielijnen IJsselmeergebied

Hoofdrapport van model DEZY



Opdrachtgever: RWS-WVL

Probabilistisch model frequentielijnen IJsselmeergebied

Hoofdrapport van model DEZY



Auteurs

Chris Geerse
Bastiaan Kuijper

Inhoud

Lijst van tabellen	v
Lijst van figuren	vii
1 Inleiding	1
1.1 Achtergronden	1
1.2 Doelstelling	1
1.3 Leeswijzer	2
2 Korte beschrijving model	3
2.1 Opmerkingen model en studiegebied	3
2.2 Modelstochasten	4
2.3 Opzet rapport	6
3 Marginale statistiek	9
3.1 Beschrijving van de statistiek voor afvoeren	9
3.1.1 Tijdsmodellering afvoerdebit in basisduur $B = 30$ dagen	9
3.1.2 Volume en gemiddelde afvoer	12
3.1.3 Overgang van basisduur B op verlengde rekenduur B_1	13
3.2 Beschrijving van de statistiek voor neerslag	14
3.2.1 Tijdsmodellering neerslag in basisduur $B = 30$ dagen	14
3.2.2 Overgang neerslag van basisduur B op rekenduur B_1	16
3.2.3 Omrekening van neerslagverloop naar debietverloop en afwaterend gebied	17
3.3 Kansverdeling voor wind en zeewaterstand	18
3.3.1 Gebruikte gegevens en homogenisatie zeewaterstanden	18
3.3.2 Kansverdeling voor wind-waterstandblokken	20
4 Correlaties	21
4.1 Correlatie IJsselafvoer en waterstand kuststation	21
4.1.1 Verwerken correlatie	21
4.1.2 Correlatie tussen Olst versus Kornwerderzand en IJmuiden	23
4.2 Correlatiemodel voor afvoeren en neerslag	24
5 Fysische gegevens en beheer van kunstwerken	27
5.1 Scheefstand	27
5.2 Oranjesluis en spuisluisen Afsluitdijk en Houtribdijk	29
5.2.1 Algemene gegevens	29
5.2.2 Aanvullende gegevens Den Oever en Kornwerderzand	30
5.2.3 Gegevens Krabbersgat- en Houtribsluisen	31
5.2.4 Gegevens Oranjesluisen	32
5.2.5 Stroomsnelheden bij spuisluisen	32
5.3 Spuisluis en gemaal IJmuiden	32
5.4 Eventuele pompen Afsluitdijk en Houtribdijk	33
5.4.1 Pompen Afsluitdijk	33
5.4.2 Pompen Houtribdijk	34
6 Keuze modelparameters	35

6.1	Grootte afwaterende gebieden en gegevens waterbalans.....	35
6.1.1	IJsselmeer	35
6.1.2	Markermeer	36
6.2	Afvoer- en neerslagstatistiek	37
6.2.1	Marginale statistiek afvoeren	37
6.2.2	Marginale statistiek neerslag	39
6.2.3	Tijdsverlopen afvoer en neerslag.....	40
6.2.4	Samenvattende gegevens afvoer en neerslag	41
7	Probabilistische formules	43
7.1	Stochasten en notatie	43
7.2	Berekening van meerpeilverloop	44
7.2.1	Bepalen tijdsverlopen	44
7.2.2	Berekening tijdsverlopen meerpeilen bij gegeven k, γ, γ	45
7.2.3	Schema voor berekening spui- en pompdebieten	46
7.3	Probabilistische formules	48
7.3.1	Basisformules	48
7.4	Numerieke uitwerking	48
8	Afregeling en validatie model	51
8.1	Modelversie	51
8.2	Statistische gegevens uit Hydra-Zoet.....	51
8.2.1	Versies meerpeilstatistiek.....	51
8.2.2	Onzekerheden in de meerpeilstatistiek uit Hydra-Zoet	53
8.3	Meetgegevens IJssel- en Markermeer	53
8.3.1	IJsselmeer	53
8.3.2	Markermeer	55
8.3.3	Gemiddelden van de meerpeilen	56
8.3.4	Verband dagmetingen IJssel- en Markermeer	56
8.3.5	Verband piekwaarden van meerpeilgolven.....	56
8.3.6	Tijdsverlopen van meerpeilgolven	57
8.3.7	Keuze basisduur B en rekenduur B_1	59
8.4	Validatie IJssel- en Markermeer	59
8.4.1	Enkele statistische begrippen uit de meerpeilstatistiek.....	60
8.4.2	Frequentielijn volgens model en metingen.....	60
8.4.3	Gevoeligheid voor de tijdstap	66
8.4.4	Gevoeligheid voor afgesloten Noordzeekanaal.....	68
8.4.5	Gevoeligheid voor aantal ww-blokken en lengte periode.....	69
8.4.6	Gevoeligheid voor de spuicoëfficiënten.....	71
8.4.7	Gevoeligheid voor tijdsverloop neerslag	72
8.4.8	Gevoeligheid voor keuze van scheefstandparameters	74
8.4.9	Gevoeligheid voor keuze van kansen in correlatiemodel	76
8.4.10	Gevoeligheid meenemen correlatie tussen afvoer en zee.....	77
8.5	Momentane kans IJssel- en Markermeer.....	78
8.6	Topduren IJssel- en Markermeer	80
8.6.1	Topduur IJsselmeer.....	80
8.6.2	Topduur Markermeer.....	81
8.7	Beschouwingen over het Noordzeekanaal	83
8.7.1	Overschrijdingsfrequentie NZK.....	83
8.7.2	Vergelijking overschrijdingsfrequentie NZK met eerdere studie	84

8.7.3	Topduur NZK	85
8.7.4	Conclusies NZK	86
9	Enkele resultaten	87
9.1	Keuze initiële peilen	87
9.2	Streefpeilverhoging en zeespiegelstijging	88
9.3	Toename afvoer en neerslag	89
9.4	Pompen bij Den Oever	90
9.5	Gecombineerd effect van pompen bij Den Oever en zeespiegelstijging	91
10	Conclusies en aanbevelingen	93
10.1	Conclusies IJssel- en Markermeer	93
10.2	Conclusies Noordzeekanaal	93
10.3	Aanbevelingen	94
11	Referenties	95
	Bijlage A: Weergave invoerbestanden	99
	Bijlage B: Parameterinstellingen	105
	Bijlage C: Nieuwe modelversie	109

Lijst van tabellen

Tabel 2-1	Overzicht onderdelen model DEZY.....	7
Tabel 3-1	Parameters tijdsmodellering en afvoerstatistiek.	9
Tabel 3-2	Voorbeeld parameterwaarden voor Olst en Dalfsen (fictieve waarden).	10
Tabel 3-3	Parameters tijdsmodellering en neerslagstatistiek.	15
Tabel 4-1	Verschuiving Δw van de minimale zeewaterstand te Den Oever, als functie van de Olstafvoer 7 dagen later.	22
Tabel 5-1	Overzicht voor bepalen vervallen over spuisluizen.	27
Tabel 5-2	Samenvatting modelparameters in DEZY voor de Oranjesluis en de spuisluizen in de Afsluitdijk en Houtribdijk.	30
Tabel 5-3	Afhankelijkheid van afvoercoëfficiënt a van het verval in IWP.	31
Tabel 6-1	Gegevens op IJsselmeer afwaterende gebieden.	35
Tabel 6-2	Aan- en afvoerposten IJsselmeer.	36
Tabel 6-3	Aan- en afvoerposten Markermeer.	37
Tabel 6-4	Informatie over afvoer en neerslag zoals gebruikt in DEZY voor de basisduur $B = 30$ dagen.	42
Tabel 7-1	Stochasten en notatie.....	43
Tabel 8-1	Gemiddelden van de meerpeildata.	56
Tabel 8-2	Gemiddelde volgens model en metingen (standaardsituatie).....	62
Tabel C-1	Resultaten overschrijdingsfrequentie voor modelversie 30 april (hoofdstuk 8) en de aangepaste modelversie van 13 mei.	109
Tabel C-2	Resultaten overschrijdingsfrequentie voor modelversie 30 april (hoofdstuk 8) en de aangepaste modelversie van 13 mei met 0.03 m lagere zeespiegel.	112

Lijst van figuren

Figuur 2-1	De Zuiderzee rond 1850. Bron: site van het Zuiderzee Museum.....	3
Figuur 2-2	Historische kaart van de "Zuyder Zee" uit 1658. Bron: Wikipedia.....	4
Figuur 2-3	Weergave van het IJsselmeergebied.....	5
Figuur 2-4	Schematische weergave watersystemen, spuilocaties en aanvoeren, inclusief richting van de spui (in winterhalfjaren).	6
Figuur 3-1	Parameters tijdsmodellering aanvoerdebiet (niet-geknikte versie).....	10
Figuur 3-2	Parameters tijdsmodellering aanvoerdebiet (volledige geknikte versie).....	10
Figuur 3-3	Weergave aanvullende grootheden t_{b3} , t_{e3} , $q_b(k)$ en $q_e(k)$ voor de geknikte versie van de golfvorm.....	11
Figuur 3-4	Weergave symbolen voor de berekening van $V(k)$	12
Figuur 3-5	Toelichting overgang op rekenduur B_1 (boven: verloop in B, onder: verloop in B_1).....	14
Figuur 3-6	Parameters tijdsmodellering neerslag.	15
Figuur 3-7	Toelichting overgang op rekenduur B_1 (boven: verloop voor B, onder: verloop voor B_1), waarbij $n_{gem} = n$	17
Figuur 3-8	Buitenwaterstanden Kornwerderzand versus Den Oever (zelfde uurtijstippen).	19
Figuur 3-9	Buitenwaterstanden Kornwerderzand versus Den Oever één uur eerder, samen met het regressieverband.....	19
Figuur 4-1	Verband tussen afvoer Olst (feitelijk bij Ketelmeer) en de minimale dagwaterstand te Den Oever. In dit geval wordt de afvoer 7 dagen later beschouwd dan de waterstand te Den Oever.....	21
Figuur 4-2	Verband tussen afvoer Olst (feitelijk bij Ketelmeer) en de <u>maximale</u> dagwaterstand te Den Oever. In dit geval wordt de afvoer 7 dagen later beschouwd dan de waterstand te Den Oever.....	23
Figuur 4-3	Voorbeeld van puntenwolk met twee lijnen als modellering.	25
Figuur 5-1	Illustratie van de scheefstand bij Den Oever IJsselmeerzijde, voor richting 90° (Oostenwind).....	28
Figuur 5-2	Illustratie van de scheefstand bij de Houtribsluizen Oever Markermeerzijde, voor richting 90° (Oostenwind).	29
Figuur 5-3	Weergave pompkarakteristiek.....	34
Figuur 6-1	Overschrijdingsfrequentie van de IJssel.	38
Figuur 6-2	Overschrijdingsfrequentie van de Vecht en Eem.....	38
Figuur 6-3	Overschrijdingskans voor de maandsom van de neerslag in Noord, Midden- en West Nederland.	39
Figuur 6-4	Tijdsverlopen voor aanvoeren op het IJsselmeer.	40
Figuur 6-5	Tijdsverlopen voor aanvoeren op het Markermeer en NZK.....	40
Figuur 7-1	Voorbeeld om stochast Γ toe te lichten. N.B. De afvoeren betreffen <u>piek</u> waarden.	44
Figuur 7-2	Schema voor bepalen spui- en/of pompdebiet bij een sluis in de Afsluitdijk of Houtribdijk.	47
Figuur 8-1	Meerpeilpieken IJsselmeer, voor de originele data en de oude en nieuwe homogenisatiemethode. Zichtjaar 2015.	54
Figuur 8-2	Meerpeilpieken Markermeer, voor de originele en naar zichtjaar 2015 gehomogeniseerde data.....	55
Figuur 8-3	Verband dagmetingen IJssel- en Markermeer.	56
Figuur 8-4	Verband piekwaarden IJssel- en Markermeer; drempel -0.2 m+NAP, selectie op IJsselmeerpieken.	57
Figuur 8-5	Tijdsverlopen IJssel- en Markermeer voor zichtduur $z = 30$ dagen.....	58
Figuur 8-6	Overschrijdingsfrequentie IJsselmeer, standaardkeuzes.	61
Figuur 8-7	Overschrijdingsfrequentie Markermeer, standaardkeuzes.	61
Figuur 8-8	Tijdsverlopen bij piekafvoer IJssel gelijk aan 2200 m ³ /s.....	64
Figuur 8-9	Tijdsverlopen bij piekafvoer IJssel gelijk aan 2700 m ³ /s.....	65

Figuur 8-10 Verband piekwaarden IJssel- en Markermeer (zichtduur $z = 15$ dagen) met 1-1 lijn uit DEZY..... 66

Figuur 8-11 Overschrijdingsfrequentie IJsselmeer, gevoeligheid voor stapgrootte Δt 66

Figuur 8-12 Overschrijdingsfrequentie Markermeer, gevoeligheid voor stapgrootte Δt 67

Figuur 8-13 Tijdsverlopen voor $\Delta t = 1$ uur..... 67

Figuur 8-14 Overschrijdingsfrequentie Markermeer, effect van afsluiten NZK. 'OS dicht' staat voor Oranjesluizen dichtgezet..... 68

Figuur 8-15 Overschrijdingsfrequentie IJsselmeer, gevoeligheid aantal ww-blokken en meetperiode..... 70

Figuur 8-16 Overschrijdingsfrequentie Markermeer, gevoeligheid aantal ww-blokken en meetperiode..... 70

Figuur 8-17 Overschrijdingsfrequentie IJsselmeer, gevoeligheid afvoercoëfficiënten Afsluitdijk..... 71

Figuur 8-18 Overschrijdingsfrequentie Markermeer, gevoeligheid afvoercoëfficiënten Afsluitdijk..... 72

Figuur 8-19 Overschrijdingsfrequentie IJsselmeer, gevoeligheid voor het neerslagverloop..... 73

Figuur 8-20 Overschrijdingsfrequentie Markermeer, gevoeligheid voor het neerslagverloop..... 73

Figuur 8-21 Tijdsverlopen voor sterk in de tijd gespreid ander neerslagverloop..... 74

Figuur 8-22 Overschrijdingsfrequentie IJsselmeer, gevoeligheid voor de scheefstand..... 75

Figuur 8-23 Overschrijdingsfrequentie Markermeer, gevoeligheid voor de scheefstand..... 75

Figuur 8-24 Overschrijdingsfrequentie IJsselmeer, correlatiesterkte..... 76

Figuur 8-25 Overschrijdingsfrequentie Markermeer, correlatiesterkte..... 76

Figuur 8-26 Overschrijdingsfrequentie IJsselmeer, effect correlatie afvoer en zee..... 77

Figuur 8-27 Overschrijdingsfrequentie Markermeer, effect correlatie afvoer en zee..... 78

Figuur 8-28 Momentane kans IJsselmeer..... 79

Figuur 8-29 Momentane kans Markermeer..... 79

Figuur 8-30 Topduur IJsselmeer..... 80

Figuur 8-31 Topduur volgens Hydra-Zoet statistiek en (incorrecte) statistiek Hydra-M. Bron: [Geerse, 2006]..... 81

Figuur 8-32 Topduur Markermeer..... 82

Figuur 8-33 Topduur IJsselmeer volgens Hydra-Zoet en (incorrecte) statistiek Hydra-M. Bron: [Geerse, 2008]..... 82

Figuur 8-34 Overschrijdingsfrequentie NZK, voor standaardinstellingen en fijnere tijdstap $\Delta t = 1$ uur..... 83

Figuur 8-35 Overschrijdingsfrequentie NZK, voor standaardinstellingen en gemaalcapaciteit bij IJmuiden van $360 \text{ m}^3/\text{s}$ 84

Figuur 8-36 Overschrijdingsfrequentie NZK, voor tijdstap $\Delta t = 1$ uur, waarbij als variant de neerslag is verminderd met 14%; rode markeringen geven resultaten uit [Pengel en Geerse H, 2001]..... 85

Figuur 8-37 Topduur NZK, voor standaardinstellingen en fijnere tijdstap $\Delta t = 1$ uur..... 86

Figuur 9-1 Overschrijdingsfrequentie IJsselmeer, invloed ander streefpeil en zeespiegelstijging..... 88

Figuur 9-2 Overschrijdingsfrequentie Markermeer, invloed ander streefpeil en zeespiegelstijging..... 88

Figuur 9-3 Overschrijdingsfrequentie IJsselmeer, invloed 15% hogere afvoer en neerslag..... 89

Figuur 9-4 Overschrijdingsfrequentie Markermeer, invloed 15% hogere afvoer en neerslag..... 90

Figuur 9-5 Overschrijdingsfrequentie IJsselmeer, effect van pompen bij Den Oever..... 91

Figuur 9-6 Overschrijdingsfrequentie Markermeer, effect van pompen bij Den Oever..... 91

Figuur 9-7 Overschrijdingsfrequentie IJsselmeer, effect van pompen bij Den Oever in combinatie met zeespiegelstijging..... 92

Figuur 9-8 Overschrijdingsfrequentie Markermeer, effect van pompen bij Den Oever in combinatie met zeespiegelstijging..... 92

Figuur C-1 Overschrijdingsfrequentie IJsselmeer, voor de nieuwe modelversie..... 110

Figuur C-2 Momentane kans IJsselmeer, voor de nieuwe modelversie..... 111

Figuur C-3 Topduur IJsselmeer, voor de nieuwe modelversie..... 111

1 Inleiding

1.1 Achtergronden

Voor het bepalen van Hydraulische Randvoorwaarden en voor allerlei beleidsstudies voor het IJsselmeergebied is statistiek nodig van de meerpeilen voor het IJssel- en Markermeer. In het verleden werd dergelijke statistiek gewoonlijk bepaald door statistische extrapolatie van gemeten meerpeilen [Blaakman et al, 1999; Geerse, 2006], of van zogenaamde synthetische meerpeilen, berekend met een Sobekmodel [Van Meurs et al, 2014]. Dergelijke extrapolaties zijn bijvoorbeeld nodig bij studies met andere streefpeilen van de meren, of bij scenario's met zeespiegelstijging of andere afvoerverdelingen. De praktijk heeft uitgewezen dat deze extrapolaties vaak op problemen stuiten, waarbij subjectieve keuzes sterk bepalend zijn voor de afgeleide meerpeilstatistiek.

In [Dulfer et al, 2014; Geerse en Kuijper, 2014] is door HKV voor het IJsselmeer een model opgesteld om statistiek voor dit meer te bepalen, uitgaande van stochasten op de randen van het IJsselmeer, waarbij het spuien bij de Afsluitdijk is gemodelleerd met een overlaatformule. De stochasten uit dit model zijn:

- Afvoeren Olst en Dalfsen en de neerslag (die behalve deze afvoeren) afwatert op het IJsselmeer.
- Waterstand Waddenzee.
- Wind boven IJsselmeer (snelheid en richting).

Dit model bleek goed werkbaar en heeft voor het IJsselmeer geresulteerd in een computerprogramma, waarmee o.m. de frequentielijn van het IJsselmeerpeil kan worden berekend. In het bijzonder is dan geen statistische extrapolatie meer nodig van (synthetische) meerpeilmetingen. Met het model kan o.m. worden onderzocht hoe de frequentielijn van het (IJssel)meerpeil verandert in de volgende situaties:

- zeespiegelstijging
- ander streefpeil
- pompen in de Afsluitdijk
- andere afvoerstatistiek Olst
- extra spuicapaciteit

Inmiddels is door RWS gevraagd het model voor het IJsselmeer uit te breiden met het Markermeer en het Noordzeekanaal (NZK), waarbij het laatste watersysteem versimpeld kan worden meegenomen, onder de voorwaarde dat de invloed daarvan op het Markermeer voldoende nauwkeurig wordt verwerkt. Dat betekent dat ook de neerslag in Midden- en West Nederland in het model moet worden opgenomen, alsmede de afvoer van de Eem en de zeewaterstand bij IJmuiden. Daarbij is gevraagd een computerprogramma op te leveren, waarvan de uitkomsten zijn gevalideerd aan de hand van metingen van het IJssel- en Markermeer.

1.2 Doelstelling

De doelstelling van het project bestaat uit het opstellen van een probabilistisch model om meerpeilstatistiek te bepalen voor het IJsselmeer, Markermeer en NZK, waarbij dat laatste watersysteem versimpeld kan worden meegenomen. In dit model dient de juiste statistiek van

afvoeren, neerslag, zeewaterstand en wind te zijn opgenomen, inclusief correlaties daartussen. Dit model moet geïmplementeerd worden in een computerprogramma, waarvan de uitkomsten zijn gevalideerd aan de hand van metingen voor het IJssel- en Markermeer.

1.3 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 geeft een korte beschrijving van het studiegebied en van het probabilistisch model, waarbij de modelstochasten en de spuilocaties uit het model aan de orde komen. In hoofdstuk 3 wordt beschreven hoe in het model met marginale statistiek en tijdsverlopen van afvoeren, zeewaterstanden, wind en neerslag wordt omgegaan. Hoofdstuk 4 gaat in op de correlaties daartussen. Hoofdstuk 5 en 6 gaan over fysische gegevens voor kunstwerken en over de keuze van allerlei modelparameters. In hoofdstuk 7 worden de wiskundige probabilistische formules beschreven. De afregeling en validatie van het model staat in hoofdstuk 8. Hoofdstuk 9 geeft voorbeelden van resultaten die met het model kunnen worden berekend, voor o.m. situaties met zeespiegelstijging, pompen bij Den Oever, ander streefpeil en verhoogde neerslag/afvoer. Hoofdstuk 10 geeft de conclusies over het model. Daarna volgen nog de referenties en enkele bijlagen.

Terzijde wordt nog opgemerkt dat, ná de gebiedsbeschrijving en de introductie van de modelstochasten, in paragraaf 2.3 nogmaals de opzet van het rapport wordt beschreven, waarbij in meer detail wordt ingezoomd op diverse aspecten van het model.

2 Korte beschrijving model

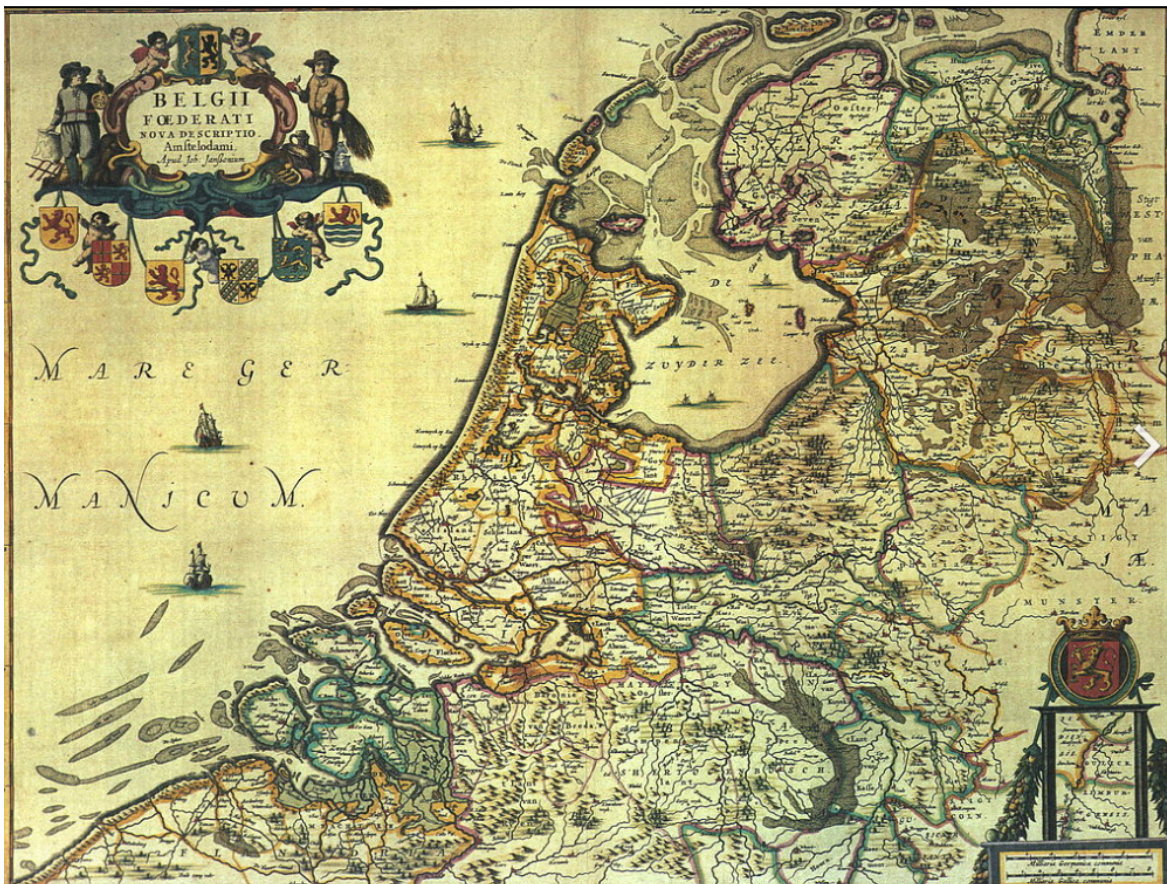
2.1 Opmerkingen model en studiegebied

Het gebied waarop het probabilistisch model betrekking heeft, bestaat uit het IJsselmeer, Markermeer en Noordzeekanaal, alsmede de polders die daarop afwateren. Een belangrijk doel van het probabilistisch model is om voor het winterhalfjaar de kansen op extreme meerpeilen (voor het IJssel- en Markermeer) en de waterstanden op het Noordzeekanaal te bepalen. Behalve de extreme situaties moet het model ook de kansen op dagelijkse meerpeilen en waterstanden juist weergeven.

Het studiegebied bestaat ruwweg uit het Zuiderzeegebied van rond 1850 (Figuur 2-1), waartoe ook het huidige binnen IJ behoorde. Het Noordzeekanaal is grotendeels ontstaan door inpoldering van het toenmalige IJ, waarvoor over een lengte van 17 km dijken werden aangelegd. De aanleg van de IJ-polders, het Noordzeekanaal en de zijkanalen vonden tegelijkertijd plaats. De polders waren in 1872 voltooid en het Noordzeekanaal, waarbij de duinen tussen Velsen en de Noordzee werden doorgraven, in 1876.



Figuur 2-1 De Zuiderzee rond 1850. Bron: site van het Zuiderzee Museum.



Figuur 2-2 Historische kaart van de "Zuyder Zee" uit 1658. Bron: Wikipedia.

In vroeger tijden werd de Zuiderzee overigens aangeduid als de *Zuyder Zee* (zie bijvoorbeeld Figuur 2-2) of ook wel *Suyder Zee*. Doel van het model is volgens bovenstaande het bepalen van **D**agelijkse en **E**xtrême waarden voor het **Z**uyder Zee gebied, wat leidt tot de modelnaam **DEZY**.

2.2 Modelstochasten

Het hoofddoel van het probabilistisch model DEZY is het bepalen van de frequentielijnen voor het IJssel- en het Markermeer, zie voor een kaart van het hele IJsselmeergebied Figuur 2-3. Het gaat dan om frequentielijnen voor de (deel)meren:

1. IJsselmeer.
2. Markermeer.
3. Noordzeekanaal.

Behalve de frequentielijnen zijn ook de zogenaamde momentane kansen (feitelijk tijdfractionen van meerpeilniveaus) en overschrijdingsduren van meerpeilniveaus nodig. Deze zijn vooral van belang voor het afregelen van het model. Zie voor uitleg van deze begrippen desgewenst paragraaf 8.4.1.



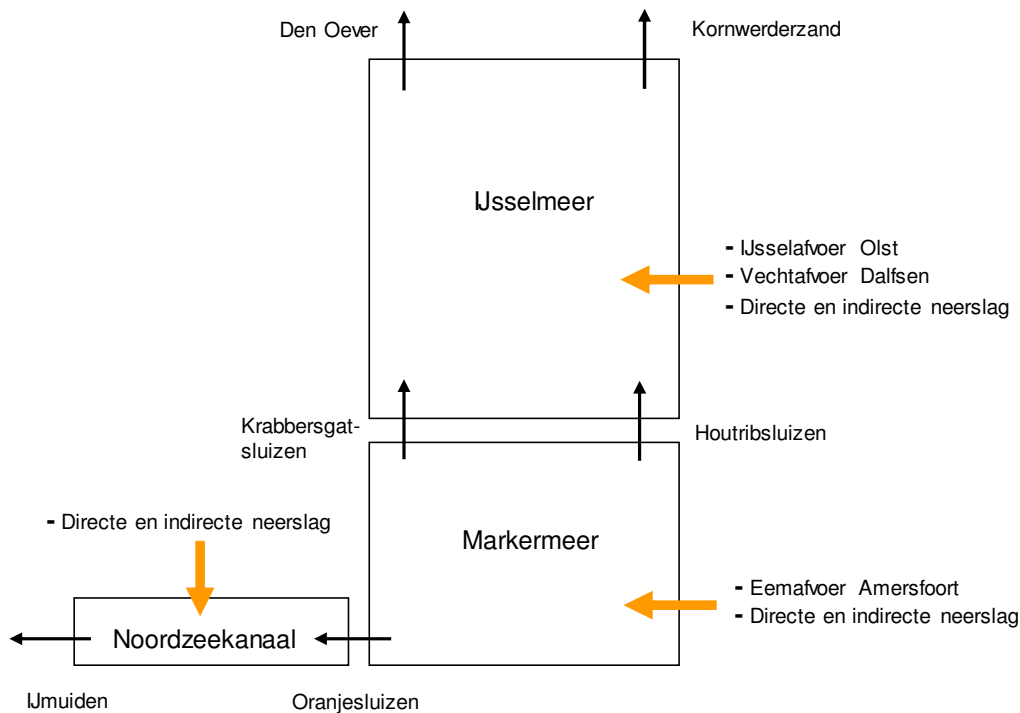
Figuur 2-3 Weergave van het IJsselmeergebied.

In model DEZY worden de volgende stochasten opgenomen (Figuur 2-4):

1. IJsselaafvoer te Olst (m^3/s).
2. Vechtafvoer te Dalfsen (m^3/s).
3. De neerslag (mm) die afwatert op het IJsselmeer, voor zover niet inbegrepen in de afvoeren voor Olst en Dalfsen.
4. Buitenwaterstand te Den Oever (m+NAP).
5. Buitenwaterstand te Kornwerderzand (m+NAP).
6. Windsnelheid station Schiphol (m/s).
7. Windrichting station Schiphol (graden).
8. Eemafvoer te Amersfoort (m^3/s).
9. De neerslag (mm) die afwatert op het Markermeer, voor zover niet inbegrepen in de Eemafvoer.
10. De neerslag (mm) die afwatert op het Noordzeekanaal.
11. Buitenwaterstand te IJmuiden (m+NAP).

Hierbij wordt opgemerkt dat de wind voor Schiphol, die in het model wordt gebruikt om de scheefstand van het IJsselmeer te bepalen, ook gebruikt kan worden om de scheefstand van het Markermeer en het Noordzeekanaal te bepalen. We merken op dat in Figuur 2-4 door zwarte pijlen ook de richting van de spui en/of het pompdebiet is opgenomen. Omdat in het model alleen het winterhalfjaar (whjaar) wordt beschouwd, dat loopt van oktober t/m maart, wordt geen water van het IJsselmeer naar het Markermeer afgevoerd; dat gebeurt namelijk alleen in de zomermaanden.

Deze stochasten worden in het model beschouwd in een basisduur van $B = 30$ dagen, waarbij aan deze duur ook nog voor- en natrajecten zijn gekoppeld, om redenen die duidelijk worden in paragraaf 0.



Figuur 2-4 Schematische weergave watersystemen, spuilocaties en aanvoeren, inclusief richting van de spui (in winterhalfjaren).

2.3 Opzet rapport

Het model DEZY is tamelijk omvangrijk. Als handreiking aan de lezer wordt in Tabel 2-1 een overzicht van de belangrijkste onderdelen gegeven. Hier volgen kort wat opmerkingen daarover:

- Naast kansverdelingen van stochasten zijn ook gemodelleerde tijdsverlopen nodig, omdat de manier waarop meerpeilen veranderen in de tijd samenhangen met de manier waarop afvoeren, neerslag e.d. zich gedragen in de tijd. De theoretische beschrijving van die statistiek en tijdsverlopen staat in hoofdstuk 3, terwijl concrete gegevens kunnen worden gevonden in paragraaf 6.2. Hoofdstuk 3 is erg wiskundig-technisch van aard, en zal niet voor iedere lezer even belangrijk zijn.
- Behalve marginale statistiek zijn ook correlaties tussen stochasten nodig, die worden behandeld in hoofdstuk 4. De behandeling in dit hoofdstuk wordt beknopt gehouden, waarbij voor details wordt verwezen naar [Van Haaren en Geerse, 2015].
- Fysische gegevens van kunstwerken en gegevens over waterbalansen staan in hoofdstuk 5 en paragraaf 6.1. Deze gegevens staan los van de statistiek.
- In hoofdstuk 7 worden de gedetailleerde formules beschreven. Dit hoofdstuk vereist wiskundige kennis.
- Hoofdstuk 8 behandelt de afregeling en de validatie van het model, waarbij het model wordt vergeleken met metingen en waarbij allerlei gevoeligheidsanalyses worden uitgevoerd.

- In hoofdstuk 9 worden concrete voorbeelden gegeven, waaraan te zien is hoe het model presteert in o.m. klimaatscenario's.
- Hoofdstuk 10 geeft de conclusies over de validatie van model DEZY en de praktische toepasbaarheid.
- Het rapport bevat ook enkele bijlagen met gegevens, die niet in het overzicht zijn opgenomen.

Onderdelen	Beschrijving in:
Theoretische beschrijving marginale statistiek Kansen en tijdsverlopen afvoer en neerslag Kansen en tijdsverlopen wind en zeewaterstand	Hoofdstuk 3
Correlaties Correlatie IJsselafvoer en neerslag Correlatie IJsselafvoer en zeewaterstand	Hoofdstuk 4
Fysische gegevens en beheer kunstwerken	Hoofdstuk 5
Waterbalansen IJssel- en Markermeer	Paragraaf 6.1
Gebruikte gegevens marginale statistiek Kansen en tijdsverlopen afvoer en neerslag Kansen en tijdsverlopen wind en zeewaterstand	Paragraaf 6.2
Probabilistische formules (wiskundige behandeling)	Hoofdstuk 7
Afregeling en validatie	Hoofdstuk 8
Voorbeelden van resultaten	Hoofdstuk 9
Conclusies	Hoofdstuk 10

Tabel 2-1 Overzicht onderdelen model DEZY.

3 Marginale statistiek

In dit hoofdstuk wordt de zogenaamde marginale statistiek van de stochasten uit het model behandeld. Van marginale statistiek van stochasten is sprake als kansverdelingen van *afzonderlijke* stochasten worden beschouwd, dus zonder naar correlaties tussen stochasten te kijken. Hoewel strikt genomen het tijdsverloop van een stochast (bijvoorbeeld afvoer of neerslag) niet behoort tot de marginale statistiek, wordt in dit hoofdstuk ook de tijdsmodellering van stochasten behandeld.

3.1 Beschrijving van de statistiek voor afvoeren

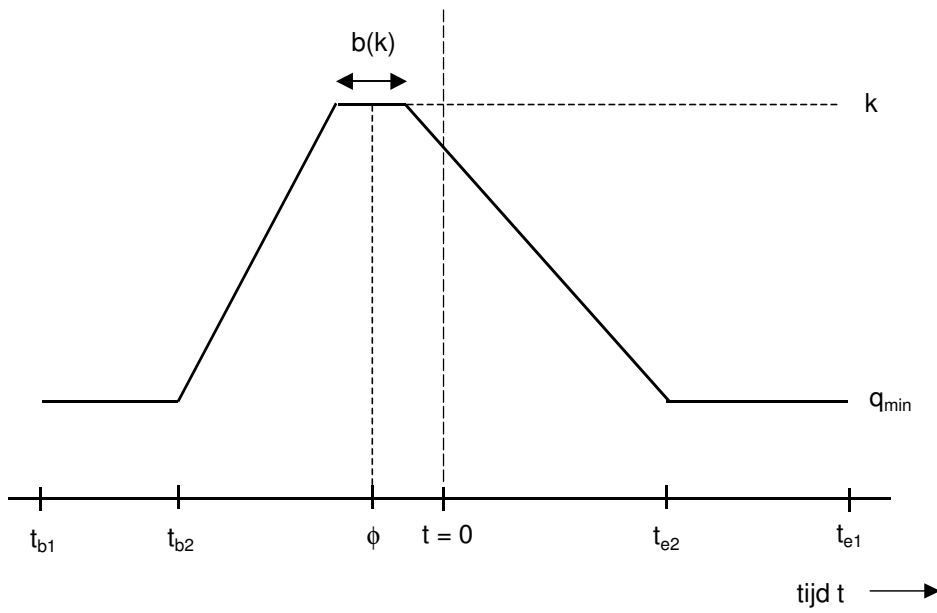
3.1.1 Tijdsmodellering afvoerdebit in basisduur $B = 30$ dagen

Als sprake is van een afvoerdebit gedurende een (standaard) basisduur $B = 30$ dagen, wordt een tijdsmodellering/afvoerstatistiek gebruikt met parameters als weergegeven in Tabel 3-1. Zie als toelichting de figuren Figuur 3-1 en Figuur 3-2.

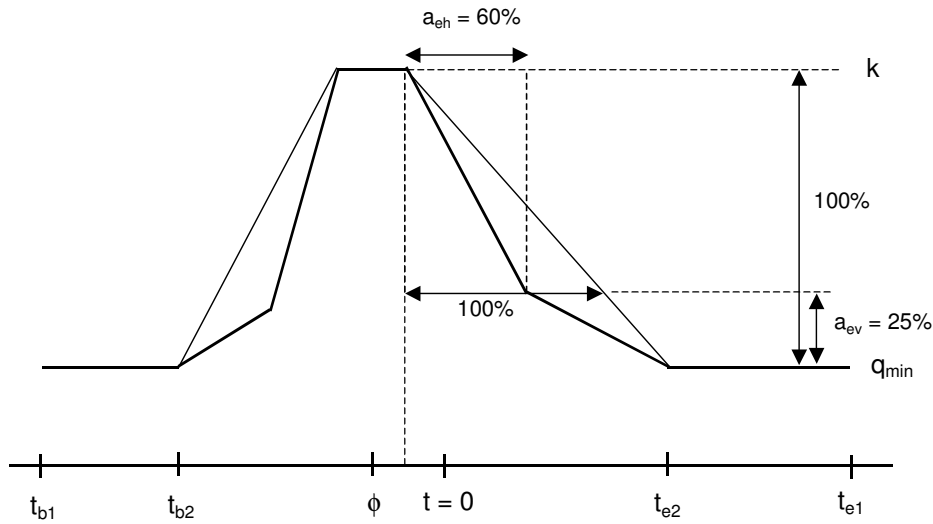
B	dag	Basisduur ($B = 30$ dagen). Betreft 'globale parameter'.
t_{b1}	dag	Begintijdstip golfvorm. Betreft 'globale parameter'.
t_{e1}	dag	Eindtijdstip golfvorm; $t_{e1} = B + t_{b1}$. Betreft 'globale parameter'.
$b(k)$	dag	Duur topniveau.
q_{min}	m^3/s	Begin- en eindniveau golfvorm.
k	m^3/s	Piekwaarde van de golfvorm.
t_{b2}	dag	Begintijdstip van de was van de golfvorm.
t_{e2}	dag	Eindtijdstip van de val van de golfvorm.
φ	dag	Tijdstip midden van topniveau.
a_{bv}	[-]	Knikfactor voor de verticale hoogte in de was (waarde $0 \leq a_{bv} \leq 1$).
a_{bh}	[-]	Breedtefactor voor de horizontale breedte van de was.
a_{ev}	[-]	Knikfactor voor de verticale hoogte in de val (waarde $0 \leq a_{ev} \leq 1$).
a_{eh}	[-]	Breedtefactor voor de horizontale breedte van de val.
$P(K > k)$	[-]	Overschrijdingskans piekafvoer in de basisduur.
$f(k)$	s/m^3	Kansdichtheid piekwaarde in de basisduur, gelijk aan $-dP(K > k)/dk$.

Tabel 3-1 Parameters tijdsmodellering en afvoerstatistiek.

Hier volgen wat opmerkingen. Voor iedere aanvoer in het model zijn de grootheden B , t_{b1} en t_{e1} gemeenschappelijk (globale parameters). De overige grootheden kunnen per aanvoer anders zijn. Voor bijvoorbeeld de afvoer te Olst en Dalfsen zouden de parameters uit Tabel 3-2 kunnen gelden. In dit geval heeft Olst een ongeknikt trapezium, terwijl Dalfsen een geknikt trapezium heeft, van ongeveer de vorm uit Figuur 3-2.



Figuur 3-1 Parameters tijdsmodellering aanvoerdebiet (niet-geknikte versie).



Figuur 3-2 Parameters tijdsmodellering aanvoerdebiet (volledige geknikte versie).

		Olst	Dalfsen
B	dag	45	45
t _{b1}	dag	-22.5	-22.5
t _{e1}	dag	22.5	22.5
q _{min}	m ³ /s	350	30
t _{b2}	dag	-15	-15
t _{e2}	dag	15	15
φ	dag	-1	-6
a _{bv}	[-]	1	0.2
a _{bh}	[-]	1	0.7
a _{ev}	[-]	1	0.25
a _{eh}	[-]	1	0.6

Tabel 3-2 Voorbeeld parameterwaarden voor Olst en Dalfsen (fictieve waarden).

De knikfactoren a_{bv} en a_{ev} hebben waarden waarvoor geldt:

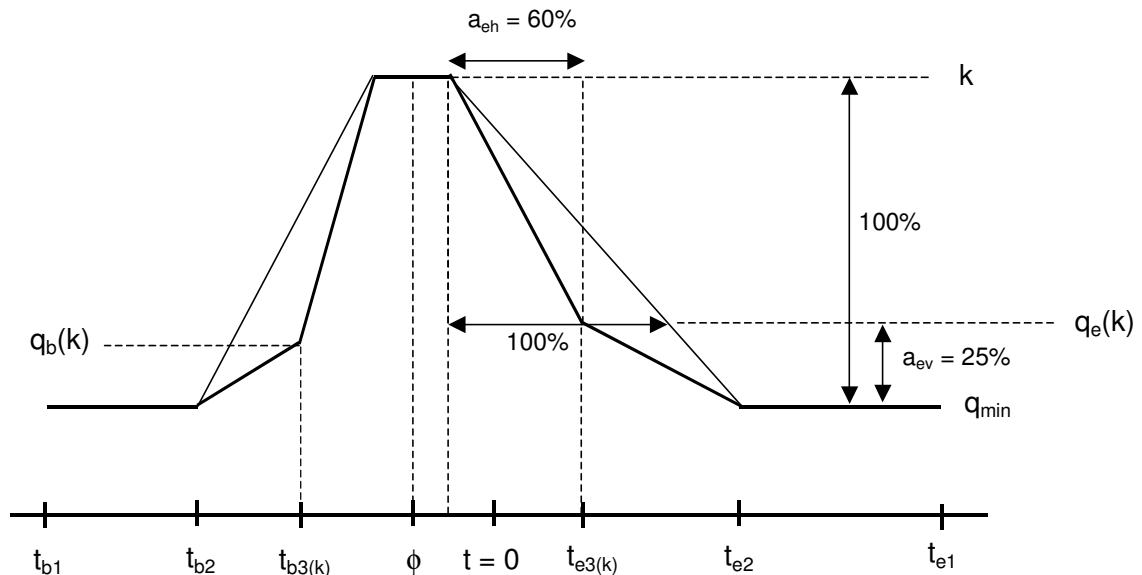
$$\begin{aligned} 0 &\leq a_{bv} \leq 1 \\ 0 &\leq a_{be} \leq 1 \end{aligned} \tag{3.1}$$

De breedtefactoren kunnen zodanig zijn dat sprake is van een insnoering, zoals in Figuur 3-2, maar ook zodanig dat sprake is van een verbreding. Die verbreding mag echter niet 'voorbij' de tijdstippen t_{b2} en t_{e2} lopen. Het is eenvoudig te verifiëren dat dan geldt:

$$\begin{aligned} 0 &\leq a_{bh}(1-a_{bv}) \leq 1 \\ 0 &\leq a_{eh}(1-a_{ev}) \leq 1 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Merk verder nog op dat $a_{bh} = 1$ en $a_{eh} = 1$ corresponderen met ongeknikte flanken, ongeacht wat de waarden van a_{bv} en a_{ev} zijn.

Hiervoor zijn de parameters van de golfvormmodellering beschouwd. Op basis daarvan kunnen extra grootheden t_{b3} , t_{e3} , $q_b(k)$ en $q_e(k)$ worden bepaald, zoals weergegeven Figuur 3-3.



Figuur 3-3 Weergave aanvullende grootheden t_{b3} , t_{e3} , $q_b(k)$ en $q_e(k)$ voor de geknikte versie van de golfvorm.

Het is dan te verifiëren dat geldt:

$$t_{b3}(k) = \{\varphi - b(k) / 2\} \{1 - a_{bh}(1 - a_{bv})\} + a_{bh}(1 - a_{bv})t_{b2} \tag{3.3}$$

$$t_{e3}(k) = \{\varphi + b(k) / 2\} \{1 - a_{eh}(1 - a_{ev})\} + a_{eh}(1 - a_{ev})t_{e2} \tag{3.4}$$

terwijl de afvoeren in de knikpunten worden gegeven door:

$$q_b(k) = q_{min} + a_{bv}(k - q_{min}) \tag{3.5}$$

$$q_e(k) = q_{min} + a_{ev}(k - q_{min}) \tag{3.6}$$

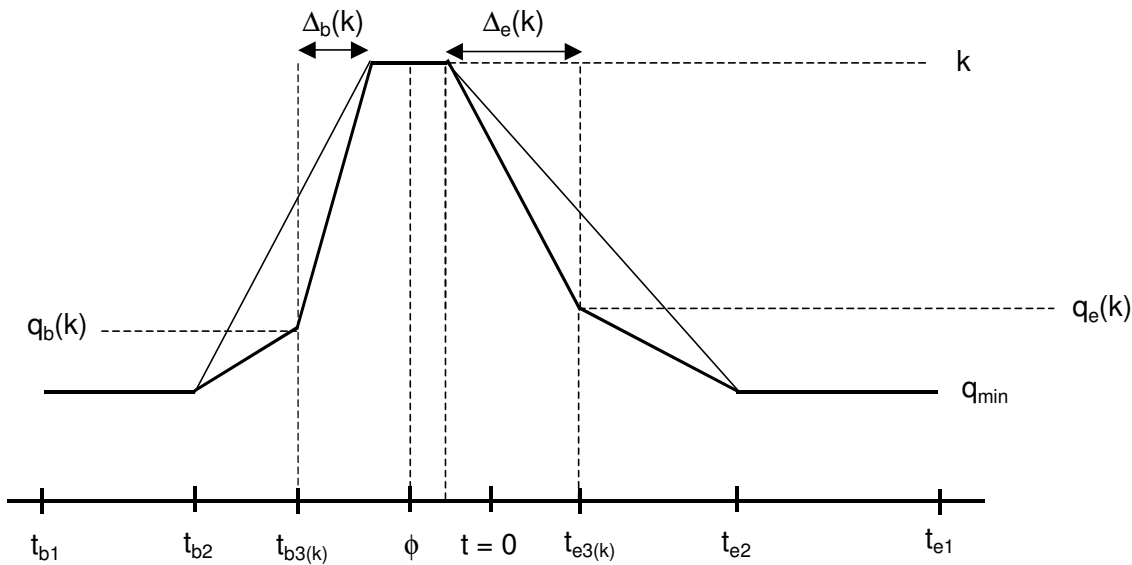
3.1.2 Volume en gemiddelde afvoer

Bij de implementatie, en voor de berekening van de gemiddelde afvoer, is het verband nodig tussen het volume $V(k)$ en de piekwaarde k van de afvoer. In het bepalen van een formule daarvoor is het hinderlijk dat in de symbolen uit de voorgaande paragraaf de tijd zowel in dagen voorkomt (in B , t en φ) als in seconden (bij de debieten). Handiger zou zijn alle tijden in bijvoorbeeld seconden uit te drukken. Dat wordt hier niet gedaan. We introduceren daarom de constante:

$$c_s = 24 * 60 * 60 = 86400, \quad \text{s/dag} \tag{3.7}$$

die in onderstaande formules af en toe voorkomt. We introduceren ook de hulpvariabelen:

$$\begin{aligned} \Delta_b(k) &= \varphi - b(k) / 2 - t_{b3} \\ \Delta_e(k) &= t_{e3} - \varphi - b(k) / 2 \end{aligned} \tag{3.8}$$



Figuur 3-4 Weergave symbolen voor de berekening van $V(k)$.

Het verband tussen $V(k)$ en k wordt dan gegeven door (zie Figuur 3-2 en Figuur 3-4):

$$\begin{aligned} \frac{V(k)}{c_s} &= Bq_{\min} + \frac{t_{b3}(k) - t_{b2}}{2} \{q_b(k) - q_{\min}\} + \frac{t_{e2} - t_{e3}(k)}{2} \{q_e(k) - q_{\min}\} \\ &+ \Delta_b(k) \{q_b(k) - q_{\min}\} + \Delta_e(k) \{q_e(k) - q_{\min}\} \\ &+ 0.5 \Delta_b(k) \{k - q_b(k)\} + 0.5 \Delta_e(k) \{k - q_e(k)\} \\ &+ b(k) \{k - q_{\min}\} \end{aligned} \tag{3.9}$$

In de statistiek wordt gebruik gemaakt van de overschrijdingskans $P(K > k)$ van de piekafvoer k en van de kansdichtheid gegeven door:

$$f_k(k) = -\frac{dP(K > k)}{dk}, \quad k \geq q_{\min} \tag{3.10}$$

De gemiddelde afvoer \bar{q} kan worden berekend door eerst het gemiddelde volume \bar{v} in de basisduur te berekenen, en dat vervolgens te delen door de basisduur. In formules volgt:

$$\bar{v} = \int_{q_{\min}}^{\infty} dk f_K(k) V(k) \quad (3.11)$$

$$\bar{q} = \frac{\bar{v}}{c_s B} \quad (3.12)$$

Opmerking

Een andere manier om de gemiddelde afvoer uit te rekenen is door eerst (op een standaardmanier) de momentane kans $P(Q>q)$ te bepalen door gebruik te maken van $f_K(k)$ en de tijdsmodellering van de afvoer, en vervolgens van de kansverdeling $P(Q>q)$ het gemiddelde te bepalen. Dat levert eveneens \bar{q} . Die berekening is omslachtiger, maar heeft wel als voordeel dat dan ook meteen $P(Q>q)$ beschikbaar is.

3.1.3 Overgang van basisduur B op verlengde rekenduur B₁

Als invoer voor het probabilistisch model is gewoonlijk afvoerstatistiek beschikbaar voor een wintermaand (oktober t/m maart) bestaande uit $B = 30$ dagen. Tijdens de uitvoering van de werkzaamheden is duidelijk geworden dat een langere rekenduur B_1 gewenst is, zoals wordt toegelicht in paragraaf 0. Dat betekent dat de gegevens voor duur B moeten worden omgezet naar die voor de langere duur B_1 . In het vervolg wordt de aanpak daarvoor beschreven.

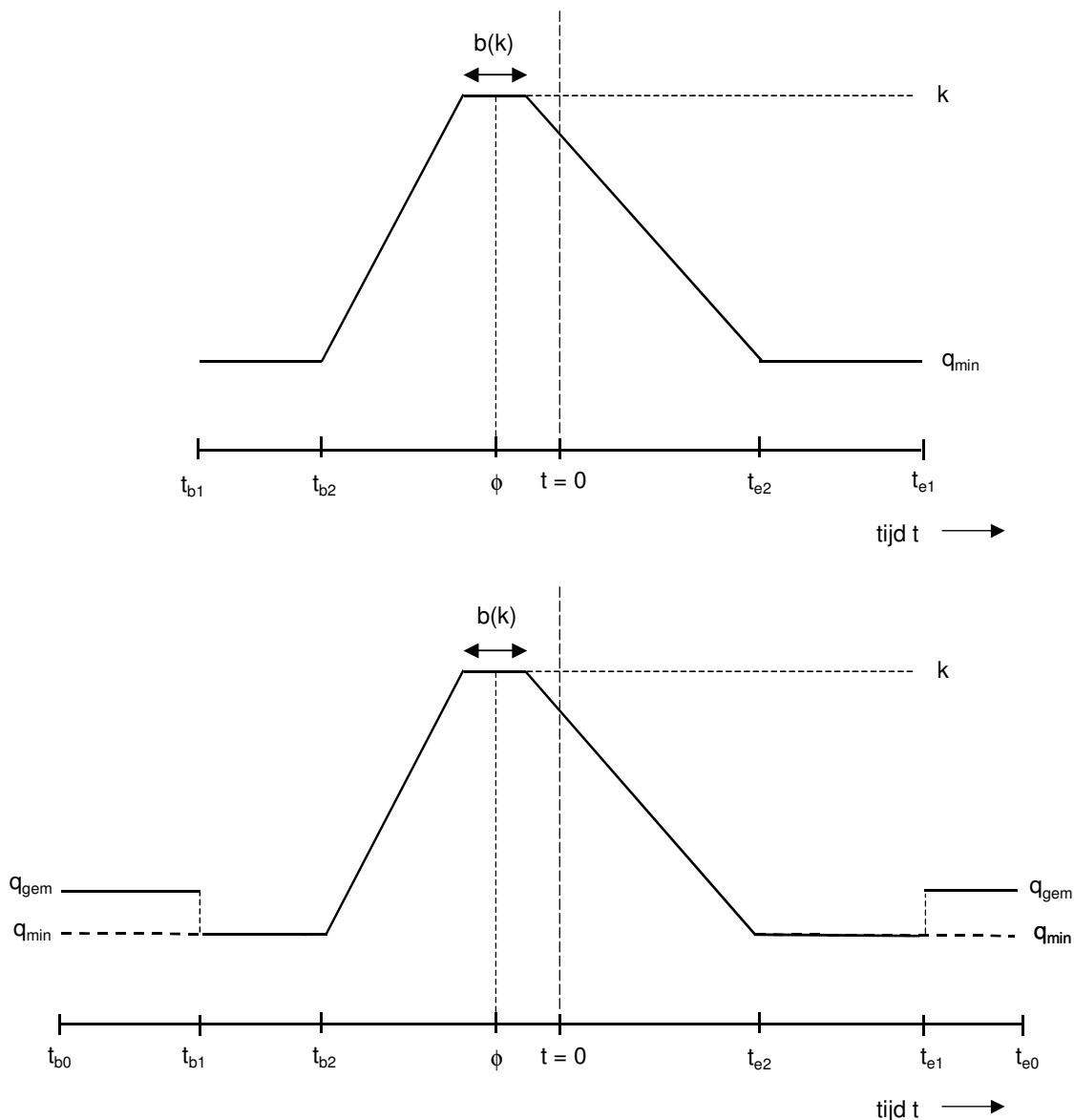
Uitgangspunt is dat voor duur B de volgende gegevens beschikbaar zijn:

1. Overschrijdingskans $P(K>k)$, $k > q_{\min}$.
2. Topduur $b(k)$.
3. De tijdstippen t_{b1} , t_{b2} , φ , t_{e21} , t_{e1} uit Figuur 3-2.
4. Eventuele knikparameters a_{bv} , a_{hv} , a_{ev} , a_{eh} .

De aanpak om tot een verlengde duur te komen is dat het verloop in duur B geheel ongewijzigd blijft, maar dat een begin- en een eindtraject wordt toegevoegd zoals weergegeven in Figuur 3-5. De hoogte van deze trajecten wordt gelijk genomen aan de (momentane) gemiddelde afvoer \bar{q} . Het begintraject met duur t_{voor} loopt van t_{b0} tot t_{b1} , en het eindtraject met duur t_{na} van t_{e0} tot t_{e1} . Er geldt:

$$\begin{aligned} t_{voor} &= t_{b1} - t_{b0} \\ t_{na} &= t_{e0} - t_{e1} \\ B_1 &= t_{voor} + B + t_{na} \end{aligned} \quad (3.13)$$

De toegevoegde begin- en eindtrajecten worden in het model alleen gebruikt voor de 'fysische berekeningen' om het meerpeilverloop te bepalen, maar niet in de statistiek. Voor de omrekening naar het winterhalfjaar (180 dagen) wordt ook voor de rekenduren B_1 uitgegaan van 6 uren in het winterhalfjaar. Merk verder op dat, omdat de gemiddelde afvoer \bar{q} in duur B gelijk is aan de waarde van de toegevoegde trajecten, de gemiddelde afvoer in duur B_1 eveneens \bar{q} is.



Figuur 3-5 Toelichting overgang op rekenduur B_1 (boven: verloop in B , onder: verloop in B_1).

3.2 Beschrijving van de statistiek voor neerslag

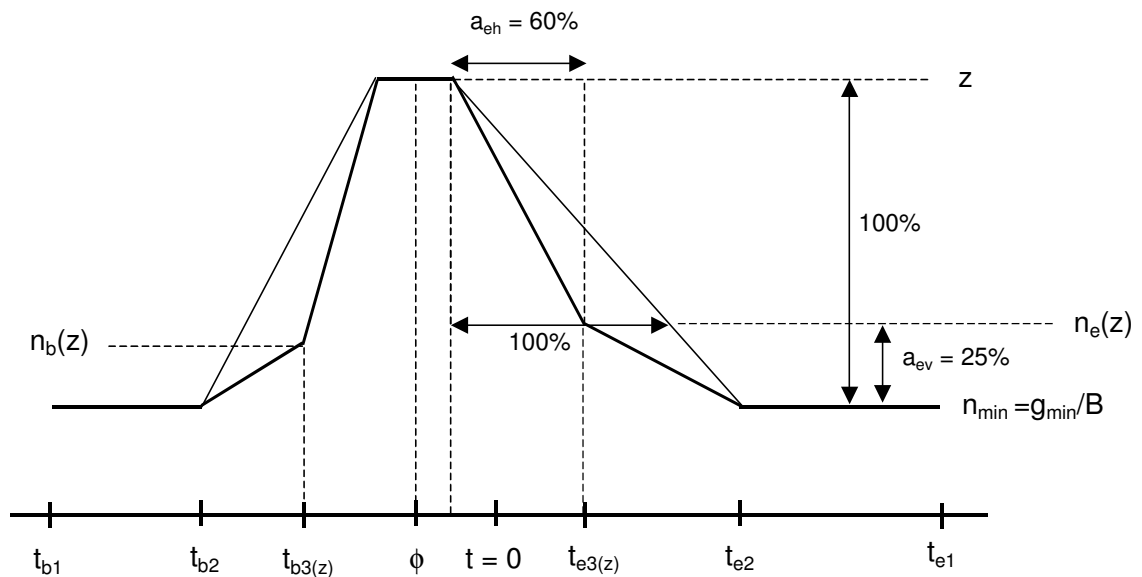
3.2.1 Tijdsmodellering neerslag in basisduur $B = 30$ dagen

Voor de neerslag worden soortgelijke tijdsverlopen gebruikt als voor de afvoer. Een belangrijk verschil met de afvoer is echter dat in plaats van statistiek voor afvoerpiekwaarden voor de neerslag statistiek wordt gebruikt van de maandsom van de neerslag. Neerslag is namelijk erg variabel in de tijd, waardoor – in de context van het beschouwde model waarin vooral afwaterende volumes relevant zijn – de som over een aantal dagen een betere maat is om statistiek voor af te leiden dan statistiek voor piekwaarden.

Als sprake is van neerslag wordt in het probabilistisch model een tijdsmodellering/neerslag-statistiek gebruikt met parameters als weergegeven in Tabel 3-3, zie ook Figuur 3-6. Merk op dat de minimale dagwaarde n_{min} gelijk is aan de minimale maandsom g_{min} gedeeld door B , zoals weergegeven in de figuur.

B	dag	Basisduur (30 dagen).
N	nn	Dagwaarde van de neerslag.
G	mm	Maandsom voor de duur B.
z	mm	Piekwaarde van het tijdsverloop.
n_{min}	mm	Begin- en eindniveau tijdsverloop.
g_{min}	mm	Minimumwaarde van G.
$b(z)$	dag	Duur topniveau.
t_{b1}	dag	Begintijdstip tijdsverloop; 'globale parameter'.
t_{e1}	dag	Eindtijdstip tijdsverloop; $t_{e1} = B + t_{b1}$; 'globale parameter'.
t_{b2}	dag	Begintijdstip van de stijging van de tijdsverloop.
t_{e2}	dag	Eindtijdstip van de daling van de tijdsverloop.
ϕ	dag	Tijdstip midden van topniveau.
a_{bv}	[-]	Knikfactor voor de verticale hoogte in de was.
a_{bh}	[-]	Breedtefactor voor de horizontale breedte van de was.
a_{ev}	[-]	Knikfactor voor de verticale hoogte in de val.
a_{eh}	[-]	Breedtefactor voor de horizontale breedte van de val.
$P(G>g)$	[-]	Overschrijdingskans maandsom in de basisduur.
$f_G(g)$	1/mm	Kansdichtheid maandsom in de basisduur, gelijk aan $-dP(G>g)/dg$.

Tabel 3-3 Parameters tijdsmodellering en neerslagstatistiek.



Figuur 3-6 Parameters tijdsmodellering neerslag.

Voor de neerslag wordt in het probabilistisch model voor de basisduur B uitgegaan van statistiek waarin de volgende onderdelen beschikbaar zijn:

1. Overschrijdingskans $P(G>g)$, $g > g_{min}$.
2. Topduur $b(z)$.
3. De tijdstippen t_{b1} , t_{b2} , ϕ , t_{e21} , t_{e1} .
4. Eventuele knikparameters a_{bv} , a_{hv} , a_{ev} , a_{eh} .

Uiteraard dient de gemiddelde maandsom (de verwachtingswaarde $E(G)$) volgens de statistiek gelijk te zijn aan de gemiddelde maandsom \bar{g} volgens de data.

Vervolgens moet in het model het verband worden gelegd tussen een realisatie g van de maandsom met de piekwaarde z van het tijdsverloop. Dat gaat als volgt. Bij iedere piekwaarde z kan de bijbehorende maandsom $g = g(z)$ bepaald worden, door gebruik te maken van de analogons van de formules (3.3) t/m (3.9). Omgekeerd kan dan bij iedere waarde g de bijbehorende piekwaarde z worden bepaald. Wellicht ten overvloede volgen hier de gedetailleerde formules.

De 'kniktijdstippen' worden gegeven door:

$$t_{b3}(z) = \{\varphi - b(z)/2\} \{1 - a_{bh}(1 - a_{bv})\} + a_{bh}(1 - a_{bv})t_{b2} \quad (3.14)$$

$$t_{e3}(z) = \{\varphi + b(z)/2\} \{1 - a_{eh}(1 - a_{ev})\} + a_{eh}(1 - a_{ev})t_{e2} \quad (3.15)$$

terwijl de dagwaarden van de neerslag in de knikpunten worden gegeven door:

$$n_b(z) = n_{min} + a_{bv}(z - n_{min}) \quad (3.16)$$

$$n_e(z) = n_{min} + a_{ev}(z - n_{min}) \quad (3.17)$$

De maandsom $g(z)$ wordt dan analoog aan (3.8) en (3.9) gegeven door:

$$\begin{aligned} g(z) = & Bn_{min} + \frac{t_{b3}(z) - t_{b2}}{2} \{n_b(z) - n_{min}\} + \frac{t_{e2} - t_{e3}(z)}{2} \{n_e(z) - n_{min}\} \\ & + \Delta_b(z) \{n_b(z) - n_{min}\} + \Delta_e(z) \{n_e(z) - n_{min}\} \\ & + 0.5\Delta_b(z) \{z - n_b(z)\} + 0.5\Delta_e(z) \{z - n_e(z)\} \\ & + b(z) \{z - n_{min}\} \end{aligned} \quad (3.18)$$

waarin

$$\begin{aligned} \Delta_b(z) &= \varphi - b(z)/2 - t_{b3} \\ \Delta_e(z) &= t_{e3} - \varphi - b(z)/2 \end{aligned} \quad (3.19)$$

Door voor een (groot) aantal waarden van z de grootheid $g(z)$ uit (3.18) te bepalen, kan omgekeerd door interpolatie bij iedere waarde van g de piekwaarde $z(g)$ worden bepaald.

Opmerking

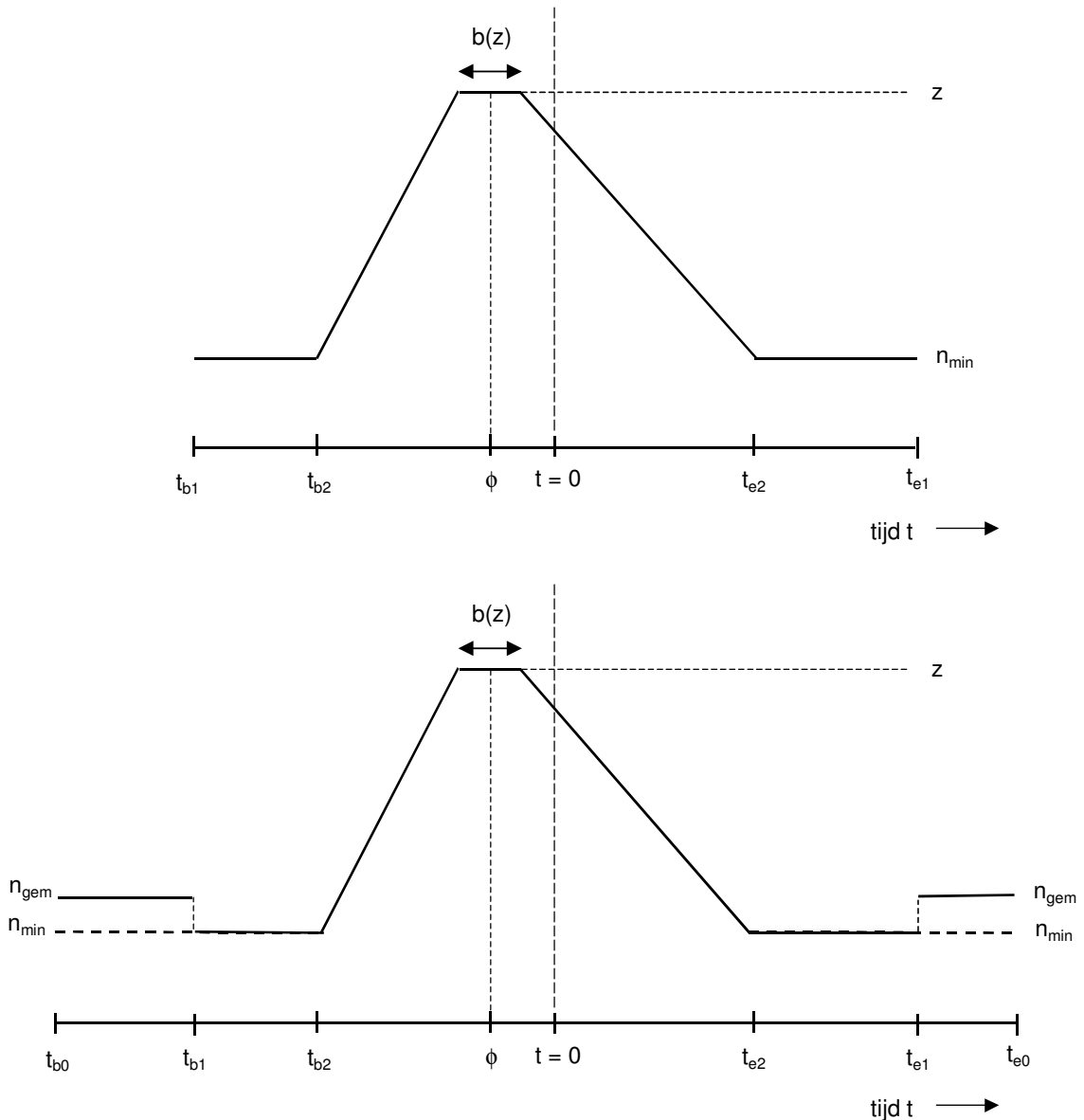
De kansverdeling $P(G > g)$ induceert een kansverdeling $P(Z > z)$. Die laatste verdeling is in het probabilistisch model niet nodig.

3.2.2 Overgang neerslag van basisduur B op rekenduur B₁

Net als voor de afvoer is voor het probabilistisch model neerslagstatistiek beschikbaar voor een wintermaand (oktober t/m maart) bestaande uit $B = 30$ dagen. Omdat in het model een langere rekenduur B_1 nodig is, moeten de gegevens voor B worden omgezet naar statistiek (inclusief tijdsverlopen) voor duur B_1 . In het vervolg wordt de aanpak daarvoor beschreven, die analoog is aan die voor de afvoer uit paragraaf 3.1.3.

Uitgangspunt voor duur B is dat neerslagstatistiek beschikbaar is volgens de punten 1 t/m 4 uit paragraaf 3.1.3. Net als voor de afvoer worden aan het tijdsverloop van de neerslag begin- en eindtrajecten toegevoegd, zoals weergegeven in Figuur 3-7. Deze trajecten hebben als niveau de gemiddelde dagneerslag:

$$\bar{n} = \frac{\bar{g}}{B} \tag{3.20}$$



Figuur 3-7 Toelichting overgang op rekenduur B_1 (boven: verloop voor B, onder: verloop voor B_1), waarbij $n_{gem} = \bar{n}$.

3.2.3 Omrekening van neerslagverloop naar debietverloop en afwaterend gebied

In het probabilistisch model moet het tijdsverloop van de neerslag nog worden omgerekend naar een debietverloop (in m^3/s) dat afwatert op het betreffende watersysteem (IJsselmeer, Markermeer of NZK), door de grootte van het afwaterend gebied te verdisconteren. De parameters die het neerslagverloop vastleggen moeten daarbij zó worden gekozen, dat het tijdsverloop overeen stemt met het 'afwaterende' debietverloop. Allerlei kortdurende

neerslagpiekjes zullen (deels) afgevlakt/verbreed en vertraagd tot afstroming komen. Overigens bevat het neerslagverloop ook de directe neerslag, die onmiddellijk in het watersysteem komt, waarvoor deze afvlakking/verbreding/vertraging niet geldt. Inmiddels is duidelijk dat de precieze tijdsmodellering niet heel nauw steekt, omdat verhoging van het meerpeil een cumulatief proces is dat meerdere dagen duurt; met name de *volumes* die over enkele dagen zijn gecumuleerd, bepalen de maximale meerpeilen (eventueel met uitzondering voor het NZK). Zie voor meer informatie hierover hoofdstuk 8.

Stel dat een tijdsverloop van de neerslag is gekozen dat naar verwachting de directe neerslag en afwatering op het watersysteem voldoende nauwkeurig beschrijft. Geef met A het oppervlak aan van het afwaterend gebied op dit systeem. Deze oppervlakte is gelijk aan de som van het oppervlak van het betreffende watersysteem en van het land dat (indirect) afwatert op het VZM. In dat geval kan iedere waarde $n(t)$, in mm/dag, uit het verloop van Figuur 3-7 worden omgerekend naar een debiet $q(t)$, in m^3/s , volgens het verband:

$$q(t) = \frac{n(t)A}{1000c_s}, \quad m^3/s \quad (3.21)$$

waarbij A is gegeven in m^2 en $c_s = 86400$ gelijk is aan het aantal seconden in één dag.

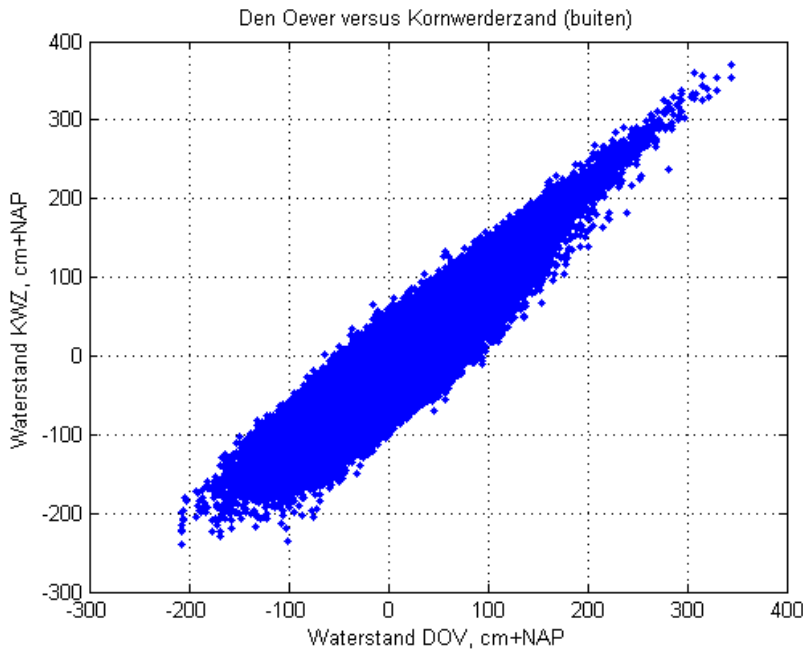
3.3 Kansverdeling voor wind en zeewaterstand

3.3.1 Gebruikte gegevens en homogenisatie zeewaterstanden

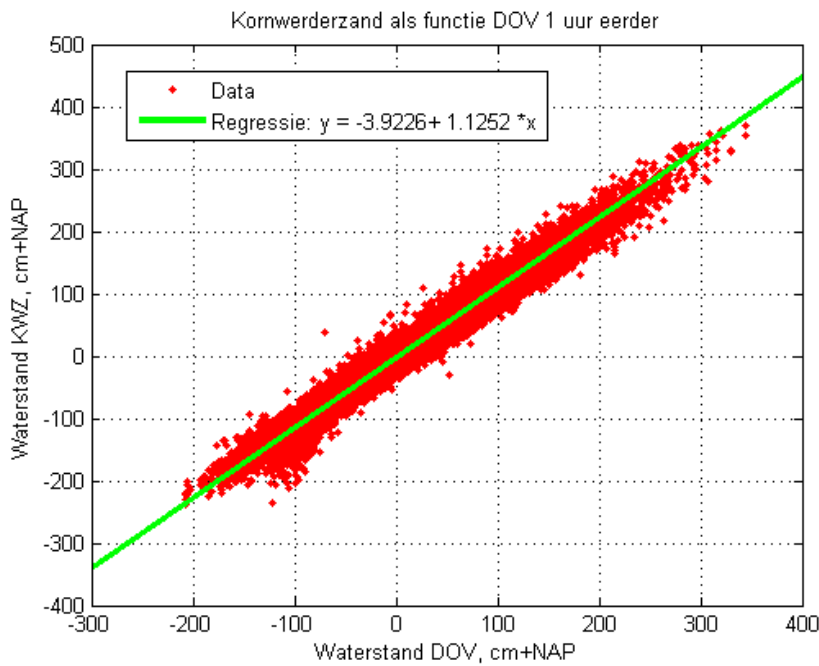
Voor de zeeranden (Den Oever, Kornwerderzand en IJmuiden) en de wind wordt een kansverdeling geconstrueerd op basis van meetreeksen met uurwaarden. Het betreft, voor de periode 1951 t/m 2010:

1. Buitenwaterstanden Den Oever, Kornwerderzand en IJmuiden.
2. Windsnelheid en windrichting station Schiphol.

Deze gegevens zijn, uitgezonderd Kornwerderzand voor 1951 t/m 1975, toegeleverd door Deltares en stemmen overeen met die uit Fase 4 (Toets waterveiligheid) van het Deltaprogramma IJsselmeergebied voor berekeningen met het Landelijk Sobek Model (LSM), zie [Meurs Van et al., 2014]. N.B. De buitenwaterstanden te Kornwerderzand zijn in de studie uit dat rapport voor 1951 t/m 1975 gelijk genomen aan die te Den Oever, omdat pas daarna goede gegevens beschikbaar zijn voor Kornwerderzand. In dit project is er voor gekozen om de gegevens voor Kornwerderzand te *berekenen* uit die te Den Oever, aangezien het getij bij Kornwerderzand verschilt van dat te Den Oever.



Figuur 3-8 Buitenwaterstanden Kornwerderzand versus Den Oever (zelfde uurtijstippen).



Figuur 3-9 Buitenwaterstanden Kornwerderzand versus Den Oever één uur eerder, samen met het regressieverband.

Figuur 3-8 geeft de (buiten)waterstanden van Kornwerderzand als functie van die te Den Oever. De puntenwolk is vrij breed. Bekend is echter dat het getij bij Den Oever ongeveer één uur voorloopt op dat bij Kornwerderzand. Als Kornwerderzand wordt uitgezet tegen Den Oever één uur eerder, resulteert Figuur 3-9. Die figuur toont ook het aangenomen lineaire verband, van de vorm:

$$w_{kwz}(t) = 1.13 * w_{do}(t-1) - 3.92 \tag{3.22}$$

waarin $w_{KWZ}(t)$ en $w_{DO}(t)$ de waterstanden weergeven bij Den Oever en Kornwerderzand in cm+NAP op tijdstip t in uren. Deze formule is afgeleid door lineaire regressie toe te passen op de puntenparen $(w_{KWZ}(t), w_{DO}(t-1))$. De spreiding blijkt nu duidelijk afgenomen. Merk verder op dat de laagwaters bij Kornwerderzand lager zijn dan die bij Den Oever, en de hoogwaters juist hoger dan die bij Den Oever.

In de periode 1951 t/m 2010 is de zeespiegel langzaam gestegen. Ruwweg bedraagt die 20 cm per eeuw. Vandaar dat op de toegeleverde zeewaterstanden een eenvoudige homogenisatie is uitgevoerd, naar het zichtjaar 2015. Die correctie is van de vorm:

$$\text{gehomogeniseerde meting} = \text{originele meting} + \frac{0.20}{100} (2015 - \text{jaar originele meting}), \text{ m+NAP} \quad (3.23)$$

Op deze manier worden de metingen verhoogd, waarbij die verhoging het grootst is naarmate de meting verder terug ligt in de tijd.

3.3.2 Kansverdeling voor wind-waterstandblokken

Van de meetreeksen worden alleen de winterhalfjaren gebruikt (oktober t/m maart), omdat in het model de zomermaanden voor de veiligheid worden verwaarloosd.¹ De meetperiode beslaat 60 jaren. In elk winterhalfjaar (whj) worden nu aansluitende uren van lengte B_1 dagen beschouwd, wat dan een aantal N_{ww} zogenaamde wind-waterstandblokken (ww-blokken) oplevert.² Voor bijvoorbeeld $B_1 = 45$ dagen passen er (nagenoeg) precies 4 blokken in het whj, wat in dat geval leidt tot $N_{ww} = 60 \cdot 4 = 240$ blokken. Overigens wordt, om de rekentijd te verkorten, in het uiteindelijke model vaak gerekend met minder ww-blokken, waarover meer in hoofdstuk 8.

Het is handig om te schrijven naar uren en de blokken te nummeren, als $j = 1, 2, \dots, N_{ww}$. Het j^{de} ww-blok $Y = y_j$ bestaat uit $24 \cdot B_1$ uurwaarden voor:

- Buitenwaterstanden bij Den Oever: $w_{DO, j}(1, 2, \dots, 24 \cdot B_1)$.
- Buitenwaterstanden bij Kornwerderzand: $w_{KWZ, j}(1, 2, \dots, 24 \cdot B_1)$.
- Buitenwaterstanden bij IJmuiden: $w_{IJMU, j}(1, 2, \dots, 24 \cdot B_1)$.
- Windsnelheden te Schiphol: $u_j(1, 2, \dots, 24 \cdot B_1)$.
- Windrichtingen te Schiphol: $r_j(1, 2, \dots, 24 \cdot B_1)$.

Merk op dat y_j dus uit een hele collectie van waarden bestaat, namelijk uit 5 tijdreeksen met elk $24 \cdot B_1$ waarden (elk tijdstip geeft 5 waarden op dat tijdstip).

In het probabilistisch model wordt aan elk ww-blok de volgende kans toegekend (uniforme kansverdeling):

$$P(Y = y_j) = \frac{1}{N_{ww}}, \quad j = 1, 2, \dots, N_{ww} \quad (3.24)$$

¹ In [Geerse en Wojciechowska, 2013] wordt deze verwaarlozing gerechtvaardigd.

² Er wordt hier voorbijgegaan aan praktische details die te maken hebben met het feit dat het winterhalfjaar niet precies uit 180 dagen bestaat. Daarnaast merken we op dat in het model ook meerdere ww-blokken kunnen worden geselecteerd, in welk geval deels overlappende ww-blokken worden beschouwd.

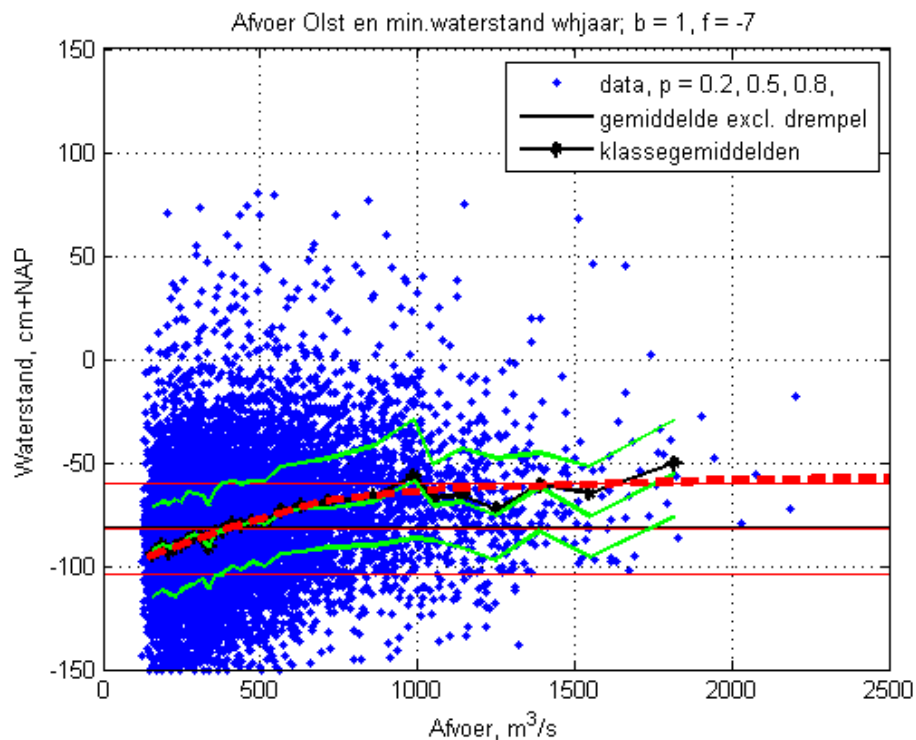
4 Correlaties

4.1 Correlatie IJsselaflow en waterstand kuststation

Er blijkt een (positieve) correlatie te bestaan tussen de waterstand te Den Oever en de afvoer te Olst. Om een lange reeks dagwaarden te krijgen, wordt de afvoer op dag t te Olst berekend uit die te Lobith, door de afvoer bij Lobith op $t - 2$ dagen te vermenigvuldigen met 0.16. De aanname is hier dat de looptijd Lobith - Olst gelijk is aan 2 dagen. In werkelijkheid ligt die looptijd dichterbij 1.5 dag, maar omdat voor het model DEZY het instroompunt van de IJssel in het IJsselmeer het meest relevant is, is voor een wat langere looptijd van 2 dagen gekozen (de looptijd van Olst tot het instroompunt is ook nog eens ongeveer 0.5 dag). Een volledige behandeling van de correlatie wordt gegeven in [Van Haaren en Geerse, 2015]. In het vervolg wordt alleen een korte beschrijving gegeven.

4.1.1 Verwerken correlatie

De correlatie tussen Den Oever en Olst blijkt het grootst te zijn als een waterstand bij Den Oever wordt gekoppeld aan de IJsselaflow die 7 à 8 dagen later optreedt. Fysiek komt dat doordat depressies/regenfronten gewoonlijk vanaf de Noordzee in Zuidwestelijke richting over ons land naar Duitsland trekken. De regen die in Duitsland in het stroomgebied van de Rijn valt, komt dan dagen later via de Rijn ons land binnen, en heeft vanaf de grens (Lobith) dan nog circa 2 dagen nodig om Olst dan wel het IJsselmeer te bereiken.



Figuur 4-1 Verband tussen afvoer Olst (feitelijk bij Ketelmeer) en de minimale dagwaterstand te Den Oever. In dit geval wordt de afvoer 7 dagen later beschouwd dan de waterstand te Den Oever.

Figuur 4-1 toont puntenparen die bestaan uit de *minimale* dagwaterstand bij Den Oever en de Olstafvoer $T_{WO} = 7$ dagen later (periode 1951-2010). De figuur bevat de volgende gegevens, zie voor meer details [Van Haaren en Geerse, 2015]:

1. De blauwe punten representeren de data.
2. De (kromme) vette zwarte lijn geeft de gemiddelde trend in de data weer.
3. De horizontale zwarte lijn in de figuur geeft het gemiddelde van alle (minimale) dagwaterstanden (in dit geval -0.82 m+NAP).
4. De gestreepte rode lijn geeft een gekozen fit aan de (kromme) vette zwarte lijn. De punten van deze lijn kunnen worden gegeven als verschuiving Δw t.o.v. dit gemiddelde, met getalswaarden volgens Tabel 4-1.
5. De groene lijnen corresponderen, *bij gegeven afvoer*, van onder naar boven met respectievelijk het 20%-percentiel, het 50%-percentiel (mediaan) en het 80%-percentiel. De afvoeren zijn voor het bepalen van deze percentielen ingedeeld in klassen, waarna *per afvoerklasse* steeds de genoemde percentielen zijn bepaald; dan blijkt dus dat hooggelegen afvoerklassen tot hogere percentielen leiden. Binnen een afvoerklasse ligt gemiddeld ruwweg 60% van de data tussen de onderste en bovenste groene lijn.
6. De rode lijnen corresponderen ook met de percentielen voor 20%, 50% en 80%, maar nu voor *alle data gezamenlijk beschouwd*. I.h.b. kan worden gesteld dat ruwweg 60% van *alle* data tussen de onderste en bovenste lijn ligt.

Afvoer Olst m ³ /s	Verschuiving waterstand Den Oever m
120	-0.15
400	0
700	0.13
800	0.15
1100	0.19
1500	0.21
2000	0.23
3000	0.25
4000	0.25

Tabel 4-1 *Verschuiving Δw van de minimale zeewaterstand te Den Oever, als functie van de Olstafvoer 7 dagen later.*³

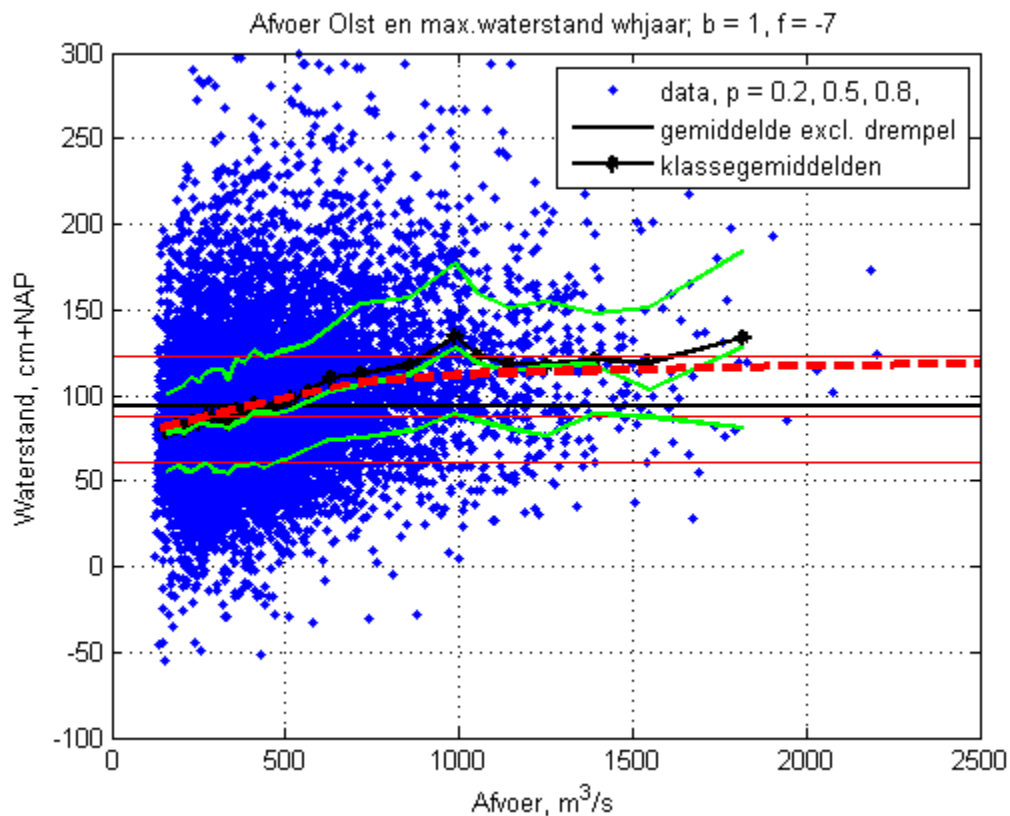
De positieve correlatie tussen Den Oever en Olst 7 dagen later blijkt uit het feit dat (a) de vette zwarte lijn oploopt t.o.v. de horizontale zwarte lijn en (b) de groene lijnen oplopen t.o.v de horizontale rode lijnen.

Nu wordt uitgelegd hoe deze correlatie in het probabilistisch model wordt verwerkt. Stel dat voor duur B een afvoerverloop bij Olst is gegeven, zoals in Figuur 4-2; geef de afvoer als functie van de tijd aan door $q(t,k)$, voor $t_{b0} \leq t \leq t_{e0}$ en $k \geq q_{min}$, met de tijd gerekend in dagen (t hoeft geen geheel getal te zijn). In het probabilistisch model worden dergelijke afvoerverlopen beschouwd in combinatie met waterstandsverlopen $w_{DO}(t)$ bij Den Oever, ook weer voor $t_{b0} \leq t \leq t_{e0}$. De correlatie wordt in DEZY in rekening gebracht door de waterstand op tijdstip t te vermeerderen met de waarde Δw die hoort bij de afvoerwaarde 7 dagen later. Merk op dat aan de dagen uit de laatste 7 dagen van het verloop $w_{DO}(t)$ op deze manier geen verschuiving kan worden gekoppeld. In dat geval wordt, omdat in dit eindtraject sprake is van lage afvoeren, pragmatisch een verschuiving van 0 m aangehouden. In formule kan dan voor de aangepaste waterstand $w'_{DO}(t)$ worden geschreven:

³ Bij nader inzien blijkt het voor de lagere afvoeren onder 400 m³/s beter om geen correlatie aan te nemen; zie hierover de afregeling van het model in hoofdstuk 8.

$$w'_{DO}(t) = \begin{cases} w_{DO}(t) + \Delta w[q(t + T_{WO}, k)] & , \text{ als } t_{b0} \leq t \leq t_{e0} - T_{WO} \\ w_{DO}(t) & , \text{ als } t > t_{e0} - T_{WO} \end{cases} \quad (4.1)$$

Voor het probabilistisch model zijn met name de laagwaterstanden (LW's) op de Waddenzee relevant. Een interessante vraag is of de gevonden correlatie tussen laagwaterstanden verschilt met die voor hoogwaterstanden (HW's). Figuur 4-2 laat zien dat ook voor HW's vrijwel dezelfde correlatie resulteert; de rode gestreepte lijn in die figuur is t.o.v. de horizontale zwarte lijn dezelfde als die uit Figuur 4-1. In feite is de correlatie tussen HW's en afvoeren nog iets sterker dan die tussen LW's en afvoeren: de kromme zwarte lijn in Figuur 4-2 ligt nu namelijk net iets boven de gestreepte rode lijn, terwijl beide lijnen in Figuur 4-1 op elkaar liggen.



Figuur 4-2 Verband tussen afvoer Olst (feitelijk bij Ketelmeer) en de maximale dagwaterstand te Den Oever. In dit geval wordt de afvoer 7 dagen later beschouwd dan de waterstand te Den Oever.

4.1.2 Correlatie tussen Olst versus Kornwerderzand en IJmuiden

Voor Kornwerderzand zal dezelfde beschrijving van de correlatie worden genomen als voor Den Oever. Deze locaties liggen dermate dicht bij elkaar dat de aard van de correlatie sterk overeenkomstig zal zijn. Daarbij wordt nog opgemerkt dat voor Den Oever data beschikbaar zijn uit de periode 1951-2010, terwijl voor Kornwerderzand alleen een kortere dataset uit de periode 1976-2010 beschikbaar is. Ons inziens weegt het voordeel van de langere dataset ruimschoots op tegen het voordeel van iets nauwkeurigere waterstanden bij uitvoeren van de analyses voor Kornwerderzand.

Voor IJmuiden wordt een soortgelijke correlatie verwacht als voor Den Oever/Kornwerderzand. Daarbij wordt opgemerkt dat in [Geerse, 2013] de correlatie tussen HW's en de afvoer te Lobith is onderzocht. Daarbij bleek dat HW's positief gecorreleerd zijn met afvoeren bij Lobith, waarbij

die correlatie het sterkst blijkt te zijn tussen HW's en afvoeren die 6 dagen *later* optreden . Omdat de looptijd Lobith tot het IJsselmeer ongeveer 2 dagen bedraagt, kan worden gesteld dat de correlatie tussen HW's bij Hoek van Holland en de afvoer te Olst/Keteldiep het sterkst is met een tijdsverschil van 8 dagen. Deze duur stemt goed overeen met het tijdsverschil van 7 à 8 dagen voor Olst/Keteldiep uit [Van Haaren en Geerse, 2015]. Tot slot: IJmuiden en Hoek van Holland liggen zo dicht bij elkaar dat de correlatie tussen IJmuiden en afvoeren gelijkgesteld kan worden aan die tussen Hoek van Holland en afvoeren.

4.2 Correlatiemodel voor afvoeren en neerslag

In het model DEZY worden correlaties beschouwd tussen combinaties van stochasten van afvoer en/of neerslag. Al deze correlaties worden gekoppeld aan de afvoer van de IJssel, waarbij bij iedere waarde van de IJsselafvoer slechts twee waarden van de bijbehorende stochast worden beschouwd. Zie voor meer informatie over de specifieke manier waarop de correlaties in model DEZY worden verwerkt het voorbeeld in paragraaf 7.1. In het vervolg wordt kort weergegeven welke correlaties worden beschouwd, en welk correlatiemodel daaraan ten grondslag ligt.

In het model worden correlaties tussen de volgende combinaties van stochasten beschouwd:

1. Piekafvoer IJssel en piekafvoer Vecht.
2. Piekafvoer IJssel en piekafvoer Eem.
3. Piekafvoer IJssel en maandsom neerslag in Noord-Nederland.
4. Piekafvoer IJssel en maandsom neerslag in Midden-Nederland.
5. Piekafvoer IJssel en maandsom neerslag in West-Nederland.

Deze correlaties zijn, behalve die uit punt 5, onderzocht in [Van Haaren en Geerse, 2015].⁴ Elke combinatie blijkt een positieve correlatie te vertonen. In de (wiskundige) beschrijving van de correlatie is een bepaald correlatiemodel gebruikt, dat de aanwezige correlatie op een versimpelde wijze beschrijft. Die versimpeling bestaat er uit dat slechts twee lijnen worden gebruikt om het spreidingspatroon in de data te beschrijven. Voor bijvoorbeeld de eerste combinatie (piekafvoeren IJssel en Vecht) worden dan bij iedere piekafvoer van de IJssel slechts twee mogelijke piekafvoeren van de Vecht beschouwd, die in het model met kansen p en $1-p$ voorkomen. De versimpeling is aangebracht om de rekentijd van DEZY beperkt te houden. In principe kan het twee lijnen model, ook aangeduid als *2LijnenModel*, worden uitgebreid tot een model met meerdere lijnen; bij een aantal van n lijnen wordt dan gesproken over het *nLijnenModel*. Bij beschouwen van meerdere lijnen neemt de rekentijd van DEZY echter toe, wat onpraktisch is.

Nu wordt het 2LijnenModel beknopt besproken; zie voor een gedetailleerde (wiskundige) beschrijving en voor concrete toepassingen voor de punten 1 t/m 4 het rapport [Van Haaren en Geerse, 2015].

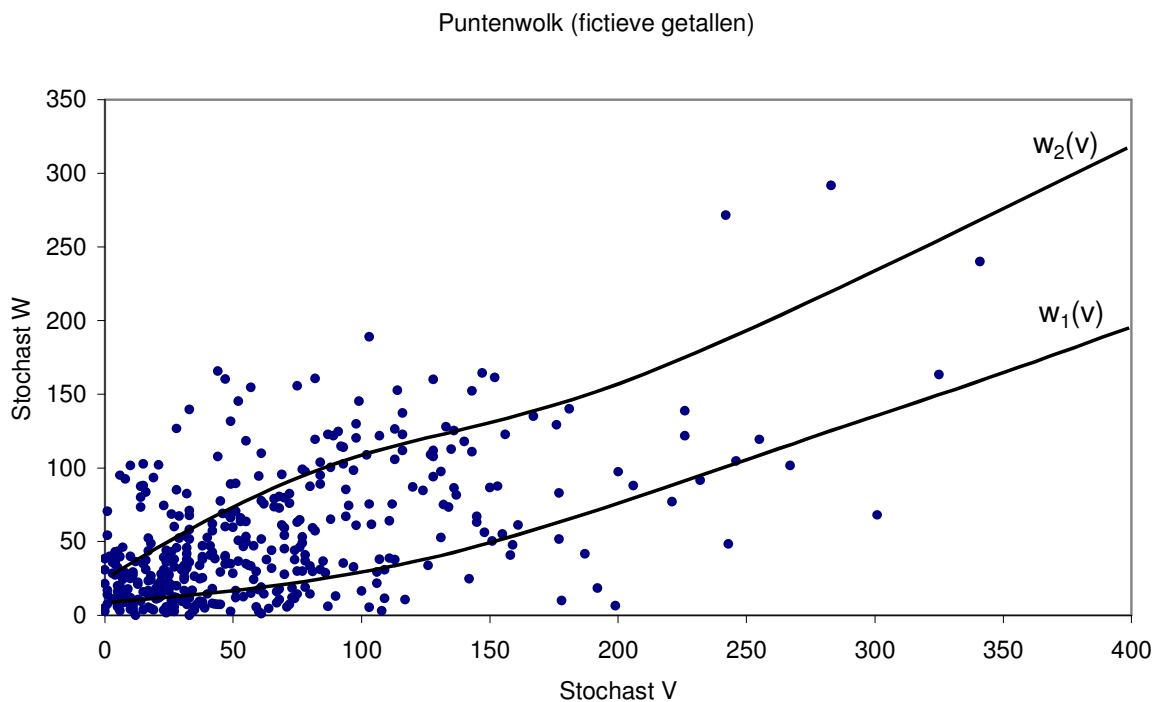
In het 2LijnenModel worden twee gecorreleerde stochasten V en W beschouwd, waarvan de marginale verdelingen $f(v)$ en $f(w)$ bekend zijn. De wens is de correlatie tussen deze stochasten versimpeld mee te nemen, met slechts twee deterministische verbanden: een lijn $w_1(v)$ met kans p , en een lijn $w_2(v)$ met kans $1-p$ (zie Figuur 4-3). Deze lijnen moeten het patroon in de data redelijkerwijs beschrijven. Als bijvoorbeeld $p = 0.6$ wordt gekozen, moet de onderste lijn

⁴ Omdat in DEZY het NZK benaderenderwijs wordt meegenomen, is aan de correlatie uit punt 5 in die referentie geen aandacht besteed.

ruwweg door het centrum van de onderste 60% van de data gaan, en de bovenste lijn door het centrum van de bovenste 40% van de data.

Merk op dat de lijnen inhouden dat, gegeven een waarde $V = v$, er slechts twee uitkomsten mogelijk zijn voor W : de uitkomsten $w_1(v)$ en $w_2(v)$, die dan respectievelijk voorkomen met kansen p en $1-p$.

De twee lijnen kunnen niet willekeurig worden gekozen, omdat ze zodanig moeten zijn dat de vooraf gegeven marginale verdelingen gereproduceerd worden. Zie voor de wiskundige methode om deze lijnen te bepalen [Van Haaren en Geerse, 2015].



Figuur 4-3 Voorbeeld van puntenwolk met twee lijnen als modellering.

In model DEZY wordt uitgegaan van $p = 0.6$ als kans op de onderste lijn. Een gevoeligheidsanalyse uit paragraaf 8.4.9 laat zien dat de precieze keuze voor p niet erg nauw steekt.

5 Fysische gegevens en beheer van kunstwerken

In dit hoofdstuk worden fysische gegevens besproken voor de kunstwerken (spuisluizen en pompen) die in het model DEZY zijn opgenomen. Sommige kunstwerken zijn fictief van aard, zoals bijvoorbeeld pompen in de Houtribdijk, en worden alleen in DEZY opgenomen om bepaalde maatregelen te kunnen doorrekenen. Naast de gegevens worden ook scheefstand-gegevens van de meren besproken, omdat deze mede de vervallen over de spuisluizen bepalen.

5.1 Scheefstand

Om spuidebieten te bepalen zijn lokale waterstanden aan de boven- en benedenzijde van de spuisluizen van belang. N.B. De richting van de spui ligt vast in het model, zie Figuur 2-4: voor elke spuisluis geldt dat slechts in één richting gespuid kan worden. De terminologie die hier wordt gebruikt is dat gespuid wordt van de 'binnenzijde' naar de 'buitenzijde'. Om vervallen te bepalen is op bepaalde locaties in het model de scheefstand van het watersysteem nodig, terwijl op andere locaties in het model de waterstand volgt uit het beschouwde ww-blok (zie paragraaf 3.3.2). De benodigde gegevens staan in Tabel 5-1.

Locatie	Waterstand binnenzijde uit:	Waterstand buitenzijde uit:
Den Oever	meerpeil + scheefstand IJsselmeerzijde	ww-blok
Kornwerderzand	meerpeil + scheefstand IJsselmeerzijde	ww-blok
Houtribsluizen	meerpeil + scheefstand Markermeerzijde	meerpeil + scheefstand IJsselmeerzijde
Krabbersgatsluizen	meerpeil + scheefstand Markermeerzijde	meerpeil + scheefstand IJsselmeerzijde
Oranjesluizen	meerpeil + scheefstand Markermeerzijde	meerpeil + scheefstand NZK-zijde
IJmuiden	meerpeil + scheefstand NZK-zijde	ww-blok

Tabel 5-1 Overzicht voor bepalen vervallen over spuisluizen.

Voor het NZK, dat in het model op *vereenvoudigde* wijze wordt meegenomen, zal in het model de scheefstand worden verwaarloosd. Op basis van Bijlage J uit [Pengel en Geerse H., 2001] blijkt dat de scheefstand door wind op het NZK (traject IJmuiden - Oranjesluizen) beperkt blijft tot enkele centimeters.⁵ Deze scheefstand wordt in model DEZY verwaarloosd.

Uit bovenstaande blijkt dat voor 7 locaties de scheefstand moet worden bepaald. Het volgende versimpelde verband is aangenomen om de scheefstand te bepalen als functie van de windsnelheid u en windrichting r :

$$\text{scheefstand: } \Delta h = K_r (a + bu) u^2 \quad (5.1)$$

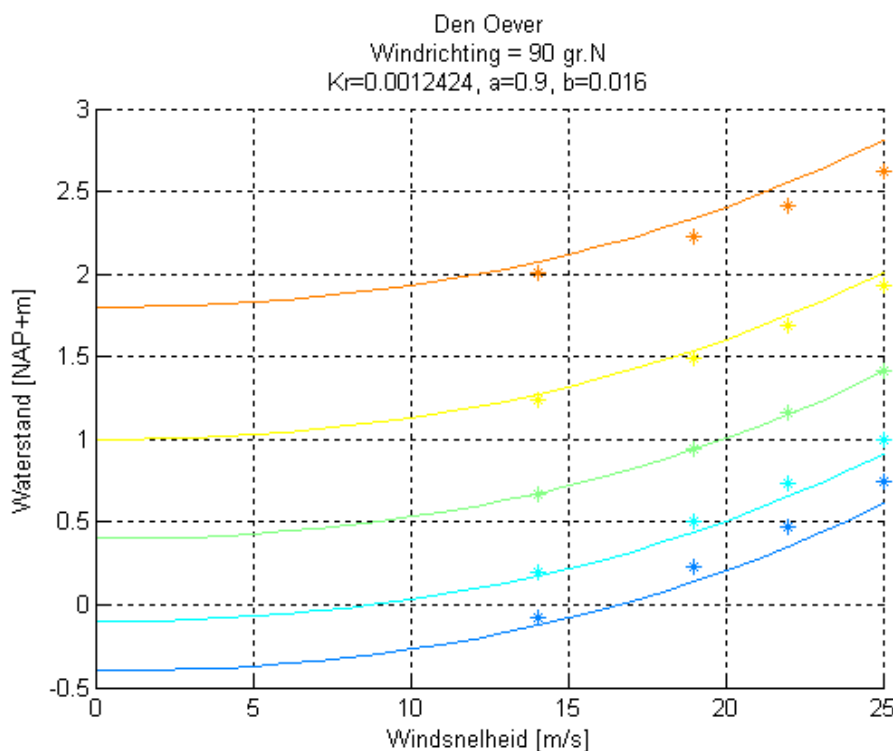
Om per richting K_r te bepalen wordt gebruik gemaakt van WAQUA-gegevens uit de HR2006.⁶ Met WAQUA zijn, voor $r = \text{NNO}, \text{NO}, \dots, \text{N}$, verschillende meerpeilen m en windsnelheden u doorgerekend. Voor het IJsselmeer zijn dat $m = -0.4, -0.1, 0.4, 1.0, 1.8 \text{ m+NAP}$ en $u = 14, 19$,

⁵ In feite kan een verschil in verval van enkele centimeters wel degelijk het spuidebiet richting NZK beïnvloeden. Een verval van slechts 0.02 m levert bijvoorbeeld bij de Oranjesluizen al een spuidebiet van circa 25 m³/s. Gezien de relatief geringe toevoeren op het Markermeer is dat niet helemaal verwaarloosbaar. N.B. De scheefstand wordt in [Pengel en Geerse H, 2001] *wel* meegenomen.

⁶ We merken op dat de WTI2011-database geen gegevens voor afwaaiing bevat; waar afwaaiing plaatsvindt, is die op nul gezet. Dat maakt de WTI2011-database onbruikbaar voor onze doeleinden. Verder merken we op dat de HR2006 gegevens zijn afgeleid van oudere Hydra-M gegevens, waarbij alleen richtingssectoren 30°, 60°, ..., 360° zijn doorgerekend; de resultaten voor de richtingen NNO, NO, ..., N zijn daaruit verkregen door interpolatie.

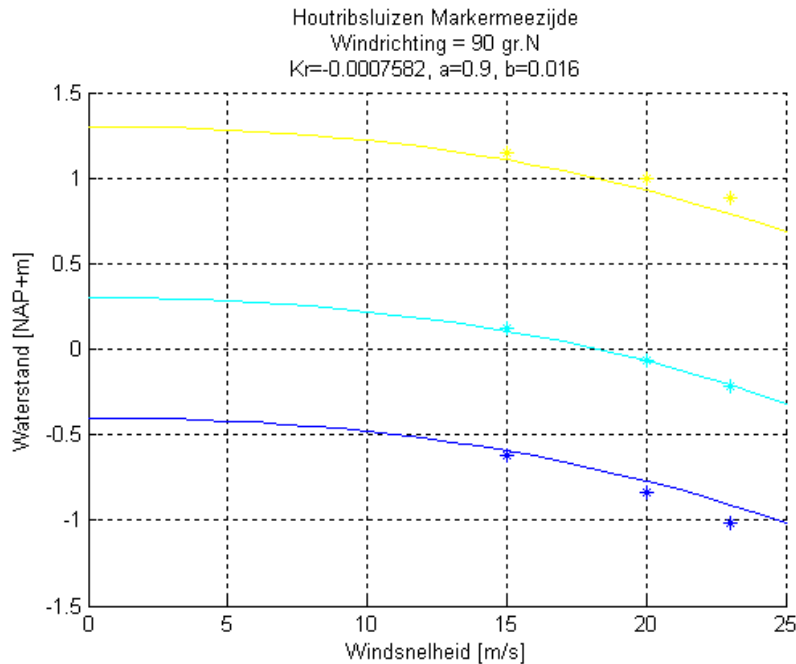
22, 24, 28 m/s. Feitelijk zijn nog extra (hogere) windsnelheden doorgerekend, maar die spelen in dit verband geen rol, omdat in de gebruikte ww-blokken geen windsnelheden hoger dan 28 m/s voorkomen. Het blijkt dat de waarden $a = 0.9$ en $b = 0.016$ voldoen om fits mee te bepalen. Om dan voor bijvoorbeeld Den Oever K_r te bepalen voor $r = 90^\circ$ (richting O) zijn één meerpeil en één windsnelheid beschouwd, namelijk $m = 0.4$ m+NAP en $u = 19$ m/s. Door deze waarden in te vullen in (5.1), waarbij Δh kan worden afgeleid uit WAQUA, volgt dan $K_r = 0.00124$ s²/m. Zie voor de numerieke waarden van de K_r voor alle scheefstandlocaties Bijlage A.

Figuur 5-1 laat de fit zien die op die manier resulteert (de lijnen zijn op een verticale verschuiving na gelijk aan elkaar). Merk op dat de fit niet heel goed is. In principe kan een betere fit worden bedacht, door de diepte van het water in de formule voor de scheefstand te betrekken. Dat is echter niet gedaan. De gevoeligheid voor de uitkomsten van het model blijkt beperkt te zijn (zie hoofdstuk 8), vandaar dat is vastgehouden aan de hier beschreven simpele modellering van de scheefstand.



Figuur 5-1 Illustratie van de scheefstand bij Den Oever IJsselmeerzijde, voor richting 90° (Oostenwind).

Voor het Markermeer is een soortgelijke procedure gevolgd, met andere waarden voor m en u om de scheefstand te bepalen. Ter illustratie wordt voor richting 90° het resultaat getoond voor de Markermeerzijde van de Houtribsluizen, voor richting $r = 0$. Merk op dat in dit geval sprake is van afwaaiing.



Figuur 5-2 Illustratie van de scheefstand bij de Houtribsluizen Oever Markermeezijde, voor richting 90° (Oostenwind).

5.2 Oranjesluis en spuisluizen Afsluitdijk en Houtribdijk

5.2.1 Algemene gegevens

Voor de genoemde spuisluizen wordt gebruik gemaakt van een standaard overlaatformule. Voor een spuicomplex bestaande uit N identieke spuikokers wordt het spuidebiet q (in m^3/s) gegeven door, met $H_{bi} > 0$:

$$\begin{aligned} \text{Onvolkomen overlaat: } H_{bu} \leq H_{bi} \leq \frac{3}{2} H_{bu} \\ q = N a B H_{bu} \sqrt{2g(H_{bi} - H_{bu})} \end{aligned} \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned} \text{Volkomen overlaat: } H_{bi} > \frac{3}{2} H_{bu} \\ q = N a B (2/3) \sqrt{2g/3} H_{bi}^{3/2} \end{aligned}$$

waarin als notatie wordt gebruikt:

- N = aantal spuikokers
- B = breedte (in m) van één koker (deze is voor alle kokers dezelfde)
- a = afvoercoëfficiënt in overlaatformule (dimensieloos)
- h_{bodem} = bodemhoogte (in m+NAP) van de koker
- H_{bu} = buitenwaterstand gemeten t.o.v. het bodemniveau h_{bodem} (in m)
- H_{bi} = binnenwaterstand gemeten t.o.v. het bodemniveau h_{bodem} (in m)
- g = gravitatieconstante (9.81 m/s^2)

Tabel 5-2 geeft informatie voor de betreffende spuisluizen voor de grootheden N, B, a en h_{bodem} . In de volgende paragrafen wordt de herkomst van deze gegevens besproken.

Locatie	Richting spui	Aantal	Breedte	Bodemhoogte	Afvoercoëff.
		[-]	m	m+NAP	[-]
Den Oever	Van IJsselmeer naar Waddenzee	15	12	-4.7	1.06
Kornwerderzand	Van IJsselmeer naar Waddenzee	10	12	-4.7	1.06
Houtribsluizen	Van Markermeer naar IJsselmeer	6	18	-4.5	0.95
Krabbersgatsluizen	Van Markermeer naar IJsselmeer	2	18	-4.5	0.95
Oranjesluizen	Van Markermeer naar NZK	1	9.8	-4.5	1.0

Tabel 5-2 Samenvatting modelparameters in DEZY voor de Oranjesluis en de spuisluisen in de Afsluitdijk en Houtribdijk.

5.2.2 Aanvullende gegevens Den Oever en Kornwerderzand

Om de waarden van de parameters voor Den Oever en Kornwerderzand uit formule (5.2) te bepalen is informatie gevraagd aan RWS. Daarop zijn gegevens toegeleverd over de manier waarop in IWP de overlaatformule wordt gebruikt, zie [Miedema en Pompert, 2014]. N.B. IWP staat voor "Instrumentarium voor de waterhuishouding van peilgereguleerde watersystemen".

Hierover worden de volgende punten genoemd:

1. Alleen de situatie voor de onvolkomen overlaat wordt in IWP beschouwd. Reden daarvan is (vermoedelijk) dat voor praktijksituaties vrijwel nooit zal gelden $H_{bi} > 1.5H_{bu}$. Voor de extreme meerpeilen uit het probabilistisch model kan die situatie zich echter wel voordoen, vandaar dat in het model ook de situatie van de volkomen overlaat is geïmplementeerd.⁷
2. In de beschrijving van de IWP-formules wordt gesteld dat spuien bij de Afsluitdijk plaatsvindt zodra sprake is van een verval > 0 . Door Erik Pompert is echter meegedeeld dat om indringing van zout water te vermijden pas wordt gespuid bij een binnenwaterstand die 0.1 m hoger ligt dan de buitenwaterstand. Met dat laatste wordt in het probabilistisch model rekening gehouden, zie voor details formule (5.5).
3. De afvoercoëfficiënt a (ook aangeduid als spuicoëfficiënt) wordt in IWP afhankelijk genomen van het beschouwde verval, zoals weergegeven in Tabel 5-3, waarbij wordt opgemerkt dat deze zijn overgenomen uit het rapport "IJKmetingen Spuisluizen Afsluitdijk". Om de rekentijd te beperken, is in dit project een vaste waarde voor a aangenomen, namelijk $a = 1.06$. Door deze vaste waarde hoeft in het computerprogramma niet geïnterpoleerd te worden, wat een gunstig effect heeft op de rekentijd. Daarnaast is geverifieerd dat de gevoeligheid van de uitkomsten van DEZY voor de keuze van deze vaste waarde niet heel groot is (zie hoofdstuk 8).
4. In de beschrijving van de IWP-formules wordt ook het spuidebiet tijdens perioden van visintrek besproken. Uit persoonlijk contact met Hans Miedema blijkt dat tijdens extreme meerpeilen geen sprake is van een beperking aan het spuidebiet door visintrek. Vandaar dat daarmee in het model geen rekening wordt gehouden.
5. In IWP worden tijdreeksen omgezet naar 10-minuten waarden alvorens de formules te gebruiken. In het probabilistisch model blijkt een dergelijke fijne tijdstap onnodig, en kan met uurwaarden worden gerekend, of met een nog grotere tijdstap (zie hoofdstuk 8).

⁷ Beschouw bijvoorbeeld een extreem meerpeil van 1.3 m+NAP (zonder wind) en een laagwater van -0.9 m+NAP. In dat geval is $H_{bi} = 1.3 + 4.7 = 6$ m en $H_{bu} = -0.9 + 4.7 = 3.8$, met verhouding $H_{bi}/H_{bu} = 6/3.8 = 1.58$. Bij zuidoosten wind kan dan, door scheefstand op het IJsselmeer en afwaaiing op de Waddenzee, de verhouding nog verder oplopen.

Verval, m	Afvoercoëfficiënt, [-]
0.1	0.85
0.2	1.08
0.3	1.09
0.4	1.07
0.5	1.05
0.6	1.04
0.7	1.03
0.8	1.02
0.9 en groter	1.01

Tabel 5-3 Afhankelijkheid van afvoercoëfficiënt a van het verval in IWP.

Hieronder gaan we op sommige van bovengenoemde punten in meer detail in.

Ad 2.

In het probabilistisch model wordt aangenomen dat pas wordt gespuid op het moment dat de druk op de bodem van de spuijoker t.g.v. het zoete water aan de binnenzijde en het zoute water aan de buitenzijde aan elkaar gelijk zijn, wat het geval is als:

$$H_{bu} \rho_{zout} = H_{bi} \rho_{zoet} \quad (5.3)$$

waarbij ρ_{zout} en ρ_{zoet} de dichtheden van zout en zoet water aangeven. Deze relatie kan ook worden herschreven als

$$H_{bi} - H_{bu} = H_{bi} \left(1 - \frac{\rho_{zoet}}{\rho_{zout}} \right) = H_{bi} \left(1 - \frac{1}{1.025} \right) = 0.024 H_{bi} \quad (5.4)$$

waarbij in het derde lid de bekende waarde van de relatieve dichtheid is ingevuld. Formule (5.4) is geïmplementeerd: er wordt pas gespuid op het moment dat $H_{bi} - H_{bu}$ groter is dan het rechter lid uit (5.4). In formule kan dan voor het spuidebiet van een spuicomplex dan worden geschreven:

$$q_{spui}(H_{bi}, H_{bu}, N) = \begin{cases} 0 & , \text{als } H_{bi} < H_{bu} + 0.024 H_{bi} \\ \text{formule (5.2)} & , \text{als } H_{bi} \geq H_{bu} + 0.024 H_{bi} \end{cases} \quad (5.5)$$

Neem als voorbeeld een binnenwaterstand van 0 m+NAP, zodat $H_{bi} = 0 - h_{bodem} = 4.7$ m; in dat geval worden de spuisluizen geopend als H_{bi} gelijk is aan $H_{bu} + 0.11$ m.

5.2.3 Gegevens Krabbersgat- en Houtribsluizen

De gegevens uit Tabel 5-2 voor deze sluizen zijn ontleend aan diverse bronnen:

1. De gegevens voor de Krabbersgatsluizen zijn ontleend aan [Projectnota Krabbersgatsluis, 1994].
2. De gegevens voor de Houtribsluizen zijn ontleend aan de "Legger Houtribdijk 2009" en daarnaast aan [Deelrapportage Houtribsluizen, 2011].

Met betrekking tot punt 2 het volgende. In [Deelrapportage Houtribsluizen, 2011] wordt gesteld dat een verval van 0.05 m overeenkomt met een spuidebiet van 450 m³/s. Dat zou betekenen dat de afvoercoëfficiënt in formule (5.2) gelijk aan $a = 1.0$ moet zijn. In de afregeling van het model blijkt de waarde $a = 0.95$ iets beter bij de data te passen, vandaar dat in Tabel 5-2 die waarde staat. Verder geeft de genoemde referentie informatie over het knijpen van de Houtribsluis bij te hoge stroomsnelheden – die informatie is echter strijdig met andere

informatie die op internet is te vinden. In DEZY wordt in ieder geval geen beperking aan het spuidebiet door de Houtribdijk opgelegd. Uit een gevoeligheidsanalyse blijkt dat een maximum stellen aan het spuidebiet (200 m³/s bij Krabbersgatsluizen en 500 m³/s bij de Houtribsluizen) een verwaarloosbaar effect heeft op de resultaten.

In het model is aangenomen dat bij een overschrijding van het streefpeil van het Markermeer zo mogelijk onder vrij verval wordt gespuid richting IJsselmeer, ook als in die situatie het IJsselmeer hoger is dan 'zijn' streefpeil. Er wordt in het model geen water gespuid van het IJssel- naar het Markermeer. Bedenk wel dat het model alleen de situatie voor de *wintermaand*- en weergeeft. Voor de zomermaanden gelden andere beheerregels, die niet in het model worden beschouwd.

5.2.4 Gegevens Oranjesluizen

De gegevens voor de Oranjesluis zijn ontleend aan [Pengel en Geerse H, 2001]. Als het Markermeerpeil hoger is dan het streefpeil wordt zo mogelijk onder vrij verval gespuid richting het NZK, met dien verstande dat het NZK zich onder de waarde -0.35 m+NAP bevindt. Die laatste waarde wordt in het model het 'inlaatpeil van het NZK' genoemd. Als het peil op het NZK hoger is dan -0.35 m+NAP, wordt er in het model dus geen water ingelaten vanuit het Markermeer.

5.2.5 Stroomsnelheden bij spuisluizen

In model DEZY wordt nergens rekening gehouden met eventuele beperkingen aan spuidebieten vanwege (te) hoge stroomsnelheden. Van belang is wel dat in de doorgekende extreme situaties erg hoge stroomsnelheden mogelijk zijn. Voor bijvoorbeeld Den Oever en Kornwerderzand kunnen bij extreme meerpeilen tijdens laagwater stroomsnelheden in de orde van 6 m/s voorkomen (en wellicht nog hoger). In hoeverre de spuisluizen tegen dergelijke snelheden bestand zijn, is niet onderzocht. In dit rapport wordt verder geen rekening gehouden met eventuele beperkingen aan spuidebieten vanwege eventuele hoge stroomsnelheden.

5.3 Spuisluis en gemaal IJmuiden

Nu worden de spuisluis en het gemaal IJmuiden, zoals opgenomen in model DEZY besproken. We brengen nog eens in herinnering dat het NZK, en dus het beheer bij IJmuiden, in het model slechts versimpeld wordt opgenomen.

Voor de spuisluis is sprake van $N = 7$ trompetvormige spuikokers met een stroomvoerende breedte $B = 5.9$ m per koker; de keelhoogte H_{keel} is gelijk aan 4.8 m [Pengel en Geerse H, 2001]. De volgende formule is (als vereenvoudigde beschrijving voor de spuisluis) aangenomen, met spuicoëfficiënt $a = 1.0$:

$$q = N a B H_{keel} \sqrt{2gZ} \quad (5.6)$$

- N = aantal spuikokers
- B = breedte (in m) van één koker (deze is voor alle kokers dezelfde)
- a = afvoercoëfficiënt in overlaatformule (dimensieloos)
- H_{keel} = keelhoogte (in m) van de koker
- Z = verval over de spuisluis (in m)

g = gravitatieconstante (9.81 m/s²)

In model DEZY wordt verder aangenomen dat om zoutindringing te voorkomen, indien nodig gespuid wordt bij (ongeveer) een verschil tussen binnen- en buitenwaterstand van 0.12 m.⁸ De waarde 0.12 m is overgenomen uit [Pengel en Geerse H, 2001].

Voor het gemaal bij IJmuiden wordt aangenomen dat dit in werking treedt indien de waterstand op het NZK het *aanslagpeil* -0.32 m+NAP overschrijdt; deze waarde is overgenomen uit paragraaf 3.2.4 van [Pengel en Geerse H, 2001]. In het model wordt verder aangenomen dat spuien en pompen tegelijkertijd mogelijk is: als het aanslagpeil wordt overschreden, en daarmee ook het streefpeil -0.40 m+NAP, wordt in het model dus zowel gespuid als gepompt (indien spuien onder vrij verval mogelijk is). Ook wordt aangenomen dat de maximum pompcapaciteit gelijk is aan 260 m³/s, die indien nodig meteen beschikbaar is. Als de buitenwaterstand 2.7 m+NAP overschrijdt, wordt de pompcapaciteit echter op 0 gesteld (te hoge buitenwaterstand om te kunnen pompen).

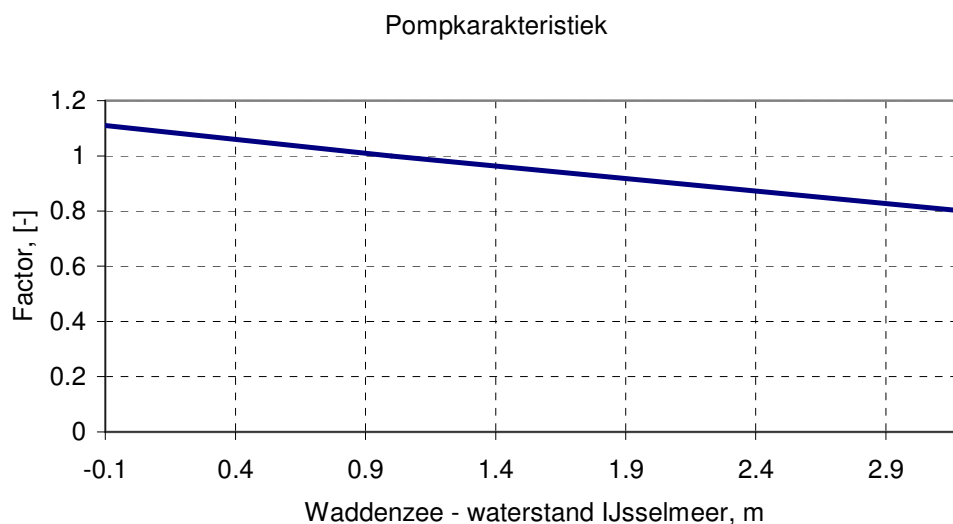
5.4 Eventuele pompen Afsluitdijk en Houtribdijk

5.4.1 Pompen Afsluitdijk

In de toekomst worden wellicht bij Den Oever pompen ingebouwd, welke situatie in DEZY is geïmplementeerd. Naar verwachting wordt dat gedaan op zo'n manier dat deze in bedrijf worden gesteld zodra een zeker aanslagpeil m_{aanslag} wordt overschreden. Zolang het IJsselmeerpeil onder deze waarde blijft, worden de pompen niet in bedrijf gesteld en blijft spuien onder vrij verval mogelijk. Er wordt derhalve uitgegaan van 'uithijsbare pompen', zodat ook na plaatsen van de pompen het spuien onder vrij verval niet wordt gehinderd. In model DEZY is conform [Van Meurs et al, 2014] de waarde $m_{\text{aanslag}} = -0.32$ m+NAP aangenomen. Overigens is in DEZY deze parameter instelbaar.

Daarnaast wordt aangenomen, eveneens conform de genoemde referentie, dat de pompen slechts in bedrijf (kunnen) zijn tot een waterstand op de Waddenzee van 2.5 m+NAP; de pompen slaan dan af omdat de noorderschuif dan sluit. Er wordt in het model, eveneens volgens deze referentie, een maximum spuidebiet van 523.6 m³/s aangenomen. N.B. Ook deze parameter is in het model in te stellen.

⁸ Om programmeertechnische redenen wordt in het programma hiertoe een fictieve bodemhoogte $h_{\text{bodem}} = -5.3$ m+NAP aangenomen, in combinatie met formule (5.4). Voor bijvoorbeeld een binnenwaterstand van -0.3 m+NAP volgt dan $H_{\text{bi}} = -0.3 - (-5.3) = 5.0$ m, zodat het zoutslot volgens formule (5.4) gelijk wordt aan $0.024 * 5.0 = 0.12$ m. Overigens is de werkelijk aanwezige bodemhoogte volgens [Pengel en Geerse H, 2001] gelijk aan -9.25 m+NAP.



Figuur 5-3 Weergave pompkarakteristiek.

De feitelijke pompcapaciteit is enigszins afhankelijk van het verval: naarmate de Waddenzee hoger is, wordt de pompcapaciteit kleiner. Het verband dat in het model wordt aangenomen is, voor situaties dat niet kan worden gespuid, overeenkomstig Figuur 5-3 (getallen afgelezen uit Figuur C-1 van [Van Meurs et al, 2014]).

Opmerking

In DEZY is het ook mogelijk te rekenen met pompen bij Kornwerderzand, met een instelbaar (maximum) pompdebiet. De pompkarakteristiek en het aanslagpeil dienen echter hetzelfde te zijn als voor Den Oever.

5.4.2 Pompen Houtribdijk

In DEZY kan optioneel worden gerekend met (fictieve) pompen bij de Krabbersgat- en Houtribsluizen. Instelbaar in het model zijn: het aanslagpeil, dat voor beide locaties gelijk dient te zijn en het (maximale) pompdebiet, dat per locatie kan verschillen. De pompkarakteristiek is onafhankelijk van het verval genomen (de factor uit Figuur 5-3 is gelijk aan 1).

6 Keuze modelparameters

In dit hoofdstuk worden allerlei modelparameters behandeld, die deels ontleend zijn aan de waterbalansen van het IJssel- en Markermeer. Ook wordt aangegeven welke statistische gegevens en tijdsverlopen voor de afvoeren en de neerslag worden gebruikt.

6.1 Grootte afwaterende gebieden en gegevens waterbalans

6.1.1 IJsselmeer

De neerslag die boven het noorden van Nederland valt, komt deels via gemalen en spuisluizen tot afwatering op het IJsselmeer. N.B. Het betreft hier de neerslag die niet via de Vecht- en IJsselafvoer op het IJsselmeer tot afstroming komt. In [Geerse en Kuijper, 2014] is geschat (a) welke gebieden afwateren op het IJsselmeer, (b) wat hun oppervlakte is en (c) welk deel van het gebied daadwerkelijk op het IJsselmeer afwatert. De gegevens staan in Tabel 6-1.⁹

	Totale oppervlakte gebied ha.	Factor afwatering op IJsselm. [-]	Afwaterend op IJsselm. ha.
Friesland, op de boezem afwaterend	291000	0.5	145500
Wieringermeer	20700	0.67	13800
Noordoostpolder	48000	1	48000
Oostelijk en Zuidelijk Flevoland	98000	0.20	19782
Directe neerslag op IJsselmeer	132400	1	132400
Stroink	65000	1	65000
Streukelerzijl	28840	1	28840
Mastenbroek	12557	1	12557
Sallandse Weteringen	49910	1	49910
Meppelerdiep	87088	1	87088
Totaal (afgerond)	833500	0.72	603000

Tabel 6-1 Gegevens op IJsselmeer afwaterende gebieden.¹⁰

Resumerend: van de in totaal 833.500 ha = 8335 km² die door de gebieden worden vertegenwoordigd, komt ruim 70% daadwerkelijk tot afstroming op het IJsselmeer, wat een afwaterend gebied inhoudt van A = 6030 km². N.B. De directe neerslag op het IJsselmeer is inbegrepen bij de afwaterende gebieden.

Deze getallen zijn geschat door uit te gaan van situaties met grote hoeveelheden neerslag, waarbij pompcapaciteiten zijn gebruikt om de afwateringsfactoren te schatten. Deze factoren hoeven in principe niet overeen te komen met de 'gemiddelde situatie' voor de winter, hoewel we als benadering in het vervolg van deze paragraaf deze getallen ook voor de gemiddelde situatie zullen aanhouden. In paragraaf 6.2 blijkt dat de maandsom (30-daagse som) van de neerslag die in Noord-Nederland valt gelijk is aan $g = 75$ mm. Als deze neerslag op het

⁹ Deze tabel is overgenomen uit de genoemde referentie, met dien verstande dat de factor voor gemaal Stroink nu op 1 is gezet, terwijl daarvoor aanvankelijk de waarde 0.5 was genomen. Die aanpassing is doorgevoerd op advies van Harmen Faber van RWS.

¹⁰ De afwatering via de Roggebotsluis is bevat in de afwatering vanuit 'Oostelijk en Zuidelijk Flevoland'.

afwaterend gebied met oppervlakte A valt, is dat equivalent met een gemiddeld debiet q van 175 m³/s. De precieze omrekening luidt:

$$q = \frac{gA}{1000C_{30}}, \quad \text{m}^3/\text{s}$$

g = 30-daagse neerslagsom in mm

A = oppervlakte in m²

C₃₀ = 2.59*10⁶ = aantal seconden in 30 dagen

(5.7)

Voor een goed inzicht in (de afregeling van) model DEZY is inzicht nodig in de aan- en afvoerposten van het IJsselmeer. Daartoe zijn door Rijkswaterstaat waterbalansen van het IJssel- en Markermeer toegeleverd, voor de jaren 2005 t/m 2012 [Pompert, 2014]. Op grond hiervan en het rapport [Geerse, 2006] resulteren de gegevens uit Tabel 6-2.

Aanvoeren	m3/s	Bron:
IJssel	445	Data-analyses [Geerse, 2006]
Vecht	57	Data-analyses [Geerse, 2006]
Houtribdijk	46	Waterbalans Markermeer 2005 tm 2012
Directe en indirecte neerslag	175	Berekend uit grootte afwaterend gebied
Totaal	723	
Afvoeren		
Verdamping	8	Waterbalans IJsselmeer 2005 tm 2012
Stevinsluizen Den Oever	401	Waterbalans IJsselmeer 2005 tm 2012
Lorentzsluizen Kornwerderzand	314	Waterbalans IJsselmeer 2005 tm 2012
Totaal	723	

Tabel 6-2 Aan- en afvoerposten IJsselmeer.

We merken op dat elk van de genoemde getallen een foutmarge bevat; dergelijke getallen zijn om diverse redenen slechts met een beperkte nauwkeurigheid te bepalen. Verder merken we op dat in [Geerse en Kuijper, 2014] werd geschat dat de gemiddelde winterafvoer vanuit het IJsselmeer door de sluizen in de Afsluitdijk 690 m³/s bedraagt, terwijl [Van Meurs et al, 2014] uitkomt op 750 m³/s. Deze waarden zijn consistent met de opdeling van de aan- en afvoeren uit Tabel 6-2.

6.1.2 Markermeer

Voor het Markermeer staat de opdeling van de aan- en afvoerposten in Tabel 6-2. In dit geval is geen schatting gemaakt van het afwaterend gebied zoals in Tabel 6-1 voor het IJsselmeer. De grootte van het afwaterend gebied is hier zó gekozen dat de aanvoer volgens de directe en indirecte neerslag (die valt op oppervlak A) overeenstemt met de waarde 56 m³/s die volgt uit de waterbalans, zijnde het verschil tussen de totale aanvoer en de Eemafvoer. Merk op dat de sluitfout (12 m³/s) in de waterbalans vrij groot is. De aanvoer via de Nijkerkersluis (water vanuit het Veluwerandmeer) is bevat in de post 'Directe en indirecte neerslag'.

In het model wordt uitgegaan van de aanvoeren zoals weergegeven in de tabel (70 m³/s). De verdamping wordt vervolgens in rekening gebracht door op deze aanvoer 7 m³/s in mindering te brengen.

Aanvoeren	m ³ /s	Bron:
Eem	14	Data-analyses [Van Haaren en Geerse, 2015]
Directe en indirecte neerslag	56	Correspondeert met A = 1910 km ² , bij 30-daagse neerslag 76.4 mm
Totaal	70	
Afvoeren		
Krabbersgatsluizen	15	Waterbalans Markermeer 2005 tm 2012
Houtribsluizen	31	Waterbalans Markermeer 2005 tm 2012
NZK (Oranjesluis)	5	Waterbalans Markermeer 2005 tm 2012
Verdamping	7	Waterbalans Markermeer 2005 tm 2012
Sluitpost	12	Waterbalans Markermeer 2005 tm 2012
Totaal	70	

Tabel 6-3 Aan- en afvoerposten Markermeer.¹¹

6.2 Afvoer- en neerslagstatistiek

In het model wordt marginale statistiek van afvoeren en neerslag gebruikt. Dat betreft de volgende grootheden:

1. IJsselafvoer bij Olst.
2. Vechtafvoer bij Dalfsen.
3. 30-daagse neerslagsom Noord-Nederland (relevant voor afwatering op IJsselmeer).
4. 30-daagse neerslagsom Midden-Nederland (relevant voor afwatering op Markermeer).
5. 30-daagse neerslagsom West-Nederland (relevant voor afwatering op NZK).
6. Eemafvoer bij Amersfoort.

De volgende paragrafen geven nadere informatie.

6.2.1 Marginale statistiek afvoeren

Voor de statistiek van de afvoeren geldt het volgende (zie de toelichting hieronder voor de aanpak voor de lagere afvoeren):

- Voor de IJsselafvoer geldt dat vanaf terugkeertijd $T = 1$ jaar ($800 \text{ m}^3/\text{s}$) de gegevens voor de TMR2006 zijn gebruikt, afgeleid in [Geerse, 2006]. Voor lagere afvoeren is de overschrijdingsfrequentie tot aan een zekere minimumafvoer q_{\min} uitgebreid.
- Voor de Vechtafvoer geldt dat vanaf terugkeertijd $T = 1$ jaar ($180 \text{ m}^3/\text{s}$) de gegevens voor de HR2006 zijn gebruikt, afgeleid in [Geerse, 2006]. Voor lagere afvoeren is de overschrijdingsfrequentie tot aan een zekere minimumafvoer q_{\min} uitgebreid.
- Voor de Eemafvoer geldt dat vanaf terugkeertijd $T = 10$ jaar ($107 \text{ m}^3/\text{s}$) de gegevens uit de HR2006 voor de meren zijn gebruikt, afgeleid in [Lodder, 2008]. Voor lagere afvoeren is de overschrijdingsfrequentie tot aan een zekere minimumafvoer q_{\min} uitgebreid.¹²

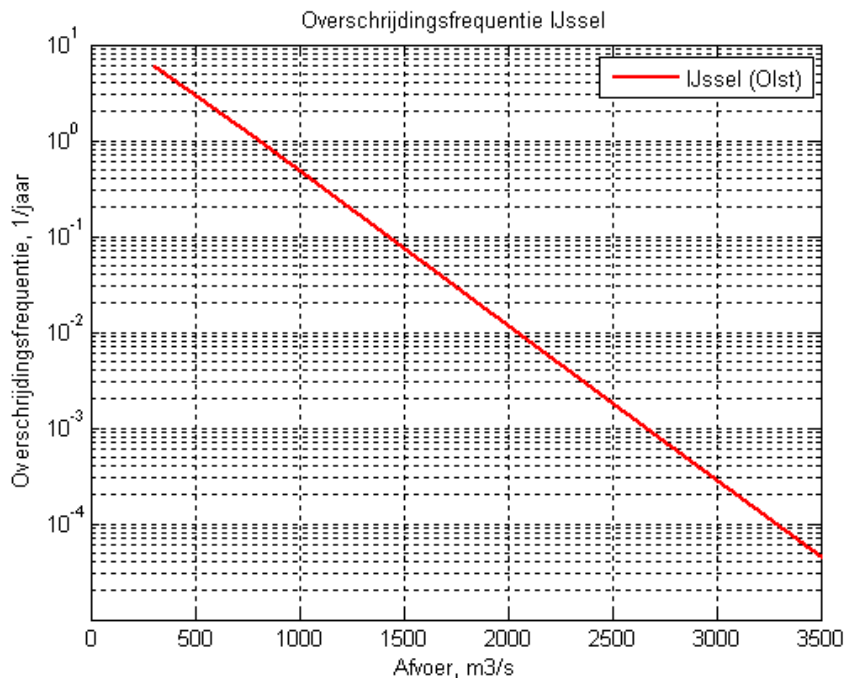
Toelichting

Overschrijdingsfrequenties van lagere afvoeren hebben nauwelijks fysieke betekenis, omdat voor dergelijke lage afvoeren nauwelijks zinvol afvoergolven zijn te onderscheiden – het afvoerverloop wordt daarvoor te onregelmatig en te grillig. Wel is van belang dat de gemiddelde

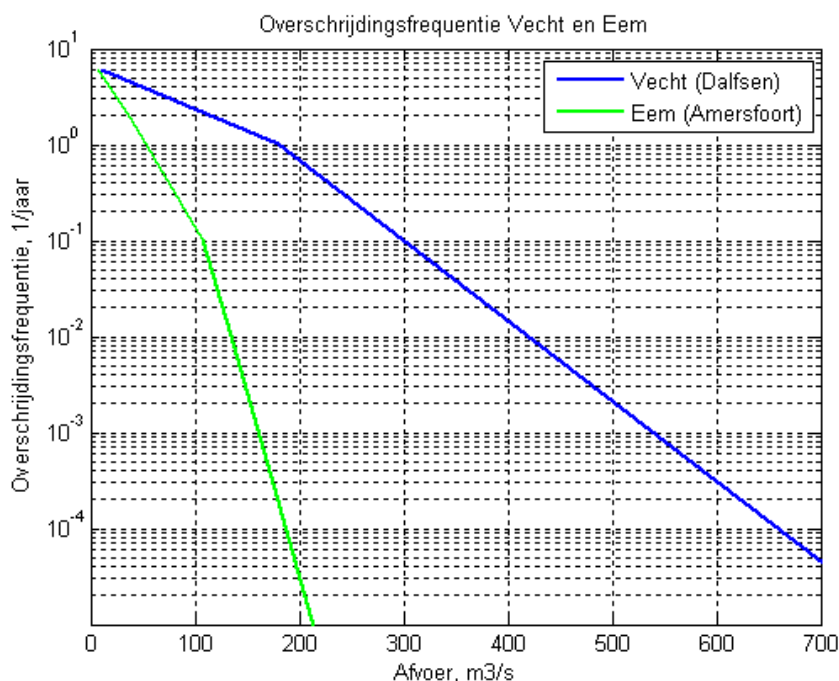
¹¹ Merk op dat de verdamping voor het Markermeer $7 \text{ m}^3/\text{s}$ bedraagt, terwijl die voor het bijna twee maal zo grote IJsselmeer met $8 \text{ m}^3/\text{s}$ nauwelijks groter is. Voor dat verschil, dat blijkt uit de respectievelijke waterbalansen, hebben we geen verklaring.

¹² In principe was de wens de gegevens uit de HR2006 te gebruiken vanaf $T = 1$ jaar ($77 \text{ m}^3/\text{s}$) i.p.v. $T = 10$ jaar. In [Van Haaren en Geerse, 2015] bleek de afvoer voor $T = 1$ jaar echter slecht te passen bij de gebruikte metingen, die leidden tot een lagere eens per jaar afvoer van $54 \text{ m}^3/\text{s}$. De verschillen zijn vermoedelijk hoofdzakelijk te wijten aan de beperkte lengte van de meetreeks, in combinatie met nogal wat hiaten in de meetdata. De resultaten van DEZY blijken echter nauwelijks gevoelig voor de keuze van de afvoer met $T = 1$ jaar; de Eem levert daarvoor een te geringe bijdrage aan de toevoer op het Markermeer.

afvoer (d.w.z. het gemiddelde van de *dagafvoeren*) overeenstemt met de data. De overschrijdingsfrequentie is steeds tot aan lagere afvoeren pragmatisch uitgebreid, maar wel op zo'n manier dat dit gemiddelde overeenstemt met de data. Zie paragraaf 6.2.4 voor meer informatie over de gemiddelde afvoer en de gebruikte minimale afvoer in het model, en voor een grafische weergave Figuur 6-1 en Figuur 6-2.¹³



Figuur 6-1 Overschrijdingsfrequentie van de IJssel.



Figuur 6-2 Overschrijdingsfrequentie van de Vecht en Eem.

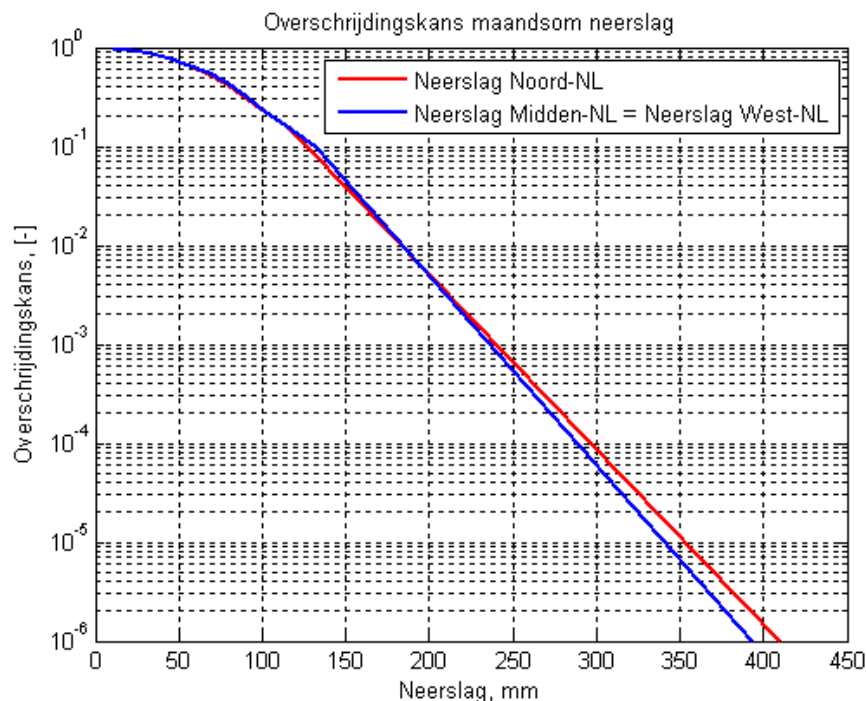
¹³ Robert Slomp van Rijkswaterstaat heeft opgemerkt dat voor de Eem in sommige studies wordt uitgegaan van een fysisch maximum van 200 m³/s. In DEZY wordt daar geen rekening mee gehouden. Het wel meenemen daarvan heeft overigens een verwaarloosbaar effect op de resultaten, enerzijds omdat de kans op overschrijden van het fysisch maximum gering is, en anderzijds omdat de Eem veel minder toevoert aan het Markermeer dan de (afwaterende) neerslag.

6.2.2 Marginale statistiek neerslag

In eerste instantie was de bedoeling neerslagstatistiek te gebruiken zoals bepaald in [Van Haaren en Geerse, 2015]. Bij nader inzien is van de precieze gegevens daaruit afgeweken. Het is gebleken dat de neerslag een toenemende trend vertoont [uit KNMI-rapporten en volgens persoonlijke communicatie met Rudolf Versteeg van HKV]. Met name ná 1950 is een stijgende trend in de neerslag te zien. Eigen analyses laten bijvoorbeeld zien dat de gemiddelde maandsom van de neerslag over de periode 1906 t/m 2014 voor Noord-Nederland 66 mm bedraagt, terwijl dat voor de periode 1980 t/m 2014 uitkomt op 75 mm: een toename van 14%. Voor Midden-Nederland volgen vrijwel dezelfde getallen, dus opnieuw een toename van circa 14%. Daarom is de neerslagstatistiek uit [Van Haaren en Geerse, 2014], afgeleid op basis van 1906 t/m 2014, op *pragmatische* wijze verhoogd met 14%. Deze statistiek wordt in het vervolg representatief geacht voor het zichtjaar 2015.¹⁴

De numerieke waarden voor de in DEZY gebruikte afvoer- en neerslagstatistiek zijn weergegeven in Bijlage A. Zie voor een grafische weergave Figuur 6-1 t/m Figuur 6-3. Hier volgen kort wat opmerkingen daarover.

De statistiek voor de neerslag is in [Van Haaren en Geerse, 2015] bepaald door een exponentiële verdeling te fitten op het hoogste deel van de neerslag (de hoogste 10%). Er is niet gekeken naar de gevoeligheid voor de keuze van de drempelwaarde, of naar andere verdelingen dan de exponentiële. De gedachte is dat voor de uitkomsten van DEZY deze aanpak voldoende nauwkeurig is. Merk ook op dat voor West-Nederland eenvoudig dezelfde verdeling is genomen als voor Midden-Nederland. Op termijn zou eventueel een verbeterde neerslagstatistiek bepaald kunnen worden.

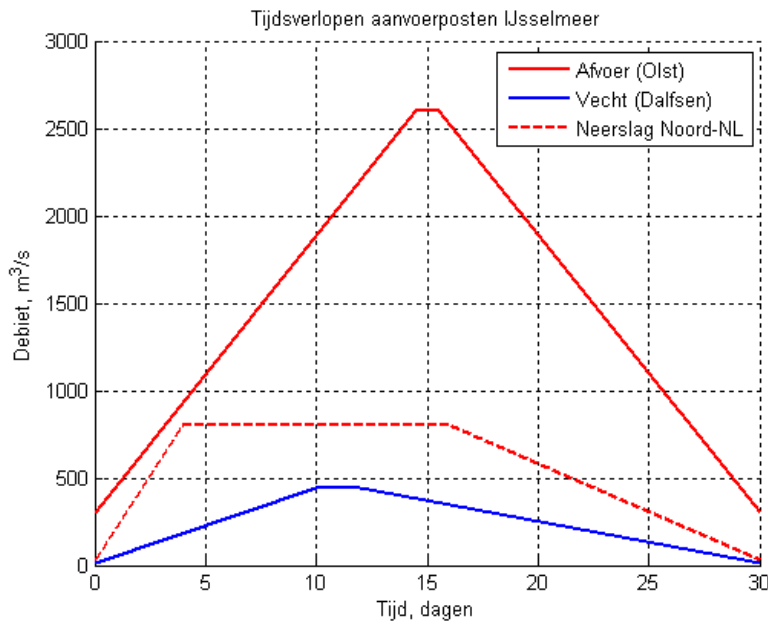


Figuur 6-3 Overschrijdingskans voor de maandsom van de neerslag in Noord, Midden- en West Nederland.

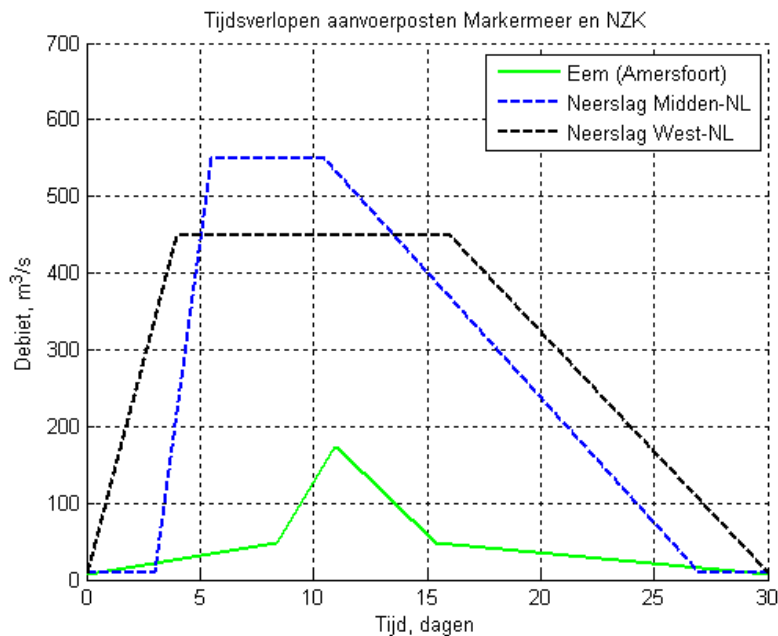
¹⁴ Een volledige trendanalyse om statistiek voor zichtjaar 2015 te bepalen, valt buiten de scope van dit project.

6.2.3 Tijdsverlopen afvoer en neerslag

Van de hiervoor genoemde grootheden zijn tijdsverlopen nodig (debiet in m³/s als functie van de tijd) voor de basisduur B = 30 dagen. Deze tijdsverlopen zijn te zien in Figuur 6-4 en Figuur 6-5. Informatie over de precieze golfvormparameters kan worden gevonden in Bijlage A en Bijlage B.



Figuur 6-4 Tijdsverlopen voor aanvoeren op het IJsselmeer.



Figuur 6-5 Tijdsverlopen voor aanvoeren op het Markermeer en NZK.

Over de tijdsverlopen voor de afvoeren wordt het volgende opgemerkt:

1. Het tijdsverloop voor de IJssel lijkt sterk op dat uit de TMR2006 voor de IJsseldelta, zoals afgeleid in [Geerse, 2006]. Alleen is de minimumwaarde van het trapezium is iets anders gekozen, om in combinatie met de gebruikte overschrijdingsfrequentie het gemiddelde van

de data te reproduceren.

2. Het tijdsverloop voor de Vecht lijkt sterk op dat uit de HR2006 voor de Vechtdelta, zoals afgeleid in [Geerse, 2006]. Alleen is de minimumwaarde van het trapezium iets anders gekozen, om in combinatie met de gebruikte overschrijdingsfrequentie het gemiddelde van de data te reproduceren.
3. Het tijdsverloop voor de Eem is op soortgelijke wijze afgeleid als dat voor de IJssel en de Vecht, dus met de zogenaamde opschalingsmethode gebruikt in [Geerse, 2006]. Merk op dat in dit geval een geknikt trapezium wordt gebruikt, omdat een ongeknikt trapezium tot te brede afvoergolven zou leiden. Het gemiddelde van de data wordt met het gebruikte tijdsverloop en overschrijdingsfrequentie correct gereproduceerd.

De tijdsverlopen voor de neerslag dienen, zoals uitgelegd in paragraaf 3.2.3, feitelijk te corresponderen met het *op het watersysteem afwaterende debiet*. Uit gevoeligheidsanalyses (zie hoofdstuk 8) blijkt dat de precieze tijdsmodellering voor met name het IJsselmeer niet nauw steekt. Dat is ook grotendeels het geval voor het Markermeer, hoewel daarvoor toch enige gevoeligheid voor het gekozen verloop blijkt. Die gevoeligheid is nog groter voor het NZK, dat echter in dit project slechts benaderenderwijs wordt behandeld. In ieder geval blijken de gekozen verlopen adequaat voor het IJssel- en Markermeer; zie voor meer informatie de gevoeligheidsanalyses in hoofdstuk 8.

6.2.4 Samenvattende gegevens afvoer en neerslag

Onderstaande tabel geeft enkele gegevens voor de afvoer en neerslag, waarbij de gegevens als volgt geïnterpreteerd moeten worden:

- Minimum
 - Voor de afvoer is dit gelijk aan de minimumwaarde in de basisduur B van zowel de piekafvoer als de dagafvoer (de waarde van waaraf het tijdsverloop begint).
 - Voor de neerslag is dit gelijk aan de minimumwaarde in de basisduur B van de *maandsom* voor een maand in het winterhalfjaar (oktober t/m maart).
- Gemiddelde
 - Voor de afvoer is dit gelijk aan de daggemiddelde afvoer in het winterhalfjaar.
 - Voor de neerslag is dit gelijk aan het gemiddelde van de maandsom voor een maand in het winterhalfjaar.
- Terugkeertijd
 - Voor de afvoer heeft deze grootheid betrekking op de piekafvoer in het whjaar.
 - Voor de neerslag heeft deze grootheid betrekking op de maandsom van een wintermaand (zie ook het voorbeeld hieronder).

De gemiddelden voor de afvoeren stemmen (inderdaad) overeen met die uit Tabel 6-2 en Tabel 6-3 terwijl de gemiddelden voor de neerslagstatistiek overeen stemmen met die uit [Van Haaren en Geerse, 2015] nadat deze met 14% zijn verhoogd zoals beschreven in paragraaf 6.2.2.

Terugkeertijd [jaar]	Afvoer IJssel [m ³ /s]	Afvoer Vecht [m ³ /s]	Afvoer Eem [m ³ /s]	Neerslag Noord-NL [mm]	Neerslag Midden-NL [mm]	Neerslag West-NL [mm]
1	800	180	54	113	114	114
10	1420	299	107	171	172	172
100	2040	419	134	227	225	225
1000	2660	538	160	284	277	277
10000	3280	658	187	340	329	329
100000	3900	777	213	397	382	382
Minimum	300	10	8	11.4	11.4	11.4
Gemiddelde	443	57	14	75	76	76

Tabel 6-4 Informatie over afvoer en neerslag zoals gebruikt in DEZY voor de basisduur $B = 30$ dagen.

Voorbeeld terugkeertijd neerslag

Voor de neerslag wordt hier een voorbeeld gegeven om de terugkeertijd van een maandsom correct te interpreteren. Beschouw voor $T = 10$ jaar, voor de neerslag in Noord-Nederland, de waarde 171 mm. Dat betekent dat gemiddeld eens in de 10 jaar een wintermaand (oktober, ..., maart) voorkomt, waarin de maandsom de waarde 171 mm overschrijdt.

7 Probabilistische formules

Dit hoofdstuk beschrijft de probabilistische formules uit model DEZY. Er wordt van de lezer wiskundige kennis van probabilistische begrippen verwacht.

7.1 Stochasten en notatie

In paragraaf 2.2 zijn de stochasten uit het model geïntroduceerd. Hier worden deze stochasten opnieuw opgesomd, en voorzien van een passende notatie (Tabel 7-1). Aan de lijst is ook de stochast Y toegevoegd die in paragraaf 3.3.2 is ingevoerd. Daarnaast is een nieuwe stochast Γ ingevoerd, die dient om in het correlatiemodel (2LijnenModel) uit paragraaf 4.2 aan te geven welke van de twee verbanden wordt beschouwd; zie onderstaand voorbeeld en Figuur 7-1. Omdat de piekafvoer K_{IJ} van de IJssel een centrale rol speelt in het model, wordt die grootte vaak ook kortweg aangeduid als K .

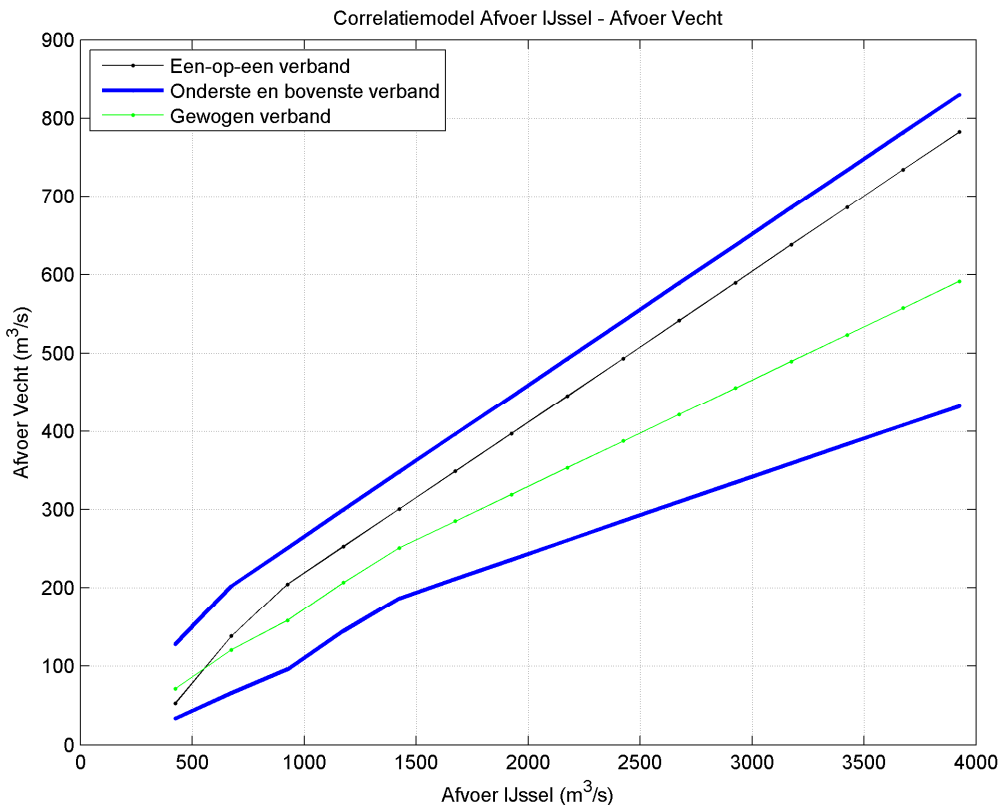
K_{IJ} of K	m^3/s	IJsselafvoer te Olst.
K_V	m^3/s	Vechtafvoer te Dalfsen
K_E	m^3/s	Eemafvoer te Amersfoort.
G_{NN}	mm	De neerslag uit Noord-Nederland die afwatert op het IJsselmeer, voor zover niet inbegrepen in de IJssel- en Vechtafvoer.
G_{NM}	mm	De neerslag uit Midden-Nederland die afwatert op het Markermeer, voor zover niet inbegrepen in de Eemafvoer.
G_{NW}	mm	De neerslag uit West-Nederland die afwatert op het Noordzeekanaal.
U	m/s	Windsnelheid station Schiphol.
R	graden	Windrichting station Schiphol.
W_{DO}	m+NAP	Buitenwaterstand te Den Oever.
W_{KWZ}	m+NAP	Buitenwaterstand te Kornwerderzand.
W_{IJMU}	m+NAP	Buitenwaterstand te IJmuiden.
Y	***	Tijdsverlopen in rekenduur B_1 voor: $u, r, W_{DO}, W_{KWZ}, W_{IJMU}$.
Γ	[-]	Nummering van het verband uit het 2LijnenModel: $\gamma = 1$ duidt het onderste verband aan en $\gamma = 2$ het bovenste.

Tabel 7-1 Stochasten en notatie.

Zoals vaker in de wiskundige literatuur worden stochasten aangeduid met hoofdletters en realisaties (uitkomsten) daarvan met de overeenkomstige kleine letters. K geeft bijvoorbeeld de piekafvoer van de IJssel aan, terwijl een realisatie $2000 m^3/s$ daarvan wordt aangeduid als $k = 2000 m^3/s$.

Voorbeeld voor stochast Γ

In paragraaf 4.2 is kort het 2LijnenModel besproken, dat aanleiding geeft tot de lijnen $w_1(v)$ en $w_2(v)$ zoals weergegeven in Figuur 4-3, met respectievelijke kansen $p = 0.6$ en $1-p = 0.4$. Beschouw nu als voorbeeld de situatie waarin $V = K$ en $W = K_V$. De blauwe lijnen uit Figuur 7-1 laten zien hoe deze lijnen er in model DEZY uitzien (de groene en zwarte lijn worden later besproken). Voor bijvoorbeeld $k = 1500 m^3/s$ levert de onderste lijn ($\gamma = 1$) dan de waarde $k_{V,\gamma=1} = 200 m^3/s$ en de bovenste ($\gamma = 2$) dan $k_{V,\gamma=2} = 365 m^3/s$. Hoe de kansen op deze waarden in DEZY zijn verwerkt staat in paragraaf 7.3.



Figuur 7-1 Voorbeeld om stochast Γ toe te lichten. N.B. De afvoeren betreffen piekwaarden.

N.B. De zwarte lijn in Figuur 7-1 geeft de situatie weer van de maximale correlatie (een zogenaamd 1-1 verband¹⁵) tussen de piekafvoeren van de IJssel en de Vecht. De groene lijn geeft de situatie weer waarbij de blauwe lijnen zijn gewogen met de kansen 0.6 en 0.4; de waarde $k = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ levert op de groene lijn de waarde $0.6 \cdot 200 + 0.4 \cdot 365 = 266 \text{ m}^3/\text{s}$. We merken op dat in DEZY de waarden volgens de zwarte en de groene lijnen niet worden gebruikt in de berekeningen voor de meerpeilstatistiek; ze dienen voor controle-doeleinden en om te illustreren dat het gewogen gemiddelde tot lagere waarden leidt dan het 1-1 verband.

7.2 Berekening van meerpeilverloop

7.2.1 Bepalen tijdsverlopen

In model DEZY moeten bij gegeven tijdsverlopen in de rekenduur B_1 van afvoer, neerslag, windsnelheid en -richting de tijdsverlopen van de meerpeilen op het IJsselmeer, Markermeer en Noordzeekanaal worden bepaald.¹⁶ Dat dient in het model conditioneel plaats te vinden bij gegeven waarden $K = k$, $Y = \gamma$ en $\Gamma = \gamma$.

In de berekening van het tijdsverloop van het meerpeil wordt de tijd t gediscrètiseerd met een stapgrootte Δt uur:

$$t_i = 0.5\Delta t + (i-1)\Delta t, \quad i = 1, 2, \dots, n \tag{6.1}$$

waarbij $n = B_1 \cdot 24 / \Delta t$. Voor bijvoorbeeld rekenduur $B_1 = 45$ dagen en $\Delta t = 3$ uur volgt $n = 360$.

¹⁵ Van een 1-1 tussen twee grootheden wordt gesproken als waarden met dezelfde terugkeertijd tegen elkaar worden uitgezet.

¹⁶ Gemakshalve wordt de waterstand op het NZK, die in het model een vlakke waterstand betreft, hier ook aangeduid als een *meerpeil*.

Bij piekwaarde k van de IJssel wordt het tijdsverloop vastgelegd door de de trapeziumparameters beschreven in paragraaf 3.1. Dat tijdsverloop wordt hier aangeduid als:

$$q_{IJ}(t_i | k), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6.2)$$

Soortgelijke tijdsverlopen resulteren, bij gegeven waarde $Y = y$, voor zeewaterstanden en de wind:

$$\begin{aligned} u(t_i | y), \quad i = 1, 2, \dots, n \\ r(t_i | y), \quad i = 1, 2, \dots, n \\ w_{DO}(t_i | y), \quad i = 1, 2, \dots, n \\ w_{KWZ}(t_i | y), \quad i = 1, 2, \dots, n \\ w_{IJMU}(t_i | y), \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (6.3)$$

Dan zijn verder nog nodig de tijdsverlopen voor de Vecht- en Eemafvoer en de neerslag. Bedenk daarbij dat als k en γ vastliggen, de volgende grootheden door berekening volgen uit de beschikbare marginale statistiek en het 2LijnenModel:

$$(k, \gamma) \Rightarrow \{k_{V,\gamma}, k_{E,\gamma}, g_{NN,\gamma}, g_{NM,\gamma}, g_{NW,\gamma}\} \quad (6.4)$$

Oftewel, voor het verband met rangnummer γ uit het correlatiemodel volgen uit de IJsselpiekafvoer k de piekafvoeren van de Vecht en Eem en de maandsommen voor de neerslag uit Noord-, Midden- en West-Nederland. N.B. De precieze berekening maakt gebruik van de formules uit het 2LijnenModel, die hier niet worden uitgewerkt.

Als de piekafvoeren van de Vecht en de Eem vastliggen, volgen de bijbehorende tijdsverlopen voor deze rivieren uit de trapeziumparameters beschreven in paragraaf 3.1. Deze tijdsverlopen worden hier aangeduid als:

$$\begin{aligned} q_V(t_i | k, \gamma), \quad i = 1, 2, \dots, n \\ q_E(t_i | k, \gamma), \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (6.5)$$

Voor de neerslag moeten de neerslagvolumes worden omgerekend naar tijdsverlopen in m^3/s zoals aangegeven in paragraaf 3.2.3. De resulterende tijdsverlopen worden aangeduid als:

$$\begin{aligned} q_{NN}(t_i | k, \gamma), \quad i = 1, 2, \dots, n \\ q_{NM}(t_i | k, \gamma), \quad i = 1, 2, \dots, n \\ q_{NW}(t_i | k, \gamma), \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (6.6)$$

Op deze manier liggen, bij gegeven $K = k$, $Y = y$ en $\Gamma = \gamma$, alle benodigde tijdsverlopen van de aanvoeren, de zeewaterstanden en de wind vast.

7.2.2 Berekening tijdsverlopen meerpeilen bij gegeven k , y , γ

Bovenstaande tijdsverlopen leiden, door gebruik te maken van de streefpeilen en het bekende beheer van de spuisluizen en pompen, tot meerpeilverlopen voor het IJsselmeer, Markermeer en NZK.

Daarbij moeten initiële peilen worden beschouwd, die invoer van DEZY vormen. Geef die initiële peilen aan als:

$$\begin{aligned} m_{IJM}(t_1) &= m_{init,IJM} \\ m_{MM}(t_1) &= m_{init,MM} \\ m_{NZK}(t_1) &= m_{init,NZK} \end{aligned} \tag{6.7}$$

Bij bekende streefpeilen en bekend beheer van de spuisluizen/pompen kan dan op ieder tijdstip het meerpeil bepaald worden. De berekeningen worden niet in detail in formules opgeschreven, maar globaal beschreven.

Stel dat, bij gegeven (k, γ, γ) , op tijdstip $t = t_{i-1}$ de meerpeilen $m_{IJM}(t_{i-1})$, $m_{MM}(t_{i-1})$ en $m_{NZK}(t_{i-1})$ bekend zijn. Dan kunnen de volgende stappen worden doorlopen:

1. Door beschouwen van de tijdsverlopen uit γ op tijdstip t_i , zie (6.3), kunnen door de in paragraaf 5.1 beschreven scheefstand in rekening te brengen de waterstanden aan de binnen en buitenzijde van de sluisen worden bepaald.
2. Door de overlaatformules uit hoofdstuk 5 te gebruiken kunnen vervolgens de debieten gedurende de duur Δt (in het tijdsinterval t_{i-1} tot t_i) worden bepaald; zie voor de details het schema in paragraaf 7.2.3.
3. Als de debieten die op een meer komen worden gesommeerd en vermenigvuldigd met Δt , volgt de volumeverandering ΔV van dat meer.
4. Door ΔV te delen door het oppervlak van het meer volgt de meerpeilverandering van dat meer. I.h.b. volgen dan $m_{IJM}(t_i)$, $m_{MM}(t_i)$ en $m_{NZK}(t_i)$.

Door dit proces te starten voor $t = t_1$, volgen de meerpeilen op t_2 . Herhalen van de stappen leveren de meerpeilen op t_3 , etcetera. Op deze manier volgens de drie meerpeilen op alle tijdstippen uit (6.1).

Als eenmaal het volledige meerpeil als functie van de (gediscretiseerde) tijd bekend is, kan uit het verloop ook het maximale meerpeil worden bepaald, dat hier wordt aangeduid als s . Voor de drie meren resulteren dan, gegeven (k, γ, γ) , de grootheden:

$$\begin{aligned} s_{IJM}(k, \gamma, \gamma) &= \max_{i=1,2,\dots,n} \{m_{IJM}(t_i | k, \gamma, \gamma)\} \\ s_{MM}(k, \gamma, \gamma) &= \max_{i=1,2,\dots,n} \{m_{MM}(t_i | k, \gamma, \gamma)\} \\ s_{NZK}(k, \gamma, \gamma) &= \max_{i=1,2,\dots,n} \{m_{NZK}(t_i | k, \gamma, \gamma)\} \end{aligned} \tag{6.8}$$

waarbij in de meerpeilverlopen de afhankelijkheid van (k, γ, γ) expliciet is aangegeven.

7.2.3 Schema voor berekening spui- en pompdebieten

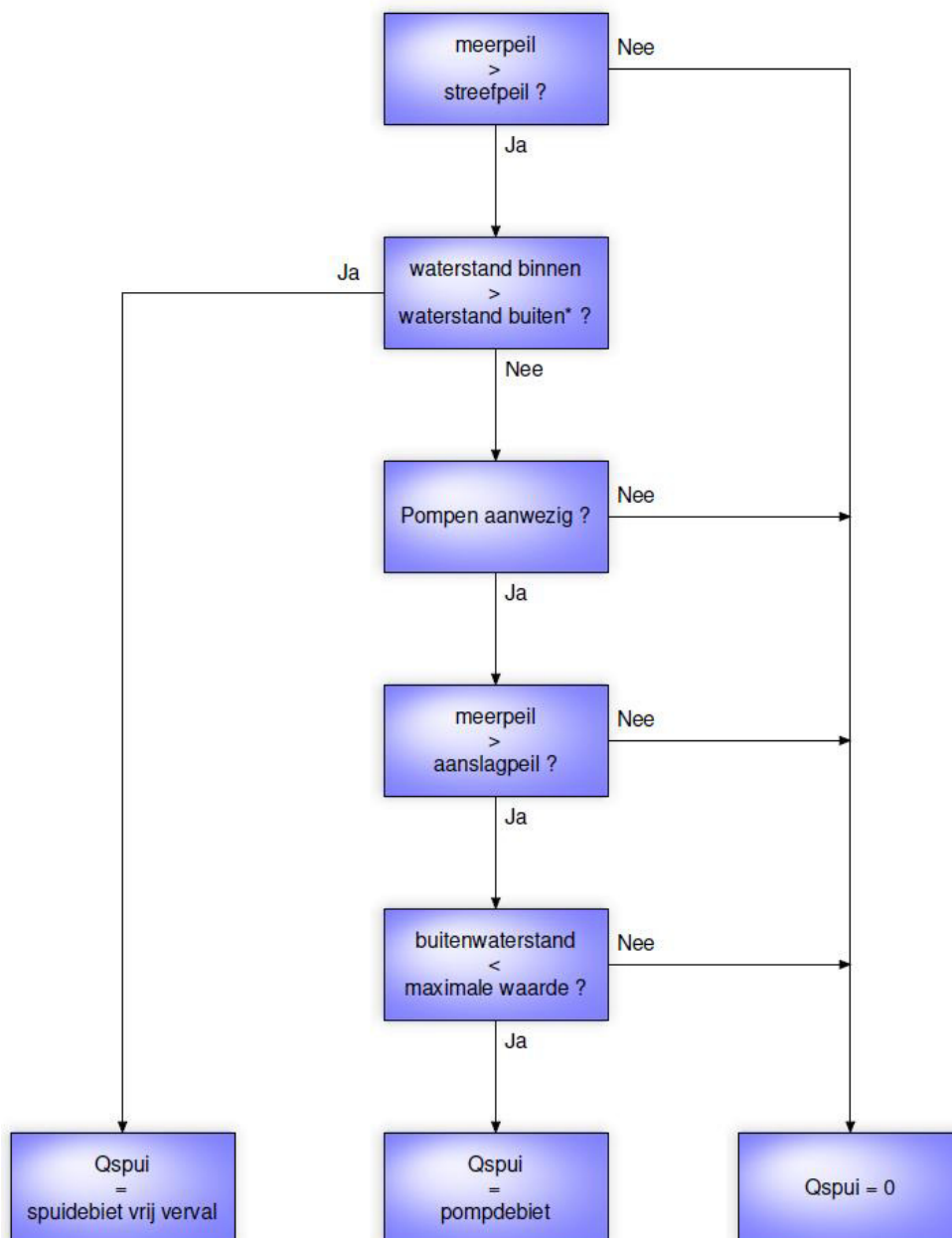
Per spuisluis wordt op ieder tijdstip t_i in het model de som van het spui- en/of pompdebiet bepaald; die som kan overigens ook $0 \text{ m}^3/\text{s}$ zijn.

Sluisen Afsluitdijk en Houtribdijk

Voor de sluisen in de Afsluitdijk en Houtribdijk (Den Oever, Kornwerderzand, Krabbersgat- en Houtribsluis) gebeurt dat volgens het schema uit Figuur 7-2. Eerst wordt bekeken of het meerpeil boven het streefpeil ligt: indien niet, dan hoeft er niet gespuid; indien wel, dan wordt gekeken of spuien onder vrij verval mogelijk is of niet. Als spuien onder vrij verval niet mogelijk is, wordt bekeken of gepompt kan worden. Het schema spreekt tamelijk voor zich, met

inachtneming van de volgende punten:

- Er wordt alleen gepompt indien het aanslagpeil (zie paragraaf 5.4) voor het betreffende meer wordt bereikt. Daarnaast is een voorwaarde dat de buitenwaterstand onder een bepaalde waarde ligt: die maximale waarde is voor Den Oever en Kornwerderzand 2.5 m+NAP (paragraaf 5.4), terwijl voor de Krabbersgat- en Houtribsluizen in het model fysisch gezien geen maximum wordt gehanteerd. In het programma is dat laatste opgelost door een extreem hoge waarde te kiezen die nooit wordt bereikt.
- Bij een overgang van zoet naar zout water, gaan bij spuien onder vrij verval de schuiven pas open als de binnenwaterstand minimaal gelijk is aan de buitenwaterstand + het zoutslot, zoals toegelicht in paragraaf 5.2.2.



*) Bij Waddenzee vervangen door: waterstand binnen > waterstand buiten + zoutslot

Figuur 7-2 Schema voor bepalen spui- en/of pompdebiet bij een sluis in de Afsluitdijk of Houtribdijk.

Oranjesluizen

Bij de Oranjesluizen is geen pomp aanwezig. In dat geval wordt alleen gekeken of het meerpeil al of niet groter is dan het streefpeil. Indien dat wel zo is – en dus de wens tot spuien richting NZK bestaat – wordt in het model bekeken of het peil op het NZK zich onder het inlaatpeil van dit watersysteem bevindt (volgens paragraaf 5.2.4 gelijk aan -0.35 m+NAP). Alleen als dat zo is wordt gespuid richting NZK.

IJmuiden

Voor IJmuiden wordt in het model in grote lijnen het schema uit Figuur 7-2 gebruikt, met dien verstande dat is aangenomen dat spuien onder vrij verval (indien mogelijk) *wordt gecombineerd* met pompen (zie ook paragraaf 5.3).

7.3 Probabilistische formules

7.3.1 Basisformules

Nu worden de basisformules uit het probabilistisch model gegeven. Deze formules hebben voor elk meer dezelfde vorm. De stochast S geeft in het vervolg het maximale meerpeil aan gedurende de basisduur. Net als hiervoor wordt met $s(k, \gamma, \gamma)$ de realisatie van deze stochast aangegeven die afhangt van (k, γ, γ) .

Centraal in de berekening staat de kans dat in de basisduur niveau s wordt overschreden:

$$P(S > s) = \text{kans dat in 30-daagse periode niveau } s \text{ wordt overschreden} \tag{6.9}$$

Als deze eenmaal is bepaald, volgt de overschrijdingsfrequentie door $P(S > s)$ te vermenigvuldigen met het aantal basisduren in het winterhalfjaar (aantal 6):

$$\begin{aligned} F(S > s) &= 6P(S > s) \\ &= \text{Overschrijdingsfrequentie van niveau } s, \text{ in keren per jaar} \end{aligned} \tag{6.10}$$

Om de kans $P(S > s)$ te vinden, moeten de kansen worden gesommeerd van alle combinaties (k, γ, γ) waarvoor $s(k, \gamma, \gamma) \geq s$. Wiskundig komt dat neer op de berekening van de volgende sommatie/integraal:

$$P(S > s) = \sum_{\gamma=1}^2 P(\gamma) \sum_{j=1}^{N_{\text{wpp}}} P(y_j) \int_{k: s(k, y_j, \gamma) \geq s} dk f(k) \tag{6.11}$$

Hierin is $f(k)$ de kansdichtheid van de piekafvoer van de IJssel te Olst, die gegeven wordt door:

$$f(k) = -\frac{dP(K > k)}{dk}, \quad k \geq q_{0,\text{min}} \tag{6.12}$$

waarin $P(K > k)$ volgt uit de gebruikte marginale afvoerstatistiek. De kans $P(y_j)$ is volgens (3.24) gelijk aan $1/N_{\text{wpp}}$. De kans $P(\gamma=1)$ is volgens paragraaf 4.2 gelijk aan 0.6, terwijl $P(\gamma=2) = 0.4$.

7.4 Numerieke uitwerking

In het computerprogramma wordt formule (6.11) numeriek bepaald, door de piekafvoer k te discretiseren met stapgrootte Δk :

$$k_i = 0.5\Delta k + (i-1)\Delta k, \quad i = 1, 2, \dots, N_Q \quad (6.13)$$

waarbij k_i dan het klassemidden vormt van het interval $[k_i - \Delta k/2, k_i + \Delta k/2]$. De kans op een piekwaarde in dit interval is dan $f(k_i)\Delta k$.

Bepaalde combinaties van (k_i, y_j, γ) leiden tot overschrijdingen van meerpeilniveau s , en andere niet. We voeren de volgende karakteristieke functie in:

$$\chi(i, j, \gamma) = \begin{cases} 1 & , \text{als } s(k_i, y_j, \gamma) \geq s \\ 0 & , \text{anders} \end{cases} \quad (6.14)$$

Dan kan (6.11) numeriek worden benaderd door:

$$P(S > s) = \sum_{\gamma=1}^2 \sum_{j=1}^{N_{ww}} \sum_{i=1}^{N_Q} P(\gamma) P(y_j) f(k_i) \Delta k \chi(i, j, \gamma) \quad (6.15)$$

Merk op dat de combinatie (k_i, y_j, γ) optreedt met kans $f(k_i)\Delta k * P(\gamma)/N_{ww}$. In het computerprogramma worden de kansen van de combinaties waarvoor niveau s wordt overschreden gesommeerd. Bovendien geeft het programma ter illustratie voor een aantal (extreme) waarden van s de tijdsverlopen die corresponderen met k_i , y_j en γ . Voorbeelden daarvan staan in paragraaf 8.3.6.

8 Afregeling en validatie model

In dit hoofdstuk wordt de afregeling en validatie van model DEZY behandeld. Eerst wordt ingegaan op de gebruikte modelversie van DEZY. Daarna wordt ingegaan op statistische gegevens uit Hydra-Zoet, waarbij twee verschillende versies daarvan aan de orde komen. Dan worden voor het IJssel- en Markermeer de meetgegevens besproken, waarbij ook een aantal data-analyses worden uitgevoerd. Vervolgens wordt voor het IJssel- en Markermeer gecontroleerd dat de modelinstellingen bevredigende resultaten geven voor deze meren, waarbij diverse gevoeligheidsanalyses worden uitgevoerd. Tot slot volgt beknopt informatie voor het NZK .

8.1 Modelversie

De afregeling en validatie zijn uitgevoerd met een modelversie en instellingen van het model die 30 april j.l. beschikbaar waren. Helaas is recent geconstateerd dat dat programma een klein foutje bevat: bij de selectie van de ww-blokken (zie paragraaf 3.3.2) worden ten onrechte geen blokken meegenomen met zowel dagen in december als in januari. Na deze constatering is die fout hersteld, en worden dergelijke blokken dus wel meegenomen in de selectie. Helaas blijken de resultaten na dit herstel iets af te wijken van de eerdere resultaten. Met name blijkt de frequentielijn voor het IJsselmeer, vanaf terugkeertijd $T = 1$ jaar, dan ongeveer 0.03 cm hoger komt te liggen, terwijl de resultaten voor het Markermeer en NZK nauwelijks veranderen.

Er is besloten de afregeling en validatie niet opnieuw uit te voeren. In Bijlage C wordt gedemonstreerd dat de nieuwe modelversie bijna exact dezelfde resultaten geeft als de versie van 30 april indien in de nieuwe versie pragmatisch wordt gerekend met 0.03 m lagere zeewaterstanden. Die 0.03 m kan worden beschouwd als het compenseren voor 'algemene modelfouten'. Zie verder hierover Bijlage C. In de rest van dit hoofdstuk en in hoofdstuk 9 wordt in ieder geval gerekend met de modelversie van 30 april.

8.2 Statistische gegevens uit Hydra-Zoet

8.2.1 Versies meerpeilstatistiek

Hierna worden (recente) meetgegevens en uitkomsten van DEZY vergeleken met statistische meerpeilgegevens die afkomstig zijn uit het programma Hydra-Zoet. Die statistische gegevens betreffen de volgende onderdelen (zie voor meer uitleg paragraaf 8.4.1):

- Overschrijdingsfrequentie, die betrekking heeft op het gemiddeld aantal meerpeilgolven per jaar waarvan de piekwaarde een gegeven niveau overschrijdt.
- Momentane overschrijdingskans, die betrekking heeft op de kans dat een dagwaarde van het meerpeil een gegeven niveau overschrijdt.
- De gemiddelde *overschrijdingsduur* van een meerpeilniveau, ook aangeduid als *overschrijdingsduur per top of nog korter als topduur*.

Daarbij wordt opgemerkt dat er voor beide meren t.b.v Hydra-Zoet twee versies van de meerpeilstatistiek bestaan:

1. *Correct afgeleide statistiek.*

Versie van de Hydra-Zoet meerpeilstatistiek die zo goed mogelijk de “werkelijke” meerpeilen beschrijft:

- a. Voor het IJsselmeer is deze statistiek afgeleid in [Geerse, 2006], met dien verstande dat het meerpeil met overschrijdingsfrequentie 1/10000 per jaar (vrijwel) overeen moest stemmen met de waarde uit Hydra-M (namelijk 1.07 m+NAP). N.B. Deze IJsselmeerstatistiek is voor de HR2006 van de Vechtdelta gebruikt en voor de TMR2006 van de IJsseldelta.
- b. Voor het Markermeer is de overschrijdingsfrequentie uit deze Hydra-Zoet statistiek afkomstig uit [Fokkink, 1997]. De overige gegevens (momentane kans en overschrijdingsduur) zijn afgeleid in het memo [Geerse, 2008]. N.B. Deze statistiek is niet gebruikt voor de HR2006 voor het Markermeer en heeft geen officiële status. Wel is deze statistiek in beleidsstudies gebruikt, zie bijvoorbeeld [Geerse en Wojciechowska, 2013; Van Meurs et al, 2014].

2. *Statistiek die incorrecte gegevens bevat, geënt op Hydra-M statistiek.*

Dit betreft een versie van de Hydra-Zoet meerpeilstatistiek die zo goed mogelijk de meerpeilstatistiek uit Hydra-M reproduceert.

- a. Voor het IJsselmeer is deze statistiek in het memo [Geerse, 2009] bepaald als een soort fit aan de Hydra-M gegevens. Deze statistiek bevat echter onjuiste duren van meerpeilgolven – die veel te kort zijn – en onjuiste momentane kansen; ook de overschrijdingsfrequentie bevat onjuistheden, met dien verstande dat het meerpeil met overschrijdingsfrequentie voor 1/10000 per jaar (1.07 m+NAP) wel redelijk gekozen lijkt.
- b. Voor het Markermeer is deze statistiek in het memo [Geerse, 2008] bepaald als een soort fit aan de Hydra-M gegevens. De overschrijdingsfrequentie stemt overeen met die uit punt 1-b hierboven; deze is ons inziens op een correcte manier bepaald. De duren van meerpeilgolven zijn echter, net als voor het IJsselmeer, veel te kort en ook de momentane kansen zijn onjuist.

Hoewel de statistiek uit punt 2 evidente fouten bevat, is beleidsmatig toch gekozen voor het hanteren van deze statistiek in de HR2001/HR2006 voor beide meren. Zie voor een toelichting op de fouten in de afleiding van de statistiek voor het IJsselmeer paragraaf 5.6 uit [Geerse, 2006].

Als voorbeeld van de te korte duren noemen we hier de meerpeilgolf uit november 1998. Tijdens deze golf werd het niveau 0.40 m+NAP gedurende 9 dagen overschreden. Volgens de Hydra-M statistiek heeft dit niveau echter een overschrijdingsduur van circa 0.5 dag: de duur volgens Hydra-M is dus een factor 18 korter dan opgetreden tijdens deze golf. Dat laatste vormt (inderdaad) een sterke aanwijzing dat de duur uit de Hydra-M statistiek voor het IJsselmeer niet juist kan zijn. Voor het Markermeer is dezelfde (onjuiste) werkwijze gevolgd bij het bepalen van duren en momentane kansen als voor het IJsselmeer, met ons inziens als gevolg ook volkomen foutieve duren en momentane kansen. Informatie over de topduren volgens Hydra-M en (de correcte versie van de) Hydra-Zoet statistiek wordt verderop gegeven in Figuur 8-31 en Figuur 8-33.

Opmerking

Gelukkig zijn de berekende HR voor toetspeilen en benodigde kruinhoogtes uit de HR2001/HR2006 niet dramatisch gevoelig voor de fouten in de meerpeilstatistiek. De fout in de Hydra-M statistiek levert volgens oriënterende berekeningen incidenteel (voor meerpeil-dominante locaties) in de *toetspeilen* een onderschatting van circa 0.1 m (voor winddominante locaties is die onderschatting kleiner). Voor het Markermeer zijn ons geen berekeningen bekend. Het is aan te raden een gevoeligheidsonderzoek uit te voeren, om in kaart te brengen in welke mate fouten in de statistiek uit punt 2 tot fouten in toetspeilen en benodigde kruinhoogtes leidt.

In het vervolg van dit rapport wordt voor de vergelijking van Hydra-Zoet statistiek met meetgegevens en met uitkomsten van DEZY in de regel de (correct afgeleide) statistiek uit punt 1 beschouwd. De statistiek uit Hydra-M wordt slechts incidenteel genoemd (in paragraaf 8.6).

8.2.2 Onzekerheden in de meerpeilstatistiek uit Hydra-Zoet

Hiervoor is gesproken over de 'correct afgeleide' versie van de meerpeilstatistiek. Het feit dat de afleiding op (ons inziens) correcte wijze is gebeurd, betekent echter niet dat de uitkomsten van de statistiek zonder meer de werkelijkheid representeren. Het is nu eenmaal niet mogelijk om statistiek voor extreme – nog nooit voorgekomen – meerpeilen met grote betrouwbaarheid te bepalen. De benodigde statistische extrapolaties, die ver uit het bereik van de metingen lopen, zijn namelijk behept met grote onnauwkeurigheden.

Neem als voorbeeld het IJsselmeerpeil met overschrijdingsfrequentie 1/10000 per jaar (1.07 m+NAP). In [Geerse en Wojciechowska, 2014] worden voor dit meerpeil zogenaamde betrouwbaarheidsintervallen (BI's) afgeleid. De precieze interpretatie daarvan wordt hier niet gegeven. Wel merken we op dat uit deze BI's blijkt dat de onzekerheid in de waarde 1.07 m+NAP *meerdere decimeters* bedraagt, zowel naar beneden als naar boven.¹⁷ Voor het Markermeer (bij overschrijdingsfrequentie 1/10000 een meerpeil 0.67 m+NAP) geldt een soortgelijk resultaat.¹⁸

De grote mate van statistische onzekerheid geldt niet alleen de overschrijdingsfrequentie; ook de momentane kansen en duren van meerpeilen zijn voor de extreme meerpeilen in hoge mate onzeker.

8.3 Meetgegevens IJssel- en Markermeer

8.3.1 IJsselmeer

Voor het IJsselmeer zijn als basis dagwaarden gebruikt uit de volgende bronnen:

- Periode 01-01-1976 t/m 31-09-2005: uit [Geerse, 2006].¹⁹
- Periode 01-10-2005 t/m 31-12-2012: uit ISWP, toegeleverd door Hans van Twuiver van Rijkswaterstaat.²⁰

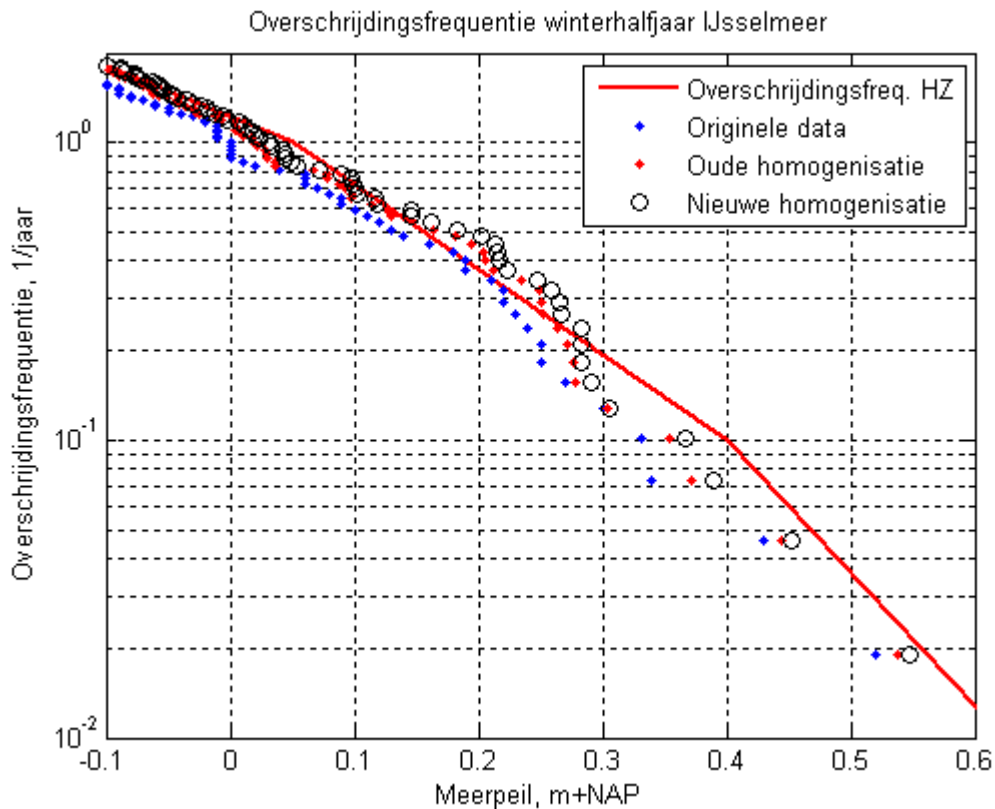
¹⁷ Het zogenaamde 90%-BI loopt voor het IJsselmeer van 0.75 m+NAP tot 1.50 m+NAP. Overigens zijn deze grenzen ook weer sterk afhankelijk van subjectieve aannames in de bepaling van de BI's.

¹⁸ Het 90%-BI voor het Markermeer loopt van 0.35 m+NAP tot 1.09 m+NAP.

¹⁹ Er is slechts één wijziging aangebracht. Het hoogste meerpeil uit de reeks, uit november 1998, is veranderd van 0.50 m+NAP naar 0.52 m+NAP dat voorkomt in de toegeleverde ISWP-gegevens.

²⁰ In feite bestond de toelevering uit een langere datareeks, vanaf 1976. Omdat daarin hiaten voorkwamen, is gebruik gemaakt van eerdere metingen waarin dergelijke hiaten zijn opgevuld door interpolatie uit omliggende waarden. Hetzelfde geldt voor de hierna genoemde Markermeerdata.

Op de data uit eerstgenoemde periode is in [Geerse, 2006] een bepaalde trendhomogenisatie uitgevoerd, waarbij is aangenomen dat het meerpeil (gemiddeld) per jaar toeneemt met 0.11 cm/jaar, bij een zeespiegelstijging van 0.2 cm/jaar. Een meerpeilmeting die bijvoorbeeld 10 jaar terug ligt in de tijd t.o.v. het beschouwde zichtjaar 2011, wordt dan met $10 \cdot 0.11 = 1.1$ cm verhoogd.



Figuur 8-1 Meerpeilpieken IJsselmeer, voor de originele data en de oude en nieuwe homogenisatiemethode. Zichtjaar 2015.

Inmiddels is op grond van berekeningen met het (nieuwe) model DEZY duidelijk dat met name de hogere meerpeilen meer gecorrigeerd moeten worden dan met de genoemde stijging van 0.11 cm/jaar; in de hogere meerpeilen blijkt circa 85% van de zeespiegelstijging van 0.2 cm/jaar terug te zien, oftewel $0.85 \cdot 0.2 = 0.17$ cm/jaar. Zonder verder op de details in te gaan, worden de resultaten gepresenteerd in Figuur 8-1. De rode lijn geeft overschrijdingsfrequentie uit Hydra-Zoet (correcte versie uit punt 1 van paragraaf 8.2.1), die in [Geerse, 2006] is bepaald als fit aan de rode punten.²¹ In het vervolg wordt gebruik gemaakt van de nieuwe homogenisatie, geldig voor zichtjaar 2015.

Opmerking: correctie onterechte spui IJssel- naar Markermeer overgang 1993-1994

Eind december 1993 is, hoewel strijdig met de beheerregels, in de periode van 23 tot 27 december vanuit het IJsselmeer water afgelaten op het Markermeer, zie bijvoorbeeld Bijlage E uit [Van Meurs et al, 2014]. Daarbij is naar schatting het piekmeerpeil van het Markermeer verhoogd met 0.11 m, terwijl het piekmeerpeil van het IJsselmeer daardoor verlaagd is met circa 0.06 m. De in dit project gebruikte (ongehomogeniseerde) dagmetingen van het IJssel- en Markermeer zijn hiervoor *pragmatisch* gecorrigeerd, door integraal de metingen in de periode

²¹ Strikt genomen is dat niet helemaal juist, omdat in de genoemde referentie slechts data t/m september 2005 zijn gebruikt, met een afwijkend zichtjaar, namelijk 2011.

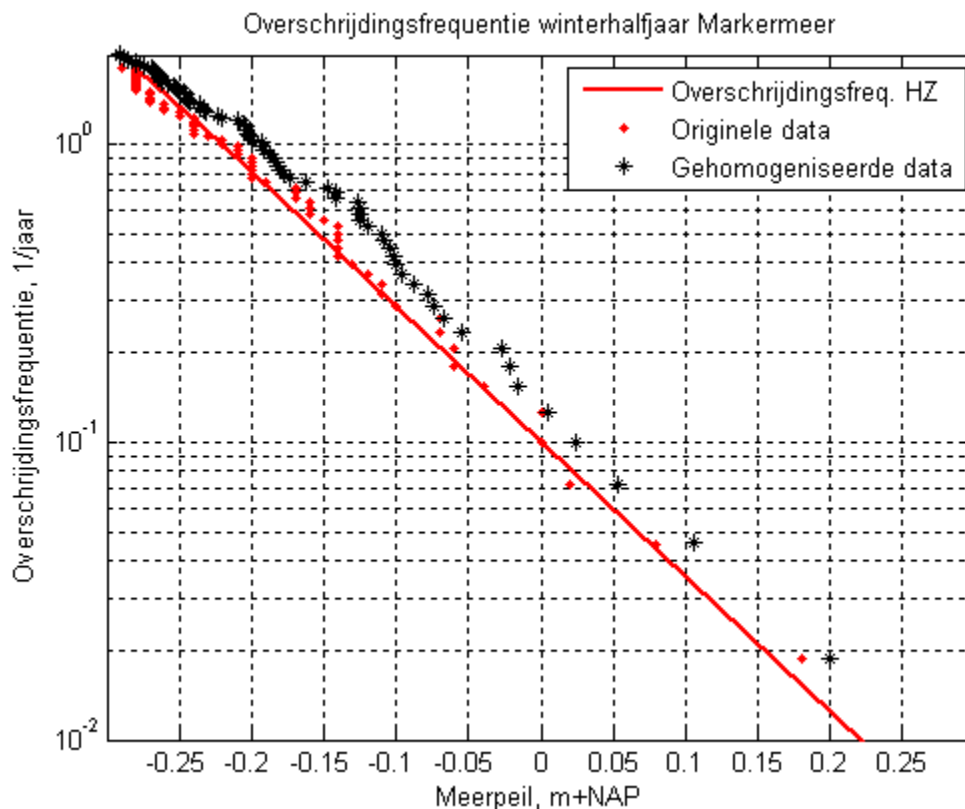
23-12-1993 t/m 15-02-1994 voor het IJsselmeer met 0.06 m te verhogen en die voor het Markermeer met 0.11 m te verlagen. Bedenk hierbij dat met name de inlaat op het Markermeer lang doorwerkt, en meerdere weken na het inlaten op dat meer effect heeft.

8.3.2 Markermeer

Voor het Markermeer zijn als basis dagwaarden gebruikt uit de volgende bronnen:

- Periode 01-01-1976 t/m 31-12-2007: deze data zijn indertijd aan HKV toegeleverd door Dirk Vlag van Dienst IJsselmeergebied Watersystemen.
- Periode 01-01-2008 t/m 31-12-2012: uit ISWP, toegeleverd door Hans van Twuiver van Rijkswaterstaat.

Hierop is een soortgelijke homogenisatie toegepast als voor de IJsselmeerdata, door in rekening te brengen dat met name de hoogste meerpeilen het meest beïnvloed worden door zeespiegelstijging (waarin 60% van de zeespiegelstijging is terug te zien). Zonder op details van de homogenisatie in te gaan, worden de resultaten gepresenteerd in Figuur 8-2. De rode lijn geeft de overschrijdingsfrequentie uit Hydra-Zoet (correcte versie uit punt 1 van paragraaf 8.2.1), die in [Fokkink, 1997] is bepaald als fit aan een deel van de rode punten (punten uit de periode 1976 t/m 1995).



Figuur 8-2 Meerpeilpieken Markermeer, voor de originele en naar zichtjaar 2015 gehomogeniseerde data.

In het vervolg wordt gebruik gemaakt van de gehomogeniseerde data, geldig voor zichtjaar 2015.

8.3.3 Gemiddelden van de meerpeilen

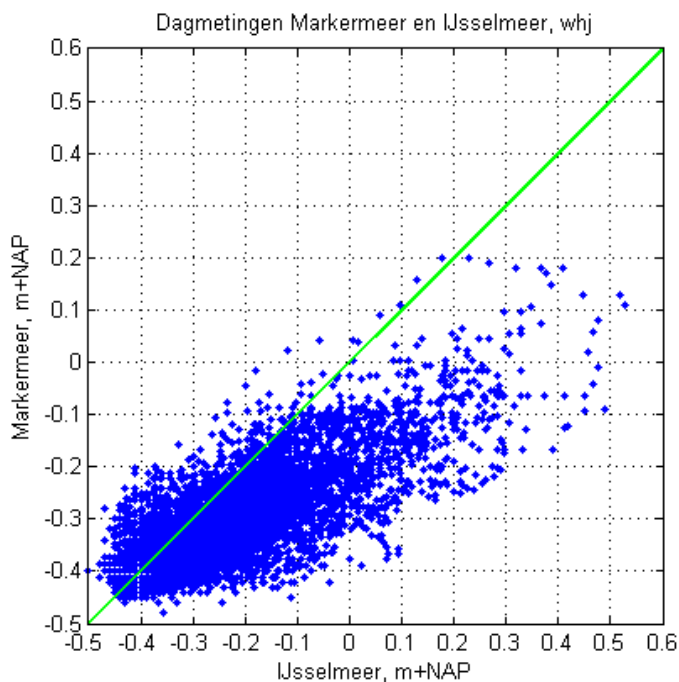
Voor de validatie van het model zijn de gemiddelden van de meerpeilen nodig. Die staan in Tabel 8-1, zowel voor de originele als de gehomogeniseerde data. In het vervolg worden alleen de gehomogeniseerde waarden gebruikt, met als gemiddelde voor het IJsselmeer -0.24 m+NAP en voor het Markermeer -0.32 m+NAP.

Data		IJsselmeer	Markermeer
Origineel	m+NAP	-0.26	-0.33
Gehomogeniseerd	m+NAP	-0.24	-0.32
Vershil (afgerond)	m	0.02	0.01

Tabel 8-1 Gemiddelden van de meerpeildata.

8.3.4 Verband dagmetingen IJssel- en Markermeer

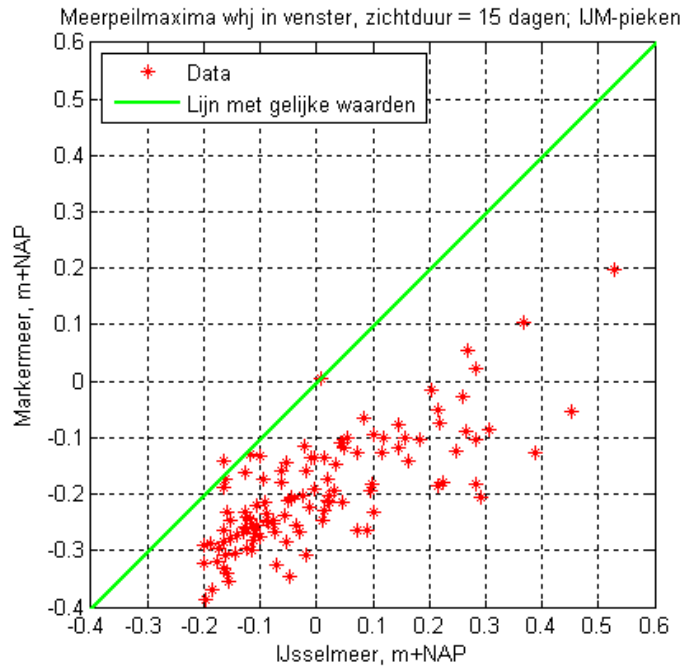
Om gevoel te krijgen voor het verband tussen IJssel- en Markermeerpeilen is een figuur gemaakt waarin dagmetingen uit het winterhalfjaar (whjaar) van beide meren tegen elkaar zijn uitgezet, voor de gehomogeniseerde data uit de periode 1976-2012 (gecorrigeerd voor aflaten water van IJssel- naar Markermeer eind 1993/begin 1994). Op de groene lijn liggen waarden met gelijke uitkomsten. Duidelijk is te zien dat het Markermeer meestal lager ligt dan het IJsselmeer. Tevens is een duidelijk positieve correlatie te zien tussen beide meren.



Figuur 8-3 Verband dagmetingen IJssel- en Markermeer.

8.3.5 Verband piekwaarden van meerpeilgolven

Behalve dagwaarden kunnen ook piekwaarden van meerpeilgolven worden beschouwd. Daartoe zijn IJsselmeerpieken geselecteerd, met een zichtduur van $z = 15$ dagen, boven een drempel van -0.20 m+NAP. Deze zichtduur betekent dat geselecteerde pieken altijd minimaal 15 dagen uit elkaar liggen, met een hoogte boven de drempelwaarde -0.20 m+NAP. Vervolgens is in het venster van 15 dagen vóór de IJsselmeerpiek tot 15 dagen ná die piek het maximale Markermeerpeil gezocht. Het resultaat levert paren van piekwaarden zoals weergegeven in Figuur 8-4.

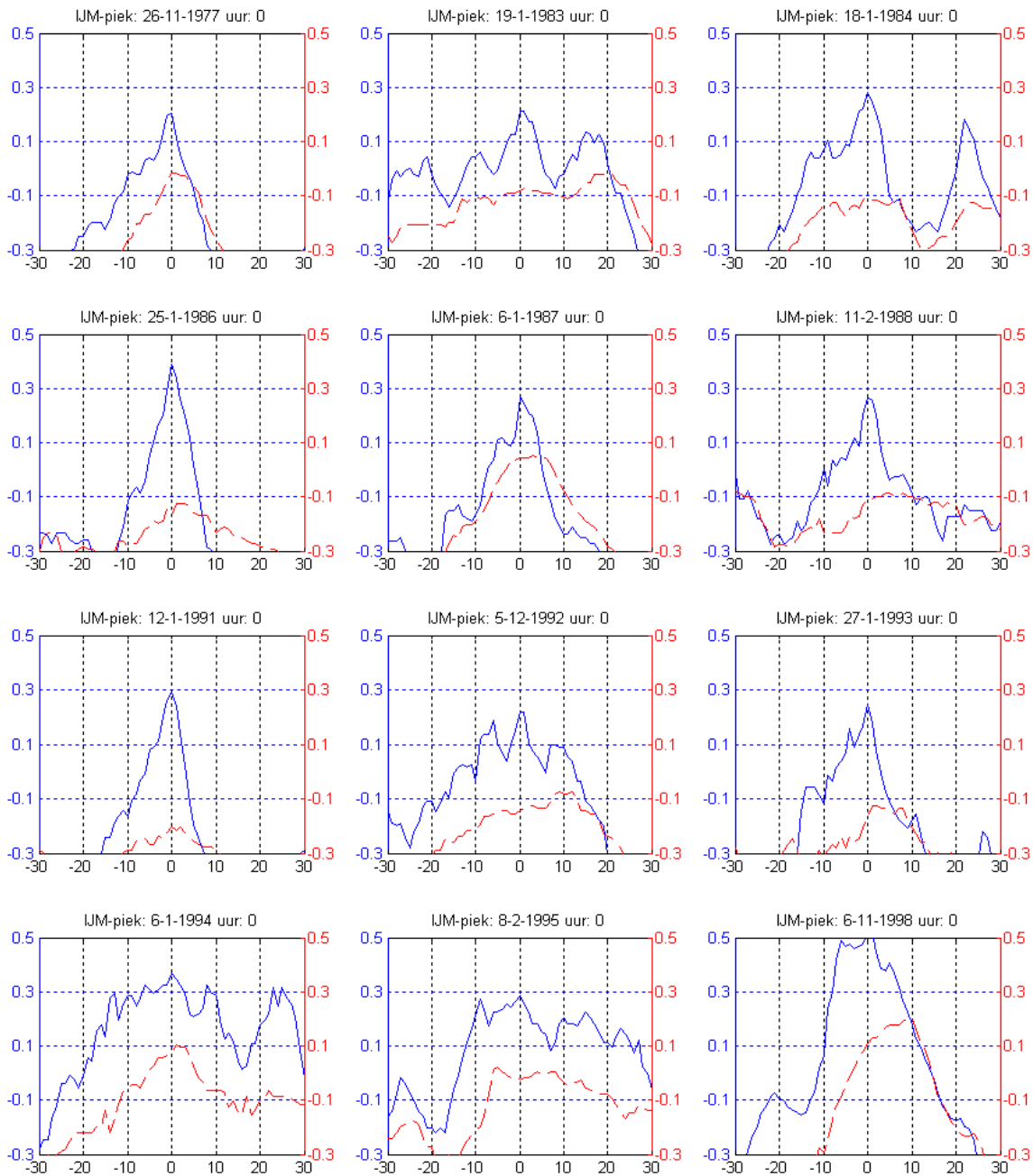


Figuur 8-4 Verband piekwaarden IJssel- en Markermeer; drempel -0.2 m+NAP, selectie op IJsselmeerpieken.

De IJsselmeerpieken liggen gewoonlijk hoger dan de Markermeerpieken, wat op grond van Figuur 8-3 voor de dagwaarden uiteraard moet worden verwacht. De trend is vergelijkbaar met die voor de dagwaarden.

8.3.6 Tijdsverlopen van meerpeilgolven

Om gevoel te krijgen voor het tijdsverloop tijdens hoge meerpeilen van beide meren zijn figuren gemaakt van hoogwaterperiodes. Daarbij zijn IJsselmeerpieken geselecteerd, met in dit geval een langere zichtduur van $z = 30$ dagen (Figuur 8-5), boven een drempel van 0.18 m+NAP. Deze zichtduur betekent dat geselecteerde pieken altijd minimaal 30 dagen uit elkaar liggen. De blauwe lijnen geven de tijdsverlopen van het IJsselmeer in het 'venster' $[-z, z]$, waarbij de piek op tijdstip $t = 0$ is gelegd, en de rode gestreepte lijnen het Markermeer.



Figuur 8-5 Tijdsverlopen IJssel- en Markermeer voor zichtduur $z = 30$ dagen.

Net als hiervoor blijken de metingen voor het Markermeer meestal onder die voor het IJsselmeer te liggen. Bij sommige golven is te zien dat het Markermeer snel daalt zodra het IJsselmeer laag genoeg is (zie de golven 3, 6, 9, 11 en 12; nummering bovenste regel van links naar rechts, dan volgende regel etcetera). Deze daling zet vaak 1 à 2 weken later in dan het peiktijdstip van het IJsselmeer, en is het gevolg van lozen onder vrij verval van het Markermeer naar het IJsselmeer.

8.3.7 Keuze basisduur B en rekenduur B_1

In statistiek voor Hydra-Zoet wordt voor het IJsselmeer een basisduur van 30 dagen gebruikt en voor het Markermeer een duur van 60 dagen. In principe lijkt een duur van circa 60 dagen de beste keuze: Figuur 8-5 maakt immers duidelijk dat de tijdschaal waarop de meren variëren de duur van 30 dagen geregeld overschrijdt. Er blijkt overigens niet dat voor het IJsselmeer met kortere uren gewerkt kan worden dan voor het Markermeer.

Het kiezen voor een langere basisduur dan 30 dagen heeft echter flinke nadelen. Ten eerste moet allerlei 'officiële' statistiek voor de IJssel en de Vecht dan opnieuw worden bepaald. Ten tweede kan in model DEZY dan geen verandering op maandniveau worden doorgevoerd; zo is het dan bijvoorbeeld niet mogelijk om in de (ene) maand maart het streefpeil op te zetten. Vandaar dat niet wordt overgestapt op een andere basisduur – die blijft 30 dagen. Een argument daarvoor is dat Figuur 8-5 laat zien, of in ieder geval suggereert, dat het meest relevante hoogste deel van een piek wél binnen duur 30 dagen valt.

Wel wordt in model DEZY de basisduur $B = 30$ dagen voorafgegaan door een soort inspeelduur t_{voor} en gevolgd door een extra duur t_{na} (zie Figuur 3-5 en Figuur 3-7). Het invoeren van duur t_{voor} is gewenst vanwege de correlatie tussen de Waddenzee en de IJssel (zie formule (4.1)), die er voor zorgt dat *voorafgaand* aan de basisduur de zeewaterstanden al aangepast worden. De duur t_{na} wordt ingevoerd omdat in principe de mogelijkheid bestaat dat het maximum van de Markermeergolf in Figuur 8-5 *meer dan 15 dagen later valt* dan het maximum van de IJsselmeergolf (dat optreedt op $t = 0$ dagen). Door het invoeren van de extra duur t_{na} in model DEZY kan het maximum van de Markermeergolf worden opgezocht in een langer tijdsvenster. Bij de afregeling van het model die nu volgt, worden deze zaken toegelicht met figuren.

In DEZY is gekozen voor $t_{\text{voor}} = 7$ dagen en $t_{\text{na}} = 8$ dagen, waarmee de rekenduur uitkomt op $B_1 = 7 + 30 + 8 = 45$ dagen.

8.4 Validatie IJssel- en Markermeer

In deze paragraaf wordt gecontroleerd dat de keuzes van de statistische en modelparameters (waaronder de basis- en rekenduur) uit de voorgaande paragrafen en hoofdstukken voldoen: het blijkt dat het model dan goed overeenstemt met de data (zie voor een opsomming van de gebruikte parameters Bijlage B). Deze parameters worden aangeduid als de *standaardkeuze*.

N.B. Ten opzichte van de lengte van de meetperiode voor de ww-blokken (zie paragraaf 3.3.2) wordt in de standaardkeuze echter één uitzondering gemaakt: i.p.v. de volledige lengte 1951 t/m 2010 wordt uitgegaan van de kortere periode 1981 t/m 2010. De belangrijkste reden is het bekorten van de rekentijd (die halveert ongeveer bij beschouwen van de kortere periode: van circa 6 minuten naar circa 3 minuten op een standaard PC). Bijkomend voordeel is dat voor Kornwerderzand werkelijk gemeten uurwaarden gebruikt kunnen worden en geen gebruik hoeft te worden gemaakt van de omrekening uit Den Oever volgens formule (3.22).

Uitgaande van de standaardkeuze wordt gecontroleerd dat bepaalde statistische eigenschappen uit de data en het model (bij de gekozen parameters) overeenstemmen met elkaar. Vervolgens wordt onderzocht in welke mate bepaalde modelparameters van invloed zijn op de uitkomsten van het model.

8.4.1 Enkele statistische begrippen uit de meerpeilstatistiek

Nu worden drie begrippen uit de meerpeilstatistiek beschreven:

- overschrijdingsfrequentie
- momentane kans
- overschrijdingsduur per top (kortweg topduur).

De overschrijdingsfrequentie staat centraal in dit rapport; deze is voor praktische toepassingen het meest van belang. Het grootste deel van de validatie wordt uitgevoerd voor de overschrijdingsfrequentie, waarna ter controle wordt bekeken hoe de momentane kans en de topduur volgens model en metingen zich verhouden.

Overschrijdingsfrequentie $F(S>s)$, in keren/jaar

Deze grootheid geeft per meerpeelniveau s het aantal overschrijdingen van het piekmeerpeil in keren per winterhalfjaar. $F(s)$ wordt ook kortweg aangeduid als de *frequentielijn* of soms als de *werklijn*.

Momentane overschrijdingskans $P(M>m)$, dimensieloos

Deze grootheid geeft het gemiddeld aantal dagen in het winterhalfjaar dat niveau m wordt overschreden. $P(M>m)$ kan ook worden opgevat als de (gemiddelde) fractie van de tijd dat niveau m wordt overschreden. Stel als voorbeeld dat $P(M> -0.1 m+NAP) = 0.15$. In dat geval is de kans dat een willekeurige dagwaarde van het meerpeil niveau $-0.1 m+NAP$ overschrijdt gelijk aan 0.15; tevens wordt dit niveau dan gemiddeld gedurende 15% van de tijd overschreden.

Overschrijdingsduur per top $d(m)$, in dagen

Dit is de gemiddelde duur dat niveau m wordt overschreden binnen meerpeilgolven waarvan de piekwaarde s groter is dan m . N.B. Het betreft hier meerpeilgolven in het winterhalfjaar.

De laatste grootheid kan worden berekend uit $F(s)$ en $P(M>m)$. Voordat de formule wordt gegeven volgt eerst een voorbeeld. Stel weer dat $P(M > -0.1 m+NAP) = 0.15$, en dat $F(S > -0.1 m+NAP) = 2$ keer/jaar, waarbij het jaar in dit geval feitelijk een winterhalfjaar is omdat overschrijdingen in de zomer verwaarloosd worden. Omdat het winterhalfjaar bestaat uit (afgerond) 180 dagen, bevinden zich in het winterhalfjaar dan $0.15 \cdot 180 = 27$ overschrijdingsdagen. Deze dagen komen voor in (gemiddeld) 2 overschrijdingen, zodat de overschrijdingsduur per top gelijk is aan: $d(m = -0.1 m+NAP) = 27/2 = 13.5$ dagen.

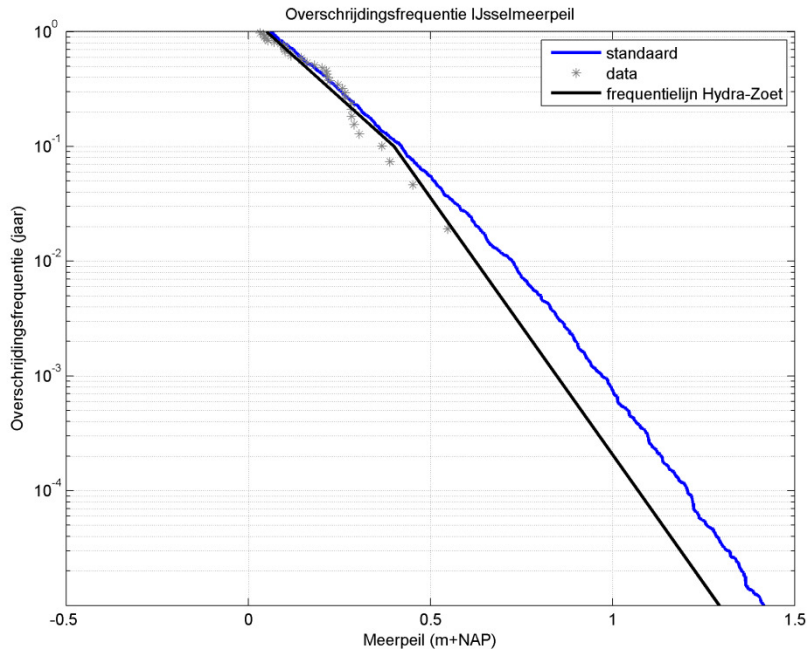
In formule geldt dus:

$$d(m) = \frac{180P(M > m)}{F(S > m)} \quad (7.1)$$

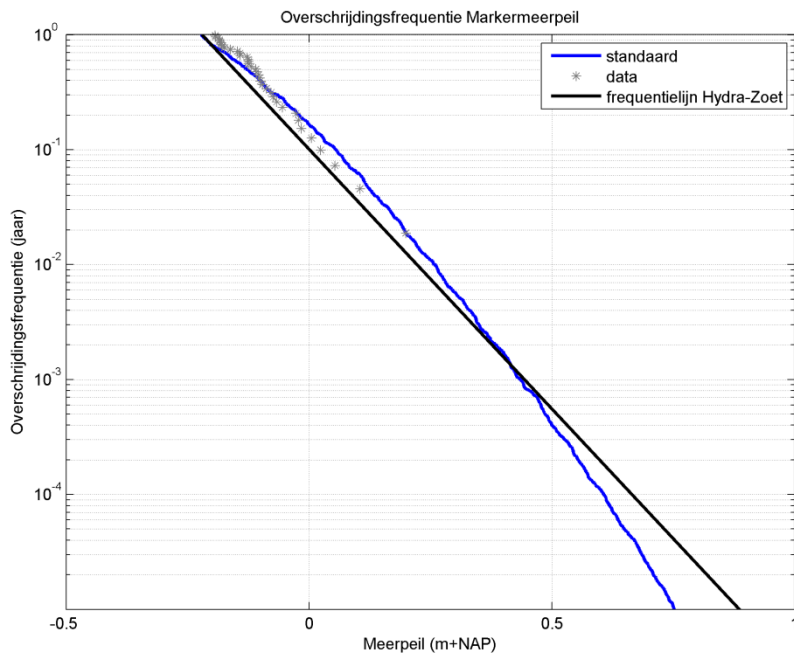
8.4.2 Frequentielijn volgens model en metingen

Als wordt uitgegaan van de hiervoor in het rapport beschouwde keuzes, levert dat voor het IJssel- en Markermeer de overschrijdingsfrequentie volgens Figuur 8-6 en Figuur 8-7. Deze figuren laten de volgende zaken zien:

- Frequentielijn zoals bepaald door het model (blauwe lijn; hiervoor aangeduid als $F(s)$).
- De frequentielijn volgens de statistiek uit Hydra-Zoet (zie paragraaf 8.3).
- De (gehomogeniseerde) data, afkomstig van zichtduur $z = 15$ dagen (zie paragraaf 8.3).



Figuur 8-6 Overschrijdingsfrequentie IJsselmeer, standaardkeuzes.



Figuur 8-7 Overschrijdingsfrequentie Markermeer, standaardkeuzes.

Het blijkt dat het model (blauwe lijn) de data behoorlijk goed representeert. Voor de hogere punten, bij overschrijdingsfrequenties in de orde 1/10 per jaar, ligt het model iets boven de waarnemingen, maar dit deel van de data wordt sterk beïnvloed door 'statistische ruis'. Oftewel, puur door toevalligheden kunnen de metingen daar onder het model liggen. Bedenk ook dat het IJssel- en Markermeer met elkaar samenhangen: als de hogere IJsselmeerpieken onder het model liggen, is het waarschijnlijk dat dat voor de hogere Markermeerpieken ook geldt.

Verder valt op dat de lagere (data)punten in Figuur 8-7, waar statistische ruis vrijwel geen rol speelt, structureel iets onder het model liggen. In paragraaf 8.4.3 blijkt dat de gebruikte tijdsdiscretisatie daarbij een rol speelt.

Wat de vergelijking tussen het model en in Hydra-Zoet gebruikte statistiek betreft kan het volgende worden opgemerkt:

- IJsselmeer
 - In het meetbereik stemt het model goed overeen met de Hydra-Zoet lijn.²²
 - In het extreme bereik (niet in de metingen aanwezig) komt het model ruim 0.1 m hoger uit.
- Markermeer
 - In het meetbereik ligt het model soms wat hoger dan de Hydra-Zoet lijn.²³ Daarbij moet bedacht worden dat de Hydra-Zoet lijn is gebaseerd op *ongehomogeniseerde* metingen; als die lijn zou worden gehomogeniseerd naar zichtjaar 2015 zou die wel nagenoeg door de data gaan lopen. In dat geval zouden het model, de data en de gecorrigeerde Hydra-Zoet lijn dicht bij elkaar komen te liggen.
 - In het extreme bereik (niet in de metingen aanwezig) komt het model lager uit dan de (ongecorrigeerde) Hydra-Zoet lijn. Dat verschil zou nog wat groter worden als de Hydra-Zoet lijn wordt gecorrigeerd naar zichtjaar 2015.

Kort samengevat is een belangrijke conclusie dat het model in het extreme bereik voor het IJsselmeer hoger uitkomt dan de Hydra-Zoet statistiek en voor het Markermeer juist lager. Gezien de grote statistische onzekerheden in de Hydra-Zoet statistiek (zie paragraaf 8.2.2) betekent het gebrek aan overeenstemming tussen DEZY en de Hydra-Zoet statistiek volstrekt niet dat de resultaten uit DEZY onjuist zouden zijn. Naar onze mening zijn de resultaten uit DEZY juist aanmerkelijk betrouwbaarder dan die volgens de Hydra-Zoet statistiek. In DEZY wordt namelijk – naast statistiek van aanvoeren – *fysica* gebruikt om de meerpeilstatistiek uit te rekenen. Een aanpak waarin fysica wordt gebruikt leidt ons inziens tot betere resultaten dan de statistische extrapolaties waarop de Hydra-Zoet statistiek is gebaseerd.

Gemiddelde volgens model en metingen

Het model dient ook de gemiddelde meerpeilen voldoende nauwkeurig te beschrijven. Dat blijkt het geval, zie Tabel 8-2. Het model komt voor het IJsselmeer slechts 0.01 m lager uit dan de metingen en voor het Markermeer 0.03 m. Dat laatste verschil blijkt overigens slechts 0.02 m te worden indien een fijnere tijdstap wordt gekozen, zie daarover paragraaf 8.4.3. Ons inziens worden de gemiddelden door het model goed gereproduceerd.

Gemiddelde		IJsselmeer	Markermeer
Data (gehomogeniseerd)	m+NAP	-0.24	-0.32
Model	m+NAP	-0.25	-0.35
Verschied	m	-0.01	-0.03

Tabel 8-2 Gemiddelde volgens model en metingen (standaardsituatie).

Figuren met tijdsverlopen

Model DEZY biedt de mogelijkheid tijdsverlopen van diverse grootheden weer te geven. Voorbeelden daarvan staan in Figuur 8-8 en Figuur 8-9, voor piekafvoer bij Olst respectievelijk 2200

²² Bedenk dat de Hydra-Zoet lijn gebaseerd is op de (oude) homogenisatie naar zichtjaar 2011, zoals beschreven in paragraaf 8.3.1.

²³ Dat blijkt nog sterker het geval te zijn bij een fijnere tijdstap zoals beschouwd in paragraaf 8.4.3.

en 2700 m³/s (laatste afvoer ongeveer gelijk aan de maatgevende afvoer van 2720 m³/s).²⁴ Deze tijdsverlopen bevatten ook de extra duren voorafgaand en volgend op de basisduur van 30 dagen.

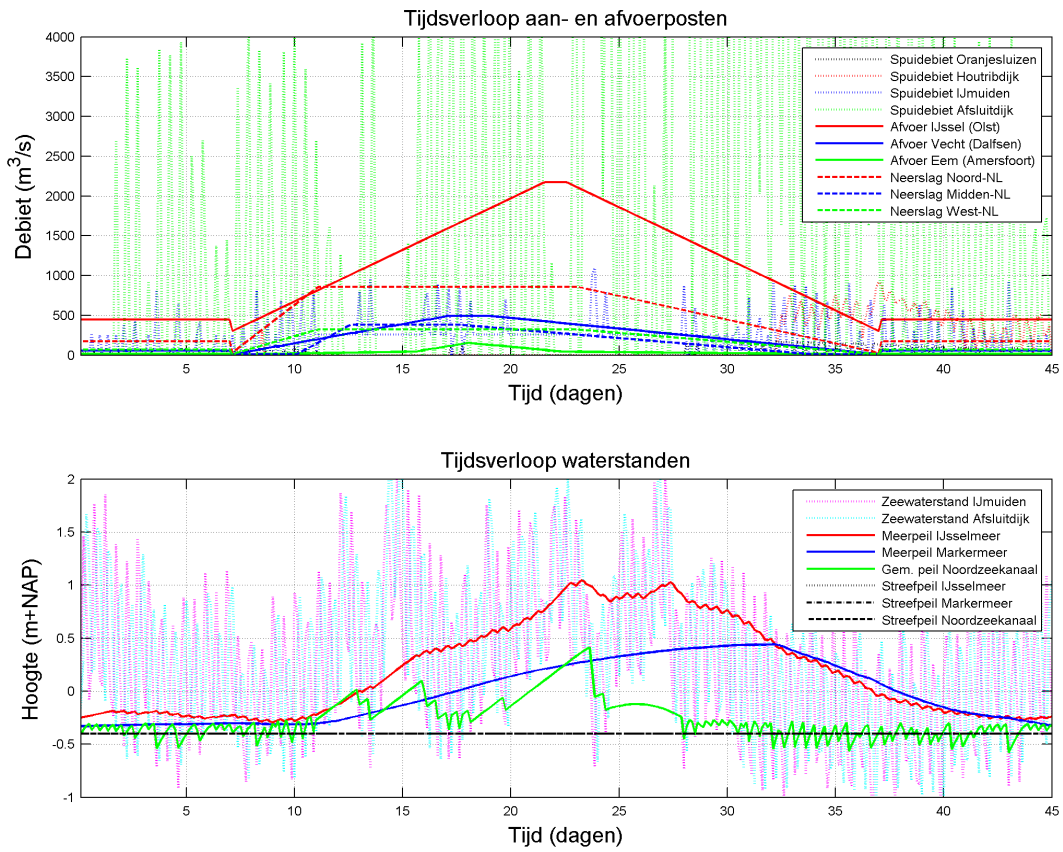
De figuren tonen de volgende gegevens:

- Bovenste panel
 - Tijdsverlopen afvoeren IJssel, Vecht en Eem.
 - Tijdsverlopen neerslag Noord-, Midden- en West-Nederland.
 - Spuidebieten:
 - Oranjesluizen.
 - Houtribdijk (gemiddelde Krabbersgat- en Houtribsluizen).
 - IJmuiden.
 - Afsluitdijk (gemiddelde Den Oever en Kornwerderzand).
- Onderste panel
 - Zeewaterstanden IJmuiden en Afsluitdijk (gemiddelde Den Oever en Kornwerderzand).
 - Meerpeilen IJssel- en Markermeer en gemiddeld peil NZK (zoals berekend door het model).
 - Streefpeilen IJssel- en Markermeer en NZK.

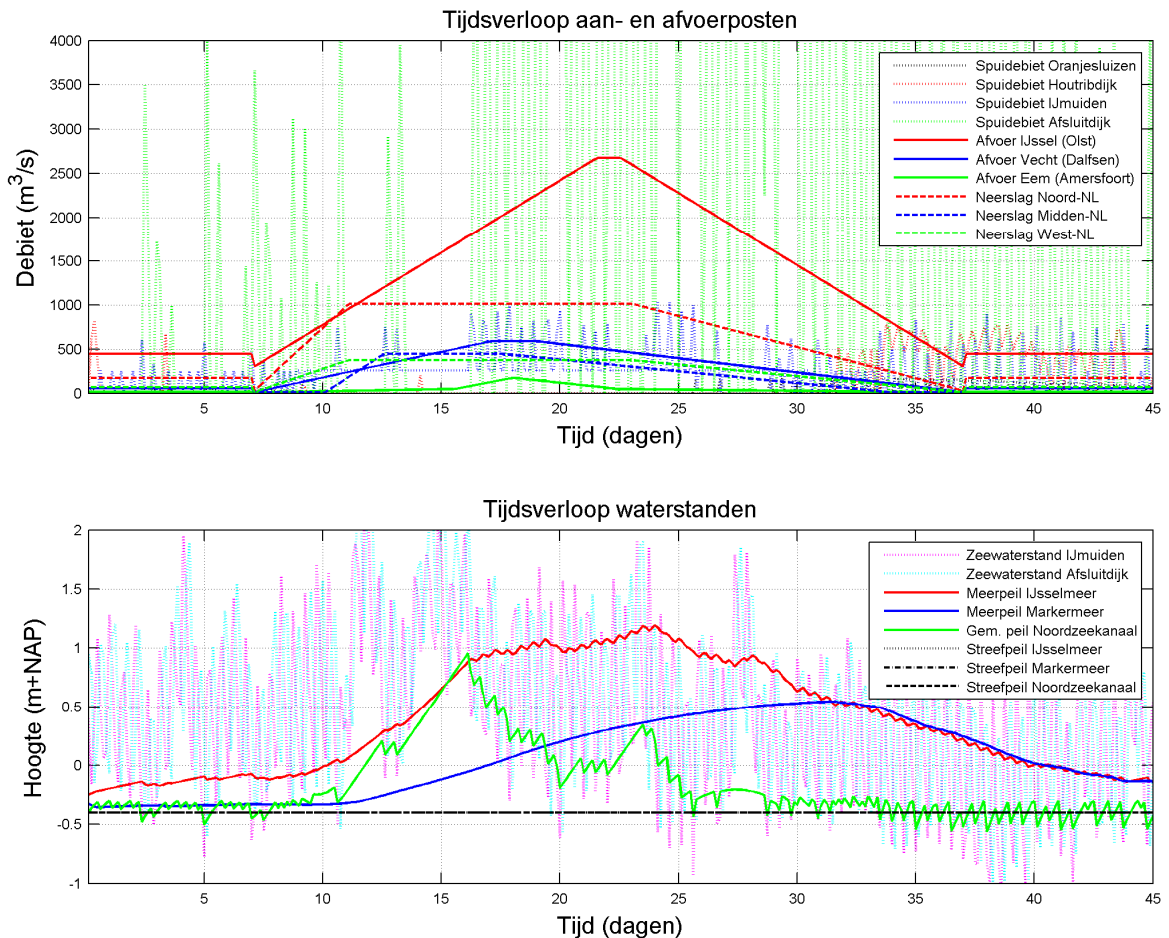
De resultaten laten zien dat de volledige IJssel- en Markermeergolven ruim een maand duren, terwijl het NZK kortere pieken heeft. Merk ook op dat het Markermeer langzaam oploopt tot het moment dat het kan spuien op het IJsselmeer, in overeenstemming met de opmerkingen over Figuur 8-5.

Wat verder opvalt is dat het NZK regelmatig tot onder het streefpeil daalt, wat niet zou moeten kunnen. Zie daarover paragraaf 8.4.3.

²⁴ in beide gevallen betreft het verbanden volgens de hoogste lijn uit het 2LijnenModel uit paragraaf 4.2.



Figuur 8-8 Tijdsverlopen bij piekafvoer IJssel gelijk aan 2200 m³/s.

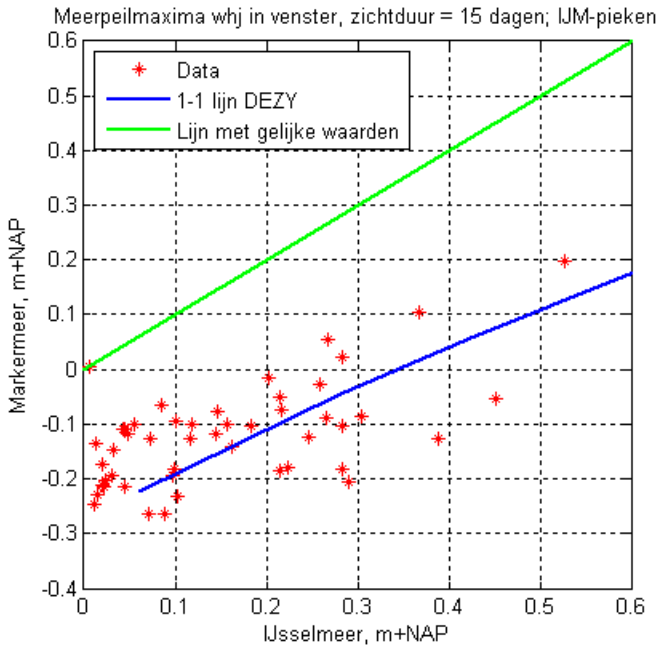


Figuur 8-9 Tijdsverlopen bij piekafvoer IJssel gelijk aan $2700 \text{ m}^3/\text{s}$.

Vergelijking IJssel- en Markermeer

Het is illustratief om het verband tussen IJssel- en Markermeerpieken volgens de data te vergelijken met het 1-1 verband volgens DEZY (Figuur 8-10). Deze figuur toont dezelfde gegevens als Figuur 8-4, maar nu met de 1-1 lijn volgens DEZY toegevoegd (de blauwe lijn volgt door meerpeilen met dezelfde terugkeertijd aan elkaar te koppelen). De overeenstemming blijkt uitstekend.²⁵

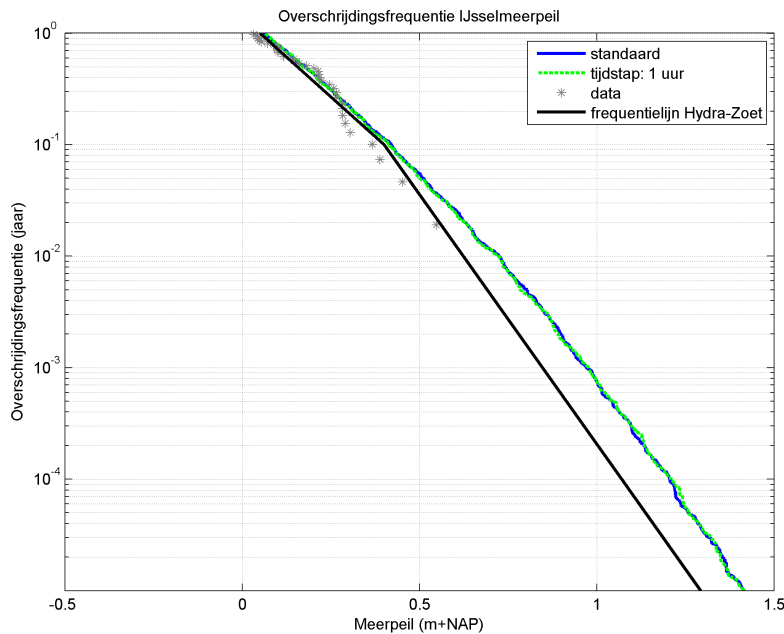
²⁵ Strikt genomen moeten de data niet worden vergeleken met de 1-1 lijn uit DEZY. In plaats daarvan moet bij iedere IJsselmeerpiek uit figuren zoals Figuur 8-9 de bijbehorende Markermeerpiek worden gezocht; de aldus resulterende puntenparen moeten worden uitgezet en vergeleken met de data. De verwachting is echter dat de 1-1 lijn uit DEZY het gemiddelde van deze puntenparen uit het model redelijk goed beschrijft.



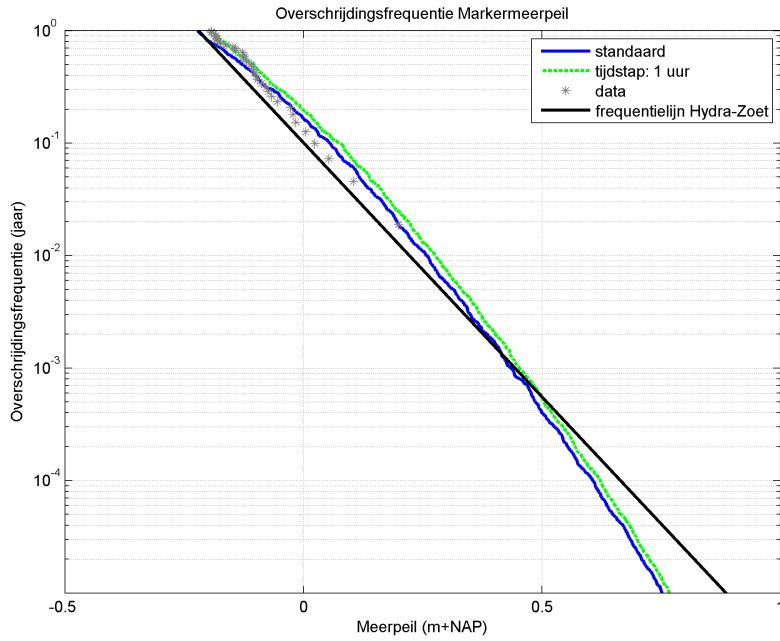
Figuur 8-10 Verband piekwaarden IJssel- en Markermeer (zichtduur $z = 15$ dagen) met 1-1 lijn uit DEZY.

8.4.3 Gevoeligheid voor de tijdstap

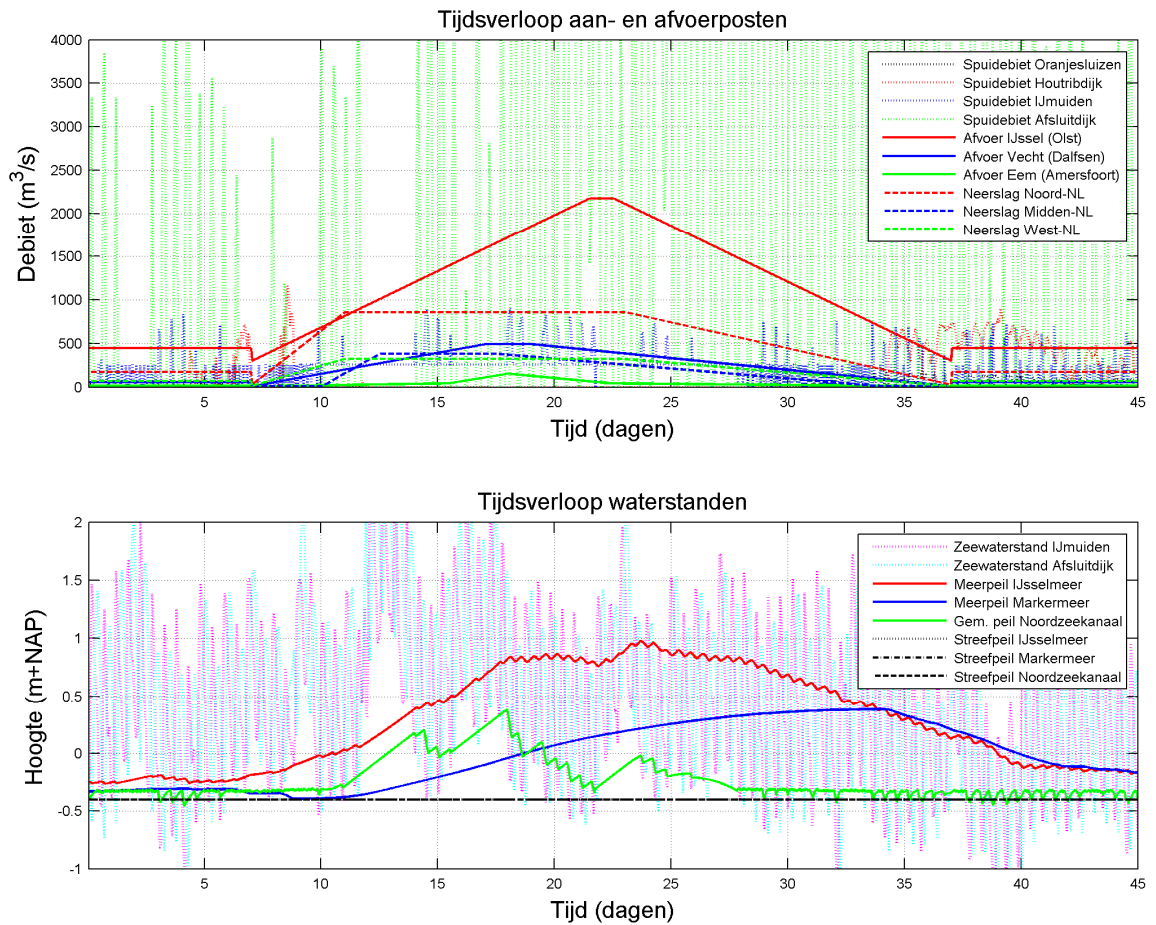
De hiervoor beschreven resultaten zijn berekend met een tijdstap $\Delta t = 3$ uur (rekentijd circa 3 minuten). De berekeningen kunnen ook worden uitgevoerd bij een fijnere tijdstap van $\Delta t = 1$ uur (rekentijd circa 9 minuten). Voor het IJsselmeer leidt de fijnere stapgrootte tot vrijwel dezelfde resultaten (Figuur 8-11). Voor het Markermeer (Figuur 8-12) komt de frequentielijn iets hoger te liggen; in het bijzonder gaat deze nu in het bereik van de data vrijwel precies door de metingen.



Figuur 8-11 Overschrijdingsfrequentie IJsselmeer, gevoeligheid voor stapgrootte Δt .



Figuur 8-12 Overschrijdingsfrequentie Markermeer, gevoeligheid voor stapgrootte Δt .



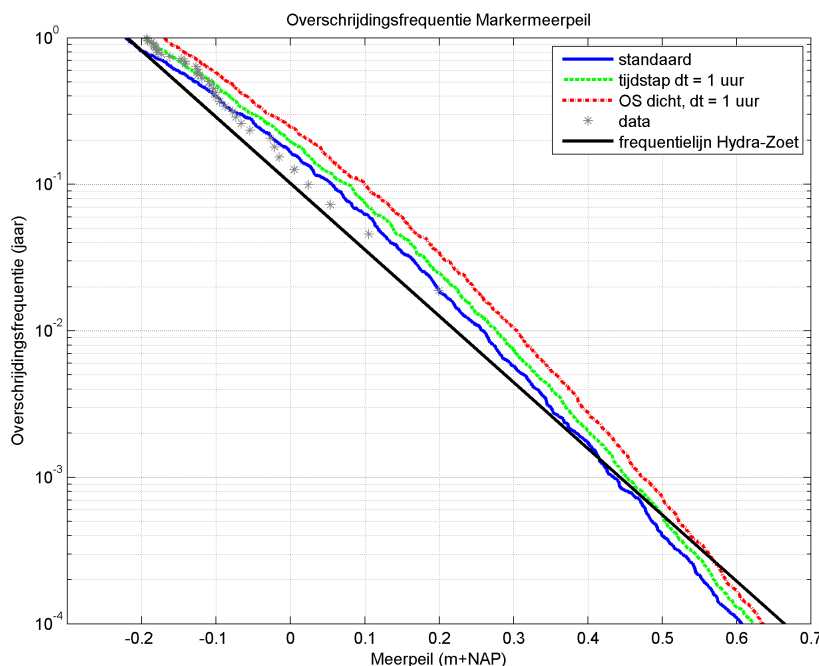
Figuur 8-13 Tijdsverlopen voor $\Delta t = 1$ uur.

Verder is het interessant om de tijdsverlopen te bekijken. Vergelijking van Figuur 8-13 met de eerdere Figuur 8-9 laat zien dat het NZK nu nauwelijks meer onder 'zijn' streefpeil komt. De reden dat dat bij $\Delta t = 3$ uur wel het geval is, is dat indien in het model gespuid wordt, dat altijd minstens 3 uur lang gebeurt, als in het model het streefpeil wordt onderschreden. De fijnere tijdstap betekent dat ook spuiduren van 'slechts' 1 uur voorkomen.

Het gemiddelde Markermeerpeil blijkt met $\Delta t = 1$ uur -0.34 m+NAP te worden i.p.v. -0.35 m+NAP. Voor $\Delta t = 1$ uur wordt het verschil met het gemiddelde van de gehomogeniseerde data (namelijk -0.32 m+NAP, zie Tabel 8-2) dan 0.02 m. Oftewel, voor $\Delta t = 1$ uur ligt het gemiddelde volgens het model dan slechts 0.02 m lager dan dat volgens de gehomogeniseerde metingen. De reden dat het Markermeer voor $\Delta t = 1$ uur nu een hoger gemiddelde krijgt, is dat bij de fijnere tijdstap minder vaak water van het Markermeer naar het NZK wordt ingelaten: de fijnere tijdstap betekent namelijk dat het gemiddelde van het NZK omhoog gaat, namelijk van -0.396 m+NAP naar -0.364 m+NAP (dat wordt circa 0.03 m hoger). Bij dit hogere peil wordt minder vaak het inlaatcriterium $m_{\text{inlaatpeil}} = -0.35$ m+NAP bereikt.

8.4.4 Gevoeligheid voor afgesloten Noordzeekanaal

In de standaardinstellingen van DEZY wordt zoals gezegd (indien gewenst) water ingelaten naar het NZK zolang de waterstand aldaar onder het inlaatcriterium $m_{\text{inlaatpeil}} = -0.35$ m+NAP ligt. Recente informatie van de opdrachtgever suggereert echter dat in de praktijk minder vaak water van het Markermeer wordt ingelaten naar het NZK. Als gevoeligheidsanalyse is daarom een berekening gemaakt waarbij helemaal geen water richting het NZK gaat. Dat is gedaan door de afvoercoëfficiënt van de Oranjesluizen op 0 te zetten, in combinatie met tijdstap $\Delta t = 1$ uur.



Figuur 8-14 Overschrijdingsfrequentie Markermeer, effect van afsluiten NZK. 'OS dicht' staat voor Oranjesluizen dichtgezet.

Interessant is dan om te zien in welke mate de resultaten voor het Markermeer veranderen (voor het IJsselmeer is het effect van het afsluiten van het NZK volstrekt verwaarloosbaar en worden geen resultaten getoond). De resultaten voor het Markermeer staan in Figuur 8-14,

waarbij naast de genoemde berekening ook de standaardberekening is weergegeven en degene met de fijnere tijdstap $\Delta t = 1$ uur. Om de resultaten goed te kunnen beoordelen, is een kleiner bereik van de assen gekozen.

In de figuur is goed te zien dat bij een afgesloten NZK (OS dicht) de frequentielijn overal boven de data ligt. Ons inziens worden de metingen beter gereproduceerd bij een niet-afgesloten NZK. Het gemiddelde meerpeil voor de afgesloten situatie blijkt -0.33 m+NAP te worden, wat slechts 0.01 m lager is dan het gemiddelde van de gehomogeniseerde data. Oftewel: bij een afgesloten NZK wordt het gemiddelde Markermeerpeil weliswaar beter gereproduceerd, maar de frequentielijn minder goed. Ons inziens verdient het de voorkeur om de frequentielijn goed te beschrijven, zodat inlaten van water naar het NZK in het model de standaardsituatie blijft.

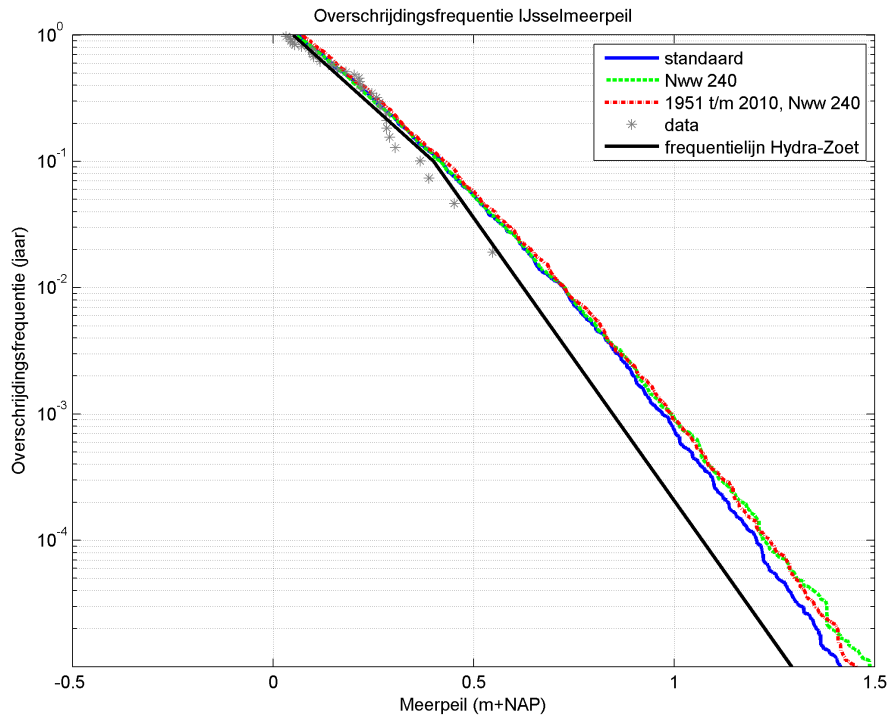
We brengen in herinnering dat de sluitfout in de waterbalans voor het Markermeer 12 m³/s bedraagt (Tabel 6-3), wat een flinke afwijking betreft gezien de gemiddelde aanvoer van 70 m³/s. In principe kan in model DEZY – om de frequentielijn volgens de metingen te reproduceren – ook worden gekozen voor een afgesloten NZK in combinatie met een lagere aanvoer op het Markermeer. Gezien de onzekerheden in de grootte van de aan- en afvoeren zou ook dat een legitieme aanpak zijn om de frequentielijn volgens de metingen te reproduceren. Daar wordt echter niet voor gekozen.

8.4.5 Gevoeligheid voor aantal ww-blokken en lengte periode

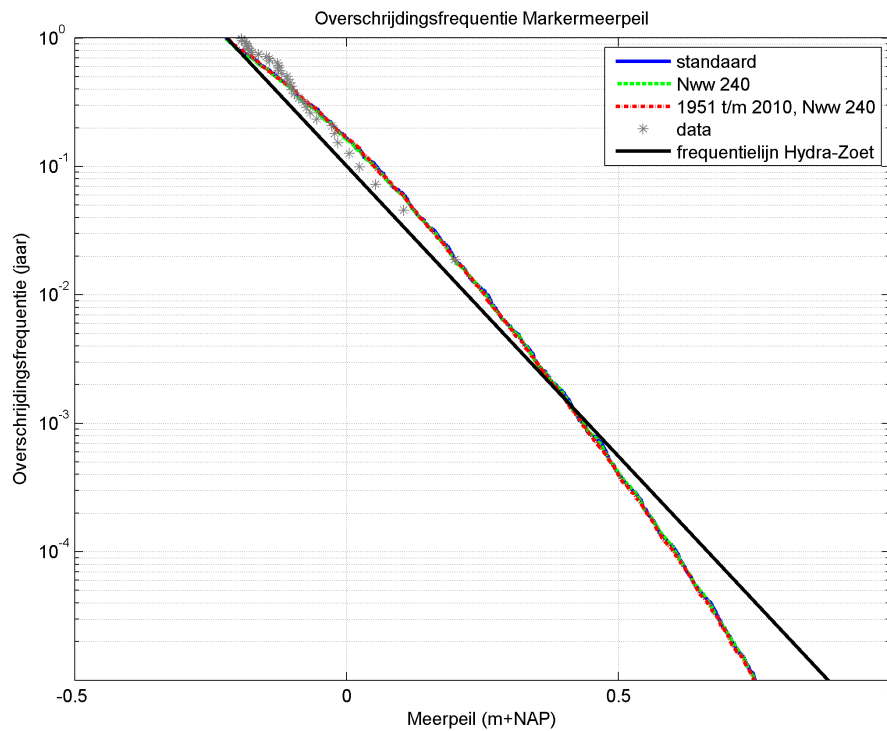
In de berekening worden voor de periode 1981 t/m 2010 standaard $N_{ww} = 120$ ww-blokken gebruikt (zie paragraaf 3.3.2). N.B. Bij de gebruikte rekenduur $B_1 = 45$ dagen passen er 4 rekenduren in het whjaar, wat voor 30 meetjaren 120 blokken oplevert.

Het is ook mogelijk voor dezelfde periode in DEZY meer blokken op te geven in welk geval *overlappende* blokken worden gebruikt; op die manier wordt de variatie aan wind-zeewaterstand situaties vergroot. Als eerste gevoeligheidsanalyse is voor 1981 t/m 2010 met $N_{ww} = 240$ blokken gerekend. Als tweede analyse is gerekend voor de hele periode 1951 t/m 2010, in combinatie met $N_{ww} = 240$ blokken (in dit geval is sprake van aansluitende blokken in het whjaar). De resultaten staan Figuur 8-15 en Figuur 8-16.

De conclusie is dat rekenen met meer blokken en/of een langere meetperiode voor het IJsselmeer een licht verhogend effect heeft (voor $T = 10000$ jaar 0.03 m), terwijl de verschillen voor het Markermeer verwaarloosbaar zijn.



Figuur 8-15 Overschrijdingsfrequentie IJsselmeer, gevoeligheid aantal ww-blokken en meetperiode.



Figuur 8-16 Overschrijdingsfrequentie Markermeer, gevoeligheid aantal ww-blokken en meetperiode.

Opmerking over invloed afvoer/neerslag en zee

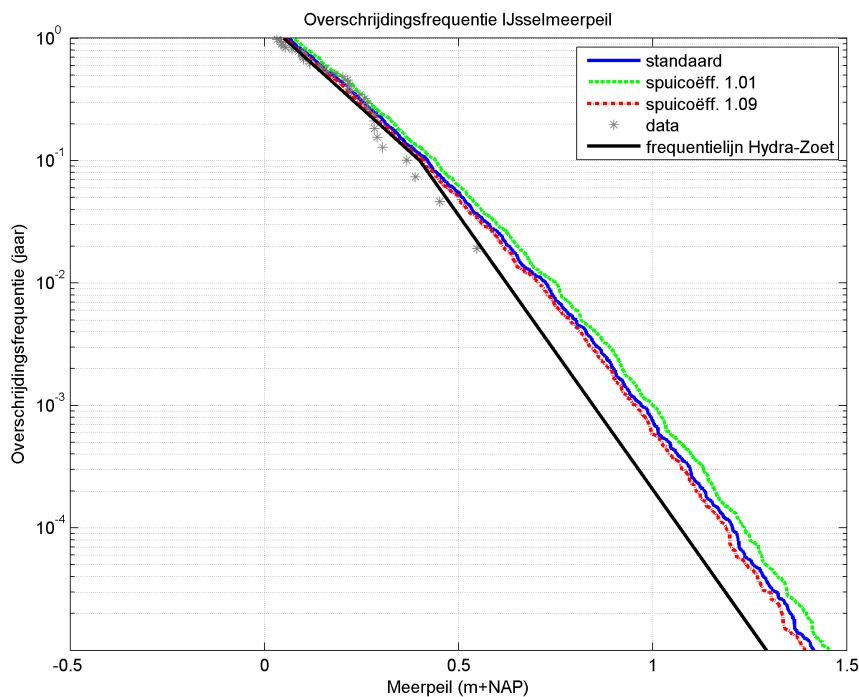
Op dit moment beslaat de langst beschikbare meetreeks voor de Waddenzee en IJmuiden circa 60 jaar. Als een veel langere meetreeks beschikbaar zou zijn is de verwachting dat het model bij extreme meerpeilen nog hoger uitkomt, omdat in die langere meetreeks nog ongunstigere spuicondities zouden voorkomen. De mate waarin het model dan hoger uitkomt is niet met zekerheid vast te stellen. Ons vermoeden is dat de toename van extreme meerpeilen beperkt blijft. De reden is feitelijk dat de meest extreme meerpeilen in veel sterkere mate door de rivierafvoeren/neerslag worden bepaald dan door ongunstige spuicondities op zee.

8.4.6 Gevoeligheid voor de spuicoëfficiënten

In DEZY wordt standaard een vaste waarde $a = 1.06$ voor de spuicoëfficiënt bij de Afsluitdijk gebruikt, terwijl die in IWP varieert van 1.01 tot 1.09 (zie Tabel 5-3).²⁶ Als gevoeligheid zijn ook deze uiterste waarden doorgerekend (Figuur 8-17 en Figuur 8-18).

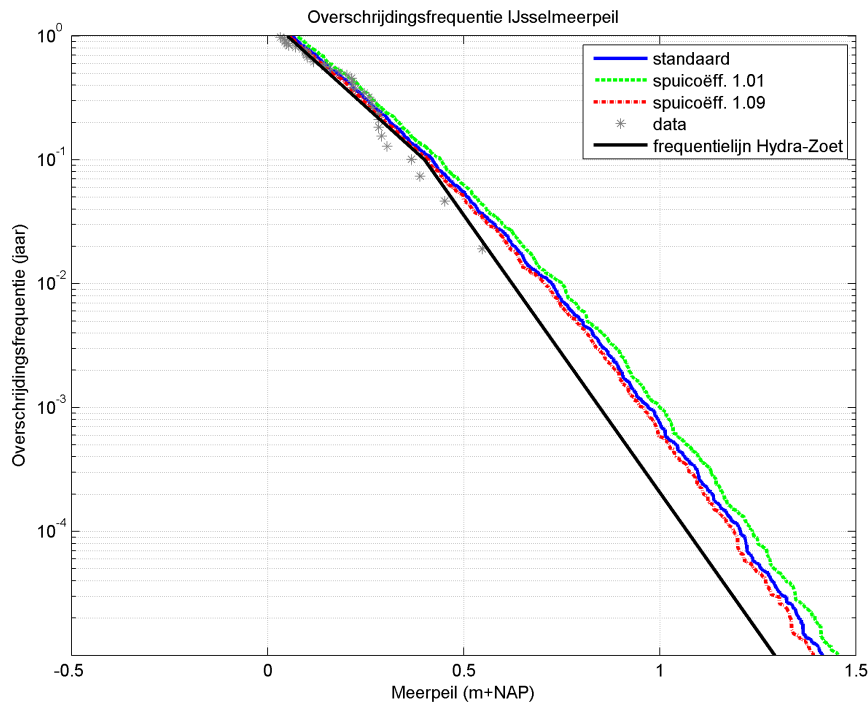
Voor het IJsselmeer blijkt de lijn voor de standaardwaarde ($a = 1.06$) tussen de lijnen voor de uitersten waarden te liggen, waarbij de lijnen voor de uitersten weinig verschillen. De conclusie is dat de gebruikte standaardwaarde goede resultaten geeft.

Voor het Markermeer blijken de lijnen voor de uiterste waarden tot verwaarloosbare verschillen te leiden. De conclusie is dus dat voor beide meren de standaardwaarde voor de spuicoëfficiënt ($a = 1.06$) goede resultaten geeft.



Figuur 8-17 Overschrijdingsfrequentie IJsselmeer, gevoeligheid afvoercoëfficiënten Afsluitdijk.

²⁶ In de tabel komt voor een verval van 0.1 m ook de sterk afwijkende waarde 0.85 voor. Ons vermoeden is dat deze waarde samenhangt met de manier waarop in de kalibratie met het zoutslot is omgegaan (zie paragraaf 5.2.2. Hier is in ieder geval aangenomen dat de waarde van 0.85 voor DEZY niet relevant is.



Figuur 8-18 Overschrijdingsfrequentie Markermeer, gevoeligheid afvoercoëfficiënten Afsluitdijk.

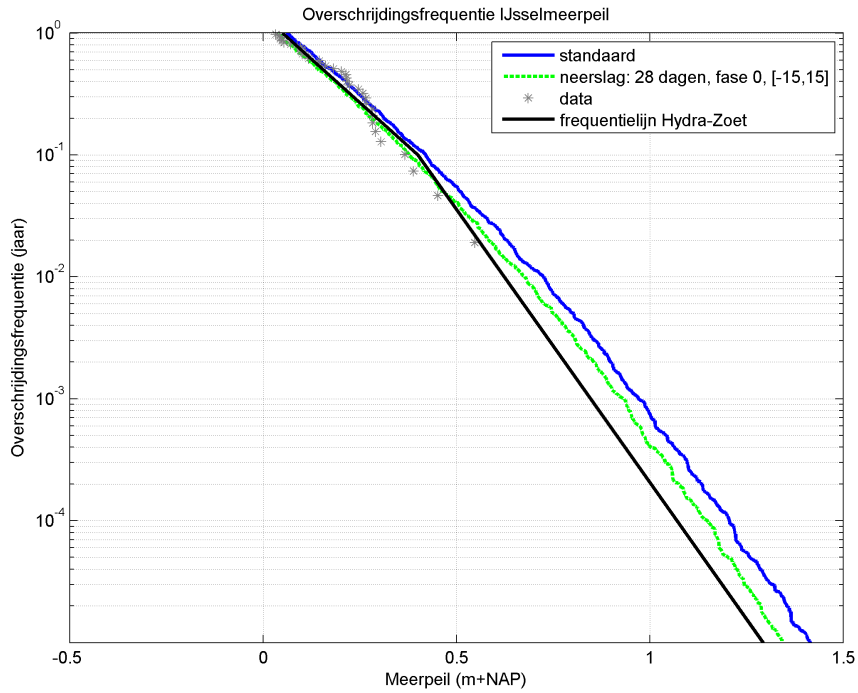
8.4.7 Gevoeligheid voor tijdsverloop neerslag

In paragraaf 6.2.3 zijn de standaard gebruikte tijdsverlopen voor de neerslag geïntroduceerd. Als variant daarop wordt voor elke regio (Noord, Midden en West) nu een topduur van 28 dagen beschouwd met fase 0 dagen (middens van de maxima vallen samen met de IJsselpiek). N.B. Voor de regio Midden start het verloop nu eveneens zodra de feitelijke basisduur begint en niet pas na 3 dagen, zoals te zien is in Figuur 8-21.

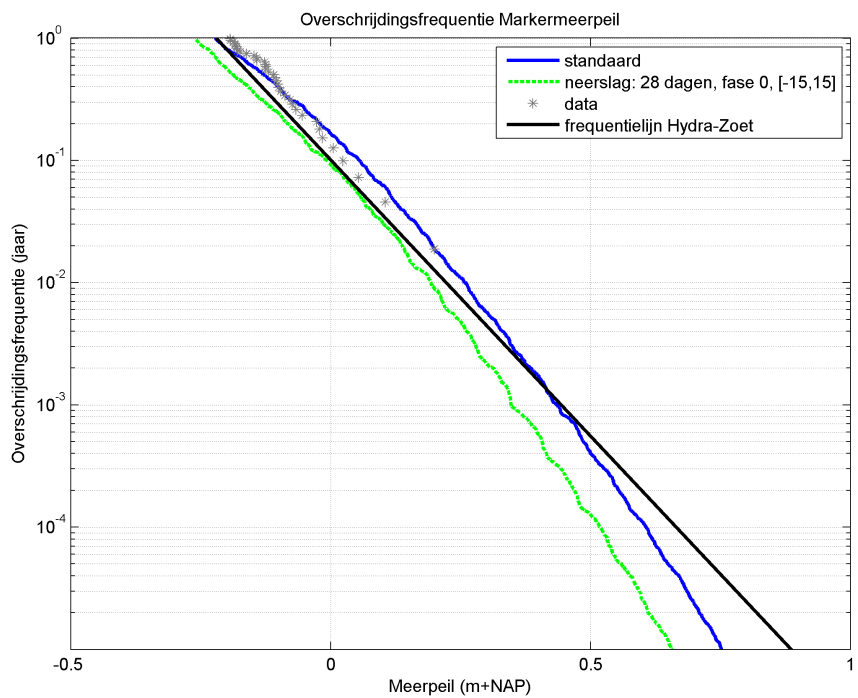
De andere neerslagmodellering houdt in dat t.o.v. de standaardberekening een sterk in de tijd uitgesmeerd neerslagverloop wordt beschouwd, waarbij het midden van het verloop samenvalt met het midden van het IJsselverloop. Volgens paragraaf 4.4.1 uit [Van Haaren en Geerse, 2015] is die keuze niet adequaat. Die referentie maakt duidelijk dat de neerslag gemiddeld gezien eerder moet komen dan de IJsselpiek. De alternatieve neerslagmodellering is in onze optiek dus geen heel goede keuze, en wordt hier alleen als gevoeligheid beschouwd.

Het alternatieve neerslagverloop blijkt een beperkt effect te hebben voor het IJsselmeer (Figuur 8-19), met voor bijvoorbeeld $T = 10000$ jaar een verlaging van 0.06 m. Gezien de onzekerheden in de manier waarop de overschrijdingsfrequentie voor (extreme) meerpeilen kan worden bepaald, zie paragraaf 8.2.2, zijn de verschillen met de standaardberekening verwaarloosbaar.

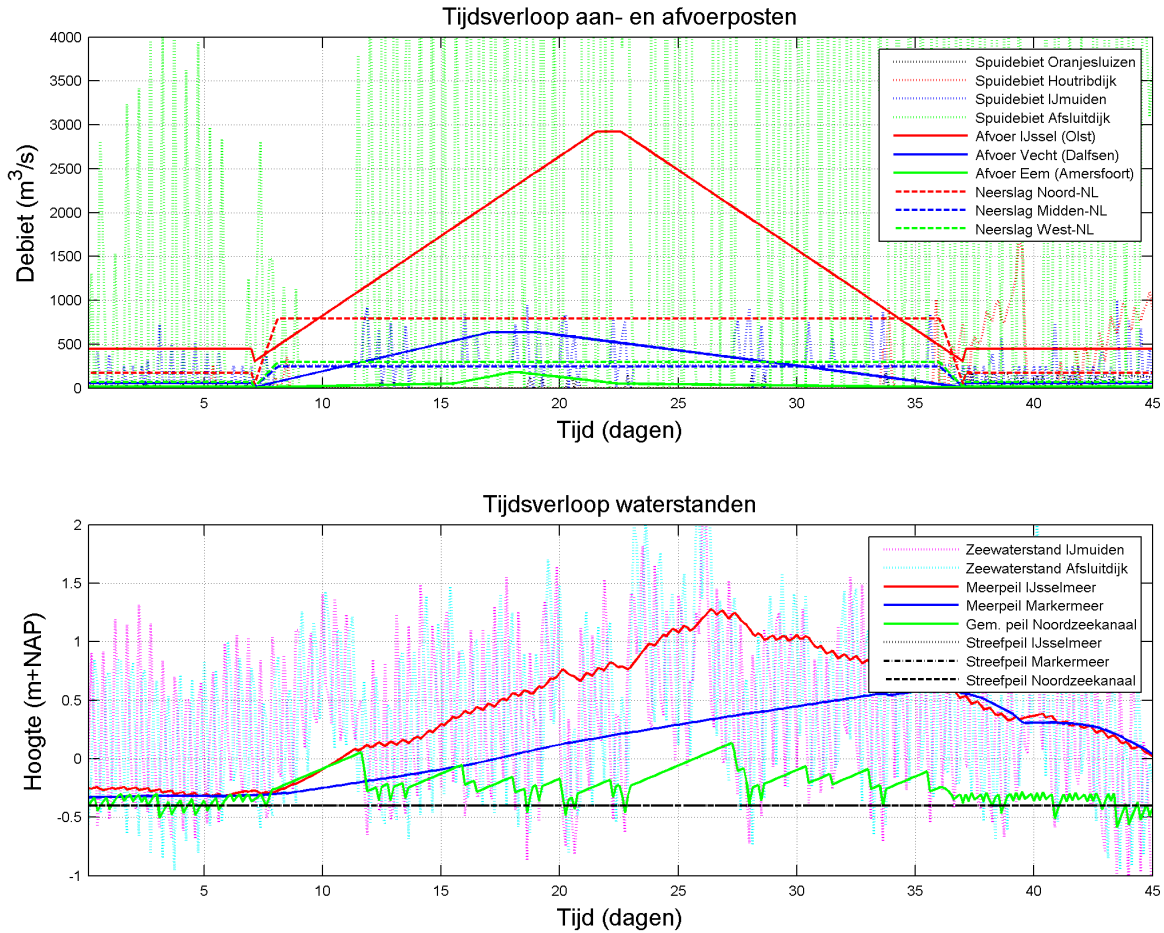
Voor het Markermeer zijn de verschillen over het hele bereik van meerpeilen groter dan voor het IJsselmeer; voor bijvoorbeeld $T = 10000$ jaar ongeveer 0.09 m. Maar tevens is duidelijk dat de alternatieve neerslagmodellering incorrect is: in dat geval ligt de frequentielijn voor het Markermeer volgens het model duidelijk onder de data. Ons inziens beschrijft de standaard-situatie de werkelijkheid voldoende nauwkeurig, zowel voor het IJssel- als het Markermeer.



Figuur 8-19 Overschrijdingsfrequentie IJsselmeer, gevoeligheid voor het neerslagverloop.



Figuur 8-20 Overschrijdingsfrequentie Markermeer, gevoeligheid voor het neerslagverloop.



Figuur 8-21 Tijdsverlopen voor sterk in de tijd gespreid ander neerslagverloop.

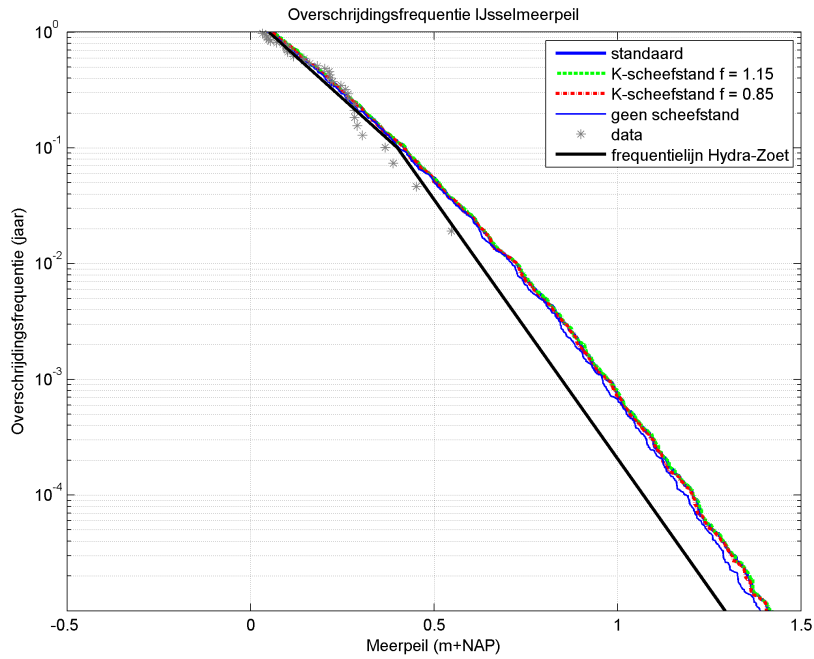
8.4.8 Gevoeligheid voor keuze van scheefstandparameters

In paragraaf 5.1 zijn parameters voor de scheefstand afgeleid, waarbij een fit is gemaakt aan WAQUA-resultaten. Daarbij werd geconstateerd dat de kwaliteit van de fit niet heel goed is, maar voldoende nauwkeurig voor gebruik in het model. Dat laatste wordt hier geverifieerd, door de K-waarden uit formule (5.1) met respectievelijk 15% te verlagen en te verhogen, waarmee tevens de scheefstand met dit percentage wordt verhoogd respectievelijk verlaagd. Ook wordt de situatie zonder enige scheefstand beschouwd (K-waarde gelijk aan 0); deze dient slechts ter vergelijking en heeft geen reële betekenis.

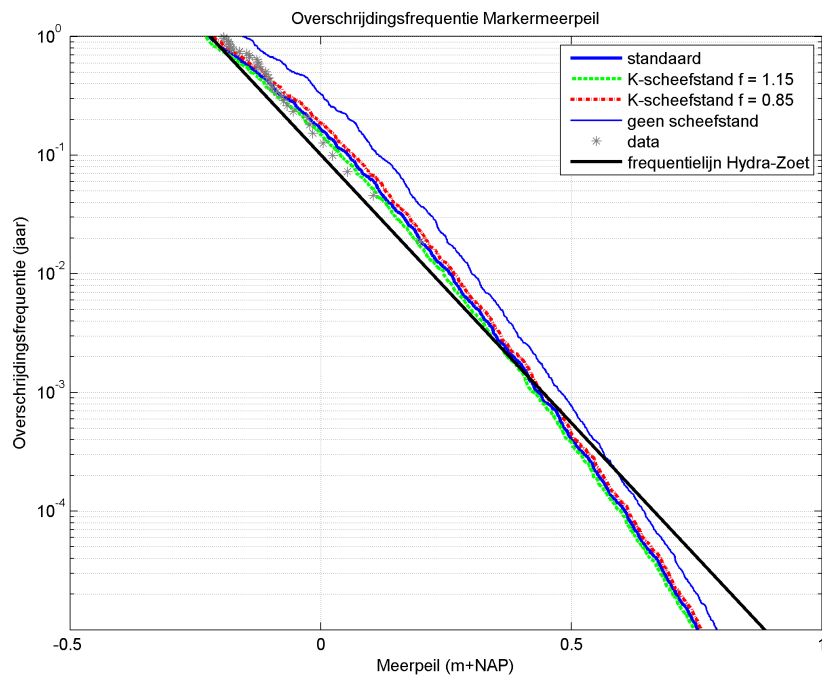
Figuur 8-22 toont dat de mate van scheefstand voor het IJsselmeer vrijwel geen invloed heeft op de resultaten. Voor het Markermeer (Figuur 8-23) blijkt dat wel het geval. De situaties met 15% meer en minder scheefstand geven echter in redelijke benadering dezelfde resultaten, waaruit we concluderen dat de fits voor de scheefstand voldoende nauwkeurig zijn voor onze doeleinden. Maar het rekenen zonder scheefstand leidt tot grote fouten. De reden is dat het Markermeer dan veel minder water kan spuien richting het IJsselmeer.

Terzijde merken we nog op dat in de standaard situatie er gemiddeld in een wintermaand circa 51 m³/s door de Houtrib- en Krabbersgatsluizen wordt gespuid richting het IJsselmeer. Deze waarde ligt dicht bij de 46 m³/s die wordt gevonden volgens de waterbalans uit paragraaf 6.1.2.²⁷

²⁷ Deze waarde is bepaald door te onderzoeken hoe het gemiddelde van het IJsselmeer verandert als de sluisen in de Houtribdijk permanent worden gesloten. Vervolgens is gekeken hoeveel extra water op het IJsselmeer moet worden



Figuur 8-22 Overschrijdingsfrequentie IJsselmeer, gevoeligheid voor de scheefstand.

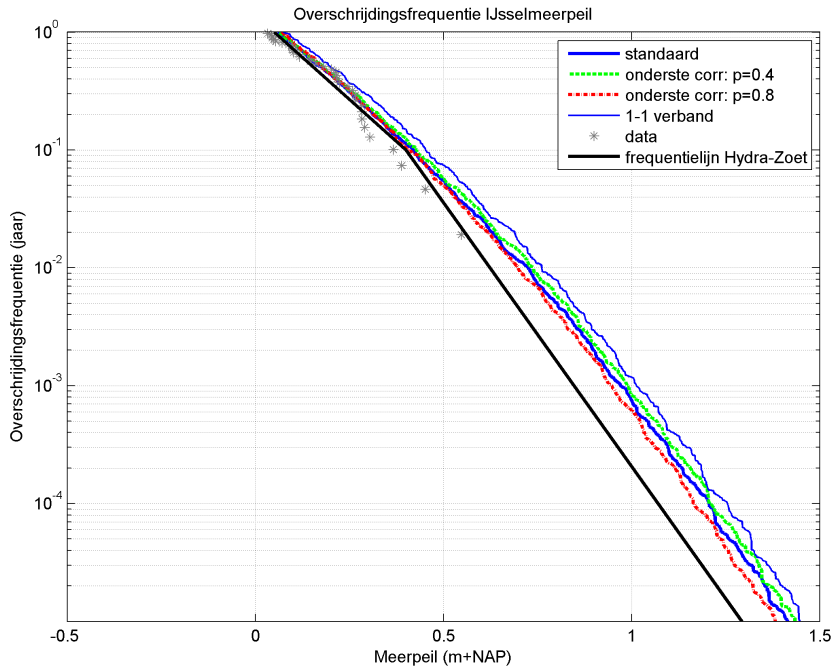


Figuur 8-23 Overschrijdingsfrequentie Markermeer, gevoeligheid voor de scheefstand.

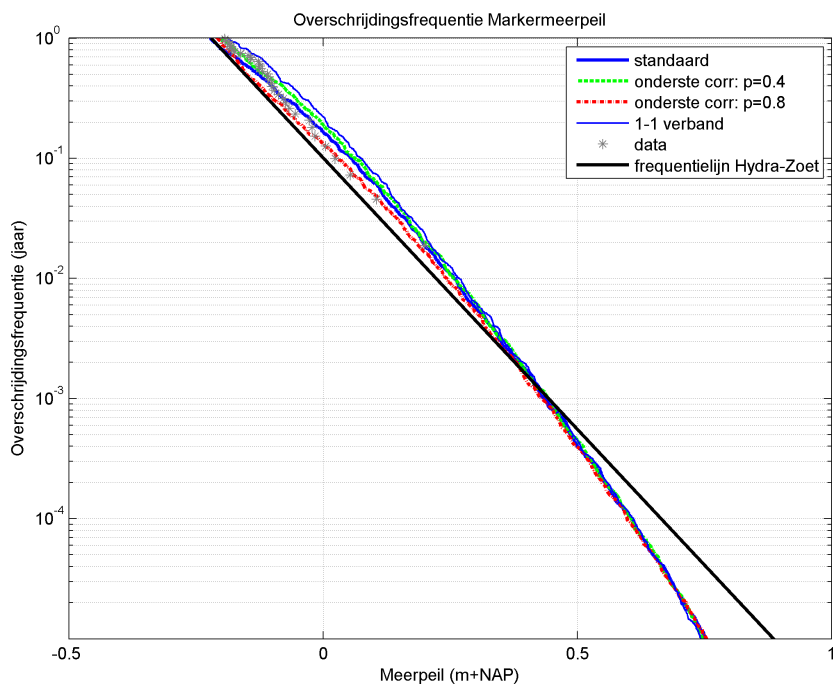
geloosd om het gemiddelde weer op de oude waarde te krijgen in de situatie van een afgesloten Houtribdijk. Die hoeveelheid extra water blijkt gemiddeld 51 m³/s per winterdag te zijn.

8.4.9 Gevoeligheid voor keuze van kansen in correlatiemodel

In paragraaf 4.2 is het correlatiemodel (2LijnenModel) beschouwd. Daarbij is aan de onderste lijn uit Figuur 4-3 een kans van $p_{\text{onder}} = 0.6$ toegekend en aan de bovenste 0.4. Als gevoeligheid worden hier ook de keuzes $p_{\text{onder}} = 0.4$ en $p_{\text{onder}} = 0.8$ beschouwd. Ter vergelijking wordt ook de situatie van de maximale correlatie beschouwd (1-1 verband), die als een overschatting van de resultaten moet worden beschouwd. De resultaten staan in Figuur 8-24 en Figuur 8-25.



Figuur 8-24 Overschrijdingsfrequentie IJsselmeer, correlatiesterkte.



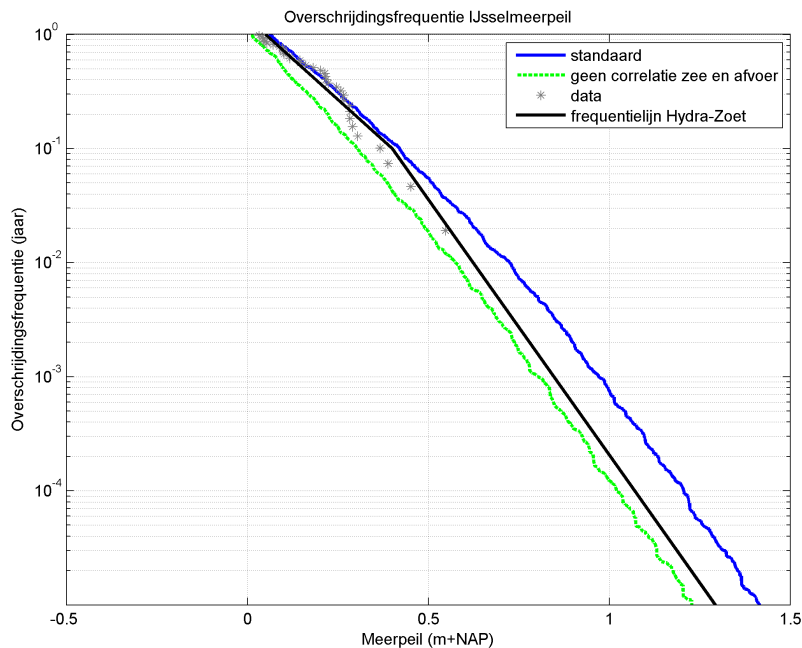
Figuur 8-25 Overschrijdingsfrequentie Markermeer, correlatiesterkte.

Voor het IJsselmeer leiden de keuzes voor p_{onder} van 0.4 en 0.8 ruwweg tot dezelfde resultaten. Ook de situatie van maximale correlatie wijkt niet sterk af: conform verwachting komt de frequentielijn bij maximale correlatie het hoogst te liggen. Voor het Markermeer zijn de verschillen alleen zichtbaar voor de minder extreme meerpeilen: rond terugkeertijd $T = 1000$ jaar en hoger zijn de verschillen verwaarloosbaar.

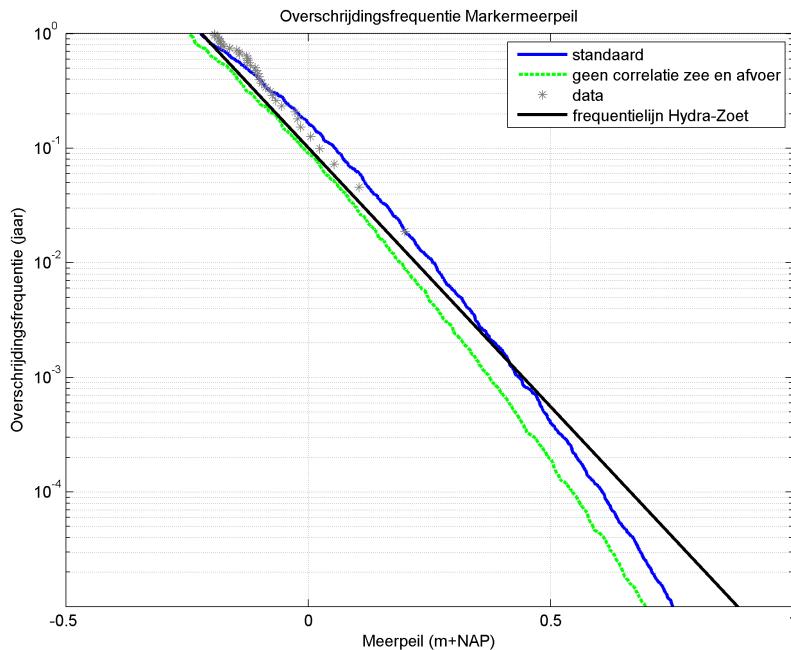
De conclusie is dat de keuze van p_{onder} in het correlatiemodel niet heel nauw steekt. We merken op dat een meer nauwkeurigere manier om de correlatie te modelleren bestaat uit het beschouwen van veel meer dan 2 lijnen. Dat is niet gedaan met het oog op de rekentijd. Op grond van Figuur 8-24 en Figuur 8-25 is de conclusie echter dat het 2LijnenModel voldoende nauwkeurige resultaten geeft.

8.4.10 Gevoeligheid meenemen correlatie tussen afvoer en zee

In paragraaf 4.2 is de correlatie tussen de IJsselaflow en de Waddenzee behandeld. Het blijkt dat de frequentielijnen zonder deze correlatie onder de metingen komen te liggen (Figuur 8-26 en Figuur 8-27). Zowel voor het IJssel- als het Markermeer is dat het geval. De conclusie is dat het essentieel is deze correlatie in DEZY op te nemen.



Figuur 8-26 Overschrijdingsfrequentie IJsselmeer, effect correlatie afvoer en zee.



Figuur 8-27 Overschrijdingsfrequentie Markermeer, effect correlatie afvoer en zee.

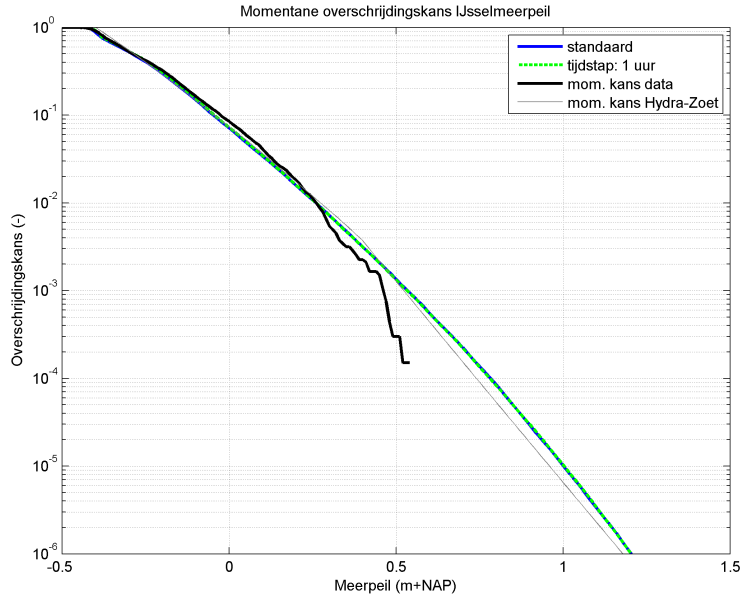
8.5 Momentane kans IJssel- en Markermeer

Hiervoor is gecontroleerd dat het model voor de overschrijdingsfrequentie $F(S>s)$ goede resultaten geeft bij gebruik van de standaardinstellingen uit Bijlage B. Nu volgt informatie over de manier waarop in het model de momentane kans $P(M>m)$ wordt gereproduceerd (zie paragraaf 8.4.1 voor uitleg over deze kans). Omdat in toepassingen de momentane kans minder belangrijk is dan de overschrijdingsfrequentie, wordt de behandeling van de momentane kans beknopt gehouden.

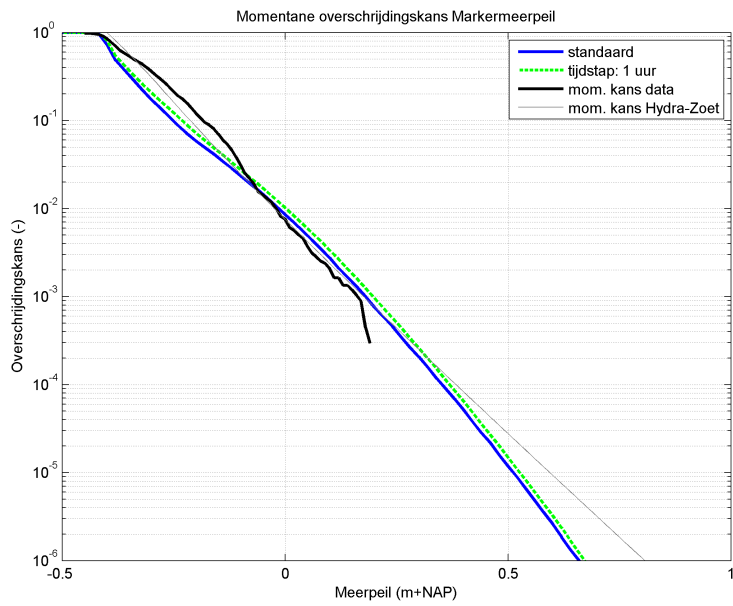
De resultaten staan in Figuur 8-28 en Figuur 8-29. Omdat hiervoor bleek dat voor het Markermeer de modelresultaten enigszins afhangen van de gekozen tijdstap, is hier ook gerekend met de fijnere tijdstap $\Delta t = 1$ uur. Voor het IJsselmeer blijkt het model zowel met de standaardinstelling ($\Delta t = 3$ uur) als met de fijnere tijdstap goed overeen te komen met de data en met de momentane kans uit Hydra-Zoet.

Voor het Markermeer is de overeenstemming in het lage bereik van de data minder goed: het model ligt dan onder de data, wat het geval is voor beide tijdsdiscretisaties. De reden daarvan is niet duidelijk. Het is niet gelukt modelparameters anders te kiezen zodat én de momentane kans op de data komt te liggen én de overschrijdingsfrequentie van het model de data goed blijft beschrijven. Misschien wijst dit verschil op een onvolkomenheid in het model, waarin uiteraard geen perfecte beschrijving van alle aan- en afvoeren mogelijk is. Mogelijk speelt ook een rol dat in de praktijk een specifiek beheer heeft plaatsgevonden waar in het model geen rekening mee wordt gehouden. Ook is het mogelijk dat de metingen onnauwkeurigheden bevatten.

Naarmate de meerpeilen extremer worden, is voor het Markermeer sprake van een slechtere overeenkomst tussen DEZY en Hydra-Zoet. Gezien de grote onzekerheid in de momentane kans voor Hydra-Zoet (paragraaf 8.2.2) heeft dit verschil weinig te betekenen voor de betrouwbaarheid van DEZY.



Figuur 8-28 Momentane kans IJsselmeer.



Figuur 8-29 Momentane kans Markermeer.

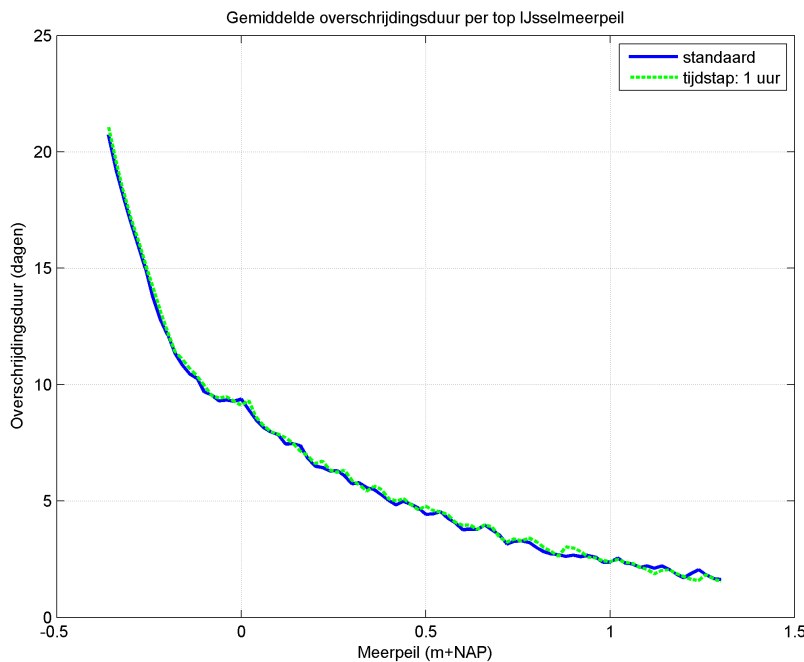
8.6 Topduren IJssel- en Markermeer

8.6.1 Topduur IJsselmeer

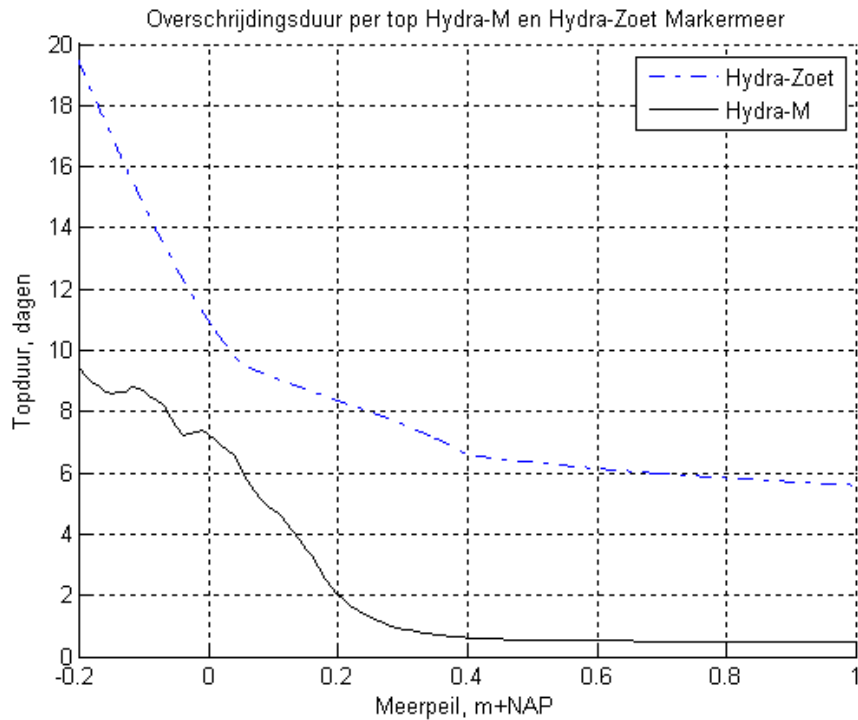
Er is ook onderzocht hoe de topduren $d(m)$ voor het IJssel- en Markermeer er uit zien (zie paragraaf 8.4.1 voor uitleg). Figuur 8-30 geeft het resultaat voor het IJsselmeer, waarbij naast de standaard tijdstap van $\Delta t = 3$ uur ook een tijdstap van $\Delta t = 1$ uur is gebruikt. Ter vergelijking is in Figuur 8-31 weergegeven hoe deze grootte er uit ziet op basis van de gegevens uit de Hydra-Zoet statistiek; deze figuur geeft als extra informatie ook de topduren uit de (incorrecte) Hydra-M statistiek.

Dan blijkt dat voor de hogere meerpeilen de topduur volgens het model niet overeenstemt met de Hydra-Zoet gegevens. Zoals in paragraaf 8.2.2 gezegd zijn, tenminste voor de extreme meerpeilen, de onzekerheden in de topduren volgens Hydra-Zoet zeer groot. Het is goed mogelijk dat die niet helemaal juist zijn, en dat de werkelijke extreme meerpeilgolven korter aanhouden dan aangenomen in deze referentie. Een andere mogelijkheid is dat het model de duren van extreme meerpeilen onderschat. Dat laatste wordt ook enigszins gesuggereerd in paragraaf 0, waar de keuze voor de basisduur B en de rekenduur B_1 wordt besproken. Daar bleek immers dat op basis van waargenomen meerpeilgolven beter voor een langere basisduur dan 30 dagen kon worden gekozen, met vermoedelijk ook wat langere topduren tot gevolg. (Vanwege de daar genoemde nadelen is echter geen langere basisduur gekozen.)

Merk nog op (zie ook paragraaf 8.2.1) dat de incorrecte statistiek uit Hydra-M tot nog veel kortere topduren leidt: vanaf 0.4 m+NAP resulteert dan een vaste topduur van slechts 0.5 dag, wat aanzienlijk korter is dan de topduren uit DEZY. Toch blijkt uit oriënterende berekeningen voor het IJsselmeer dat een dergelijke fout voor toetspeilen en benodigde kruinhoogtes relatief weinig invloed heeft. N.B. Dat laatste hoeft echter niet te gelden voor geotechnische faalmechanismes, waarvoor de duur mogelijk belangrijker is dan voor de berekening van toetspeilen en benodigde kruinhoogtes. Zie in dit verband ook de aanbevelingen in paragraaf 10.3.



Figuur 8-30 Topduur IJsselmeer.

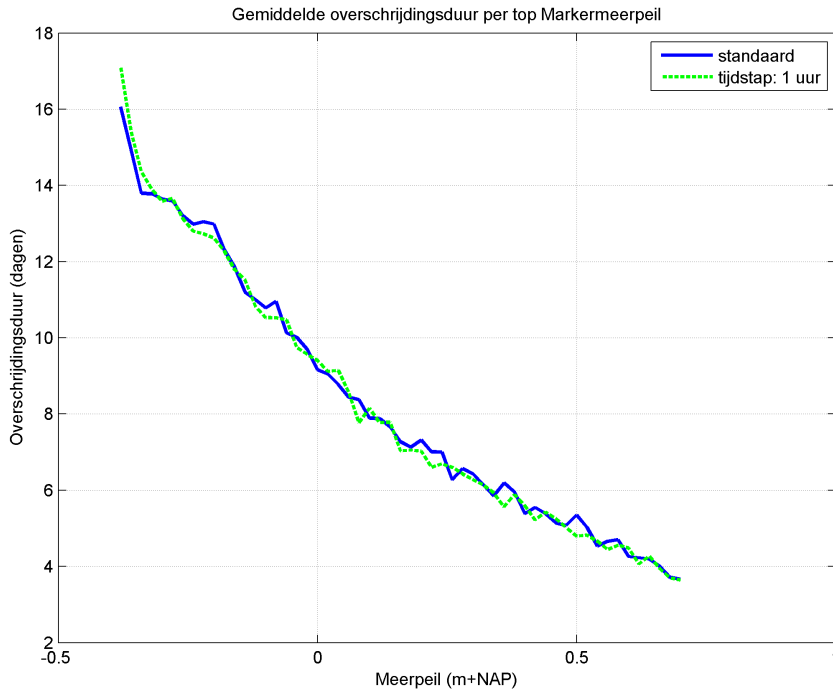


Figuur 8-31 Topduur volgens Hydra-Zoet statistiek en (incorrecte) statistiek Hydra-M. Bron: [Geerse, 2006].

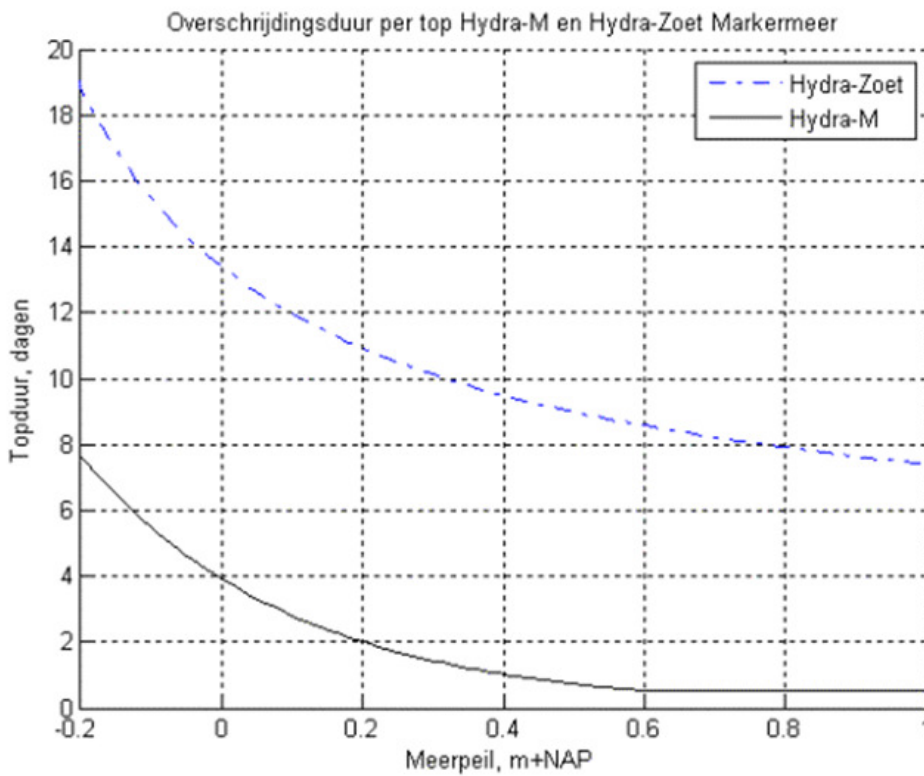
8.6.2 Topduur Markermeer

In Figuur 8-32 wordt de topduur voor het Markermeer getoond. Daaruit blijkt dat de duren voor het Markermeer op het bereik van meerpeilen van -0.20 m+NAP tot 0.70 m+NAP vergelijkbaar zijn met die van het IJsselmeer. De topduren volgens Hydra-Zoet en de (incorrecte) duren uit Hydra-M staan in Figuur 8-33.

Afgezien van de incorrecte gegevens uit de Hydra-M statistiek, die hier verder niet worden besproken, geldt voor de duren voor het Markermeer hetzelfde als voor het IJsselmeer: de duren volgens DEZY zijn korter dan die uit de statistiek voor Hydra-Zoet. Gezien de zeer grote onzekerheden in de duren voor de extreme meerpeilen kan niet zonder meer gezegd worden dat de duren volgens DEZY te kort zijn. Maar het is ook mogelijk dat het model de duren van extreme meerpeilen onderschat. Zie verder de aanbevelingen in paragraaf 10.3.



Figuur 8-32 Topduur Markermeer.



Figuur 8-33 Topduur IJsselmeer volgens Hydra-Zoet en (incorrecte) statistiek Hydra-M. Bron: [Geerse, 2008].

8.7 Beschouwingen over het Noordzeekanaal

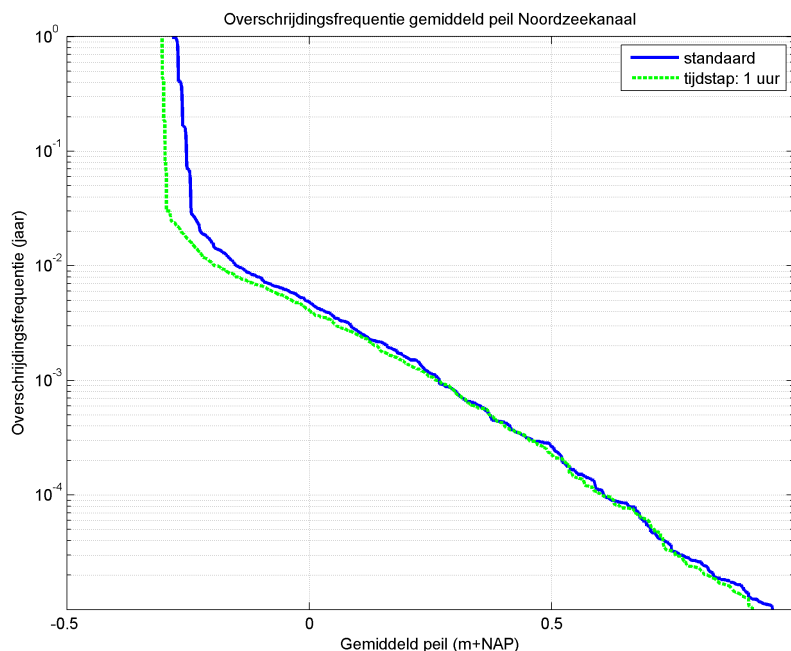
8.7.1 Overschrijdingsfrequentie NZK

In dit project wordt het NZK alleen versimpeld meegenomen, om zicht te krijgen op de manier waarop dit watersysteem van invloed is op het Markermeer. Het model geeft echter wel resultaten voor het NZK, die hier kort worden becommentarieerd.

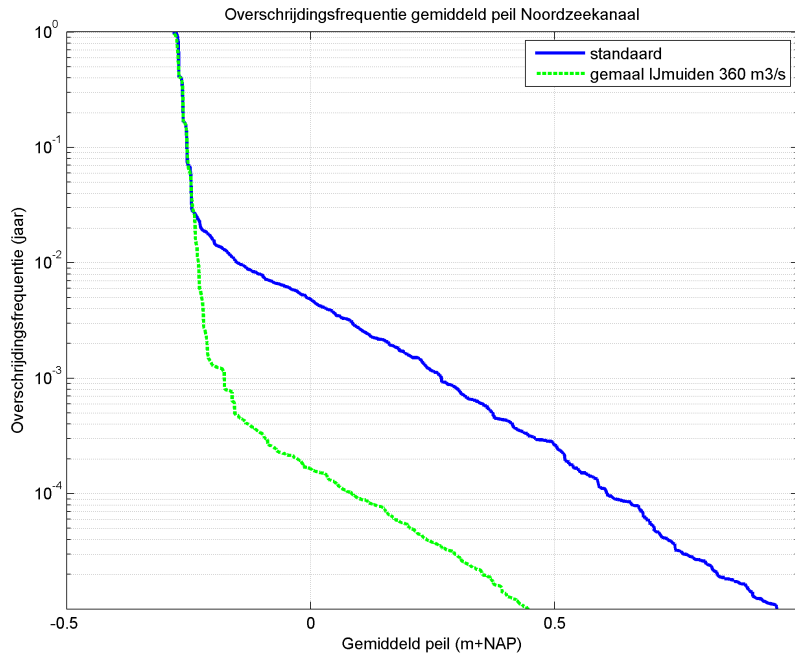
Figuur 8-34 geeft de overschrijdingsfrequentie, berekend met de standaard tijdstap $\Delta t = 3$ uur en de fijnere tijdstap $\Delta t = 1$ uur. Zoals eerder opgemerkt (paragraaf 8.4.3) gaat er bij een fijnere tijdstap minder water van het Markermeer naar het NZK, vandaar dat de groene lijn voor $\Delta t = 1$ uur lager ligt dan die voor de standaardberekening. Dat verschil wordt overigens zeer klein voor de extremere peilen.

Verder valt op dat de lijn een knik vertoont bij een overschrijdingsfrequentie van ongeveer $2.5 \cdot 10^{-2} = 1/40$ per jaar, bij een meerpeil van ongeveer -0.30 m+NAP à -0.25 m+NAP . De reden is dat vanaf deze meerpeilen het gemaal bij IJmuiden de toestroom van water op het NZK niet langer aankan. Ter illustratie is ook een berekening gemaakt voor een gemaal met een grotere maalcapaciteit ($360 \text{ m}^3/\text{s}$ i.p.v. $260 \text{ m}^3/\text{s}$). Het resultaat daarvan staat in Figuur 8-35.

Een belangrijke kanttekening hierbij is dat in het model het tijdsverloop van de afwaterende neerslag erg ruw is gemodelleerd. *Ook is geen rekening gehouden met maalstops, die in de praktijk wel gehanteerd worden.* Naar onze mening moet voor nauwkeurige resultaten voor het NZK een verbeterde tijdsmodellering in het model gebruikt worden, waarbij ook rekening wordt gehouden met maalstops. Zie verder paragraaf 8.7.4.



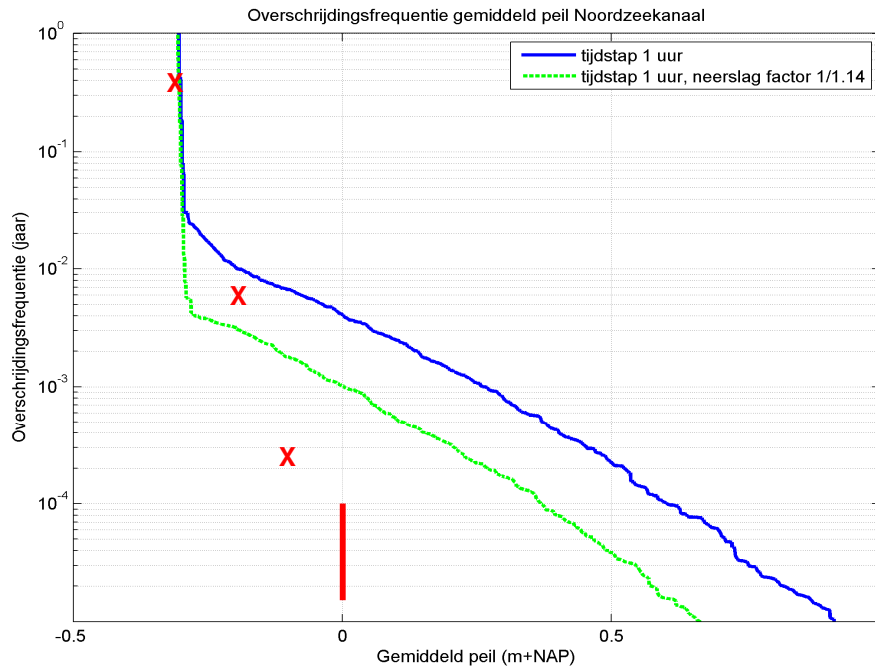
Figuur 8-34 Overschrijdingsfrequentie NZK, voor standaardinstellingen en fijnere tijdstap $\Delta t = 1$ uur.



Figuur 8-35 Overschrijdingsfrequentie NZK, voor standaardinstellingen en gemaalcapaciteit bij IJmuiden van 360 m³/s.

8.7.2 Vergelijking overschrijdingsfrequentie NZK met eerdere studie

In een eerdere studie [Pengel en Geerse H, 2001] zijn overschrijdingsfrequenties voor het NZK berekend voor de niveaus -0.3, -0.2, -0.1, 0.0 m+NAP. Dat is gedaan voor o.m. de locaties Oranjesluizen West en Buitenhuisen, die representatief geacht kunnen worden voor het NZK. De overschrijdingsfrequenties voor beide locaties verschillen enigszins, omdat in deze referentie het (kleine) verhang op het NZK is meegenomen. Om de vergelijking met model DEZY te maken, zijn de overschrijdingsfrequenties van de locaties uit de eerdere studie gemiddeld. Die gemiddelden zijn weergegeven door de rode kruisjes in Figuur 8-36, samen met resultaten uit DEZY die hierna worden besproken. Merk op dat voor 0.0 m+NAP geen kruisje is getekend, maar alleen een rode lijn. Reden daarvan is dat in de eerdere studie in dat geval alleen wordt genoemd dat beide locaties overschrijdingsfrequenties kleiner dan $1 \cdot 10^{-4}$ hebben.



Figuur 8-36 Overschrijdingsfrequentie NZK, voor tijdstep $\Delta t = 1$ uur, waarbij als variant de neerslag is verminderd met 14%; rode markeringen geven resultaten uit [Pengel en Geerse H, 2001].

Vermoedelijk is in de genoemde referentie gerekend met een neerslagstatistiek die niet is gecorrigeerd voor trendeffecten, wat wel is gebeurd in DEZY, waarbij de neerslag met 14% is verhoogd (zie paragraaf 6.2.2). Om de vergelijking zuiverder te kunnen maken is met DEZY ook een berekening gemaakt waaruit die trendverhoging weer is verwijderd (daarbij wordt de neerslag gedeeld door 1.14). De conclusie is dat de resultaten voor de hogere meerpeilen uiteen lopen. Dat de resultaten voor -0.1 en 0.0 m+NAP uit de eerdere studie lager liggen dan DEZY, heeft mogelijk te maken met het veronachtzamen van maalstops in DEZY.

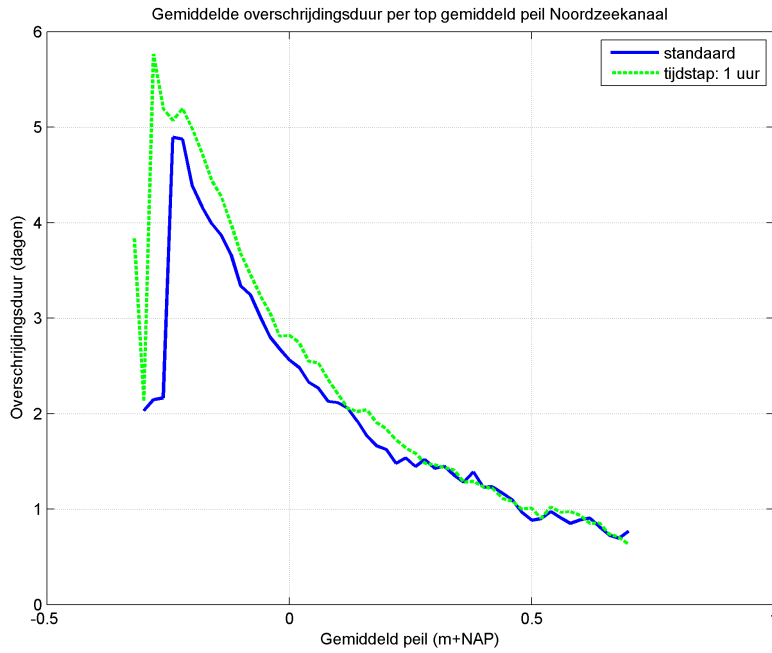
We herhalen/noemen hier nog enkele punten die relevant zijn voor de vergelijking:

- In DEZY wordt een vereenvoudigd tijdsverloop van de afwatering op het NZK gebruikt.
- In de eerdere studie worden maalstops gehanteerd, maar niet in DEZY.
- In DEZY wordt rekening gehouden met de correlatie tussen afvoer/neerslag en de zeewaterstand bij IJmuiden, terwijl dat niet het geval is in de eerdere studie.²⁸
- In DEZY is mogelijk dat tegelijkertijd wordt gepompt en wordt gespuid onder vrij verval, terwijl in de eerdere studie indien nodig ófwel wordt gespuid onder vrij verval, ófwel wordt gepompt.

8.7.3 Topduur NZK

Figuur 8-37 toont resultaten voor de topduur voor het NZK. Vergelijking met de overeenkomstige figuren voor het IJssel- en Markermeer (Figuur 8-30 en Figuur 8-32) laat zien dat voor het NZK kortere duren resulteren dan voor deze meren.

²⁸ In feite wordt in DEZY rekening gehouden met de correlatie tussen de IJssel en IJmuiden. Maar omdat de IJssel gecorreleerd is met de neerslag, is indirect die neerslag óók gecorreleerd met IJmuiden.



Figuur 8-37 Topduur NZK, voor standaardinstellingen en fijnere tijdstep $\Delta t = 1$ uur.

8.7.4 Conclusies NZK

Op basis van het voorgaande is de conclusie dat het huidige model DEZY niet gebruikt mag worden om meerpeilstatistiek voor het NZK te bepalen.

Dit watersysteem heeft namelijk een veel geringer bergend oppervlak dan de grotere meren IJssel- en Markermeer, waardoor kortdurende buien het meerpeil van het NZK veel meer kunnen beïnvloeden dan op deze grote meren. Dat maakt het noodzakelijk het tijdsverloop van de afwaterende neerslag veel nauwkeuriger te modelleren dan nu in DEZY gebeurt. Daarbij moet ook rekening worden gehouden met maalstops, wat nu in DEZY niet het geval is.

N.B. Een dergelijk verbeterd tijdsverloop is niet eenvoudig af te leiden. Wil men DEZY geschikt maken voor het NZK, dan is vermoedelijk nodig zowel kortdurende als langdurige buien te beschouwen, met dus bij een gegeven neerslagniveau *meerdere* afwaterende tijdsverlopen.

9 Enkele resultaten

In dit hoofdstuk worden ter illustratie van het model DEZY een aantal varianten doorgerekend. Die varianten zijn:

- Een hoger streefpeil: op alle drie meren/watersystemen streefpeil 0.2 m+NAP.
- Zeespiegelstijging 0.6 m.
- 15% hogere afvoer en neerslag.
- Pompen bij Den Oever (pompcapaciteit 500 m³/s).
- Pompen bij Den Oever (pompcapaciteit 500 m³/s) in combinatie met 0.3 m zeespiegelstijging.

In de resultaten worden alleen de veranderingen in de frequentielijnen behandeld, hoewel voor praktische toepassingen ook de veranderingen in de gemiddelde meerpeilen relevant zijn. Zoals uitgelegd in o.m. [Geerse en Wojciechowska, 2013] zijn voor de MHW's en benodigde kriunhoogten juist de gemiddelde meerpeilen van belang voor *winddominante* locaties, waar de bedreigende situatie bestaat uit een min of meer dagelijks meerpeil in combinatie met extreme wind. Deze winddominante locaties komen erg veel voor langs het IJssel- en Markermeer. N.B. Vanwege dat laatste is in DEZY ook erg veel zorg besteed aan een correctie beschrijving van de gemiddelde meerpeilen.

9.1 Keuze initiële peilen

Bij het doorrekenen van varianten is van belang dat geschikte initiële peilen voor het IJsselmeer, Markermeer en het NZK worden gekozen. Dat betreft de meerpeilen die worden gekozen aan het begin van de rekenduur B_1 (zie daarover paragraaf 7.2.2). De uitkomsten van DEZY hangen namelijk enigszins af van de keuzes daarvoor. In de afregeling en de validatie zijn deze initiële peilen gelijk gekozen aan de gemiddelde meerpeilen volgens de metingen. Maar als bijvoorbeeld in een klimaatscenario met 0.30 m zeespiegelstijging de initiële peilen niet worden verhoogd, resulteren te lage frequentielijnen en tevens te lage gemiddelde meerpeilen.

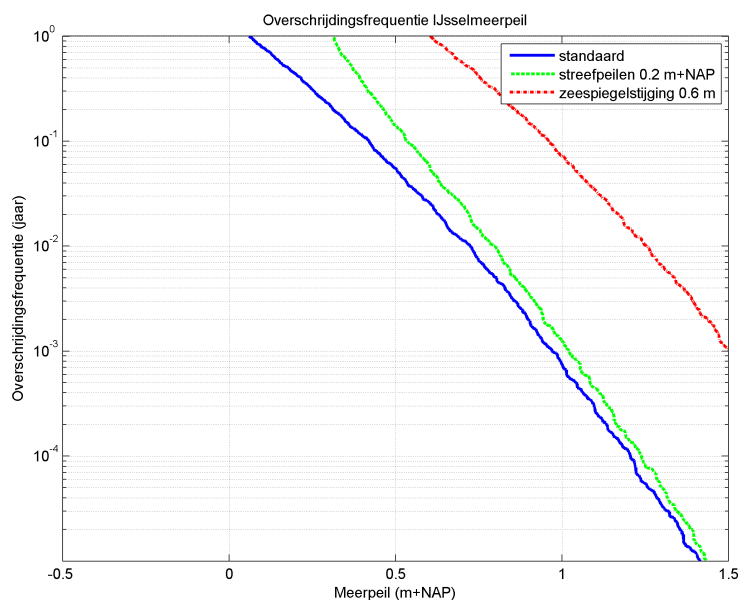
Een probleem is dat in varianten niet altijd op voorhand duidelijk is wat goede keuzes zijn voor de initiële peilen. Om geschikte keuzes te maken wordt een iteratief proces gevolgd (het NZK wordt hier gemakshalve ook aangeduid als een meer):

1. Maak een berekening met de standaardkeuzes voor de initiële peilen, en bepaal de door DEZY berekende peilen voor de meren.
2. Pas de initiële peilen aan, door daarvoor de in stap 1 berekende gemiddelde meerpeilen te kiezen. Maak de berekening opnieuw, wat resulteert in aangepaste gemiddelde peilen.
3. Herhaal de berekening met als initiële peilen de nieuwe gemiddelde peilen uit de voorgaande stap. Etcetera.

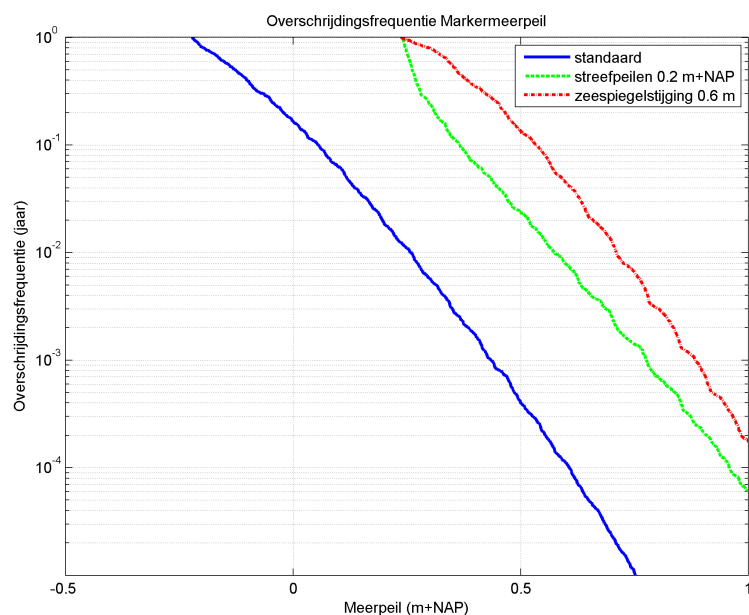
Het proces stopt op het moment dat de beginpeilen overeen stemmen met de gemiddelde peilen die door DEZY worden berekend. De aanname is dat met deze keuzes van de initiële peilen de werkelijkheid voldoende nauwkeurig wordt benaderd.

9.2 Streefpeilverhoging en zeespiegelstijging

Er is een berekening gemaakt met een 0.6 m hogere zeespiegel en een berekening met een 0.6 m hoger streefpeil. Op het IJssel- en Markermeer en het NZK wordt in het laatste geval het streefpeil dan 0.2 m+NAP. De resultaten voor het IJssel- en Markermeer staan in Figuur 9-1 en Figuur 9-2.



Figuur 9-1 Overschrijdingsfrequentie IJsselmeer, invloed ander streefpeil en zeespiegelstijging.



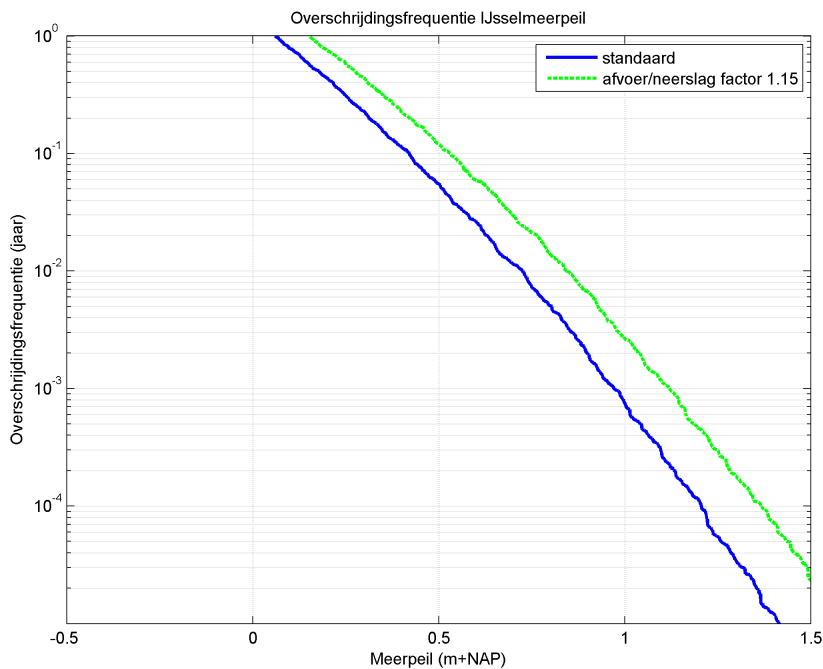
Figuur 9-2 Overschrijdingsfrequentie Markermeer, invloed ander streefpeil en zeespiegelstijging.

Voor beide meren leidt de zeespiegelstijging tot een nagenoeg constante verschuiving. Voor het IJsselmeer is die verschuiving ongeveer 0.54 m (circa 90% van de zeespiegelstijging) en voor het Markermeer ongeveer 0.45 (circa 75% van de zeespiegelstijging).

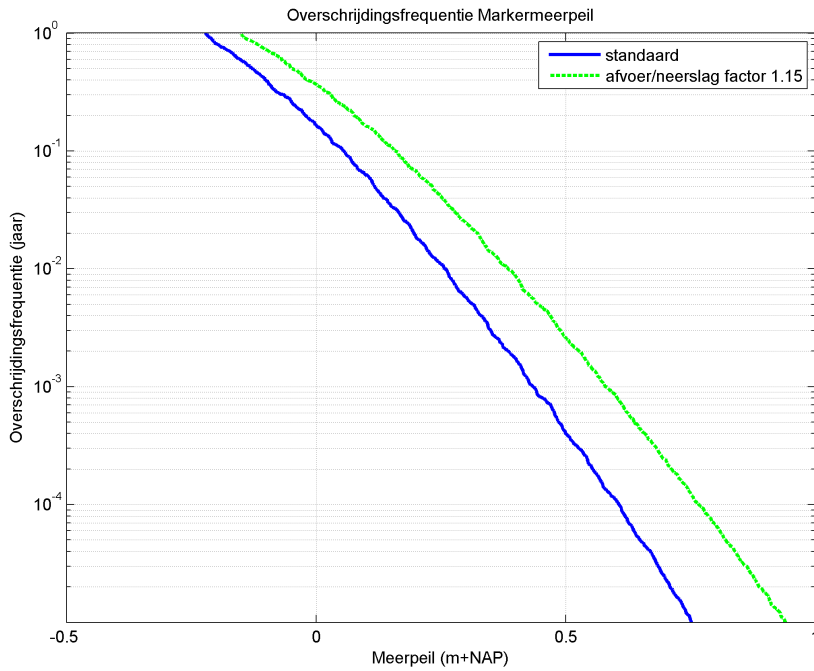
Voor het IJsselmeer blijkt de invloed van het streefpeil voor de extremere meerpeilen steeds minder te worden, maar niet voor het Markermeer, waar de streefpeilverandering ook voor de extreme meerpeilen doorwerkt.

9.3 Toename afvoer en neerslag

Om gevoel te krijgen voor de mate waarin een hogere neerslag en hogere afvoeren doorwerken op de resultaten, zijn alle afvoeren zowel als de neerslagen voor Noord-, Midden en West-Nederland met 15% verhoogd. De resultaten staan in Figuur 9-3 en Figuur 9-4. De invloed blijkt toe te nemen bij hoger wordende meerpeilen. Voor $T = 10000$ jaar is het verschil met de referentie (blauwe lijn) circa 0.15 m.



Figuur 9-3 Overschrijdingsfrequentie IJsselmeer, invloed 15% hogere afvoer en neerslag.

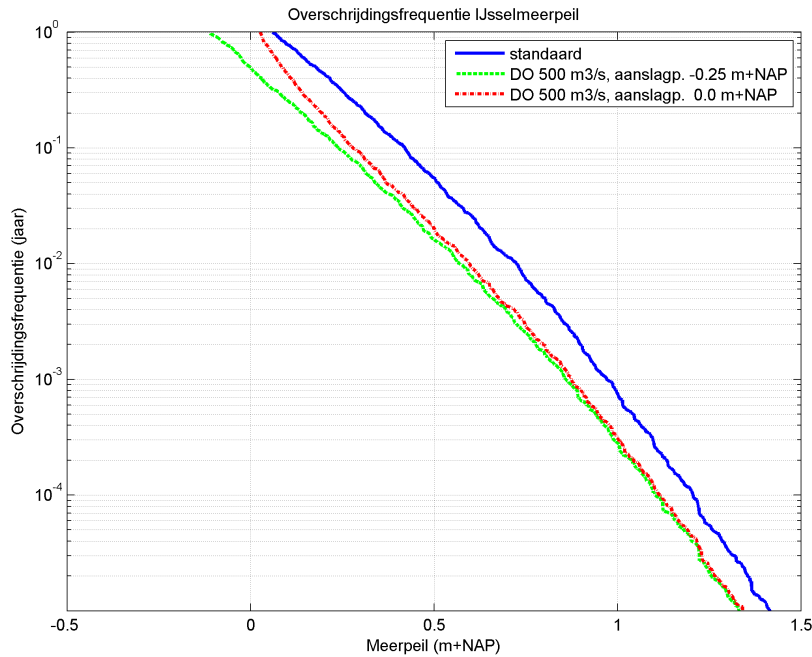


Figuur 9-4 Overschrijdingsfrequentie Markermeer, invloed 15% hogere afvoer en neerslag.

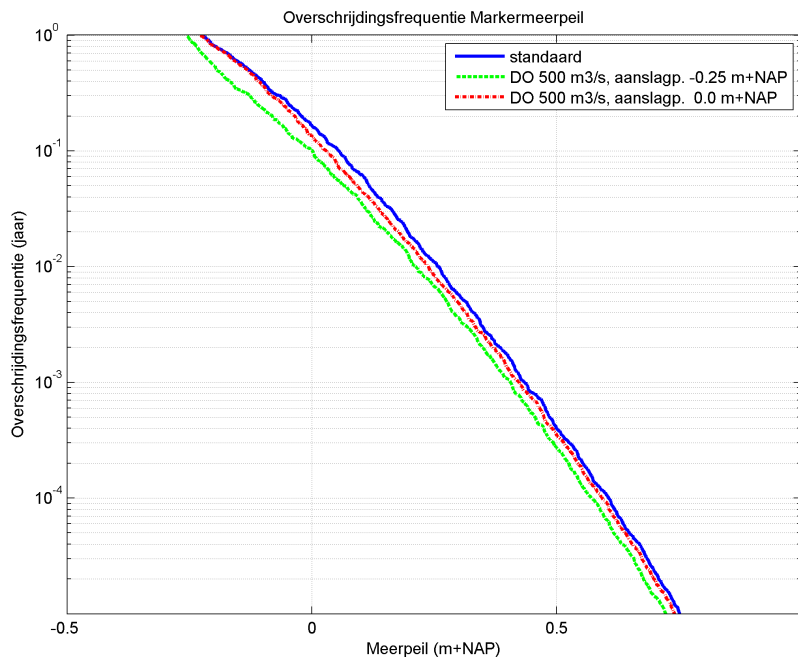
9.4 Pompen bij Den Oever

Er is onderzocht wat de invloed is van pompen bij Den Oever, voor pompcapaciteit 500 m³/s. Daarbij zijn twee aanslagpeilen gekozen: -0.25 m+NAP en 0.0 m+NAP. Bij het eerste (lage) peil wordt wel de term *pro-actief* pompen gebruikt, omdat ook bij lage peilen al wordt gepompt, terwijl bij het hogere aanslagpeil de term *reactief* pompen wordt gebruikt, omdat alleen bij hoge peilen wordt gepompt.

De resultaten staan in Figuur 9-5 en Figuur 9-6. Uiteraard is het effect van de pompen het grootst bij het laagste aanslagpeil. De resultaten laten zien dat het effect van pompen afneemt met toenemende meerpeilen. Het effect van pompen is het grootst op het IJsselmeer, wat plausibel is omdat Den Oever aan het IJsselmeer grenst.



Figuur 9-5 Overschrijdingsfrequentie IJsselmeer, effect van pompen bij Den Oever.

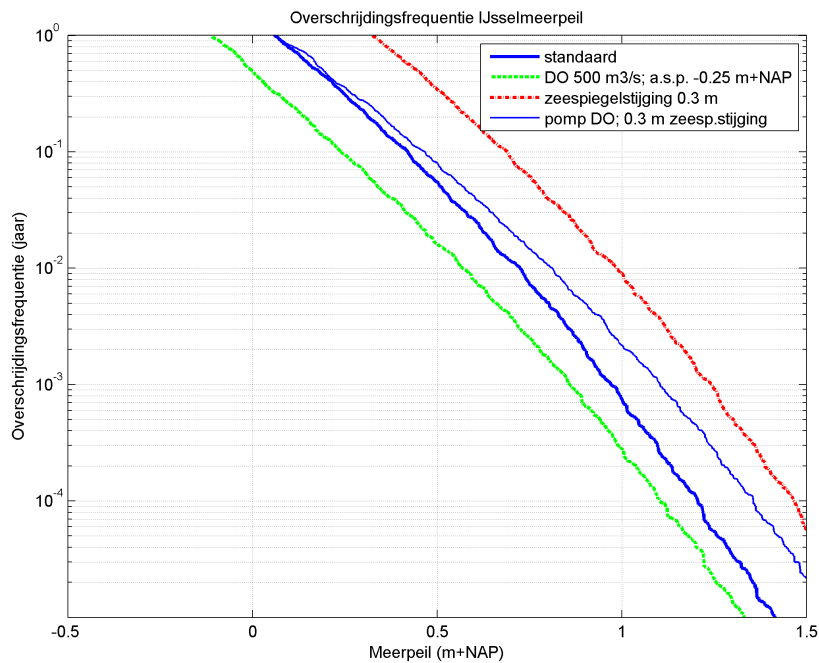


Figuur 9-6 Overschrijdingsfrequentie Markermeer, effect van pompen bij Den Oever.

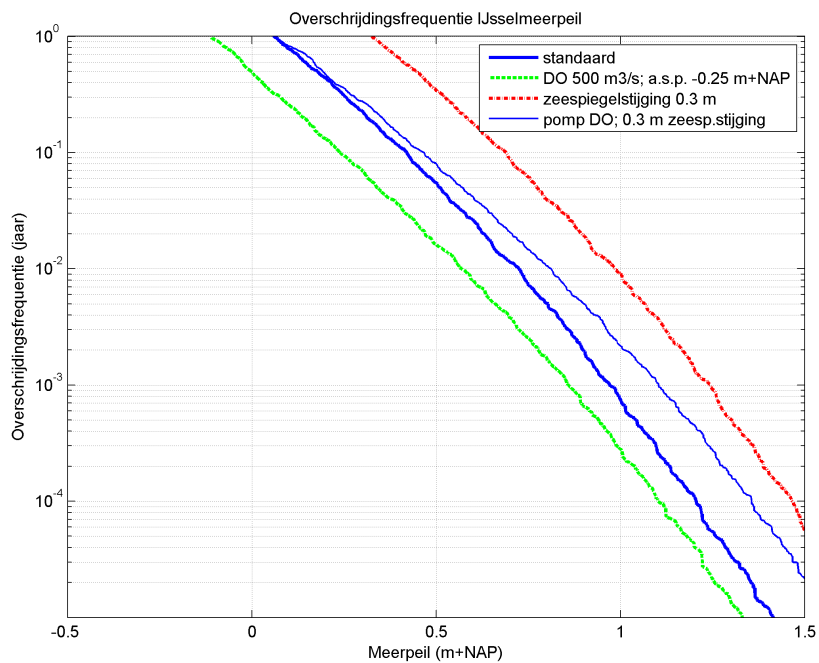
9.5 Gecombineerd effect van pompen bij Den Oever en zeespiegelstijging

Een interessante vraag is in hoeverre stijging van de zeespiegel kan worden opgevangen door pompen. Als voorbeeld is hier een zeespiegelstijging van 0.3 m beschouwd, in combinatie met een pomp bij Den Oever van 500 m³/s, met aanslagepeil -0.25 m+NAP (zie Figuur 9-7 en Figuur 9-8). Dan blijkt dat deze pompcapaciteit niet voldoende is om de extreme meerpeilen

onder de waarden voor de referentie te houden. De daarvoor benodigde capaciteit zal flink groter moeten zijn. Het is in dit voorbeeld niet onderzocht welke capaciteit wel voldoende is.



Figuur 9-7 Overschrijdingsfrequentie IJsselmeer, effect van pompen bij Den Oever in combinatie met zeespiegelstijging.



Figuur 9-8 Overschrijdingsfrequentie Markermeer, effect van pompen bij Den Oever in combinatie met zeespiegelstijging.

10 Conclusies en aanbevelingen

Dit rapport doet verslag van de bouw van model DEZY, dat ten doel heeft om op probabilistische wijze meerpeilstatistiek te bepalen voor het IJsselmeer en Markermeer. In het model is ook het NZK opgenomen (inclusief Amsterdam Rijnkanaal), maar alleen op versimpelde wijze. In het model is statistiek van afvoeren, neerslag, zeewaterstand en wind opgenomen, inclusief correlaties daartussen. Het model is vervolgens geïmplementeerd in een computerprogramma.

10.1 Conclusies IJssel- en Markermeer

Het model is gevalideerd aan de hand van metingen voor het IJssel- en Markermeer. De uitkomsten van het model blijken goed overeen te stemmen met de belangrijkste statistische kenmerken van deze metingen. In het bereik van de data blijkt dat het geval voor zowel de *overschrijdingsfrequentie* als de *momentane kansen*. Dat geldt eveneens voor het gemiddelde meerpeil: de waarden volgens het model en de data stemmen tot op circa 0.02 m overeen. Daarnaast vertonen de resultaten in het extreme (niet in de metingen aanwezige bereik) plausibele resultaten. Als onderdeel van de validatie zijn verder gevoeligheidsonderzoeken uitgevoerd, om te onderzoeken in hoeverre de modelresultaten afhangen van bepaalde modelkeuzes. Zo is de invloed onderzocht van o.m.: afvoercoëfficiënten Den Oever en Kornwerderzand, tijdsdcretisatie, tijdsverloop neerslag, modellering scheefstand, modellering van de correlatie tussen afvoer - neerslag en de modellering van de correlatie IJsselafvoer - Waddenzee.

De algehele conclusie is dat het model de overschrijdingsfrequentie en de momentane kansen van het IJssel- en het Markermeer bevredigend berekent, evenals het gemiddelde meerpeil. Wel is een kanttekening dat het model de overschrijdingsduren van meerpeiltoppen mogelijk iets onderschat: het valt niet uit te sluiten dat in werkelijkheid meerpeilgolven nog (iets) langer kunnen aanhouden dan zoals berekend door het model. Zie hierover de aanbevelingen in paragraaf 10.3.

Met het model kunnen voor deze meren diverse scenario's worden doorgerekend, door op de juiste wijze invoerparameters en invoerbestanden aan te passen. Te denken valt aan:

- zeespiegelstijging
- ander streefpeil
- pompen in de Afsluitdijk of Houtribdijk, eventueel in combinatie met zeespiegelstijging
- andere afvoerstatistiek voor Olst, Dalfsen en neerslag
- andere afvoerverdeling op de IJsselkop
- extra spuicapaciteit Afsluitdijk of Houtribdijk

10.2 Conclusies Noordzeekanaal

In het model is ook het NZK opgenomen, maar alleen op versimpelde wijze. De uitkomsten van het model mogen echter niet gebruikt mag worden om waterstandstatistiek voor het NZK te bepalen. Het NZK heeft namelijk een veel geringer bergend oppervlak dan de grotere meren IJssel- en Markermeer, waardoor kortdurende buien het meerpeil van het NZK veel meer kunnen beïnvloeden dan op deze grote meren. Dat maakt het noodzakelijk het tijdsverloop van

de afwaterende neerslag veel nauwkeuriger te modelleren dan nu in het model gebeurt. Daarbij moet ook rekening worden gehouden met maalstops, wat nu ook niet het geval is.

Een dergelijk verbeterd tijdsverloop voor de afwatering is niet eenvoudig af te leiden. Wil men het model DEZY geschikt maken voor het NZK, dan moet per gegeven neerslagvolume mogelijk ook met *meerdere* afwaterende tijdsverlopen worden gewerkt, die dan elk met een bepaalde kans voorkomen; dergelijke tijdsverlopen zijn dan afkomstig van *meerdere buipatronen*. Op dit moment is nog onduidelijk hoe dergelijke afwaterende tijdsverlopen bepaald kunnen worden. Mogelijk is daarvoor het model SOBEM vereist. Als dat laatste het geval is, wordt model DEZY aanmerkelijk gecompliceerder dan nu het geval is, met tevens gevolgen voor de rekentijd.

10.3 Aanbevelingen

Hiervoor is gesteld dat model DEZY de topduren (oftwel de gemiddelde overschrijdingsduren van meerpeilniveaus) mogelijk onderschat. Op grond van oriënterende berekeningen voor het IJsselmeer is het vermoeden dat deze eventuele onderschatting van de topduren weinig invloed zal hebben op de toetspeilen en benodigde kruinhoogtes voor het IJssel- en Markermeer. Er wordt aanbevolen om de laatste bewering te verifiëren met het model Hydra-Zoet.

Voor elk van beide meren moeten dan met Hydra-Zoet berekeningen worden gemaakt voor de faalmechanismes waterstand en golfoverslag, voor een aantal locaties verspreid langs deze meren. De Hydra-Zoet berekeningen kunnen voor verschillende meerpeilgolven worden gemaakt, waarbij smallere en bredere golven kunnen worden beschouwd (de vorm en breedte van de meerpeilgolven kan in Hydra-Zoet relatief eenvoudig gevarieerd worden). Op deze manier kan worden onderzocht in welke mate de duren van meerpeilgolven van invloed zijn op de berekende toetspeilen en benodigde kruinhoogtes.

11 Referenties

[Blaakman et al., 1999]

Achtergronden Hydraulische Belastingen Dijken IJsselmeergebied. Deelrapport 2: Meerpeilstatistiek. E.J. Blaakman, H. Buiteveld, H.C. van Twuiver, A. van Agthoven. RIZA rapport 99.039. Rijkswaterstaat-RIZA. Lelystad, 25 maart 1999.

[Deelrapportage Houtribsluizen, 2011]

Deelrapportage Houtribsluizen. Project: Planstudie Rijksvisspassages. Royal Haskoning, april 2011 (referentie: 9W2530.A0/R0018/408045/VVDM/Nijm).

[Dulfer et al., 2014]

Bepalen overschrijdingskans maximaal meerpeil, rekening houdend met op- en afwaaiing. Stagerverslag HKV. Claire Dulfer, met medewerking van Bastiaan Kuijper, Chris Geerse (HKV) en Dorota Kurowicka.

[Fokkink, 1997]

Onafhankelijk onderzoek Markermeer. Fase-rapport 1A : deelonderzoek meerpeilstatistiek. R.J. Fokkink. WL|Delft Hydraulics, december 1997.

[Geerse, 2006]

Hydraulische Randvoorwaarden 2006 Vecht- en IJsseldelta - Statistiek IJsselmeerpeil, afvoeren en stormverlopen voor Hydra-VIJ. C.P.M. Geerse. RIZA-werkdocument 2006.036x. Rijkswaterstaat-RIZA. Lelystad, januari 2006.

[Geerse, 2008]

Hydra-VIJ invoer Markermeer (herziene en uitgebreide versie van 9 oktber). C.P.M. Geerse. Memo PR1371.30. HKV Lijn in Water, Lelystad, 28 augustus 2008.

[Geerse, 2009]

Hydra-VIJ en Hydra-Zoet invoer IJsselmeer. C.P.M. Geerse. Memo PR1564.10. HKV Lijn in Water, april 2009.

[Geerse, 2011]

Hydra-Zoet for the fresh water systems in the Netherlands. Probabilistic model for the assessment of dike heights. C.P.M. Geerse (HKV), met medewerking van Robert Slomp (Waterdienst) en J.P. de Waal (Deltares). HKV Lijn in Water, december 2011. In opdracht van de Waterdienst.

[Geerse en Wojciechowska, 2013]

Invloed ander streefpeilbeheer IJsselmeergebied in Deltamodel. Opzetten meerpeil in maart met pompen in Afsluitdijk, versus referentiescenario. PR2654.10. Chris Geerse en Karolina Wojciechowska. HKV Lijn in Water, december 2013.

[Geerse, 2013]

Correlatie tussen stormvloed en afvoeren voor de benedenrivieren. Mate van correlatie en geschatte invloed op de Toetspeilen. C.P.M. Geerse. PR2442.10. HKV Lijn in Water, mei 2013. In opdracht van Rijkswaterstaat Waterdienst.

[Geerse en Wojciechowska, 2014]

Betrouwbaarheidsintervallen voor kwantielen van de overschrijdingsfrequentie. Toepassing op kuststations en IJsselmeergebied. PR 2829.20. Chris Geerse en Karolina Wojciechowska. HKV Lijn in Water, juli 2014.

[Geerse en Kuijper, 2014]

Probabilistisch model frequentielijn IJsselmeer. Chris Geerse en Bastiaan Kuijper. PR2894.10. HKV Lijn in Water, november 2014.

[Van Haaren en Geerse, 2015]

Correlaties neerslag, afvoer en zeewaterstand IJsselmeergebied. Dirk van Haaren en Chris Geerse. PR3042.10. HKV Lijn in Water, mei 2015.

[Lodder, 2008]

Achtergrondrapport HR 2006 voor de Meren. Q. J. Lodder. Rijkswaterstaat RIZA. Rapport 2007.025, november 2008.

[Van Meurs et al, 2014]

Fase 4 - Toets waterveiligheid. G.A.M. van Meurs, C.P.M. Geerse en Q. Gao. Kenmerk 1208527-000-VEB-0004. Deltares, januari 2014.

[Miedema en Pompert, 2014]

Beschrijving van IWP-spuiformules. Toegeleverd per mail door Erik Pompert en Hans Miedema, RWS, 26 augustus 2014.

[Pengel en Geerse H, 2001]

Overschrijdingskansen van waterstanden in het Noordzeekanaal en het Amsterdam-Rijnkanaal. Bob Pengel en Hans Geerse. PR447.10. HKV Lijn in Water, 2001.

[Pompert, 2014]

Toelevering Excelsheets met waterbalansen, per mail, 18 augustus 2014.

[Projectnota Krabbersgatsluis, 1994]

Projectnota Krabbersgatsluis. Directie Flevoland, 1994.

Bijlagen

Bijlage A: Weergave invoerbestanden

Deze bijlage geeft de inhoud van diverse invoerbestanden, met als doel de gebruikte gegevens eenduidig vast te leggen. Het betreft de volgende bestanden:

- A.1: Overschrijdingskansen en topduren afvoerstatistiek:
 - Piekafvoer IJssel
 - Piekafvoer Vecht
 - Piekafvoer Eem

- A.2: Overschrijdingskansen en topduren neerslagstatistiek:
 - 30-daagse neerslagsom Noord-Nederland
 - 30-daagse neerslagsom Midden-Nederland
 - 30-daagse neerslagsom West-Nederland

- A.3: Correlatieparameters voor het 2LijnenModel:
 - Piekafvoer IJssel - piekafvoer Vecht
 - Piekafvoer IJssel - piekafvoer Eem
 - Piekafvoer IJssel - 30-daagse neerslagsom Noord-Nederland
 - Piekafvoer IJssel - 30-daagse neerslagsom Midden-Nederland
 - Piekafvoer IJssel - 30-daagse neerslagsom West-Nederland

- A.4: Correlatie tussen IJsselaflow en zeewaterstand.

- A.5: Scheefstandparameters

N.B. Een belangrijk invoerbestand is het databestand met uurwaarden van de wind en de zeewaterstanden te Den Oever, Kornwerderzand en IJmuiden. Dat bestand is echter te groot om weer te geven.

Bijlage A.1 Overschrijdingskansen en topduren afvoerstatistiek

```

%-----
% OVERSCHRIJDINGSKANSEN PIEKAFVOER IJSSEL (OLST) IN BASISDUUR 30 DAGEN
%-----
% Afvoer          Ovkans
% [m3/s]          [-]
%
% 300             1.0000E+00
% 800             1.6667E-01
% 2720            1.3333E-04
%-----
    
```

```

%-----
% TOPDUREN PIEKAFVOER IJSSEL (OLST)
%-----
% Afvoer          Topduur
% [m3/s]          [uur]
%
% 300              24
% 4000             24
%-----
    
```

IJsselafvoer

```

%-----
% OVERSCHRIJDINGSKANSEN PIEKAFVOER VECHT (DALFSEN) IN BASISDUUR 30 DAGEN
%-----
% Afvoer          Ovkans
% [m3/s]          [-]
%
% 10               1.0000E+00
% 180              1.6667E-01
% 550              1.3333E-04
%-----
    
```

```

%-----
% TOPDUREN PIEKAFVOER VECHT (DALFSEN)
%-----
% Afvoer          Topduur
% [m3/s]          [uur]
%
% 10               48
% 800              48
%-----
    
```

Vechtafvoer

```

%-----
% OVERSCHRIJDINGSKANSEN PIEKAFVOER EEM (AMERSFOORT) IN BASISDUUR 30 DAGEN
%-----
% Afvoer          Ovkans
% [m3/s]          [-]
%
% 8                1.0000E+00
% 40               3.0000E-01
% 107              1.6667E-02
% 134              1.6667E-03
% 163              1.3333E-04
%-----
    
```

```

%-----
% TOPDUREN PIEKAFVOER EEM (AMERSFOORT)
%-----
% Afvoer          Topduur
% [m3/s]          [uur]
%
% 8                6
% 500              6
%-----
    
```

Femafvoer

Bijlage A.2 Overschrijdingskansen en topduren neerslagstatistiek

OVERSCHRIJDINGSKANSEN NEERSLAGVOLUME NOORD-NL IN BASISDUUR 30 DAGEN	
Neerslag [mm]	Ovkans [-]
11.4	1.00E+00
22.8	9.30E-01
34.2	8.63E-01
45.6	7.58E-01
57.0	6.54E-01
68.4	5.42E-01
79.8	4.18E-01
91.2	3.08E-01
102.6	2.22E-01
114.0	1.63E-01
125.4	1.05E-01
127.0	9.82E-02
224.0	1.90E-03

TOPDUREN NEERSLAGVOLUME NOORD-NL	
Neerslag [mm]	Topduur [uur]
11.4	288
1200.0	288

Neerslag Noord-Nederland

OVERSCHRIJDINGSKANSEN NEERSLAGVOLUME MIDDEN-NL IN BASISDUUR 30 DAGEN	
Neerslag [mm]	Ovkans [-]
11.4	1.00E+00
22.8	9.34E-01
34.2	8.52E-01
45.6	7.61E-01
57.0	6.59E-01
68.4	5.46E-01
79.8	4.36E-01
91.2	3.15E-01
102.6	2.24E-01
114.0	1.66E-01
125.4	1.18E-01
131.8	9.85E-02
225.7	1.59E-03

TOPDUREN NEERSLAGVOLUME MIDDEN-NL	
Neerslag [mm]	Topduur [uur]
11.4	120
1200.0	120

Neerslag Midden-Nederland

```

-----
% OVERSCHRIJDINGSKANSEN NEERSLAGVOLUME WEST-NL IN BASISDUUR 30 DAGEN
-----
% Neerslag      Ovkans
% [mm]         [-]
%
% 11.4         1.00E+00
% 22.8         9.34E-01
% 34.2         8.52E-01
% 45.6         7.61E-01
% 57.0         6.59E-01
% 68.4         5.46E-01
% 79.8         4.36E-01
% 91.2         3.15E-01
% 102.6        2.24E-01
% 114.0        1.66E-01
% 125.4        1.18E-01
% 131.8        9.85E-02
% 225.7        1.59E-03
-----
%
% TOPDUREN NEERSLAGVOLUME WEST-NL
-----
% Neerslag      Topduur
% [mm]         [uur]
%
% 11.4          288
% 1200.0        288
-----

```

Neerslag West-Nederland

Bijlage A.3 Correlatieparameters voor het 2LijnenModel

```

-----
% ONDERSTE (1) en BOVENSTE (2) VERBAND CORRELATIEMODEL VECHT (DALFSEN)
-----
% Verband      Ovkans      Factor
% [-]         [-]         [-]
%
% 1            0.16667     0.6
% 1            1.0E-10     0.6
% 2            0.16667     1.3
% 2            1.0E-10     1.2
-----

```

Correlatie piekafvoer IJssel - piekafvoer Vecht

```

-----
% ONDERSTE (1) en BOVENSTE (2) VERBAND CORRELATIEMODEL EEM (AMERSFOORT)
-----
% Verband      Ovkans      Factor
% [-]         [-]         [-]
%
% 1            0.16667     0.6
% 1            1.0E-10     0.6
% 2            0.16667     1.3
% 2            1.0E-10     1.2
-----

```

Correlatie piekafvoer IJssel - piekafvoer Eem

```

-----
% ONDERSTE (1) en BOVENSTE (2) VERBAND CORRELATIEMODEL NEERSLAG NOORD-NL
-----
% Verband      Ovkans      Factor
% [-]         [-]         [-]
%
% 1            0.16667     0.6
% 1            1.0E-10     0.6
% 2            0.16667     1.5
% 2            1.0E-10     1.2
-----

```

Correlatie piekafvoer IJssel - 30-daagse neerslagsom Noord-Nederland

```

% -----
% ONDERSTE (1) en BOVENSTE (2) VERBAND CORRELATIEMODEL NEERSLAG MIDDEN-NL
% -----
% Verband      OvKans      Factor
% [-]          [-]          [-]
%
%      1      0.16667      0.6
%      1      1.0E-10      0.6
%      2      0.16667      1.5
%      2      1.0E-10      1.2
% -----

```

Correlatie piekafvoer IJssel - 30-daagse neerslagsom Midden-Nederland

```

% -----
% ONDERSTE (1) en BOVENSTE (2) VERBAND CORRELATIEMODEL NEERSLAG WEST-NL
% -----
% Verband      OvKans      Factor
% [-]          [-]          [-]
%
%      1      0.16667      0.6
%      1      1.0E-10      0.6
%      2      0.16667      1.5
%      2      1.0E-10      1.2
% -----

```

Correlatie piekafvoer IJssel - 30-daagse neerslagsom West-Nederland

Bijlage A.4 Correlatie tussen IJsselaflow en zeewaterstand

```

% -----
% CORRECTIE ZEEWATERSTANDEN ALS FUNCTIE VAN PIEKAFVOER IJSSEL (OLST)
% -----
% Afvoer      Den Oever      Kornwerderzand      IJmuiden
% [m3/s]      [m]              [m]                  [m]
%
%      120      0.00            0.00                0.00
%      400      0.00            0.00                0.00
%      700      0.13            0.13                0.13
%      800      0.15            0.15                0.15
%      1100     0.19            0.19                0.19
%      1500     0.21            0.21                0.21
%      2000     0.23            0.23                0.23
%      3000     0.25            0.25                0.25
%      4000     0.25            0.25                0.25
% -----

```

Bijlage A.5 Scheefstandparameters

```

% -----
% PROBABILISTISCH MODEL FREQUENTIELIJNEN IJSSELMEERPEIL
% -----
% PARAMETERS VOOR BEPALING SCHEEFSTAND BIJ SPUISLUIZEN
% -----
%
% Locatie                Afkorting   Parameter a   Parameter b
%                               [-]          [s/m]
% Den Oever              DO          0.900        0.016
% Kornwerderzand         KWZ          0.900        0.016
% Krabbersgatsluizen IJsselmeerkant KGSIJM      0.900        0.016
% Krabbersgatsluizen Markermeerkant KGSMM       0.900        0.016
% Houtribsluizen IJsselmeerkant  HRSIJM      0.900        0.016
% Houtribsluizen Markermeerkant  HRSMM       0.900        0.016
% Oranjesluizen Markermeerkant   OSM         0.900        0.016
% Oranjesluizen Noordzeekanaal   OSNZK       0.900        0.016
% IJmuiden               IJM         0.900        0.016
%
% K-waarden per windrichting:
%
% richting      DO      KWZ      KGSIJM      KGSMM      HRSIJM      HRSMM      OSM      OSNZK      IJM
% [°]           [s^2/m] [s^2/m] [s^2/m]     [s^2/m]     [s^2/m]     [s^2/m]     [s^2/m] [s^2/m]     [s^2/m]
%
% 0.0   -6.900E-04 -1.564E-03  6.900E-04 -1.086E-03  1.449E-03 -2.000E-05  1.312E-03  0  0
% 22.5  -1.730E-04 -1.340E-03  7.250E-04 -1.071E-03  1.208E-03 -2.970E-04  1.710E-03  0  0
% 45.0   3.340E-04 -9.430E-04  6.670E-04 -9.120E-04  8.170E-04 -5.330E-04  1.855E-03  0  0
% 67.5   8.110E-04 -3.970E-04  5.350E-04 -6.100E-04  3.220E-04 -6.970E-04  1.743E-03  0  0
% 90.0   1.242E-03  2.760E-04  3.450E-04 -1.640E-04 -2.300E-04 -7.580E-04  1.370E-03  0  0
% 112.5  1.415E-03  8.460E-04  6.900E-05  2.510E-04 -7.300E-04 -6.510E-04  8.170E-04  0  0
% 135.0  1.415E-03  1.288E-03 -2.190E-04  6.150E-04 -1.116E-03 -4.820E-04  4.160E-04  0  0
% 157.5  1.214E-03  1.547E-03 -4.770E-04  8.970E-04 -1.352E-03 -2.510E-04  0  0  0
% 180.0  7.820E-04  1.564E-03 -6.670E-04  1.066E-03 -1.403E-03  4.100E-05  0  0  0
% 202.5  2.130E-04  1.271E-03 -7.360E-04  1.023E-03 -1.162E-03  4.290E-04  0  0  0
% 225.0 -3.340E-04  8.740E-04 -6.900E-04  8.750E-04 -7.590E-04  5.530E-04  0  0  0
% 247.5 -8.280E-04  3.970E-04 -5.410E-04  6.060E-04 -2.240E-04  6.930E-04  0  0  0
% 270.0 -1.242E-03 -1.380E-04 -2.990E-04  2.480E-04  4.140E-04  7.430E-04  0  0  0
% 292.5 -1.363E-03 -6.730E-04 -6.000E-06 -1.730E-04  9.150E-04  6.440E-04  0  0  0
% 315.0 -1.300E-03 -1.104E-03  2.760E-04 -5.530E-04  1.265E-03  4.790E-04  3.480E-04  0  0
% 337.5 -1.070E-03 -1.409E-03  5.180E-04 -7.920E-04  1.449E-03  3.470E-04  5.520E-04  0  0
% 360.0 -6.900E-04 -1.564E-03  6.900E-04 -1.086E-03  1.449E-03 -2.000E-05  1.312E-03  0  0
% -----

```

Bijlage B: Parameterinstellingen

Deze bijlage bevat het stuurbestand "invoer.txt" van het model DEZY. De inhoud is over meerdere pagina's verdeeld.

```
% -----
% PROBABILISTISCH MODEL FREQUENTIELIJNEN IJSSELMEERPEIL
%
% INVOERFILE
% -----
%
% BASISINSTELLINGEN
%
% invoerbestanden overschrijdingskansen afvoer en neerslag
%
qIJovKansFile = qIJovKans.txt % overschrijdingskansen piekafvoer IJssel
qVovKansFile  = qVovKans.txt  % overschrijdingskansen piekafvoer Vecht
qEovKansFile  = qEovKans.txt  % overschrijdingskansen piekafvoer Eem
gNNovKansFile = gNNovKans.txt % overschrijdingskansen neerslag Noord-NL
gNMovKansFile = gNMovKans.txt % overschrijdingskansen neerslag Midden-NL
gNWovKansFile = gNWovKans.txt % overschrijdingskansen neerslag West-NL
%
% invoerbestanden topduren afvoeren en neerslag
%
qIJtopduurFile = qIJtopduur.txt % topduren piekafvoer IJssel
qVtopduurFile  = qVtopduur.txt  % topduren piekafvoer Vecht
qEtopduurFile  = qEtopduur.txt  % topduren piekafvoer Eem
gNNtopduurFile = gNNtopduur.txt % topduren neerslag Noord-NL
gNMtopduurFile = gNMtopduur.txt % topduren neerslag Midden-NL
gNWtopduurFile = gNWtopduur.txt % topduren neerslag West-NL
%
% invoerbestanden correlatiemodel
%
qVcorrParFile = qVcorrPar.txt % parameters correlatie IJssel - Vecht
qEcorrParFile = qEcorrPar.txt % parameters correlatie IJssel - Eem
gNNcorrParFile = gNNcorrPar.txt % parameters correlatie IJssel - Noord-NL
gNMcorrParFile = gNMcorrPar.txt % parameters correlatie IJssel - Midden-NL
gNWcorrParFile = gNWcorrPar.txt % parameters correlatie IJssel - West-NL
%
% overige invoerbestanden
%
WWdataFile      = WWdata1981_2010.txt % meetreeks wind en zeewaterstand
WWcorrFile      = WWcorr.txt          % parameters correlatie IJssel - zee
KtabelFile      = Ktabel.txt          % tabel met K-waarden windopzet
%
% algemene parameters
%
basisduur       = 30      % basisduur (dagen)
rekenduurVoor   = 7      % extra rekenduur traject voor basisduur (dagen)
rekenduurNa     = 8      % extra rekenduur traject na basisduur (dagen)
tijdstapModel   = 3      % tijdstap model (voor meerpeilverlopen) (uur)
kansCorrelatie  = 0.6    % kans onderste verband correlatiemodel (-)
qIJstap         = 250    % stapgrootte discretisatie IJsselaflow (m3/s)
NreeksWW        = 120    % aantal reeksen wind/zeewaterstand (-)
%
% parameters afvoer IJssel
%
qIJfase         = 0      % faseverschil afvoertrapezia IJssel (dagen)
qIJtijdBegin    = -15   % begintijdstip was v/d golfvorm IJssel (dagen)
qIJtijdEind     = 15    % eindtijdstip val v/d golfvorm IJssel (dagen)
qIJahBegin      = 1     % breedtefactor was v/d golfvorm IJssel (-)
qIJahBegin      = 1     % hoogtefactor was v/d golfvorm IJssel (-)
qIJahEind       = 1     % breedtefactor val v/d golfvorm IJssel (-)
qIJahEind       = 1     % hoogtefactor val v/d golfvorm IJssel (-)
qIJfactor       = 1     % factor tbv aanpassing afvoer IJssel (-)
qIJaftop        = 1E6   % aftopniveau afvoertrapezia IJssel (m3/s)
```

```

% parameters afvoer Vecht
%
qVfase           = -4      % faseverschil afvoertrapezia Vecht (dagen)
qVtjdBegin      = -15     % begintijdstip was v/d golfvorm Vecht (dagen)
qVtjdEind       = 15      % eindtijdstip val v/d golfvorm Vecht (dagen)
qVahBegin       = 1       % breedtefactor was v/d golfvorm Vecht (-)
qVavBegin       = 1       % hoogtefactor was v/d golfvorm Vecht (-)
qVahEind        = 1       % breedtefactor val v/d golfvorm Vecht (-)
qVavEind        = 1       % hoogtefactor val v/d golfvorm Vecht (-)
qVfactor        = 1       % factor tbv aanpassing afvoer Vecht (-)
qVaftop         = 1E6     % aftopniveau afvoertrapezia Vecht (m3/s)
%
% parameters afvoer Eem
%
qEfase          = -4      % faseverschil afvoertrapezia Eem (dagen)
qEtjdBegin      = -15     % begintijdstip was v/d golfvorm Eem (dagen)
qEtjdEind       = 15      % eindtijdstip val v/d golfvorm Eem (dagen)
qEahBegin       = 0.3     % breedtefactor was v/d golfvorm Eem (-)
qEavBegin       = 0.25    % hoogtefactor was v/d golfvorm Eem (-)
qEahEind        = 0.3     % breedtefactor val v/d golfvorm Eem (-)
qEavEind        = 0.25    % hoogtefactor val v/d golfvorm Eem (-)
qEfactor        = 1       % factor tbv aanpassing afvoer Eem (-)
qEaftop         = 1E6     % aftopniveau afvoertrapezia Eem (m3/s)
%
% parameters neerslag Noord-Nederland (afwatering op IJsselmeer)
%
gNNfase         = -5      % faseverschil neerslagtrapezia Noord-NL (dagen)
gNNTijdBegin    = -15     % begintijdstip was v/d neerslag Noord-NL (dagen)
gNNTijdEind     = 15      % eindtijdstip val v/d neerslag Noord-NL (dagen)
gNNahBegin      = 1       % breedtefactor was v/d neerslag Noord-NL (-)
gNNavBegin      = 1       % hoogtefactor was v/d neerslag Noord-NL (-)
gNNahEind       = 1       % breedtefactor val v/d neerslag Noord-NL (-)
gNNavEind       = 1       % hoogtefactor val v/d neerslag Noord-NL (-)
gNNfactor       = 1       % factor tbv aanpassing neerslag Noord-NL (-)
gNNAftop        = 1E6     % aftopniveau neerslagtrapezia Noord-NL (mm/dag)
%
% parameters neerslag Midden-Nederland (afwatering op Markermeer)
%
gNMfase         = -7      % faseverschil neerslagtrapezia Midden-NL (dagen)
gNMTijdBegin    = -12     % begintijdstip was v/d neerslag Midden-NL (dagen)
gNMTijdEind     = 12      % eindtijdstip val v/d neerslag Midden-NL (dagen)
gNMahBegin      = 1       % breedtefactor was v/d neerslag Midden-NL (-)
gNMavBegin      = 1       % hoogtefactor was v/d neerslag Midden-NL (-)
gNMahEind       = 1       % breedtefactor val v/d neerslag Midden-NL (-)
gNMavEind       = 1       % hoogtefactor val v/d neerslag Midden-NL (-)
gNMfactor       = 1       % factor tbv aanpassing neerslag Midden-NL (-)
gNMAftop        = 1E6     % aftopniveau neerslagtrapezia Midden-NL (mm/dag)
%
% parameters neerslag West-Nederland (afwatering op Noordzeekanaal)
%
gNWfase         = -5      % faseverschil neerslagtrapezia West-NL (dagen)
gNWTijdBegin    = -15     % begintijdstip was v/d neerslag West-NL (dagen)
gNWTijdEind     = 15      % eindtijdstip val v/d neerslag West-NL (dagen)
gNWahBegin      = 1       % breedtefactor was v/d neerslag West-NL (-)
gNWavBegin      = 1       % hoogtefactor was v/d neerslag West-NL (-)
gNWahEind       = 1       % breedtefactor val v/d neerslag West-NL (-)
gNWavEind       = 1       % hoogtefactor val v/d neerslag West-NL (-)
gNWfactor       = 1       % factor tbv aanpassing neerslag West-NL (-)
gNWAftop        = 1E6     % aftopniveau neerslagtrapezia West-NL (mm/dag)
%
% parameters zeewaterstanden Waddenzee en IJmuiden
%
WWcorrRefJaar   = 2015    % referentiejaar bij homogenisatie
WWcorrStijging  = 0.2     % stijging bij homogenisatie reeks (cm/jaar)
WWklimStijging  = 0.0     % zeespiegelstijging klimaatscenario (m)
WWfaseWadden    = 7       % vertraging IJsselafoer t.o.v. Waddenzee (dagen)
WWfaseIJmuiden  = 7       % vertraging IJsselafoer t.o.v. IJmuiden (dagen)
%

```

```

% parameters IJsselmeer
%
beginPeilIJM = -0.25 % initieel IJsselmeerpeil (m+NAP)
streefpeilIJM = -0.40 % streefpeil IJsselmeer (m+NAP)
aanslagpeilIJM = -0.32 % aanslagpeil IJsselmeer (m+NAP)
oppIJsselmeer = 1342E6 % oppervlakte IJsselmeer (m2)
oppNeerslagNN = 6030E6 % oppervlakte afwaterend gebied Noord-NL (m2)
sluitpostIJM = 0 % sluitpost aanvoer IJsselmeer (m3/s)
%
% parameters Markermeer
%
beginPeilMM = -0.33 % initieel Markermeerpeil (m+NAP)
streefpeilMM = -0.40 % streefpeil Markermeer (m+NAP)
aanslagpeilMM = -0.20 % aanslagpeil Markermeer (m+NAP)
oppMarkermeer = 733E6 % oppervlakte Markermeer (m2)
oppNeerslagNM = 1910E6 % oppervlakte afwaterend gebied Midden-NL (m2)
sluitpostMM = -7 % sluitpost aanvoer Markermeer (m3/s)
%
% parameters Noordzeekanaal
%
beginPeilNZK = -0.40 % initieel peil Noordzeekanaal (m+NAP)
streefpeilNZK = -0.40 % streefpeil Noordzeekanaal (m+NAP)
aanslagpeilNZK = -0.32 % aanslagpeil Noordzeekanaal (m+NAP)
inlaatpeilNZK = -0.35 % inlaatpeil Noordzeekanaal (m+NAP)
oppNoordzeeKan = 34.7E6 % oppervlakte Noordzeekanaal (m2)
oppNeerslagNW = 2307E6 % oppervlakte afwaterend gebied West-NL (m2)
sluitpostNZK = 0 % sluitpost aanvoer Noordzeekanaal (m3/s)
%
% parameters spui Den Oever (van IJsselmeer naar Waddenzee)
%
NkokersDO = 15 % aantal spuikokers Den Oever (-)
BkokersDO = 12 % breedte spuikokers Den Oever (m)
HkokersDO = -4.7 % hoogte spuikokers Den Oever (m+NAP)
spuiParDO = 1.06 % spuicoëfficiënt Den Oever (-)
zoutslotDO = 1 % vlag voor zoutslot Den Oever (0/1)
pompenDO = 0 % vlag voor pompen Den Oever (0/1)
hPompDO = 2.5 % max. buitenws. pompen Den Oever (m+NAP)
qPompDO = 523.6 % max. pompdebiet Den Oever (m3/s)
%
% parameters spui Kornwerderzand (van IJsselmeer naar Waddenzee)
%
NkokersKWZ = 10 % aantal spuikokers Kornwerderzand (-)
BkokersKWZ = 12 % breedte spuikokers Kornwerderzand (m)
HkokersKWZ = -4.7 % hoogte spuikokers Kornwerderzand (m+NAP)
spuiParKWZ = 1.06 % spuicoëfficiënt Kornwerderzand (-)
zoutslotKWZ = 1 % vlag voor zoutslot Kornwerderzand (-)
pompenKWZ = 0 % vlag voor pompen Kornwerderzand (0/1)
hPompKWZ = 2.5 % max. buitenws. pompen Kornwerderzand (m+NAP)
qPompKWZ = 0 % max. pompdebiet Kornwerderzand (m3/s)
%
% parameters spui Krabbersgatsluizen (van Markermeer naar IJsselmeer)
%
NkokersKGS = 2 % aantal spuikokers Krabbersgatsluizen (-)
BkokersKGS = 18 % breedte spuikokers Krabbersgatsluizen (m)
HkokersKGS = -4.5 % hoogte spuikokers Krabbersgatsluizen (m+NAP)
spuiParKGS = 0.95 % spuicoëfficiënt Krabbersgatsluizen (-)
zoutslotKGS = 0 % vlag voor zoutslot Krabbersgatsluizen (0/1)
pompenKGS = 0 % vlag voor pompen Krabbersgatsluizen (0/1)
qPompKGS = 0 % pompdebiet Krabbersgatsluizen (m3/s)
%
% parameters spui Houtribsluizen (van Markermeer naar IJsselmeer)
%
NkokersHRS = 6 % aantal spuikokers Houtribsluizen (-)
BkokersHRS = 18 % breedte spuikokers Houtribsluizen (m)
HkokersHRS = -4.5 % hoogte spuikokers Houtribsluizen (m+NAP)
spuiParHRS = 0.95 % spuicoëfficiënt Houtribsluizen (-)
zoutslotHRS = 0 % vlag voor zoutslot Houtribsluizen (0/1)
pompenHRS = 0 % vlag voor pompen Houtribsluizen (0/1)
qPompHRS = 0 % pompdebiet Houtribsluizen (m3/s)
%

```

```

% parameters spui Oranjesluizen (van Markermeer naar Noordzeekanaal)
%
NkokersOS      = 1      % aantal  spuikokers Oranjesluizen      (-)
BkokersOS      = 9.8    % breedte  spuikokers Oranjesluizen      (m)
HkokersOS      = -4.5   % hoogte  spuikokers Oranjesluizen      (m+NAP)
spuiParOS     = 1.0    % spuicoëfficiënt  Oranjesluizen      (-)
zoutslotOS    = 0      % vlag voor zoutslot Oranjesluizen      (0/1)
%
% parameters spui/pomp IJmuiden (van Noordzeekanaal naar Noordzee)
%
NkokersIJM     = 7      % aantal  spuikokers IJmuiden      (-)
BkokersIJM     = 5.9    % breedte  spuikokers IJmuiden      (m)
HkokersIJM     = -5.3   % hoogte  spuikokers IJmuiden tbv spuislot (m+NAP)
KkokersIJM     = 4.8    % keelhoogte spuikokers IJmuiden      (m)
spuiParIJM    = 1.0    % spuicoëfficiënt  IJmuiden      (-)
zoutslotIJM   = 1      % vlag voor zoutslot IJmuiden      (0/1)
hPompIJM      = 2.7    % max. buitenws. pompen IJmuiden      (m+NAP)
qPompIJM      = 260    % pompdebiet      IJmuiden      (m3/s)
%
% keuzes met betrekking tot weg te schrijven figuren
%
figKoppelingen = 0      % vlag figuren koppelingen correlatiemodel (0/1)
figVerlopen    = 0      % vlag figuren tijdsverlopen meerpeilen (0/1)
%
% -----
%
% BEREKENINGINSTELLINGEN
%
berekening     = standaard
%
% -----

```


Bijlage C: Nieuwe modelversie

Bijlage C.1 Vergelijking oude en nieuwe modelversie

In paragraaf 8.1 is uitgelegd dat in de modelversie van 30 april een fout werd gemaakt in de selectie van ww-blokken. Na herstel van deze fout resulteren iets andere resultaten (berekend met de nieuwe versie van 13 mei). De numerieke resultaten voor de overschrijdingsfrequentie en het gemiddelde meerpeil staan in Tabel C-1. Daaruit blijkt dat de veranderingen vrijwel alleen optreden voor het IJsselmeer. Het gemiddelde meerpeil gaat daarvoor 0.007 m omhoog, terwijl die verandering voor $T = 1$ jaar 0.017 m bedraagt en voor $T = 10000$ jaar 0.026 m.

```

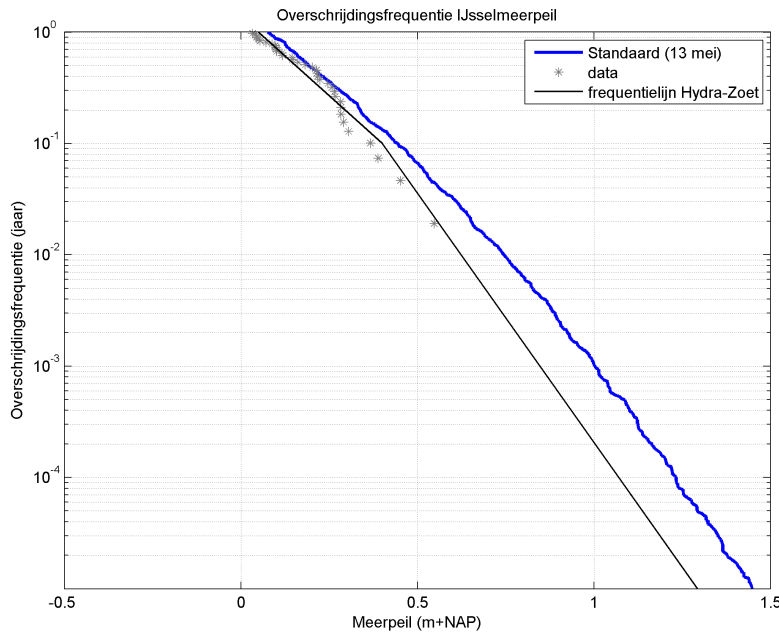
=====
Berekening   : Versie 30 april
=====
Tabel met meerpeilen en herhalingstijden
-----
Herhalingstijd      IJsselmeer      Markermeer      Noordzeekanaal
  [jaar]             [m+NAP]         [m+NAP]         [m+NAP]
-----
          1          0.060          -0.222          -0.283
          4          0.282          -0.046          -0.262
         10          0.420           0.056          -0.254
         40          0.606           0.181          -0.233
        100          0.726           0.260          -0.150
        400          0.878           0.367           0.111
       1000          0.971           0.435           0.268
      4000          1.108           0.542           0.505
     10000          1.206           0.607           0.608
    40000          1.339           0.697           0.810
   100000          1.415           0.751           0.956
  400000          1.533           0.817           1.124
 1000000          1.603           0.852           1.179
-----
Gemiddeld peil      -0.252          -0.350          -0.396
=====
Berekening   : Versie 13 mei
=====
Tabel met meerpeilen en herhalingstijden
-----
Herhalingstijd      IJsselmeer      Markermeer      Noordzeekanaal
  [jaar]             [m+NAP]         [m+NAP]         [m+NAP]
-----
          1          0.077          -0.218          -0.283
          4          0.310          -0.038          -0.262
         10          0.443           0.061          -0.254
         40          0.631           0.175          -0.232
        100          0.745           0.257          -0.145
        400          0.904           0.366           0.113
       1000          1.002           0.433           0.279
      4000          1.137           0.542           0.512
     10000          1.232           0.604           0.605
    40000          1.364           0.697           0.787
   100000          1.448           0.750           0.906
  400000          1.554           0.819           1.058
 1000000          1.631           0.845           1.114
-----
Gemiddeld peil      -0.245          -0.349          -0.395
=====

```

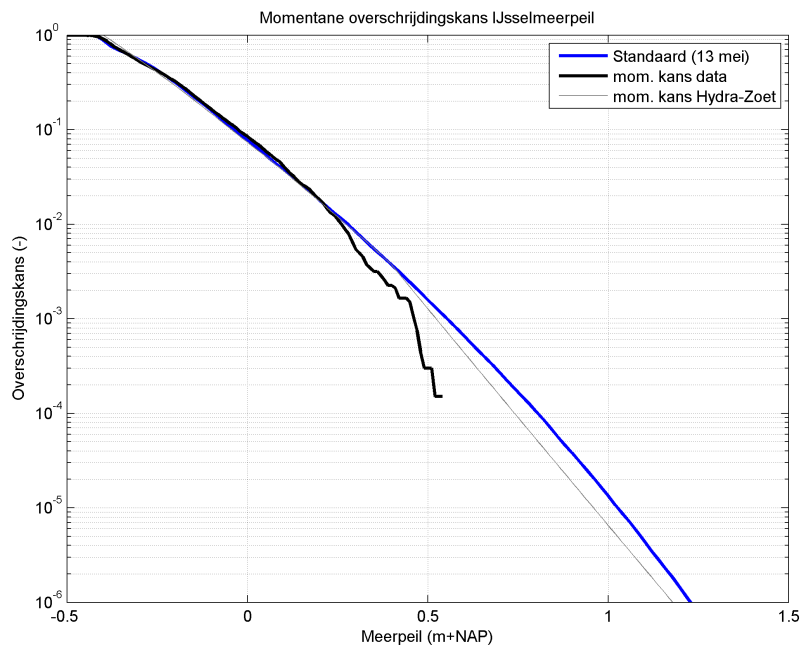
Tabel C-1 Resultaten overschrijdingsfrequentie voor modelversie 30 april (hoofdstuk 8) en de aangepaste modelversie van 13 mei.

Voor het IJsselmeer zijn de resultaten voor de overschrijdingsfrequentie, momentane kans en topduur weergegeven in Figuur C-1 t/m Figuur C-3. Daaruit blijkt overigens dat de momentane kans in de nieuwe versie nu vrijwel perfect aansluit op de data (behalve in het hoge bereik waar de data te spaarzaam worden voor betrouwbare resultaten). Oftewel: in de nieuwe modelversie sluit het model voor de momentane kans zelfs beter aan op de metingen dan in de oude versie; vergelijk ook met Figuur 8-28.

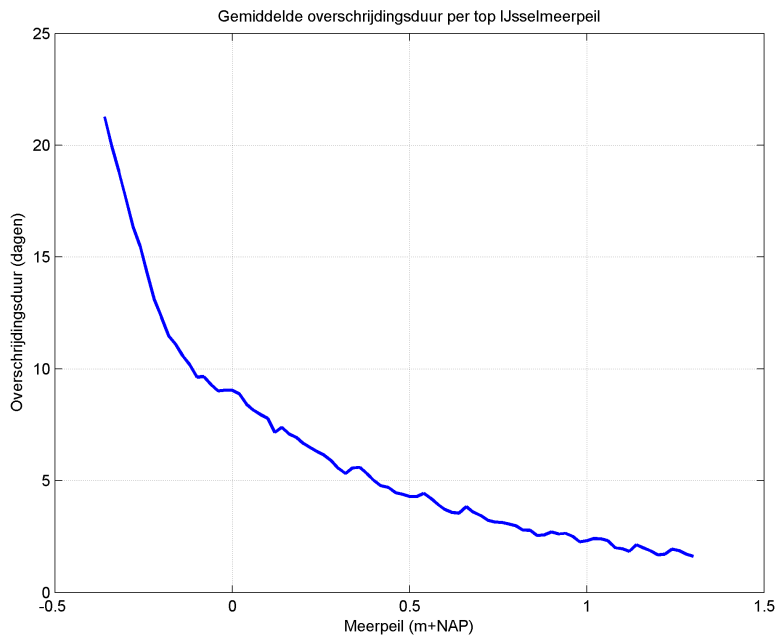
Voor het Markermeer en NZK zijn geen figuren gegeven, omdat de veranderingen daarvoor marginaal zijn.



Figuur C-1 Overschrijdingsfrequentie IJsselmeer, voor de nieuwe modelversie.



Figuur C-2 Momentane kans IJsselmeer, voor de nieuwe modelversie.



Figuur C-3 Topduur IJsselmeer, voor de nieuwe modelversie.

Bijlage C.2 Nieuwe modelversie met 0.03 m lagere zeespiegel

Tot slot wordt nog getoond dat de frequentielijn voor het IJsselmeer met de nieuwe versie vrijwel gelijk wordt aan de frequentielijn voor de oude versie, als in de nieuwe versie gerekend wordt met 0.03 m verlaging van de zeespiegel. Zie daarvoor Tabel C-2. De verschillen tussen beide modelversies zijn nu minder dan 0.01 m.

```
=====
Berekening   : Versie 30 april
=====
Tabel met meerpeilen en herhalingstijden
-----
```

Herhalingstijd [jaar]	IJsselmeer [m+NAP]	Markermeer [m+NAP]	Noordzeekanaal [m+NAP]
1	0.060	-0.222	-0.283
4	0.282	-0.046	-0.262
10	0.420	0.056	-0.254
40	0.606	0.181	-0.233
100	0.726	0.260	-0.150
400	0.878	0.367	0.111
1000	0.971	0.435	0.268
4000	1.108	0.542	0.505
10000	1.206	0.607	0.608
40000	1.339	0.697	0.810
100000	1.415	0.751	0.956
400000	1.533	0.817	1.124
1000000	1.603	0.852	1.179
Gemiddeld peil	-0.252	-0.350	-0.396

```
-----
```

```
=====
Berekening   : Versie 13 mei, daling zeespiegel -0.03 m
=====
Tabel met meerpeilen en herhalingstijden
-----
```

Herhalingstijd [jaar]	IJsselmeer [m+NAP]	Markermeer [m+NAP]	Noordzeekanaal [m+NAP]
1	0.054	-0.231	-0.283
4	0.287	-0.052	-0.262
10	0.417	0.046	-0.254
40	0.606	0.166	-0.235
100	0.724	0.242	-0.160
400	0.872	0.352	0.088
1000	0.980	0.424	0.255
4000	1.111	0.530	0.475
10000	1.205	0.593	0.593
40000	1.340	0.687	0.754
100000	1.425	0.743	0.872
400000	1.521	0.814	1.006
1000000	1.602	0.841	1.064
Gemiddeld peil	-0.261	-0.355	-0.398

```
-----
```

Tabel C-2 Resultaten overschrijdingsfrequentie voor modelversie 30 april (hoofdstuk 8) en de aangepaste modelversie van 13 mei met 0.03 m lagere zeespiegel.



HKV lijn in water BV

Postbus 2120
8203 AC Lelystad

Botter 11-29
8232 JN Lelystad

0320 29 42 42
info@hkv.nl
www.hkv.nl