

Het Friese Boezemstelsel

onder extreme condities

- een analyse -

Delft, juni 2003

L.M. Dorst

Afstudeercommissie:

Prof. drs. ir. J.K. Vrijling

Ir. K.G. Bezuyen

Ir. K. Boorsma

Ir. K.-J. Breur

Dr. Ir. H.L. Fontijn

Technische Universiteit Delft
Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen
Sectie Waterbouwkunde en Geotechniek
Specialisatie Constructieve Waterbouwkunde

Ingenieursbureau Boorsma b.v. te Drachten

Voorwoord

In het kader van het afstudeerwerk bij de sectie Waterbouwkunde en Geotechniek van de faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, Technische Universiteit Delft, is een onderzoek gedaan naar het Friese boezemstelsel onder extreme omstandigheden. In opdracht van en in samenwerking met Ingenieursbureau Boorsma B.V. te Drachten is enerzijds nagegaan in hoeverre de sturing van de afvoerkunstwerken in een gegeven extreme situatie verder geoptimaliseerd kan worden en anderzijds is onderzocht welke invloed een uitbreiding van de afvoercapaciteit heeft op het functioneren van het boezemstelsel. In het onderzoek is gebruik gemaakt van een model van het Friese boezemstelsel, vervaardigd in het simulatieprogramma Sobek®.

Bij deze wil ik de heer ir. K. Boorsma bedanken voor het aanreiken van een interessante onderzoeksopdracht met een hoog actualiteitsgehalte, voor het voorzien in relevante onderwerpgerichte literatuur, voor het voorstellen van (onconventionele) civieltechnische maatregelen voor de gesignaleerde problematiek, voor het nauwgezet evalueren van tussentijdse rapportages en tenslotte voor het bieden van de mogelijkheid één dag per week bij Ingenieursbureau Boorsma B.V. te Drachten te werken gedurende mijn afstudeerperiode; dit heb ik ervaren als een aangename afwisseling op mijn afstudeerwerk en daarnaast als een ideale gelegenheid om alvast nader kennis te maken met het ingenieurswerk in de civieltechnische sector.

De heer ir. K.-J. Breur wil ik bedanken voor zijn hulp en uitleg bij het werken met het Sobek®-model van het Friese boezemstelsel, voor zijn suggesties met betrekking tot de onderzoeksopzet en voor het tussentijds beoordelen van de verslaglegging van de met het boezemmodel uitgevoerde simulaties.

De heer ir. K.G. Bezuyen wil ik met name bedanken voor de sturing binnen het afstudeertraject, het aangeven van mogelijke richtingen om het afstudeerwerk vorm te geven. Daarnaast voor de aanwijzingen met betrekking tot het verwachte invloedsbereik en de waarschijnlijk optredende neveneffecten van de voorgestelde maatregelen.

Tenslotte wil ik de leden van de afstudeercommissie, dit zijn, naast bovengenoemde personen, prof. drs. ir. J.K. Vrijling en dr. ir. H.L. Fontijn bedanken voor het beoordelen van de (concept-) verslagen van mijn afstudeerwerk en voor het leveren van waardevolle, richtinggevende kritieken in deze; De periodieke zittingen van de afstudeercommissie heb ik als zinvol ervaren en van belang beschouwd voor het succesvol voltooien van de onderzoeksopdracht.

Delft, juni 2003

L.M. Dorst

Samenvatting

De centrale vraag is of het Friese boezemstelsel voldoende ‘toegerust’ is om ook de komende decennia met de middelen die haar ter beschikking staan een toereikend peilbeheer te voeren.

Daarom is in dit onderzoek nagegaan hoe het Friese boezemstelsel zich gedraagt onder extreme condities; extreme omstandigheden welke een toekomstige situatie representeren. Daarbij is gebruik gemaakt van een één-dimensionaal stromingsmodel van de boezem gedefinieerd in het programma Sobek®.

Bij het bepalen van de belastingen en randvoorwaarden voor het boezemmodel is nagegaan welke verwachte ontwikkeling deze grootheden gaan doormaken vanaf heden tot aan het jaar 2030; dit jaar is namelijk als richtjaar gekozen. Bijvoorbeeld: zeespiegelstijging (Waddenzee), veranderingen in de streefpeilen van het Lauwersmeer en het IJsselmeer, temperatuurfluctuaties, ontwikkelingen in de neerslag, etc.

Voor de formulering van de neerslagbelasting vanuit het afwaterende gebied is uit een jarenlange neerslagreeks een extreme periode geselecteerd. Met een neerlag-afvoermodeel voor het afwaterende gebied is de extreme neerslagperiode ‘omgezet’ in een boezembelasting. Daarbij werd duidelijk dat neerslagpieken worden afgevlakt in de boezemtoevoer vanwege de begrensde capaciteit van de afvoerkunstwerken van de afwaterende gebieden.

Het boezemstelsel wordt beoordeeld aan de hand van op diverse locaties gemeten waterstanden. Het boezemstelsel kan worden opgedeeld in 38 zogenaamde karakteristieke gebieden. Voor elk gebied geldt een maximaal toelaatbaar peil. Wordt dit peil gedurende de simulatieperiode overschreden dan heeft het boezemstelsel gefaald en dienen er maatregelen getroffen te worden.

Er is een belastingscenario, genaamd BasisSimulatie, gecreëerd, die gekenmerkt wordt door een extreme boezembelasting en hoge buitenwaterstanden (Waddenzee). In dit scenario is het peilbeheer van het Lauwersmeer aangehouden, zoals deze in de huidige situatie wordt gevoerd.

De simulatie met dit scenario laat zien dat de eerste overschrijdingen van de maximumpeilen in het Westen van de provincie plaatsvinden, waarna de peiloverschrijdingen zich in de dagen die daarop volgen voordoen in vrijwel het gehele boezemsysteem. Daarnaast valt op dat de boezembelasting de boezemafvoer veruit overtreft. De boezemafvoer kan echter niet verder vergroot worden met de bestaande middelen: er is in de gegeven omstandigheden maximaal afgevoerd, door zowel de sluizen als de gemalen. Gemeten naar de omvang van het afvoervolume vindt de lozing voornamelijk plaats via de Zuidwestelijk en Noordoostelijk gelegen kunstwerken.

De oplossing voor de optredende peiloverschrijdingen is gezocht in het opheffen van de discrepantie tussen de omvang van de boezembelasting en van de beschikbare afvoercapaciteit van het boezemsysteem; een tweede simulatie, SimulatiePlus, is uitgevoerd met het boezemnetwerk uitgebreid met een gemaal te Harlingen en een gemaal te Lauwersoog, de laatste verbonden met de boezem ter hoogte van Dokkumer Nieuwe Zijlen via een lateraal kanaal.

Deze simulatie toont aan dat in een groot gedeelte van het boezemsysteem geen peiloverschrijdingen meer plaatsvinden en dat het gemaal Harlingen daar het grootste aandeel in heeft. In het Centraal- en Zuidwesten worden wel maxima overschreden, hoewel ook hier significante peildalingen zijn waargenomen ten opzichte van de situatie in BasisSimulatie, maar blijkbaar nog van onvoldoende grootte. Het gemaal Lauwersoog wordt afwisselend met de sluizen van Dokkumer Nieuwe Zijlen in werking gesteld. Dit levert geen verhoogde afvoer via het Noordoosten op. Wel kan het gemaal Lauwersoog op termijn de functie van de D.N.Z.-sluizen overnemen, wanneer het lozen onder vrij verval onmogelijk wordt gemaakt als gevolg van een structureel stijgend Lauwersmeerpeil.

Inhoudsopgave

Voorwoord.....	2
Samenvatting	3
Hoofdstuk 1.....	11
Inleiding	11
1.1 Aanleiding tot het afstudeeronderzoek.....	11
1.2 Het Friese Boezemstelsel: Probleemverkenning.....	12
1.2.1 Inleiding.....	12
1.2.2 Wateroverlastsituaties.....	12
1.2.3 Wateroverlast is onacceptabel + praktijkvoorbeeld	13
1.2.4 Voorstellen voor maatregelen voor boezemsysteem.....	14
1.3 Doelstelling en vraagstelling.....	17
1.3.1 Inleiding + keuze voor model in Sobek Rural®.....	17
1.3.2 Doel van het onderzoek.....	18
1.3.3 Formulering van de onderzoeksvragen	19
Hoofdstuk 2	20
Het Friese boezemstelsel en haar werking	20
2.1 Inleiding.....	20
2.2 Stroomgebied Friesland	20
2.3 Het peilbeheer van de Friese boezem.....	23
2.3.1 Het boezemstreefpeil	23
2.3.2 Gewogen gemiddeld boezempeil	23
2.3.3 Middelen voor peilbeheer.....	23
2.3.4 Anticiperend peilbeheer.....	24
2.3.5 De afvoerkunstwerken.....	24
2.3.6 Inzet kunstwerken.....	24
2.3.7 Maalbeperking in extreme omstandigheden	25
2.3.8 Technische zaken gebaseerd op streefpeil	25
2.4 De kunstwerken voor de waterafvoer	26
2.4.1 Afvoercapaciteiten kunstwerken Friese Boezem	26
2.4.2 Procentueel aandeel.....	26
2.4.3 De Tsjerk Hiddessluizen te Harlingen.....	27
2.4.4 De spui- en schutsluis te Dokkumer Nieuwe Zijlen	27
2.4.5 De Friese sluis bij Zoutkamp.....	28
2.4.6 Het J.L. Hooglandgemaal te Stavoren	28
2.4.7 Het Ir. D.F. Woudagemaal te Lemmer.....	29
2.4.8 De spuisluizen bij Lauwersoog.....	29
2.5 De Nieuwe Slachtedijk.....	30
2.6 Het Lauwersmeergebied	30

Hoofdstuk 3	32
Model, beoordeling en aanpak.....	32
3.1 Systeembelasting	32
3.2 Sobek®-model van het Friese boezemstelsel.....	33
3.2.1 Eén-dimensionale waterstroming.....	33
3.2.2 De elementen van het boezemmodel	34
3.3 Beoordeling Friese boezemstelsel op peilen.....	39
3.3.1 Inleiding.....	39
3.3.2 Beoordeling Friese boezem.....	40
3.3.3 Beoordelingscriteria	42
3.4 Simulatie-werkwijze	44
3.4.1 Inleiding.....	44
3.4.2 Het simulatieproces	44
Hoofdstuk 4	47
Belastingen en randvoorwaarden	47
4.1 Inleiding.....	47
4.2 Overzicht belastingen en randvoorwaarden	47
4.3 Ontwikkeling boezemgrootheden in de afgelopen eeuw.....	48
4.3.1 Inleiding.....	48
4.3.2 Temperatuur	48
4.3.3 Neerslag.....	50
4.3.4 Zeespiegel.....	54
4.3.5 Stormklimaat.....	55
4.4 Verwachte ontwikkelingen voor de komende eeuw.....	55
4.4.1 Inleiding.....	55
4.4.2 Temperatuur	56
4.4.3 Neerslag.....	58
4.4.4 Zeespiegelstijging.....	59
4.4.5 Stormklimaat.....	60
4.4.6 Getijdeverloop – Waddenzee.....	60
4.4.7 Het peilbeheer van het IJsselmeer.....	61
4.4.8 Het peilbeheer van het Lauwersmeer	61
4.4.9 Doorvoer naar omliggende provincies	62
4.4.10 Verdamping	62
4.4.11 Bodemdaling.....	62
Hoofdstuk 5	63
Van neerslag naar boezembelasting.....	63
5.1 Welke extreme neerslagperiodes?	63
5.2 Negendagensommen	63
5.3 Frequenties van negendaagse neerslagperiodes.....	66
5.4 Correctie neerslagsommen voor toekomstige ontwikkelingen	68
5.5 Voortraject en natraject.....	69
5.6 Neerslag-Afvoermodel voor Afwaterende Gebied.....	69
5.7 Neerslag-Afvoermodel: Methode.....	72

Hoofdstuk 6	74
Belastingscenario BasisSimulatie	74
6.1 Inleiding.....	74
6.2 Temperatuurontwikkeling	74
6.3 Toevoer naar het boezemstelsel	74
6.4 Buitenwaterstanden: Waddenzee.....	75
6.5 Buitenwaterstanden: IJsselmeer	77
6.6 Gemaal Ezumazijl & Reitdiepsluizen	78
6.7 Doorvoersluis-duiker Kuinre, Noord-Oostpolder.....	79
6.8 Doorvoersluis-duiker Gaarkeuken – Groningen	79
6.9 Lauwersmeerpeil	79
Hoofdstuk 7	80
Analyse Resultaten BasisSimulatie	80
7.1 Algemeen.....	80
7.1.1 Inleiding.....	80
7.1.2 Vier periodes van extreme boezembelasting	80
7.1.3 Indeling meetpunten boezemstelsel.....	83
7.1.4 Waterstandsgrafieken	84
7.1.5 Bergingsoverschot.....	84
7.2 Eerste deel (dag 1 t/m dag 4).....	85
7.2.1 Waterstanden op dag 1.....	85
7.2.2 Waterstanden op dag 2.....	85
7.2.3 Waterstanden op dag 3 en dag 4.....	86
7.2.4 Verschillend peilverloop tussen meetpunten.....	87
7.2.5 Peilveranderingen door veranderde toevoer-afvoerrelatie.....	87
7.2.6 Conclusie eerste deel	87
7.3 Tweede deel (dag 5 t/m dag 8)	88
7.3.1 Waterstanden op dag 5 en dag 6.....	88
7.3.2 Niet-uniforme peilstijging gezien over de boezem op dag 5.....	89
7.3.3 Dag 5 en dag 6: identiek patroon waterstanden	89
7.3.4 Waterstanden op dag 7.....	90
7.3.5 Waterstanden op dag 8.....	91
7.3.6 Conclusie tweede deel	91
7.4 Derde deel (dag 9 t/m dag 10).....	92
7.4.1 Waterstanden op dag 9.....	92
7.4.2 Waterstanden op dag 10	93
7.4.3 Verschil in bergingsoverschotten verklaard.....	93
7.4.4 Conclusie derde deel.....	93
7.5 Vierde deel (dag 11 t/m dag 19).....	94
7.5.1 Waterstanden op dag 11	94
7.5.2 Waterstanden op dag 12 t/m dag 17	95
7.5.3 Waterstanden op dag 18	96
7.5.4 Waterstanden op dag 19	97
7.5.5 Conclusie vierde deel.....	97
7.6 Inzet afvoerkunstwerken Friese boezem	98
7.6.1 Dag 5 tot en met dag 19: aandeel in de boezemafvoer	98
7.6.2 Het Woudagemaal en het Hooglandgemaal	99
7.6.3 De Tsjerk Hiddessluizen.....	100
7.6.4 De sluizen van Dokkumer Nieuwe Zijlen en Zoutkamp	103

7.7	Het Lauwersmeer en de sluizen van Lauwersoog.....	108
7.7.1	Streefpeil Lauwersmeer niet gehandhaafd	108
7.7.2	Verdeling van de toevoer naar het Lauwersmeer.....	109
7.7.3	Niet alle laagwaterperiodes kunnen worden gebruikt	110
7.8	Overschrijding Waterstandscriteria.....	112
7.8.1	Waarneming: Overschrijdingen van maximumpeilen	112
7.8.2	Verklaring: Overschrijdingen van maximumpeilen	113
Hoofdstuk 8		115
Maatregelen ter voorkoming van peiloverschrijdingen		115
8.1	Evaluatie van de inzet van de afvoerkunstwerken.....	115
8.1.1	Algemeen.....	115
8.1.2	Het Hooglandgemaal en het Woudagemaal	116
8.1.3	De Tsjerk Hiddessluizen.....	117
8.1.4	Dokkumer Nieuwe Zijlen, Zoutkamp en Lauwersoog.....	118
8.2	Maatregelen.....	119
8.2.1	Vergroting van de afvoercapaciteit.....	119
8.2.2	Twee extra gemalen: SimulatiePlus	120
Hoofdstuk 9		123
Analyse SimulatiePlus		123
9.1	Peilverschillen.....	123
9.2	Periode Dag 5 t/m Dag 7.....	124
9.2.1	Afvoer – Verschil dagdebieten	124
9.2.2	Peilveranderingen in de eerste periode.....	125
9.2.3	Afvoer in het Zuidwesten.....	126
9.2.4	Afvoer in het Noordwesten	126
9.2.5	Afvoer in het Noordoosten.....	126
9.2.6	Verklaring van het peilverloop.....	128
9.3	Periode Dag 8 t/m Dag 10.....	130
9.3.1	Peildalingen en peilpieken	131
9.3.2	De afvoer in het Noordoosten	131
9.3.3	De afvoer in het Zuidwesten	132
9.3.4	De afvoer in het Noordwesten.....	132
9.3.5	De totale afvoer en peilveranderingen.....	132
9.4	Periode Dag 11 t/m Dag 19.....	133
9.4.1	De afvoer in het Noordwesten.....	134
9.4.2	De afvoer in het Noordoosten	135
9.4.3	De afvoer in het Zuidwesten	136
9.4.4	Peilveranderingen Dag 11 t/m Dag 14	136
9.4.5	Peilveranderingen Dag 15 t/m Dag 19	138
9.5	Lauwersmeer en Lauwersoog.....	140
9.6	Peiloverschrijdingen in SimPlus	145

Hoofdstuk 10.....	148
Conclusies en Aanbevelingen.....	148
10.1 Evaluatie maatregelen en conclusies	148
10.2 Aanbevelingen.....	149

Literatuur

Bijlagen

1. BB.01:	Stroomgebied Friesland
2. BB.03:	Het Friese Boezemstelsel
3. BB.04:	Lauwersmeergebied – Overstroomde en niet-overstroomde gronden
4. BB.05:	Lauwersmeer – Overstromingsgebieden bij verhoogd meerpeil
5. BD.01:	Friese Boezem – Maximumpeilen karakteristieke gebieden
6. BD.02:	Meetpunten karakteristieke gebieden + Afvoerkunstwerken
7. BF.01:	Negendagensommen – Gesorteerd op grootte
8. BF.02:	Negendagensommen – Gesorteerd op datum
9. BG.01:	Belastingscenario BasisSimulatie – Aanvullende informatie
10. BG.02:	Invoerparameters Sobek®-model
11. BG.03:	Friese boezemstelsel: Sobek®-model – Noordelijke & Zuidelijke helft
12. BH.01:	Daggemiddelde afvoerdebieten van boezemkunstwerken
13. BH.02:	Friese Boezem – Bergingsoverschot (BasisSim)
14. BH.03:	BasisSim – Peiloverschrijdingsgebied Dag 12 t/m Dag 17
15. BH.04:	Waterstandsverloop en maximumpeil van vier meetpunten (BasisSim)
16. BJ.01:	Afvoergrafieken van Gemaal Harlingen & Gemaal Lauwersoog (SimPlus)
17. BJ.02:	Afvoergrafieken van Hooglandgemaal & Woudagemaal (SimPlus)
18. BJ.03:	Dokkumer Nieuwe Zijlen Boezempeil & Lauwersmeerpeil (SimPlus)
19. BJ.04:	Afvoergrafieken van sluizen Dokkumer Nieuwe Zijlen & Zoutkamp (SimPlus)
20. BJ.05:	Nodes 00 t/m 37 – Verloop peilverschil (SimPlus vs. BasisSim)
21. BJ.06:	Afvoergrafieken van de Kleine en de Grote Tsjerk Hiddessluis (SimPlus)
22. BJ.07:	SimPlus – Peiloverschrijdingsgebied Dag 15 & Dag 16
23. BL.01:	Korte evaluatie elementen Sobek®-model

Figuren

Figuur B.01: Het Friese boezemstelsel – Uitwisseling tussen watersystemen.....	22
Figuur B.02: De grote Tsjerk Hiddessluis.....	27
Figuur B.03: De spuisluis van Dokkumer Nieuwe Zijlen	28
Figuur B.04: Het J.L. Hooglandgemaal	28
Figuur B.05: Het ir. D.F. Woudagemaal	29
Figuur B.06: De spuisluizen bij Lauwersoog.....	29
Figuur D.02: Langsdoorsnede ‘Orifice’	35
Figuur D.03: De ‘Pillar bridge’.....	37
Figuur D.04: De ‘Abutment bridge’.....	37
Figuur D.05: De ‘Fixed bed bridge’	37
Figuur D.06: Getabelleerde dwarsdoorsnede voor waterloop.....	38
Figuur D.01: Karakteristieke gebieden – Nummering.....	42
Figuur L.01: Elementen van het simulatieproces met onderlinge relaties	45
Figuur E.01: Wereldgemiddelde jaartemperatuur (Bron: K.N.M.I.).....	49
Figuur E.02: Jaargemiddelde temperatuur De Bilt (Bron: K.N.M.I.)	50
Figuur E.03: Landelijk gemiddelde neerslagsom – Zomerhalfjaar (Bron: K.N.M.I.)	51

Figuur E.04: Landelijk gemiddelde neerslagsom – Winterhalfjaar (Bron: K.N.M.I.).....	51
Figuur E.05: Landelijk gemiddelde jaarlijkse neerslagsom (Bron: K.N.M.I.).....	52
Figuur E.06: Maximale dagsommen voor Nederland – Zomerhalfjaar (Bron: K.N.M.I.)	53
Figuur E.07: Maximale dagsommen voor Nederland – Winterhalfjaar (Bron: K.N.M.I.)	53
Figuur E.08: Jaarlijkse maximale dagsommen voor Nederland (Bron: K.N.M.I.)	54
Figuur E.09: Voorspelde ontwikkelingen in de mondiale temperatuur	56
Figuur F.01: Etmaalsommen Augustus 1969	64
Figuur F.02: Neerslagsommen – overschrijdingsfrequenties	67
Figuur F.03: Neerslag-Afvoermodel voor het afwaterende gebied.....	70
Figuur F.04: De afwaterende gebieden – neerslag en afvoer.....	73
Figuur G.01: Daggemiddelde boezembelasting	75
Figuur G.02: Harlingen – Waddenzeegetijde	76
Figuur G.03: Lauwersoog – Waddenzeegetijde	76
Figuur G.04: Mogelijk verloop van het streefpeil van het IJsselmeer (d.i. de donkere lijn).....	77
Figuur G.05: Gemaal Ezumazijl – Daggemiddelde afvoer	78
Figuur G.06: Reitdiepsluizen – Daggemiddelde afvoer.....	79
Figuur H.01: Het Friese boezemstelsel – boezembelasting en boezemafvoer.....	80
Figuur H.02: Waterstandsverloop meetpunt Gorredijk.....	82
Figuur H.03: Waterstandsverloop meetpunt Leeuwarden	82
Figuur H.04: Gebiedsindeling provincie Friesland.....	83
Figuur H.05: Waterstand Meetpunten – dag 1 t/m dag 4.....	85
Figuur H.06: Waterstand Meetpunten – dag 4 t/m dag 6.....	88
Figuur H.07: Waterstand Meetpunten – dag 6 t/m dag 8.....	90
Figuur H.08: Waterstand Meetpunten – dag 8 t/m dag 10.....	92
Figuur H.09: Waterstand Meetpunten – dag 10 t/m dag 13.....	94
Figuur H.10: Waterstand Meetpunten – dag 13 t/m dag 16.....	95
Figuur H.11: Waterstand Meetpunten – dag 16 t/m dag 19.....	96
Figuur H.12: Procentueel aandeel kunstwerken in boezemafvoer.....	98
Figuur H.13: Het Hooglandgemaal – Afvoer.....	99
Figuur H.14: Het Woudagemaal – Afvoer.....	100
Figuur H.15: Boezempeil en Waddenzeegetijde nabij Harlingen.....	101
Figuur H.16: De Grote Tsjerk Hiddessluis – Afvoer.....	101
Figuur H.17: De spuisluis van Dokkumer Nieuwe Zijlen – Afvoer.....	103
Figuur H.18: De schutsluis van Dokkumer Nieuwe Zijlen – Afvoer.....	104
Figuur H.19: De Friese sluis bij Zoutkamp – Afvoer	104
Figuur H.20: Boezempeil Dokkumer Nieuwe Zijlen en Lauwersmeerpeil.....	105
Figuur H.21: Boezempeil Zoutkamp en Lauwersmeerpeil	105
Figuur H.22: Peilverloop Lauwersmeer.....	108
Figuur H.23: Lauwersmeer – Watertoevoer en waterafvoer.....	109
Figuur H.24: Lauwersmeer – Verdeling van de watertoevoer	110
Figuur H.25: De spuisluizen van Lauwersoog – Afvoer	111
Figuur H.26: Peilverloop Lauwersmeer en Waddenzeegetijde	111
Figuur K.01: Gemaal Lauwersoog met lateraal kanaal.....	122
Figuur J.01: Peilverschillen in boezemsysteem – dag 04 t/m dag 07	125
Figuur J.02: Harlingen – Waddenzeegetijde en (locaal) peilverloop van de boezem	135
Figuur J.03: Peilverschillen in boezemsysteem – dag 10 t/m dag 12	137
Figuur J.04: Peilverschillen in boezemsysteem – dag 12 t/m dag 15	137
Figuur J.05: Peilverschillen in boezemsysteem – dag 15 t/m dag 18	139
Figuur J.06: Peilverschillen in boezemsysteem – dag 18 & dag 19	139
Figuur J.07: Lauwersoog – Waddenzeegetijde en Lauwersmeerpeil (BasisSim & SimPlus)	140
Figuur J.08: Lauwersmeer – Verschillen in toevoer en afvoer tussen SimPlus en BasisSim.....	141
Figuur J.09: Lauwersmeer – Toevoer en afvoer van water op dag 16 (BasisSim & SimPlus)	142

Figuur J.10: Lauwersmeer – Cumulatief toevoer- en afvoerverschil (SimPlus vs. BasisSim)	143
Figuur J.11: Waterstandsverloop op het Lauwersmeer in BasisSim en SimPlus.....	144
Figuur J.12: Verloop omvang bergingsoverschot Friese boezem in SimPlus	145
Figuur J.13: Het Friese boezemstelsel – Boezembelasting en boezemafvoer in SimPlus	146

Tabellen

Tabel TB1: Lozingscapaciteiten afvoerkunstwerken.....	26
Tabel TB2: Overschrijdingsfrequenties Lauwersmeerpeil.....	31
Tabel TE1: Relatieve zeespiegelstijging voor meetstations Nederlandse kust (Bron: R.I.K.Z.)	55
Tabel TE2: Temperatuurscenario's gekoppeld aan relatieve zeespiegelstijging (Bron: K.N.M.I.).....	60
Tabel TF1: Overschrijdingsfrequenties neerslag	66
Tabel TH1: Het Friese boezemstelsel – daggemiddeld toevoerdebiet en afvoerdebiet.....	81
Tabel TH2: Gebiedsindeling meetpunten.....	83
Tabel TK1: Normale en hoge afvoercapaciteit van kunstwerken Friese boezem	115
Tabel TK2: Het gemiddelde afvoerdebiet voor kunstwerken Friese boezem	116
Tabel TJ1: Zuidwest – Afvoerverschil kunstwerken Dag 5 t/m Dag 7.....	124
Tabel TJ2: Noordwest – Afvoerverschil kunstwerken Dag 5 t/m Dag 7	124
Tabel TJ3: Noordoost – Afvoerverschil kunstwerken Dag 5 t/m Dag 7.....	124
Tabel TJ4: Totaal afvoerverschil kunstwerken Dag 5 t/m Dag 7.....	125
Tabel TJ5: Zuidwest – Afvoerverschil kunstwerken Dag 8 t/m Dag 10.....	130
Tabel TJ6: Noordwest – Afvoerverschil kunstwerken Dag 8 t/m Dag 10	130
Tabel TJ7: Noordoost – Afvoerverschil kunstwerken Dag 8 t/m Dag 10.....	130
Tabel TJ8: Totaal afvoerverschil kunstwerken Dag 8 t/m Dag 10.....	130
Tabel TJ9: Zuidwest – Afvoerverschil kunstwerken Dag 11 t/m Dag 19.....	133
Tabel TJ10: Noordwest – Afvoerverschil kunstwerken Dag 11 t/m Dag 19.....	133
Tabel TJ11: Noordoost – Afvoerverschil kunstwerken Dag 11 t/m Dag 19	134
Tabel TJ12: Totaal afvoerverschil kunstwerken Dag 11 t/m Dag 19	134
Tabel TJ13: Verschil tussen uitgemalen debiet en totaal afgevoerd debiet in het Noordwesten.....	135
Tabel TJ14: Het bereik van peilverschillen per gebied – halverwege dag 18	147

Hoofdstuk 1

Inleiding

1.1 Aanleiding tot het afstudeeronderzoek

Wetterskip Fryslân (Waterschap Friesland) vermoedt dat het Friese boezemstelsel in de huidige configuratie niet voldoet voor toekomstige extreme omstandigheden.

Men gaat er namelijk van uit dat de grootheden die dergelijke omstandigheden bepalen (de belastingen en randvoorwaarden voor het boezemsysteem) in de toekomst structureel gaan veranderen en dan in ongunstige zin voor het boezemstelsel.

Het verwachte gevolg van die ontwikkeling is, dat vanaf een bepaald moment de bestaande middelen waarmee het boezemstelsel wordt beheerd en het huidige gevoerde beleid met betrekking tot het boezembeheer niet meer toereikend zijn om extreme omstandigheden (bijv. hevige neerslag, hoge buitenwaterstanden) het hoofd te bieden.

Dit laatste betekent dat, ondanks de inzet van ‘alle mogelijke middelen’, situaties optreden - binnen het boezemstelsel of in het afwaterende gebied - die als ongewenst worden beschouwd; bijv. overschrijdingen van maximum boezempeilen of ondergelopen polderland.

Om dergelijke overlastsituaties te voorkomen dienen tijdig maatregelen getroffen te worden.

Daarom is Waterschap Friesland gestart met een studie om de mogelijke maatregelen te inventariseren, het invloedsbereik ervan in kaart te brengen en ze onderling te vergelijken.

Uiteindelijk wordt beslist welk pakket van maatregelen op welk tijdstip moet worden toegepast, opdat de kwaliteiten van het boezemsysteem ten aanzien van de beheersing van extreme omstandigheden, min of meer synchroon verlopen met de ontwikkelingen in de systeembelasting.

Dat stadium van het formuleren van de definitieve set van maatregelen is nog niet bereikt.

Eén maatregel uit de set is een uitbreiding van de afvoercapaciteit van de Friese boezem door het plaatsen van extra gemalen of spuisluizen of een combinatie van beiden.

In het verlengde hiervan stelde Ingenieursbureau Boorsma B.V. voor om een dergelijke maatregel technisch-constructief uit te werken. Een eenvoudig stromingsmodel van de Friese boezem kon hierbij een handig hulpmiddel zijn om de hydraulische afmetingen van het nieuw aan te leggen kunstwerk vast te stellen.

Dit laatste voorstel kon goed gecombineerd worden met een onderzoeksvraag vanuit de vakgroep Watermanagement van de faculteit Civiele Techniek. (Bij deze vakgroep staat een 1-dimensionaal stromingsmodel van de Friese boezem ter beschikking, welke is gedefinieerd in het simulatieprogramma Sobek Rural®)

Een hiaat in de kennis over het functioneren van het boezemmodel betreft namelijk de aanwezigheid en de posities van ‘knelpunten’ in het netwerk, welke laatste zichtbaar worden wanneer de boezem zich in extreme omstandigheden bevindt.

‘Knelpunten’ zijn dan locaties in het boezemnetwerk waarin niet wordt voldaan aan eisen die daar lokaal gelden, bijv. met betrekking tot de maximale boezemwaterstand of stroomsnelheid.

In onderhavig onderzoek zijn alleen die ‘knelpunten’ nagegaan die betrekking hebben op de boezempeilen.

De beoogde opzet van het onderzoek is om via het doen van modelsimulaties met extreme scenario’s voor de omstandigheden de ‘knelpunten’ in kaart te brengen en in een vervolgstap te onderzoeken op welke wijze deze ‘knelpunten’ het beste kunnen worden verholpen. De primaire oplossingsrichtingen zijn daarbij, de uitbreiding van de afvoercapaciteit van de Friese boezem en de optimalisatie van de sturing van de afvoerkunstwerken.

1.2 Het Friese Boezemstelsel: Probleemverkenning

1.2.1 Inleiding

In de paragraaf over de aanleiding tot het afstudeeronderzoek is reeds aangegeven dat Waterschap Friesland in toenemende mate problemen verwacht met betrekking tot het boezemsysteem en (daarmee samenhangend) de watersystemen in het stroomgebied als gevolg van ongunstig werkende (periodieke) veranderingen in klimatologische omstandigheden (klimaatfluctuaties) en in de grootheden die daarvan invloed ondervinden.

De verwachting is dat situaties van wateroverlast zich frequenter zullen voordoen, als geen maatregelen getroffen worden.

In de navolgende paragrafen wordt de verwachte situatie voor de 21^{ste} eeuw kort geschetst bij ongewijzigd beleid. Tevens wordt een onderzoek van Waterschap Friesland aangehaald dat laat zien dat bij een extreme neerslagbelasting, het boezemstelsel (in de huidige configuratie) met een wateroverschot blijft zitten, dat niet op de reguliere manier (d.i. binnen het systeem) kan worden verwerkt. Vervolgens wordt aangegeven dat in de samenleving geen acceptatie bestaat voor het optreden van wateroverlastsituaties, ondanks het feit dat deze (op grote schaal) zelden voorkomen. Daarnaast wordt een praktijkvoorbeeld gegeven van een overlastsituatie in de provincie Friesland onder invloed van hevige neerslag in het jaar 2002. Tot slot wordt aangegeven welke maatregelen volgens verschillende instanties de meest geschikte zijn om tekortkomingen in watersystemen op te heffen.

1.2.2 Wateroverlastsituaties

Frequenter voorkomen van wateroverlast

Wanneer veranderingen optreden in de bestaande klimatologische omstandigheden – als bijvoorbeeld wordt uitgegaan van langjarige klimaatfluctuaties – zodanig dat er ondermeer een toename te verwachten is in de neerslaghoeveelheden en in de neerslagintensiteiten en er daarnaast (ongunstige) veranderingen optreden in de neerslagpatronen, dan zal dat betekenen dat voor zowel de laaggelegen als voor de hooggelegen delen van de provincie Friesland vaker hoge grond- en oppervlaktewaterstanden voorkomen. Wateroverlastsituaties in die gebieden zullen zich daardoor frequenter kunnen voordoen. Bovengenoemde ontwikkelingen in de neerslag hebben ook invloed op de toevoer van water naar de boezem vanuit de afwaterende gebieden, deze zal toenemen. Daarnaast is de verwachting dat de afvoer van het boezemwater naar de Waddenzee (het spuien onder vrij verval) in de 21^{ste} eeuw steeds verder bemoeilijkt wordt vanwege een structurele stijging van de zeespiegel. De zeespiegelstijging zal namelijk de ingezette trend van de afgelopen eeuwen al dan niet versneld voortzetten. Concreet betekent dit een afname van de lozingscapaciteit van de Friese boezem voor wat betreft de spuisluizen. Een en ander kan op termijn resulteren in het vaker voorkomen van ongewenst hoge boezemwaterstanden.

Stijgende boezempeilen worden, als een kritiek niveau wordt genaderd, ‘afgeremd’ door het afkondigen van maaltbeperkingen. Wanneer dat instrument vaker en voor een langere duur moet worden toegepast neemt de kans op wateroverlast en schade in de afwaterende gebieden allengs toe.

Deel overtollig water kan in boezemsysteem niet verwerkt worden

Waterschap Friesland heeft in een onderzoek (Lit. [17]) bekeken of het huidige boezemstelsel op een situatie van extreem waterbezwaar adequaat kan anticiperen.

Uit het onderzoek is gebleken dat bij een waterbezwaar op de Friese boezem met een kans van voorkomen van eens in de 100 jaar, er een hoeveelheid water ‘overblijft’, die niet binnen het boezemsysteem van meren, kanalen en lozingspunten verwerkt kan worden (d.i. geborgen op de boezem of afgevoerd naar het buitenwater).

De grootte van dit wateroverschot is afhankelijk van de duur van het extreme waterbezwaar, de x-daagse toevoer op de boezem. Daarnaast wordt de omvang van het overschot bepaald door het op dat moment beschikbare deel van het bergend vermogen van de boezem en door de mate waarin de spuicapaciteit benut kan worden (afhankelijk van de actuele binnen- en buitenwaterstanden). Tevens is het tijdstip waarop de gemalen op volledige bemalingscapaciteit (kunnen) draaien mede bepalend voor de uiteindelijke grootte van het opgebouwde wateroverschot.

Het wateroverschot dat niet door het boezemsysteem verwerkt kan worden zou dan bijvoorbeeld in het boezemgebied geborgen moeten worden.

Berging in de boezemgebieden wordt gerealiseerd op die locaties waar het mogelijk is het (grond-) waterpeil gereguleerd te laten stijgen tot aan ongeveer maaiveldniveau; dit betekent dat alleen de gebieden zonder bebouwing en met sturingsmiddelen hiervoor in aanmerking komen; op die manier blijft de omvang van de eventuele schade door wateroverlast beperkt. Door bijvoorbeeld voor polders een maalbeperking of maalstop in te stellen kan berging in het afwaterende gebied gerealiseerd worden.

Wanneer de bergingsmogelijkheden in deze gebieden, welke nog reesteren in omstandigheden met een zware neerslagbelasting, worden vergeleken met het overschot aan water van de boezem, dan blijkt onder bepaalde omstandigheden (afhankelijk van o.m. de toelaatbare peilstijging op de boezem) de bergingscapaciteit van de boezemgebieden te gering te zijn om het wateroverschot volledig op te vangen.

In een dergelijke situatie zou men ervoor kunnen kiezen bergingspolders aan te wijzen, die het restant van het wateroverschot tijdelijk opslaan en waarin men het waterpeil dus laat stijgen tot (ver) boven het maaiveldniveau. Op een later tijdstip moet dit overtollige water dan alsnog via het boezemsysteem worden afgevoerd naar het buitenwater. Een alternatieve, meer structurele oplossing is de vergroting van de afvoercapaciteit van het boezemstelsel. Daarmee wordt de oorzaak van het bovengenoemde probleem, een falend boezemstelsel, op directe wijze aangepakt.

1.2.3 Wateroverlast is onacceptabel + praktijkvoorbeeld

Geen acceptatie incidentele wateroverlast

In de jaren 1998 en 1999 zorgde hevige neerslag voor ernstige wateroverlast in o.m. Noord-Oost Nederland. Door gedupeerden werd en masse een beroep gedaan op de ‘Wet tegemoetkoming schade’, hetwelk resulteerde in een totale ingebrachte schadeclaim van enkele honderden miljoenen guldens. Mede op basis hiervan heeft het toen zittende kabinet aangegeven dergelijke overlastsituaties niet langer te accepteren als zijnde een verschijnsel dat zich eens in de zoveel tijd voordoet onder extreme (weers-) omstandigheden. Ook in de rest van de samenleving bleek weinig acceptatie aanwezig te zijn voor de incidenteel voorkomende kritieke situaties in delen van Nederland (mede) als gevolg van overvloedige neerslag. Dit ondanks het feit dat het optreden van dergelijke grootschalige noodtoestanden, statistisch gezien, een betrekkelijk zeldzame gebeurtenis is.

Schade door wateroverlast in polders onacceptabel

De Friese afdeling van de Noordelijke Land- en Tuinbouw Organisatie, NLTO Fryslân, geeft in een notitie aan ondermeer Waterschap Friesland te kennen, dat de agrarische sector in Friesland de eigen waterhuishouding goed op orde heeft. Daarom beschouwt de sector het als een onacceptabel gegeven wanneer schade door wateroverlast optreedt als gevolg van het feit dat het boezemsysteem niet naar behoren functioneert of als gevolg van het feit dat de overheden aansturen op een beleid van een ‘natuurlijker’ omgang met het overtollige water in de provincie Friesland (“vasthouden, bergen, afvoeren”).

Voorbeeld wateroverlast provincie Friesland

In februari 2002 was, onder invloed van hevige neerslag in de provincie, het gemiddelde waterpeil op de Friese boezem dusdanig hoog gestegen (ca. 20 cm boven het streefpeil van N.A.P. -0.52 m), dat de Friese waterschappen besloten tot het instellen van een maalbeperking voor de polders. (doorgaans wordt een maalbeperking pas overwogen bij een gemiddelde peilstijging van ca. 30 cm boven het boezemstreefpeil)

Op bepaalde locaties bleken bovendien de boezemkades te laag te zijn ten opzichte van het verhoogde boezempeil, met als gevolg dat nabijgelegen stukken land onderliepen.

Daarnaast hadden een aantal polders, nog vóór de afgekondigde maalbeperking, op den duur te kampen met ernstige wateroverlast (sterk verhoogde grondwater- en polderpeilen).

De mogelijkheid om boezemwater te lozen via de spuisluizen was mede afhankelijk van de heersende windrichting: Zuidwest. Zo konden de sluizen van Dokkumer Nieuwe Zijlen en de Friese sluis bij Zoutkamp hun water goed kwijt, net als de Lauwersmeerspuisluisen; terwijl het spuien bij Harlingen (Tsjerk Hiddessluizen) ernstig bemoeilijkt werd.

Het Woudagemaal te Lemmer was eveneens in werking gesteld om overtollig boezemwater te lozen (op het IJsselmeer).

1.2.4 Voorstellen voor maatregelen voor boezemsysteem

Om de genoemde problemen met betrekking tot het Friese boezemstelsel te voorkomen, worden door verschillende instanties verschillende oplossingen aangedragen.

“Vasthouden, bergen en afvoeren”

De Commissie Waterbeheer 21^{ste} eeuw stelt ten aanzien van de wateroverlast-problematiek een strategie voor, die gekenmerkt wordt door de termen: ‘vasthouden, bergen en afvoeren’. In het kort houdt deze aanpak in dat de overtollige neerslag in eerste instantie zo veel mogelijk wordt vastgehouden in de grond en in de waterlopen van de gebieden waar ze valt. Is dat niet afdoende om te hoge waterstanden op de boezem te voorkomen, dan dient het overtollige water via deze waterlopen en de boezem afgevoerd te worden naar zogenaamde retentiegebieden (berging van het water). Genereert ook deze oplossing nog onvoldoende resultaat, zodanig dat gevaar dreigt van overstroming vanuit de waterlopen in het afwaterende gebied en vanuit het boezemstelsel, dan dient het surplus aan water te worden afgevoerd naar het buitenwater (via de boezem-afvoerkunstwerken).

Maalbeperking werkt tijdelijk

Bij wateroverlast op de boezem (te hoge waterstanden), kan men ertoe overgaan om voor de afwaterende polders een maalstop / -beperking in te stellen. Echter, hiermee wordt het probleem in principe verplaatst van het boezemsysteem naar de polders: oplopende waterstanden binnen het poldergebied, met als mogelijk resultaat het buiten hun oevers treden van de waterlopen. Een maalstop / -beperking kan de boezem dus tijdelijk ontlasten, maar kan niet worden volgehouden als de extreme neerslag langer aanhoudt, omdat de poldergebieden waarvoor deze maatregel geldt, dan schade leiden als gevolg van optredende wateroverlast. (dit probleem wordt ondermeer aangekaart door Waterschap Noorderzijlvest, Groningen)

Vergroting bergend vermogen boezem

Om de veiligheid (tegen overstromen vanuit de boezem) en de effectiviteit van een boezemsysteem te vergroten kan men ervoor kiezen om de boezemkaden te verhogen of het bergend oppervlak van de boezem te vergroten, door verruiming in de breedte van het boezemstelsel. In beide gevallen wordt een vergroting van het bergend vermogen bewerkstelligd. (Waterschap Noorderzijlvest, Groningen)
Vervolgens is het van belang op gezette tijden goed onderhoud aan het boezemnetwerk te plegen om de gerealiseerde bergingscapaciteit te kunnen waarborgen.

NLTO: Extra boezemgemaal

De organisatie NLTO Fryslân pleit voor een uitbreiding van de afvoercapaciteit van de Friese boezem door de aanleg van een extra gemaal. Hierbij wijst zij erop dat de afvoercapaciteit van de Friese boezem in de huidige situatie ongeveer de helft is van de maalcapaciteit van de poldergemalen. Volgens hen kan met een extra gemaal het huidige veiligheidsniveau gehandhaafd worden. In aansluiting op een goed werkende waterhuishouding binnen de poldergebieden, is de Friese agrarische sector namelijk zeer gebaat bij een adequaat functionerend boezemstelsel.

Ingenieursbureau Boorsma b.v.

In Lit. [04] worden door Ingenieursbureau Boorsma b.v. ondermeer de volgende maatregelen voorgesteld om de gewenste veiligheid tegen wateroverlast in de provincie Friesland voor de komende decennia te waarborgen.

- De polderdijken en boezemkaden structureel verhogen met 0.10 m. Daarnaast is het vereist om jaarlijks onderhoud te plegen: de polderdijken en boezemkaden dienen op de vastgestelde hoogte te zijn en te blijven.
- Een betere afstemming tot stand brengen tussen het gebruik van het bergend vermogen van de polders en van de boezem, door het inventiever hanteren van de maalbeperkingsregel en van de afvoermogelijkheden van polders en boezem.
- Stedenbouwkundige uitbreidingen dienen niet in die gebieden plaats te vinden, waarvan de waterlopen in directe verbinding staan met het boezemstelsel en waarvan het gemiddelde maaiveldniveau nabij het boezemstreefpeil (N.A.P. -0.52 m) gelegen is (vergelijk de uiterwaarden bij rivieren).
- Met de keersluizen in de Slachtedijk kan de Friese boezem in twee delen worden opgesplitst. Deze boezemscheiding dient om het effect van op- en afwaaiing op de Friese boezem te beperken. Door een verdere compartimentering van het boezemstelsel te realiseren, met behulp van nieuw aan te leggen keersluizen, kunnen de effecten van op- en afwaaiing verder gereduceerd worden.

- De inzet van extra maalcapaciteit in de Noordwesthoek van Friesland (te Harlingen) en/of uitbreiding van de boezem-afvoercapaciteit in het Zuidwesten en/of het Noordoosten van de provincie. In laatstgenoemd gebiedsdeel kan de capaciteitsvergroting van de afvoer bestaan uit een lateraal kanaal, lopend vanaf Dokkumer Nieuwe Zijlen langs de westelijke oever van het Lauwersmeergebied naar Lauwersoog aan de Waddenzee, alwaar een combinatie van een spuisluis en een gemaal zorgdragen voor de afvoer van het overtollige boezemwater. Een verruiming van de toevoerkanalen naar Dokkumer Nieuwe Zijlen is voor deze oplossing een vereiste.
- De aanleg van een groot opvangbekken nabij het IJsselmeer en/of nabij de Waddenzee (deze laatste bijv. gecombineerd met de hiervoor genoemde oplossing met het laterale kanaal)
- Het afvoeren van boezemwater naar de Waddenzee via de drie van de Friese boezem afgekoppelde gebieden in het Noorden van de provincie Friesland.

Het continue proces van waterbeheersing dient plaats te vinden op basis van een verantwoorde integratie van in de praktijk opgedane kennis en ervaringen, theoretische inzichten en bevindingen uit modelonderzoek; Het waterbeheer behelst het anticiperend reageren op actuele waarnemingen enerzijds en op verwachte, nieuwe ontwikkelingen anderzijds. Daarnaast is een adequaat beheer en onderhoud van de infrastructuur van het boezemsysteem van groot belang.

De Friese waterschappen

In Lit. [08] (de resultaten van een onderzoek gedaan door de Friese waterschappen, getiteld: “Berging en Afvoer van water in Fryslân”) worden maatregelen voor de boezem en de afwaterende gebieden genoemd, die afzonderlijk of gecombineerd kunnen bijdragen aan het handhaven van het gewenste ‘beschermingsniveau tegen wateroverlast’ op de langere termijn. De beschreven maatregelen voor de Friese boezem zijn ondermeer:

- Een uitbreiding van de maalcapaciteit en / of de spuicapaciteit van de Friese boezem.
- Het afkoppelen van de Friese boezem van afwaterende gebieden (bijv. in het Noordwesten van Friesland).
- De doorvoer van boezemwater naar reeds afgekoppelde gebieden.
- Het vergroten van het boezemoppervlak.
- Het voeren van een meer anticiperend peilbeheer (bijv. voormalen).

In het jaar 2004 zal het ‘beschermingsniveau tegen wateroverlast’ voor de verschillende soorten grondgebruik in de afwaterende gebieden en voor de boezem worden vastgesteld. Dit geschiedt aan de hand van de Leidraad van de Commissie Waterbeheer 21^{ste} Eeuw en volgens de wensen en eisen van belanghebbenden. Daarnaast wordt in het jaar 2004 het gewenste peilbeheer van de boezem en van de polders voor de komende decennia vastgesteld. Daarbij zijn ondermeer het gedefinieerde beschermingsniveau en de functies bepalend.

In het onderzoek worden voor de situatie in het jaar 2030 de volgende afzonderlijke maatregelen voor het Friese boezemstelsel voorgesteld, die (volgens de Friese waterschappen) vanuit het oogpunt van kosteneffectiviteit en andere (waterhuishoudkundige) doelen het meest kansrijk zijn:

- Een vergroting van de maalcapaciteit te Harlingen met 24 m³/s.
- Een vergroting van het boezemoppervlak met 3500 ha.
- De inrichting van een bergingsgebied met een oppervlakte van 1300 ha en een gemiddelde diepte van 70 cm.

Met elk van deze maatregelen zou de huidige frequentie, waarmee gebruikgemaakt wordt van de maalbepierking, gehandhaafd kunnen worden: d.i. gemiddeld 1 x per 30 jaar.

Zonder de maatregelen zou de frequentie van de maalbepierkingen toenemen tot gemiddeld 1 x per 12 jaar in het jaar 2030.

1.3 Doelstelling en vraagstelling

1.3.1 Inleiding + keuze voor model in Sobek Rural®

De voorgaande probleemanalyse heeft duidelijk gemaakt waar de verwachte problemen met betrekking tot de Friese boezem liggen; Een boezemstelsel dat onvoldoende is toegerust om juist te functioneren in bepaalde extreme omstandigheden, belast de afwaterende gebieden bovenmatig (via bijv. maalbepkeringen) en / of leidt (lokaal) tot waterstanden in het systeem, die op een ongewenst hoog niveau liggen.

Ten aanzien van de geconstateerde problemen zijn verschillende oplossingsrichtingen mogelijk, in de vorige paragraaf zijn reeds enkele voorstellen gedaan.

Een oplossing is bijvoorbeeld de uitbreiding van de afvoercapaciteit van de boezem, door het maalen / of spuivermogen te vergroten (bijv. door bijplaatsing van afvoerkunstwerken); dat is intuïtief een geschikte oplossing.

Vervolgens is het interessant te weten wat de precieze omvang van de capaciteitsuitbreiding dient te zijn en op welke locatie(s) in het boezemstelsel deze het gewenste en / of het meeste effect sorteert; de oplossing moet een gunstige invloed hebben op de boezempeilen, ook (of: juist) in kritieke situaties.

Omdat het boezempeil door windeffecten (op- en afwaaiing) en door variaties in het doorstroomprofiel van de watergangen op een bepaald tijdstip niet overal hetzelfde niveau heeft – tevens zijn verhangen (dus: waterstandsverschillen) noodzakelijk om stromingen naar bijvoorbeeld de afvoerkunstwerken tot stand te brengen – is het bovendien van belang om na implementatie van de maatregel te controleren of de lokale peilen voldoen aan de lokaal geldende veiligheidseisen met betrekking tot de waterstand.

Het bovenstaande in overweging nemend ligt het voor de hand te kiezen voor een hydrodynamisch model van de Friese boezem, waarmee het boezemsysteem (in de huidige configuratie of na implementatie van gepaste maatregelen) via simulatieberekeningen in haar functioneren beoordeeld kan worden.

Een dergelijk model is, zoals eerder aangegeven, reeds voorhanden en is vervaardigd in het simulatieprogramma Sobek Rural®. Het is een 1-dimensionaal stromingsmodel opgebouwd als een netwerk van ‘knopen’ en verbindende ‘takken’. De ‘takken’ zijn de waterlopen (incl. de Friese meren), waarvoor de doorstroomprofielen zijn gedefinieerd.

Per kenmerkend deel van een waterloop worden de 1-dimensionale bewegingsvergelijking en continuïteitsvergelijking opgelost.

In het simulatieprogramma kunnen verschillende scenario’s voor (extreme) omstandigheden worden opgesteld en vervolgens kan via het uitvoeren van simulaties met het boezemmodel nagegaan worden op welke wijze het boezemsysteem op deze omstandigheden (de belastingen en randvoorwaarden) reageert.

In de nu volgende paragrafen wordt het gebruik van het Sobek®-model van de Friese boezem verder verantwoord door het formuleren van het beoogde doel van het onderzoek en de daarvan afgeleide onderzoeksvragen.

1.3.2 Doel van het onderzoek

Omschrijving

Het doel van het (afstudeer-) onderzoek is om de ‘knelpunten’ van het Friese boezemstelsel op te lossen door een uitbreiding van de afvoercapaciteit te realiseren op één of meerdere goed gekozen locatie(s) en/of door de sturing van de bestaande afvoerkunstwerken in de gegeven omstandigheden te optimaliseren.

Toelichting

De ‘knelpunten’ (hier: lokale peiloverschrijdingen) manifesteren zich, wanneer het Friese boezemstelsel onder invloed staat van extreme belastingen, welke in dit onderzoek omstandigheden representeren die realistisch kunnen zijn voor de komende decennia.

De doelstelling wordt gerealiseerd door met behulp van een geschematiseerd (hydrodynamisch) model van het bestaande Friese boezemstelsel en een set - mogelijk - maatgevende scenario’s voor belastingen en randvoorwaarden (neerslag, buitenwaterstanden, etc.), simulaties uit te voeren - de scenario’s hebben hierbij betrekking op toekomstige extreme omstandigheden. De simulaties brengen dan de ‘knelpunten’ van het boezemstelsel aan het licht: het (tijdelijk) falen van het boezemsysteem.

Vervolgens wordt onderzocht in hoeverre een verbeterde sturing van de afvoerkunstwerken nog kan bijdragen aan het voorkomen van de lokale overschrijdingen van maximum peilen. Wanneer dat niet tot het gewenste resultaat leidt of kan leiden, omdat ook een optimalisatie begrensd is, wordt de oplossing gezocht in een verdere uitbreiding van de afvoercapaciteit van de boezem, totdat het boezemsysteem in staat is passend, toereikend en op een gewenste wijze te anticiperen op maatgevende (weers-) omstandigheden - welke zich in de (nabije) toekomst kunnen voordoen - zodanig dat ongewenste (wateroverlast-) situaties voorkomen worden.

1.3.3 Formulering van de onderzoeksvragen

Hierna volgen een set onderzoeksvragen, waarvan de beantwoording leidt tot het bereiken van de doelstelling.

1. Welke set van maatgevende scenario's voor belastingen en randvoorwaarden moet worden aangehouden, zodanig dat een breed bereik van toekomstige extreme (maar ook: realistische) omstandigheden is vertegenwoordigd?
(scenario's die een toekomstige situatie weergeven, worden gegenereerd op basis van de grootheden die het Friese boezemsysteem direct of indirect beïnvloeden (neerslag, Waddenzeegetijde, etc.) én de verwachte ontwikkelingen daarin voor de komende decennia)
2. In hoeverre voldoet het Friese boezemstelsel in de huidige configuratie, bij een gegeven extreem belastingsscenario, aan de geldende waterstandscriteria?
(Dit houdt een nadere analyse van de simulatieresultaten in: op welke locaties in het boezemnetwerk treden vanaf welk ogenblik ongewenste peiloverschrijdingen op; wat is de duur daarvan, etc.)
3. In hoeverre kan een legitieme aanpassing van – alleen – de sturingsstrategie de 'knelpunten' opheffen, die ontstaan bij een bepaald extreem belastingsscenario?
(Dit betekent dat de varieerbare parameters binnen de sturingsstrategie van het boezembeheer op een verantwoorde manier worden 'bijgesteld')
4. In hoeverre kan een uitbreiding van de lozingscapaciteit van de Friese boezem, door aanleg van een extra spuisluis of gemaal (of een combinatie van beiden) op één of meerdere goed gekozen locatie(s), de 'knelpunten' (peiloverschrijdingen) bij een gegeven maatgevend belastingsscenario opheffen?

Genoemde maatregelen dienen in een iteratieve procedure te worden uitgetest en afgestemd op de omstandigheden waarop ze betrekking hebben.

Hoofdstuk 2

Het Friese boezemstelsel en haar werking

2.1 Inleiding

Om een uitspraak te kunnen doen over de noodzaak van een capaciteitsuitbreiding of van andersoortige maatregelen voor het boezemsysteem, is allereerst enige kennis vereist van het boezemstelsel en van de gebieden die daarop afwateren; Het is van belang te weten uit welke onderdelen de Friese boezem bestaat en hoe het in hoofdlijnen functioneert in relatie tot de directe omgeving.

Daarom wordt in onderstaande paragrafen een beschrijving gegeven van de boezem als stelsel van meren, kanalen en vaarten, van de afvoerkunswerken die het overtollige water lozen op het buitenwater en van het peilbeheer dat gevoerd wordt op de Friese boezem. Ook komen kort de afwaterende gebieden aan de orde.

2.2 Stroomgebied Friesland

De Friese boezem en de gebieden die voor hun wateraanvoer of waterafvoer van de boezem afhankelijk zijn worden tezamen het stroomgebied Friesland genoemd.

Drie gebieden in het noorden van de provincie (Ropta, Swarte Harne en Dongerdielen) zijn van de boezem afgekoppeld, wat wil zeggen dat zij niet lozen op de boezem; overtollig water wordt direct geloosd op de Waddenzee. Zij zijn wel voor hun wateraanvoer op de boezem aangewezen. Deze gebieden hebben gezamenlijk een oppervlakte van 31.760 ha.

De totale oppervlakte van het stroomgebied Friesland bedraagt 333.980 ha ¹⁾.

Het gebied dat afwatert op de Friese boezem is groot 302.220 ha, dit is inclusief de Friese boezem zelf ²⁾.

De Friese boezem bestaat uit de kanalen, vaarten, sloten en meren die in open verbinding met elkaar staan én uit de vrij voor de boezem liggende gebieden, zoals de boezemlanden en de zomerpolders. Deze gebieden lozen overtollig water direct op de boezem, d.i. zonder dat gebruik wordt gemaakt van een afvoerkunswerk als een gemaal of spuisluis: dus een vrije natuurlijke afstroming.

Met de boezemwaterstand op streefpeil bedraagt de oppervlakte aan boezemwater 15.060 ha. De grote meren en de hoofdadars nemen daarvan 13.580 ha voor hun rekening. De overige kleinere vaarten zijn goed voor 1.480 ha.

De vrij voor de boezem liggende gebieden beslaan een oppervlakte van 27.250 ha. Daarvan is 2.700 ha boezemland en 1.030 ha zomerpolders. De maaiveldhoogte in deze gebieden varieert van N.A.P. – 0.50 m tot N.A.P. +1.0 m à N.A.P. +2.0 m.

De honderden polders die afwateren op de Friese boezem hebben een gezamenlijke oppervlakte van 195.880 ha. De afwatering geschiedt door middel van bemaling: elke polder beschikt over één of meerdere poldergemalen, waarmee het waterpeil in die polder wordt beheerst.

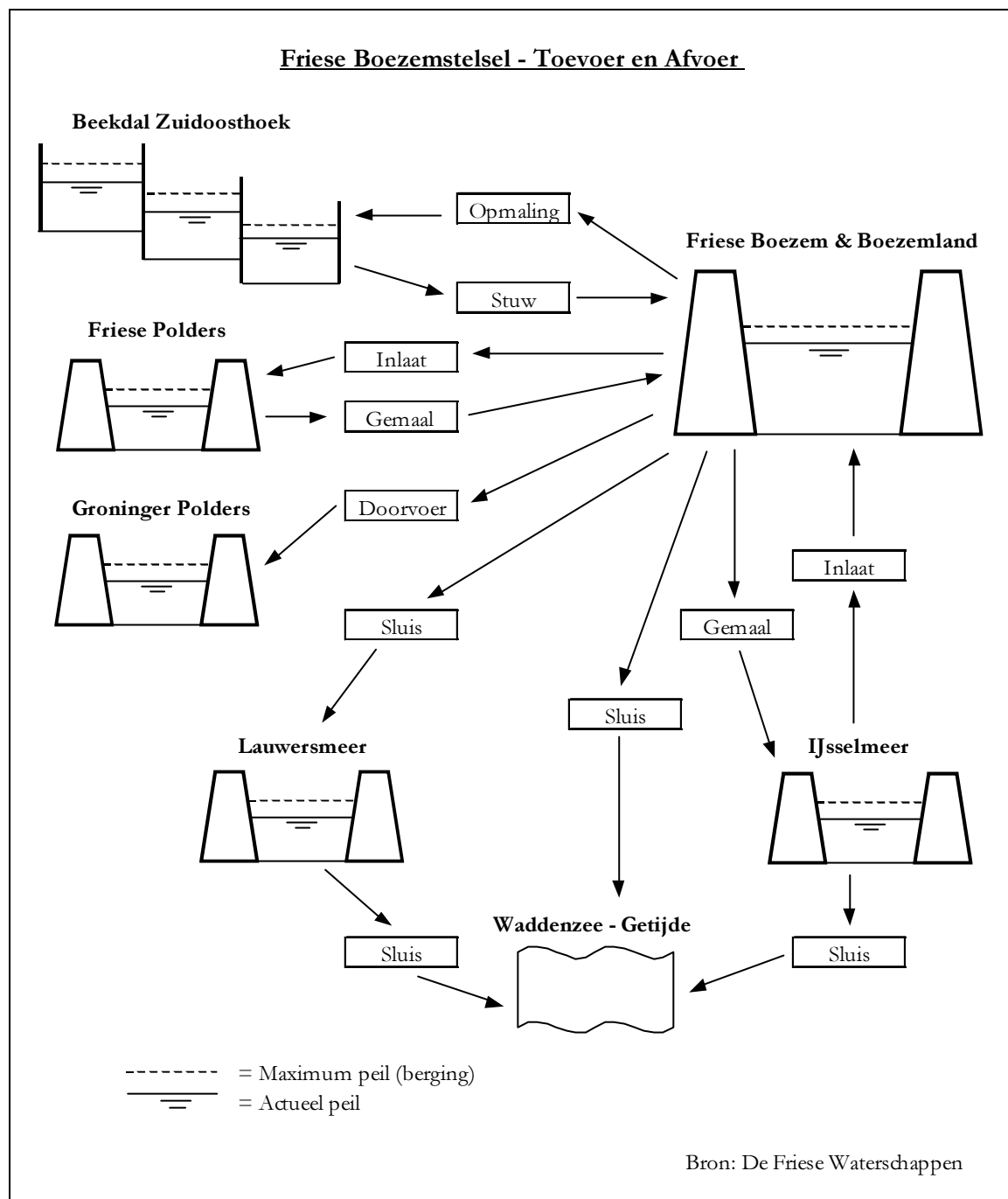
In totaal zijn er circa 800 poldergemalen met een gemiddelde capaciteit van 12 mm/dag. De polders worden tegen hoge buitenwaterstanden beschermd door aangrenzende hoge gronden of polderdijken. In veiligheidsnormen is vastgelegd dat alle polders een mate van bescherming moeten hebben, die gerelateerd is aan boezemwaterstanden met een overschrijdingsfrequentie van eens in de 100 jaar.

De zogenaamde 'hoge gronden' lozen het overtollige water onder vrij verval op de Friese boezem, waarbij altijd een (regelbare) stuw wordt gepasseerd; de stuwen houden het boezemwater gescheiden van het watersysteem van de 'hoge gronden'. De 'hoge gronden' hebben een totale oppervlakte van 64.030 ha.

- 1) $15.060 \text{ ha (boezemwater)} + 27.250 \text{ ha (gebied vrij voor de boezem)} +$
 $195.880 \text{ ha (polders)} + 64.030 \text{ ha (hoge gronden)} + 31.760 \text{ ha (afgekoppelde gebieden)}$
 $= 333.980 \text{ ha (stroomgebied Friesland)}.$
- 2) $333.980 \text{ ha (stroomgebied Friesland)} - 31.760 \text{ ha (afgekoppelde gebieden)}$
 $= 302.220 \text{ ha (afwaterend gebied)}.$

In bijlage BB.01 is een kaart opgenomen van de provincie Friesland waarin de ligging van ondermeer de hoge gronden, de polders en de vrij voor de boezem liggende gebieden staat weergegeven.

In de onderstaande figuur B.01 zijn de watersystemen afgebeeld die afwateren op en/of water onttrekken van het Friese boezemstelsel. Tevens is aangegeven op welke watersystemen het overtollige boezemwater geloosd kan worden.



Figuur B.01: Het Friese boezemstelsel – Uitwisseling tussen watersystemen

2.3 Het peilbeheer van de Friese boezem

2.3.1 Het boezemstreefpeil

De peilbesluiten en de infrastructuur, die gerealiseerd is ten behoeve van het peilbeheer van het Friese boezemstelsel, zijn gericht op het zo snel mogelijk afvoeren van wateroverschotten en het constant houden van de waterstanden.

Men streeft met het peilbeheer van de Friese boezem naar een voortdurende handhaving van de gemiddelde boezemwaterstand op het niveau van het streefpeil (N.A.P. -0.52 m) met een marge van $+ / - 0.01$ m.

2.3.2 Gewogen gemiddeld boezempeil

Het gemiddelde boezempeil is een gewogen gemiddelde van de waterstanden gemeten op zes locaties in het boezemstelsel. Die plaatsen zijn: Bergumerdam, Leeuwarden, Sneek, Nes, Scharsterbrug en Woudsend. De weging is verwerkt door het peil van Scharsterbrug twee keer mee te tellen in de berekening en die van Woudsend vier keer; voor de overige peilen is de wegingsfactor gelijk aan één. Deze wegingsfactoren zijn bepaald op basis van het boezemoppervlak dat de verschillende peilen 'vertegenwoordigen'. Zo telt bijvoorbeeld het meetpunt Woudsend zwaarder mee dan andere meetpunten, omdat deze temidden van de Friese meren ligt (d.i. een groot waterbergend oppervlak). Overigens kan als gevolg van windinvloeden en in werking zijnde boezemgemalen en spuisluisen de lokale waterstand aan de randen van het boezemstelsel significant afwijken van het rekenkundig gemiddelde boezempeil en dus van het streefpeil.

Zo zorgt opwaaiing voor plaatselijk hogere waterstanden en afwaaiing, bemaling en spuien onder vrij verval voor lagere waterstanden aan de boezemranden.

2.3.3 Middelen voor peilbeheer

Voor het dagelijkse beheer van de Friese boezem kan beschikt worden over het volgende:

- Gegevens over de weersomstandigheden in de afgelopen periode, met name neerslag en verdamping.
- Weersvoorspellingen voor de komende dagen, vooral met betrekking tot neerslag en verdamping.
- Informatie over de windrichting en de windkracht. Dergelijke gegevens zijn noodzakelijk voor de bepaling van de realiseerbare afvoervolumes en voor het juist interpreteren van de gemeten waterstanden.
- Boezemgemalen, schut- en spuisluisen en keersluizen (Slachtedijk).
- Gemeten boezempeilen en peilfluctuaties.

2.3.4 Anticiperend peilbeheer

Tegenwoordig wordt met betrekking tot het peilbeheer van het Friese boezemstelsel een anticiperend beleid gevoerd.

Zoals uit de bovenstaande lijst van beschikbare middelen ook al blijkt, houdt een dergelijk beleid in dat de inzet van de afvoerkunstwerken niet slechts gebaseerd is op het actuele gemiddelde boezempeil, maar ook op de verwachte boezembelasting en daarmee op het verwachte verloop van de boezemwaterstanden; daarnaast bepalen bijvoorbeeld de voorspellingen ten aanzien van de realiseerbare afvoerdebieten de wijze waarop de kunstwerken worden ingezet, etc.

Er wordt kortom niet alleen geanticipeerd op de huidige omstandigheden, maar ook op de verwachte ontwikkelingen daarin voor de komende dagen.

2.3.5 De afvoerkunstwerken

Als de boezemafvoer niet gelijktijdig plaatsvindt met en/of niet dezelfde omvang heeft als de toevoer van overtollig water vanuit de afwaterende gebieden, zal de boezemwaterstand stijgen: het water wordt tijdelijk geborgen in het systeem.

Om het boezempeil dan binnen de marges van het streefpeil te houden, is (vergroting van de) afvoer op een bepaald moment noodzakelijk. Daarvoor staan de volgende afvoerwerken ter beschikking:

1. De Tsjerk Hiddessluizen te Harlingen
2. De spui- en schutsluis te Dokkumer Nieuwe Zijlen
3. De Friese sluis bij Zoutkamp
4. Het J.L. Hooglandgemaal te Stavoren
5. Het Ir. D.F. Woudagemaal te Lemmer

In bijlage BD.02 is op een kaart van de provincie Friesland aangegeven waar deze afvoerkunstwerken zich bevinden.

De Tsjerk Hiddessluizen spuien direct op de Waddenzee. De sluisen te Dokkumer Nieuwe Zijlen en de Friese sluis bij Zoutkamp lozen overtollig boezemwater op het Lauwersmeer (dit gebeurt onder vrij verval: het streefpeil van het Lauwersmeer ligt lager dan het streefpeil van de Friese boezem, respectievelijk N.A.P. -0.93 m en N.A.P. -0.52 m). De provincie Groningen loost eveneens (een deel van) haar wateroverschotten op dit meer. Via de spuisluizen te Lauwersoog wordt dit water vervolgens afgevoerd naar de Waddenzee. Het Hoogland- en het Woudagemaal malen boezemwater uit op het IJsselmeer.

2.3.6 Inzet kunstwerken

De spui- en schutsluisen worden altijd als eerste ingezet, omdat deze onder vrij verval lozen en dit dus geen energie kost. Is men dan van mening dat de geloosde volumes nog van te geringe omvang zijn (bijvoorbeeld ten opzichte van de boezembelasting), dan worden achtereenvolgens het J.L. Hooglandgemaal en het Ir. D.F. Woudagemaal geactiveerd.

Het Hooglandgemaal wordt in principe ingezet vanaf een gemiddeld boezempeil van N.A.P. -0.46 m en het Woudagemaal vanaf een peil van N.A.P. -0.41 m.

Blijft de gemiddelde boezemwaterstand stijgen richting een ongewenst hoog niveau (± 0.30 m boven streefpeil: d.i. $\pm$ N.A.P. -0.22 m), ondanks de inzet van alle afvoerkunstwerken, dan wordt besloten tot de afkondiging van een (gedeeltelijke) maalbeperking voor de polders.

2.3.7 Maalbeperking in extreme omstandigheden

In Friesland is sprake van een vrije boezem; dat betekent dat onder normale omstandigheden, in perioden met waterbezwaar in de afwaterende gebieden, elke gewenste hoeveelheid water naar de boezem afgevoerd kan worden of in perioden van droogte elke gewenste hoeveelheid aan de boezem onttrokken kan worden.

In extreme omstandigheden (bijv. aanhoudend zware neerslag) wordt, zoals hierboven gezien is, afgeweken van dit principe: ten behoeve van de beheersing van het boezempeil wordt een maalbeperking ingesteld.

Het overtollige water moet dan tijdelijk geborgen worden in de polders. Als deze situatie lang aanhoudt (voortdurende stijging van de polderpeilen) kan de maalbeperking tot overlast en / of schade leiden in de poldergebieden. Bij het instellen van een maalbeperking is het daarom van belang om vast te stellen welke gebieden erg 'gevoelig' zijn voor een teveel aan water en welke gebieden wat extra water goed kunnen verdragen.

2.3.8 Technische zaken gebaseerd op streefpeil

Hoewel de waterstanden lokaal sterk kunnen afwijken van het rekenkundig gemiddelde boezempeil, is de situatie inmiddels zó, dat veel technische zaken gebaseerd zijn op het streefpeil van de boezem (N.A.P. -0.52 m), zodat een permanente afwijking hiervan (door bijvoorbeeld veel ruimere marges te hanteren) niet voor de hand ligt. Voorbeelden zijn:

De beroepsscheepvaart (hiervoor is een bepaalde minimale waterdiepte en doorstroomprofiel vereist in verband met de diepgang en het dwarsprofiel van de schepen);

De hoogteligging van bepaalde gebieden (bijvoorbeeld van de vrij op de boezem afwaterende gebieden); De hoogte van de afsluitkleppen van poldergemalen en van noodoverlaten; De hoogte van zuigmonden c.q. vijzels van opmalingsinstallaties, etc.

2.4 De kunstwerken voor de waterafvoer

2.4.1 Afvoercapaciteiten kunstwerken Friese Boezem

In de onderstaande tabel TB1 zijn de afvoercapaciteiten van de afvoerkunstwerken van de Friese boezem weergegeven. Daarbij staan ook de spuisluizen te Lauwersoog vermeld.

Voor alle sluizen geldt dat met name het actuele verval over de sluis (het verschil tussen de binnen- en buitenwaterstand) de beschikbare afvoercapaciteit bepaalt.

De weergegeven capaciteiten zijn daggemiddelden: Y m³/s/etmaal.

Afvoerkunstwerk	Lage capaciteit (m ³ /s)	Normale capaciteit (m ³ /s)	Hoge capaciteit (m ³ /s)
Tsjerk Hiddessluizen	0 ⁴⁾	13	19 ³⁾
Dokkumer Nieuwe Zijlen	0 ⁴⁾	49	70 ³⁾
Friese Sluis Zoutkamp	0 ⁴⁾	10	16 ³⁾
J.L. Hooglandgemaal	54	65	93
Ir. D.F. Woudagemaal	65	65	70
Spuisluizen Lauwersoog	0 ⁴⁾	232	464 ³⁾

- 3) Deze hoge capaciteit wordt alleen gehaald bij een gunstige invloed van de wind en bij een relatief hoge boezemwaterstand c.q. een hoog Lauwersmeerpeil.
- 4) Opwaaiing op de Waddenzee en een lage boezemwaterstand c.q. laag Lauwersmeerpeil (geringer verval) zorgen o.m. voor een vermindering van de spuimogelijkheden.

Tabel TB1: Lozingscapaciteiten afvoerkunstwerken

2.4.2 Procentueel aandeel

Gemiddeld over 20 jaar (de periode 1970 – 1989) is het procentuele aandeel (afgerond op één decimaal) van de verschillende afvoerkunstwerken in de totale jaarlijkse afvoer van overtollig boezemwater:

- De Tsjerk Hiddessluizen te Harlingen: 14.3 %
- De schut- en spuisluis van Dokkumer Nieuwe Zijlen: 49.7 %
- De Friese sluis bij Zoutkamp: 7.2 %
- Het J.L. Hooglandgemaal te Stavoren: 21.6 %
- Het Ir. D.F. Woudagemaal te Lemmer: 7.1 %

2.4.3 De Tsjerk Hiddessluizen te Harlingen

De Tsjerk Hiddessluizen te Harlingen bestaan uit een ‘grote’ scheepvaartsluis (12 m breed; drempel buitenzijde op N.A.P. -4.40 m) en een ‘kleine’ scheepvaartsluis (7 m breed; drempel buitenzijde op N.A.P. -2.70 m), die beiden voor het spuien van boezemwater gebruikt kunnen worden. (Voor beide sluizen ligt de drempel aan de binnenzijde op N.A.P. -2.55 m)

Wanneer tijdens het spuien schepen naderen, wordt de grote sluis gesloten, zodat de schepen geschut kunnen worden.

In de grote sluis zijn spuideuren aangebracht, waarmee het spuien naar behoefte gereguleerd kan worden. Daarnaast kan met deze spuideuren het lozen worden onderbroken (door ze te sluiten), als schepen geschut moeten worden.

De kleine sluis kan alleen volledig worden geopend (vóór het lozen) en worden gesloten (nà het lozen) als de binnen- en buitenwaterstand hetzelfde niveau hebben. Met de kleine sluis kan het lozen niet tussentijds onderbroken worden.



Figuur B.02: De grote Tsjerk Hiddessluis

2.4.4 De spui- en schutsluis te Dokkumer Nieuwe Zijlen

De spuisluis van Dokkumer Nieuwe Zijlen bestaat uit drie kokers, die worden afgesloten door hefdeuren. De noordelijke en zuidelijke koker hebben een breedte van resp. 4.73 m en 4.78 m, de middenkoker heeft een breedte van 8.31 m. De drempelhoogte van de drie kokers bedraagt N.A.P. -2.70 m.

De schutsluis van Dokkumer Nieuwe Zijlen wordt afgesloten met behulp van waaierdeuren, daardoor kan de sluis in stromend water worden gesloten en tegen de waterdruk in worden geopend, wanneer waterafvoer moet plaatsvinden.

De schutsluis heeft een breedte van 9.05 m en de drempelhoogte is N.A.P. -4.50 m. De lozingscapaciteit van de schutsluis is ongeveer gelijk aan die van de spuisluis. In extreme situaties (hoge boezembelasting) worden beide sluizen gebruikt voor de waterafvoer; de toeleidende kanalen naar de sluizen zijn, qua afvoercapaciteit, echter berekend op slechts één sluis, zodat het afgevoerde debiet met twee geopende sluizen maar weinig meer is dan wanneer één sluis geopend staat (d.i. een grootte-verschil van 5%). Een aantal maal per jaar komt het voor dat het Lauwersmeerpeil (streefpeil N.A.P. -0.93 m) hoger ligt dan het plaatselijke boezempeil, zodat niet geloosd kan worden via deze sluizen.



Figuur B.03: De spuisluis van Dokkumer Nieuwe Zijlen

2.4.5 De Friese sluis bij Zoutkamp

De Friese sluis bij Zoutkamp is een combinatie van een schut- en een spuisluis. Als afsluitmiddel is een hefdeur aangebracht. Daarmee kan de waterafvoer min of meer nauwkeurig gereguleerd worden. De sluis heeft een breedte van 6 m en de drempelhoogte is N.A.P. -2.80 m. Een hoog Lauwersmeerpeil kan er voor zorgen dat de waterafvoer via deze sluis wordt beperkt of verhinderd, doordat er op zo'n moment weinig of geen verval over de sluis aanwezig is; d.i. mede afhankelijk van het actuele locale boezempeil.

2.4.6 Het J.L. Hooglandgemaal te Stavoren

Dit gemaal beschikt over vier schroefpompen met een diameter van 3.60 m. Elke pomp kan aangedreven worden door twee elektromotoren met een onderling verschillend vermogen.

Afhankelijk van de actuele opvoerhoogte en de gewenste afvoercapaciteit wordt gekozen om de grote motor (420 kW, 60 omwentelingen per minuut), danwel de kleine motor (210 kW, 45 omwentelingen per minuut) in te schakelen.

Opwaaiing aan de IJsselmeerzijde en afwaaiing aan de boezemzijde, als gevolg van een (harde) zuidwestenwind, gecombineerd met het gemaal werkend op vol vermogen, kan de opvoerhoogte dusdanig vergroten dat de elektromotoren overbelast dreigen te raken. In zo'n situatie wordt de maalcapaciteit verminderd door een aantal elektromotoren uit te schakelen. Daarmee wordt de opvoerhoogte in grootte teruggebracht. Hetzelfde wordt gedaan als, door o.a. windinvloeden, de binnenwaterstand ter plaatse van de aanzuigopening van het gemaal zodanig laag is, dat de kans bestaat dat lucht wordt aangezogen, hetgeen met het oog op schade aan de lagers niet gewenst is.



Figuur B.04: Het J.L. Hooglandgemaal

2.4.7 Het Ir. D.F. Woudagemaal te Lemmer

Het gemaal is uitgerust met acht centrifugaalpompen met een waaierdiameter van 1.70 m. Eén paar pompen wordt aangedreven door één stoommachine. De stoom, waarop de vier stoommachines werken, wordt geleverd door vier zogenaamde ‘vuurgangvlampijp-waterpijpketels’. De ketels worden opgestookt met olie; de opstooktijd (opstarttijd) is 6 uren.

Normaal gesproken draaien de pompen met een snelheid van 90 omwentelingen per minuut. Dan is het voldoende om twee ketels in werking te hebben. Indien nodig kan de snelheid worden verhoogd naar 105 omwentelingen per minuut, waarbij dan drie ketels voor de benodigde stoom zorgen. De vierde ketel is in die situatie een reserveketel.



Figuur B.05: Het ir. D.F. Woudagemaal

2.4.8 De spuisluisen bij Lauwersoog

De ebperiodes van het Waddenzee-getijde worden gebruikt om de wateroverschotten van het Lauwersmeer, via de Lauwersoog-spuisluisen, onder vrij verval te lozen. De spuisluisen bestaan uit drie complexen met elk vier spuikokers. De kokers hebben een breedte van 10 m en de bodem ligt op N.A.P. –5.0 m. Elke spuikoker heeft twee stalen hefdeuren als afsluitmiddelen. Het beheer van de spuisluisen is in handen van de provincie Groningen.



Figuur B.06: De spuisluisen bij Lauwersoog

2.5 De Nieuwe Slachtedijk

Een harde Zuidwestenwind zorgt ervoor dat het Friese boezemwater wordt opgestuwd van het Zuidwesten naar het Noordoosten. Het Zuidwestelijke deel van de boezem heeft, vanwege de grote meren, meer wateroppervlak dan het Noordoostelijk deel, daarom is een stevige Zuidwestenwind al gauw ongunstig voor het Noordoosten van de provincie, vanwege de relatief hoge boezemwaterstanden die erdoor veroorzaakt worden (het opgestuwde water uit het Zuidwesten moet ‘opgevangen’ worden in een ‘sectie’ van het boezemstelsel (het Noordoosten) met een kleiner bergend oppervlak dan waar het water vandaan komt). In de Zuidwesthoek van Friesland leidt een Zuidwestenwind dus tot verlaagde boezemwaterstanden. Om de opstuwing en de afwaaiing te beperken, kan gebruik worden gemaakt van de vijf sluizen in de Nieuwe Slachtedijk; Deze sluizen liggen te Terherne, Jongeburen, Heerenzijl, Goïngarijp en Broek. Wanneer alle vijf sluizen, die in boezemwater liggen, worden gesloten, kan een boezemscheiding worden gerealiseerd. Twee sluizen zijn schutsluizen (Terherne en Broek), de overige drie zijn keersluizen. Gemiddeld over een periode van 20 jaar zijn de sluizen in de Nieuwe Slachtedijk negen keer per jaar gesloten geweest voor een tijdsduur van gemiddeld 13.5 uur.

Op de kaart van de Friese boezem in bijlage BB.03 staat de Slachtedijk weergegeven.

De sluizen te Dokkumer Nieuwe Zijlen en de Friese sluis bij Zoutkamp worden bij Zuidwestenwind ook ingeschakeld om plaatselijk hoge boezemwaterstanden tegen te gaan; de waterafvoer naar het Lauwersmeer stopt een verdere peilstijging of zorgt voor een gewenste peildaling in het Noordoostelijk gebied.

2.6 Het Lauwersmeergebied

Het Lauwersmeer heeft bij streefpeil (N.A.P. -0.93 m) een oppervlakte van ca. 1950 ha. Dat oppervlak is te splitsen in een gebied van 1050 ha waarin de waterdiepte altijd groter is dan 1.50 m en een gebied van ca. 900 ha waarin de waterdiepte zich bevindt tussen 0.00 m en 1.50 m.

De gebieden in het Lauwersmeergebied met een maaiveldhoogte lager dan N.A.P. -0.50 m, welke in directe verbinding staan met het Lauwersmeer, hebben een totale oppervlakte van ca. 645 ha. Deze gebieden worden gemiddeld minstens 10 dagen per jaar overstroomd.

De gebieden met een maaiveldhoogte tussen N.A.P. -0.00 m en N.A.P. -0.50 m, welke eveneens in directe verbinding staan met het Lauwersmeer, hebben een totale oppervlakte van ca. 1115 ha. Deze gebieden worden gemiddeld maximaal 10 dagen per jaar overstroomd.

De locaties in het Lauwersmeergebied die niet overstroomd, omdat deze hooggelegen zijn (maaiveldhoogte groter dan N.A.P. -0.00 m) of laaggelegen maar met kades zijn afgeschermd, hebben een totale oppervlakte van ca. 250 ha. In deze gebieden heerst een natuurlijk grondwaterregime.

De gedeelten van het Lauwersmeergebied die niet overstroomd en voorzien zijn van een ontwatering- en afwatersysteem, beslaan een oppervlakte van ca. 1010 ha. De afvoer van overtollig water vindt plaats door lozing onder vrij verval of door bemaling.

In bijlage BB.04 is een kaart opgenomen van het Lauwersmeergebied, waarin de bovengenoemde gebieden staan aangegeven.

Ter indicatie worden in de onderstaande tabel TB2 overschrijdingsfrequenties gegeven van verschillende peilniveau's voor het Lauwersmeer. De frequenties zijn gegeven als percentage van het aantal dagen in resp. het winterseizoen (1 oktober – 31 maart) en het zomerseizoen (1 april – 30 september). De frequenties zijn een gemiddelde voor de periode [1975 – 1983].

Peilniveau t.o.v. N.A.P. (m)	Overschrijdingsfrequentie (%)	
	Winterseizoen	Zomerseizoen
-0.25	1	0
-0.50	5	0
-0.75	25	7
-1.00	95	98

Tabel TB2: Overschrijdingsfrequenties Lauwersmeerpeil

De spuisluizen bij Lauwersoog zijn onder normale omstandigheden in staat het waterbezwaar op het Lauwersmeer binnen 1 à 2 perioden van laagwater (Waddenzee) te verwerken. Gemiddeld wordt een volume van 55.000 m³ per minuut geloosd naar het buitenwater.

De perioden dat grote volumes overtollig boezemwater wordt geloosd op het Lauwersmeer vanuit de provincies Groningen en Friesland (als gevolg van hevige neerslag in de regio), bevinden zich voornamelijk in het winterhalfjaar (in het zomerhalfjaar slechts incidenteel).

Gemiddeld over het tijdvak [1970 - 1986] werd in de maanden november t/m maart 70 % van het totale jaarlijkse afvoervolume via de spuisluizen van Lauwersoog geloosd.

Een gemiddelde waterstand op het Lauwersmeer van N.A.P. -0.00 m kan voorkomen als gevolg van aanhoudend hoge toevoeren vanuit de afwaterende boezems in combinatie met een gestremde afvoer vanwege hoge buitenwaterstanden, maar een dergelijk peil komt zelden voor, zie ook bovenstaande tabel met overschrijdingsfrequenties.

In het tijdvak [1981 – 1987] is dit extreme peil gemiddeld één dag per jaar opgetreden.

In bijlage BB.05 is in overzichtskaarten van het Lauwersmeer aangegeven welke gebieden onder water staan bij een bepaald verhoogd peil. Deze peilen zijn:

N.A.P. -0.60 m, N.A.P. -0.30 m en N.A.P. -0.00 m. Tevens is de situatie met het Lauwersmeer op streefpeil geschetst (ca. N.A.P. -0.90 m).

Hoofdstuk 3

Model, beoordeling en aanpak

3.1 Systeembelasting

De definitie van de belastingen op het boezemsysteem kan op verschillende manieren plaatsvinden. Bij de zogenaamde stochastenmethode worden met de verschillende variabele grootheden, die het (functioneren van het) watersysteem bepalen of beschrijven, gebeurtenissen gecreëerd door combinaties te maken. Op die wijze worden alle mogelijke situaties opgesteld waarin het watersysteem – in theorie – kan verkeren.

Variabele grootheden zijn bijvoorbeeld:

- het patroon van de neerslag
- de omvang van een neerslagvolume
- de buitenwaterstanden
- de sturingsstrategie
- etc.

Bepaalde situaties / gebeurtenissen zullen uit der aard een kleine kans van voorkomen hebben, omdat deze bijvoorbeeld gebaseerd zijn op een onwaarschijnlijke combinatie van variabelen. Niettemin kunnen de gevolgen van het optreden van een dergelijke gebeurtenis aanzienlijk zijn. Het omgekeerde is evenzeer het geval.

De variabele grootheden of stochasten hebben elk een eigen kansverdeling. In de stochastenmethode wordt de kans op een gebeurtenis daarom afgeleid uit de kansverdelingen van de (onafhankelijke) stochasten die gezamenlijk de gebeurtenis vormen.

Het moge duidelijk zijn dat met het hanteren van stochastische kansverdelingen, een groot aantal combinaties gevormd kunnen worden. En hoe verfijnder of uitgebreider het systeem en de belastingen gemodelleerd zijn (meer stochasten), hoe omvangrijker het aantal gebeurtenissen wordt.

Dit is meteen ook een nadeel van deze methode, namelijk dat een groot aantal situaties doorgerekend moet worden. (de berekeningen leiden uiteindelijk tot frequentieverdelingen van systeemgrootheden, bijvoorbeeld van de boezemwaterstand)

Daarnaast is het vaak genoeg een studie op zich om de statistieken van de afzonderlijke stochasten in kaart te brengen en te herleiden tot kansverdelingen; voor zover dat al op een verantwoorde wijze kan geschieden.

Een snellere (maar meer beperkte) methode is dan het selecteren van dié gebeurtenissen uit de lange reeks mogelijke combinaties van grootheden, die naar verwachting maatgevend en plausibel zijn, om daar vervolgens simulaties mee uit te voeren. Dit is de scenario-aanpak, welke in dit onderzoek is gevolgd.

3.2 Sobek®-model van het Friese boezemstelsel

3.2.1 Eén-dimensionale waterstroming

De 1-dimensionale waterstroming in het Sobek®-model wordt berekend door het oplossen van de ‘De Saint-Venant vergelijkingen’; dit zijn de bewegingsvergelijking en de continuïteitsvergelijking. Onderstaand worden deze vergelijkingen in formulevorm weergegeven.

De bewegingsvergelijking:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A_f} \right) + g \cdot A_f \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{g Q |Q|}{C^2 R A_f} - W_f \frac{\tau_{wi}}{\rho_w} = 0$$

Met:

Q	= Debiet [m ³ /s]
t	= Tijd [s]
x	= Plaats [m]
A _f	= Doorstroomprofiel [m ²]
g	= Zwaartekrachtsversnelling [m/s ²]
h	= Waterstand [m] (ten opzichte van het referentieniveau)
C	= Chézy coëfficiënt [m ^{1/2} /s]
R	= Hydraulische straal [m]
W _f	= Breedte van de waterstroming [m]
τ _{wi}	= Windschuifspanning [N/m ²]
ρ _w	= Dichtheid van water [kg/m ³]

De continuïteitsvergelijking:

$$\frac{\partial A_f}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_{lat}$$

Met:

A _f	= Doorstroomprofiel [m ²]
q _{lat}	= Lateraal debiet per eenheid van lengte [m ² /s]
Q	= Debiet [m ³ /s]
t	= Tijd [s]
x	= Plaats [m]

Dit gekoppelde stelsel vergelijkingen heeft twee onbekenden, namelijk de waterstand (h) en het debiet (Q), beide als functie van de plaats x en de tijd t. De overige grootheden in het stelsel zijn op basis van beschikbare gegevens over het boezemnetwerk expliciet gedefinieerd of zijn uit te drukken in de genoemde onbekenden. In combinatie met voldoende begin- en randvoorwaarden kan een oplossing voor het stelsel verkregen worden. In Sobek® worden de stromingsvergelijkingen numeriek opgelost door gebruikmaking van het zogenaamde ‘Delft-scheme’. Het ‘Delft-scheme’ genereert een oplossing voor (h) en (Q) met behulp van een zogenaamd ‘staggered grid’. In een dergelijk ‘grid’ worden de waterstanden (h) gedefinieerd bij de verbindingpunten en bij de rekenpunten, terwijl de debieten (Q) bij de tussenliggende takken worden bepaald.

3.2.2 De elementen van het boezemmodel

De ‘nodes’ (knooppunten)

Het Sobek®-model van de Friese Boezem is afkomstig van Waterschap Friesland. Het model is als netwerk opgebouwd uit knopen (‘nodes’) en takken (‘branches’).

Er zijn negen verschillende ‘nodes’ gedefinieerd in dit model:

1. Pumping Stations (gemalen of inlaatwerken)
2. Orifices (sluizen)
3. Boundaries (randvoorwaarden)
4. Lateral Flows (laterale debieten)
5. Bridges (bruggen)
6. Cross Sections (dwarsprofielen van de waterlopen)
7. Connection Nodes with Storage and Lateral Flow (verbindingpunten waarbij de opslag van water en laterale debieten zijn gecombineerd)
8. Connection Nodes (verbindingpunten)
9. Calculation points (rekenpunten)

In bijlage BG.03 staat het model afgebeeld.

Sturing van de kunstwerken

De meeste kunstwerken in het boezemmodel worden aangestuurd op basis van een in Matlab® geprogrammeerde set beslisregels. De laatste weerspiegelt het sturingsbeleid zoals deze in de praktijk wordt toegepast.

De ‘Pumping Stations’

Er zijn tien ‘pumping stations’ aangebracht in het model:

1. J.L. Hooglandgemaal
2. Inlaat J.L. Hooglandgemaal
3. Inlaat Tacozijl
4. Ir. D.F. Woudagemaal
5. Inlaat Teroelsterkolk
6. Doorvoerduiker Gaarkeuken (Groningen)
7. Gemaal Harlingen
8. “Pomp i.p.v. qlat73”
9. “Pomp i.p.v. qlat87”
10. “Pomp i.p.v. qlat113”

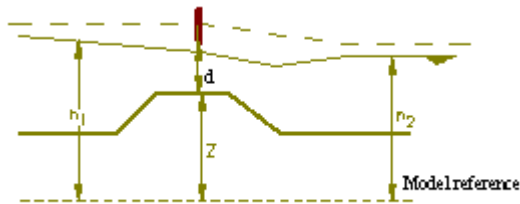
De eerste zes ‘pumping stations’ worden aangestuurd via de Matlab®-sturing. Gemaal Harlingen is nog geen bestaand kunstwerk en wordt dus in de simulaties in eerste instantie nog niet gebruikt. De laatste drie ‘pumping stations’ vervangen elk een lateraal debiet in het netwerk, maar zijn nog niet aanstuurbaar via de Matlab®-sturing. (Op termijn worden alle laterale debieten vervangen door ‘pumping stations’) Het aansturen van het kunstwerk wil zeggen dat elke tijdstap een afvoerdebiet wordt bepaald voor de ‘pumping station’.

De ‘Orifices’

In totaal zijn er vijftien ‘orifices’ geplaatst:

1. Lauwersoog-spuikokers (3 stuks)
2. Friese Sluis bij Zoutkamp
3. Dokkumer Nieuwe Zijlen-spuikokers (3 stuks)
4. Dokkumer Nieuwe Zijlen-schutsluis
5. Tsjerk Hiddessluis-groot
6. Tsjerk Hiddessluis-klein
7. Slachtedijksluizen (5 stuks)

In Sobek® wordt een ‘orifice’ vastgelegd door waarden op te geven voor de drempelhoogte (z) ten opzichte van het referentie-niveau, zie de onderstaande figuur D.02, en voor de drempelbreedte (B). Daarnaast dienen, ten behoeve van de berekening van het afvoerdebiet langs de ‘orifice’, de contractiecoëfficiënt (μ) en de laterale contractiecoëfficiënt (C_w) een waarde te krijgen.



Figuur D.02: Langsdoorsnede ‘Orifice’

Alle orifices worden aangestuurd via Matlab®, hetgeen betekent dat voor elk kunstwerk per tijdstap de openingshoogte (d) wordt bepaald.

De ‘Boundaries’

Van de 1-dimensionale waterstroming nabij een rand van het boezemnetwerk moet óf de waterstand zijn gedefinieerd óf het passerend debiet, vandaar deze ‘boundary nodes’.

Voor een ‘boundary node’ zijn drie typen gedefinieerd: ‘waterlevel (h)’, ‘flow (Q)’ en ‘Q-h-relation’. De eerste twee typen kunnen óf een constante waarde óf een functie van de tijd zijn; in het laatste geval dient de grootte voor de duur van de simulatie en per zelf te kiezen stapgrootte (qua tijd) te worden geformuleerd. Het derde type wordt in dit model niet gebruikt.

In het Sobek®-model bevinden zich 25 boundary nodes. Deze zijn, op basis van het type en de meegegeven waarde, onder te verdelen in vijf groepen:

Groep A (2 stuks):

- Type: waterlevel (h)
- Waarde: functie van de tijd

Deze groep omvat de 'interactie' van de Friese boezem met de Waddenzee: het zijn de randvoorwaarden achter de Lauwersoogspuisluizen en de Tsjerk Hiddessluizen (te Harlingen), oftewel het peilverloop van de Waddenzee (getijde).

Groep B (7 stuks):

- Type: waterlevel (h)
- Waarde: constant = - 0.52 m [above ref. level]

Deze groep heeft het streefpeil van de boezem als constante waarde (ref. level = N.A.P.). Het betreffen de randvoorwaarden achter de gemalen en de inlaatkunstwerken, welke zijn gelegen aan het IJsselmeer. Daarnaast hebben het Gemaal Harlingen en de doorvoerduiker Gaarkeuken (welke als 'pumping station' is gemodelleerd) deze randvoorwaarde.

Groep C (10 stuks):

- Type: flow (Q)
- Waarde: functie van de tijd

Deze groep wordt gekenmerkt door in de tijd variërende lozingen op het Lauwersmeer of de Friese boezem of door doorvoer van Fries boezemwater naar naastgelegen provincies.

Groep D (3 stuks):

- Type: flow (Q)
- Waarde: constant = 0.00 m³/s

Deze randvoorwaarde geeft het einde van een boezemkanaal aan.

Groep E (3 stuks):

- Type: waterlevel (h)
- Waarde: constant = 0.00 m [above ref. level]

Deze randvoorwaarden zijn gedefinieerd achter de 'pumping stations' welke de laterale debieten hebben vervangen (ref. level = N.A.P.).

De 'Lateral Flows'

Met de laterale debieten is de toevoer op de boezem vanuit het gehele afwaterende gebied geschematiseerd. Er zijn daartoe 184 'lateral flow nodes' geplaatst. De laterale debieten (m³/s) hebben een constante waarde of zijn een functie van de tijd; in het laatste geval dient het afvoerdebiet per tijdstap te worden opgegeven. De laterale debieten zijn opgenomen in de continuïteitsvergelijking en vormen de watervolumes die bij de takken of de verbindingpunten het netwerk binnenkomen.

De 'Bridges'

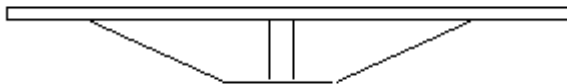
In het Sobek®-model zijn 59 bruggen geïntegreerd. In Sobek® kan gekozen worden uit vier typen bruggen; de zogenaamde 'Pillar bridge', de 'Abutment bridge', de 'Fixed bed bridge' en de 'Soil bed bridge'. De algemene formule voor het debiet langs een brug is de volgende:

$$Q = \mu \cdot A_f \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_1 - h_2)}$$

Met:

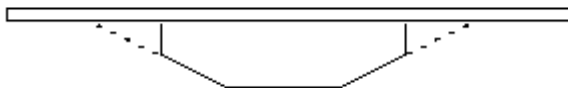
- Q = Debiet [m³/s]
- μ = Verlies-coëfficiënt [-]
- A_f = Doorstroomprofiel [m²]
- g = Zwaartekrachtsversnelling [m/s²]
- h₁ = Waterpeil aan de bovenstroomse zijde [m]
- h₂ = Waterpeil aan de benedenstroomse zijde [m]

De 'Pillar bridge' heeft een of meerdere pijlers die geplaatst zijn in de waterloop, zie de onderstaande figuur D.03. De pijlers beïnvloeden op die manier de stroming langs de brug. Bij dit type brug ligt het rijdek op een dusdanig hoog niveau dat het niet van invloed is op de stroming; het doorstroomprofiel wordt als open beschouwd.



Figuur D.03: De 'Pillar bridge'

De 'Abutment bridge', zie de figuur D.04, heeft een gesloten doorstroomprofiel, omdat het rijdek de stroming langs de brug kan beïnvloeden. Door per niveau (ten opzichte van het referentievlak) een doorstroombreedte op te geven, kan het doorstroomprofiel vorm gegeven worden.



Figuur D.04: De 'Abutment bridge'

De 'Fixed bed bridge', zie figuur D.05, is in principe gelijk aan de 'abutment bridge' met het enige verschil dat het doorstroomprofiel bij deze brug rechthoekig is.



Figuur D.05: De 'Fixed bed bridge'

De 'Soil bed bridge' is gelijk aan de 'Fixed bed bridge'; maar bij deze brug wordt voor de bodemlaag afzonderlijk de wrijving geformuleerd.

De ‘Connection Nodes’

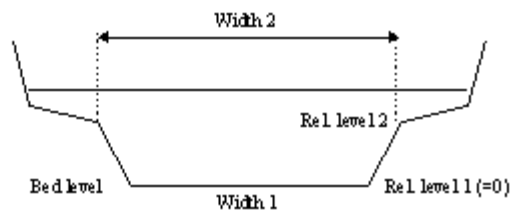
Er zijn 338 verbindingsknopen gedefinieerd in het boezemmodel. Verbindingsknopen zijn locaties waar verschillende takken bij elkaar komen en op elkaar aangesloten worden.

De ‘Calculation Points’

In het model zijn 1837 rekenpunten aangebracht. Een Sobek®-model bestaat uit een netwerk van takken, onderling verbonden door middel van verbindingspunten. In elke tak kan een aantal rekenpunten worden gedefinieerd. Alle rekenpunten tezamen vormen het ‘grid’, welke benodigd is voor het numeriek oplossen van de stromingsvergelijkingen gedurende de simulatie. De oplossing bestaat uit waterstanden gedefinieerd bij de rekenpunten en debieten gedefinieerd bij de taksegmenten.

De ‘Cross Sections’

Voor de schematisering van alle boezemkanalen en –sloten zijn 1017 dwarsprofielen gebruikt. Een kleine steekproef (20 ‘trekkingen’) onder de dwarsprofielen toont aan dat deze zijn gedefinieerd als een ‘symmetrisch getabelleerde dwarsdoorsnede’. Zie de onderstaande figuur D.06.



Figuur D.06: Getabelleerde dwarsdoorsnede voor waterloop

Een dergelijke dwarsdoorsnede wordt opgebouwd door het vastleggen van het ‘bed level’ (d.i. het laagste punt van het dwarsprofiel) en een tabel met relatieve hoogtes en bijbehorende breedtes. De Friese meren zijn ook op deze manier gemodelleerd: zeer brede (orde-grootte: 1000 m) rechthoekige dwarsprofielen.

De ‘Connection Nodes with Storage and Lateral Flow’

Er zijn zeven verbindingsknopen voor wateropslag gecombineerd met laterale stroming. De laterale stroming kan een vaste waarde hebben of een tijdreeks zijn. Voor alle knopen in het boezemmodel is de laterale stroming echter op nul gezet. Om de wateropslag vast te leggen dienen het bodemniveau (ten opzichte van N.A.P.) en de oppervlakte van het opslagreservoir een waarde te krijgen. De oppervlakte kan constant zijn of verlopend met de hoogte.

In bijlage BL.01 is een korte evaluatie opgenomen van (elementen van) het Sobek®-model.

3.3 Beoordeling Friese boezemstelsel op peilen

3.3.1 Inleiding

Globaal is nu bekend hoe het model van de Friese boezem is opgebouwd en op welke wijze het programma Sobek® hiermee simulatieberekeningen uitvoert. Tevens is aangegeven met welke doelstelling voor ogen het boezemmodel aangewend wordt. De volgende stap is te bepalen op welke onderdelen het boezemstelsel beoordeeld gaat worden.

Een simulatieberekening levert informatie op over het functioneren van het boezemstelsel in een, qua belastingen, extreme periode. In beoordelingscriteria is vastgelegd binnen welke marges het boezemsysteem zich mag bewegen, wil niet gesproken worden van een (tijdelijk) falend boezemstelsel. De informatie over het boezemgedrag, het beoordelingsmateriaal, moet dan in een vergelijkende analyse met de beoordelingscriteria uitsluitsel geven over het al dan niet falen van het boezemstelsel gedurende de simulatie.

Eerder is al kort aangegeven dat de beoordeling in dit onderzoek primair betrekking heeft op waterstanden in het boezemnetwerk. De mate waarin de maalbeperving als sturingsmiddel gebruikt wordt, kan ook een grond zijn waarop het boezemstelsel beoordeeld wordt.

Het ter handgestelde boezemmodel is echter nog niet voorzien van de mogelijkheid om tijdens een simulatie een maaltop / -beperving voor (een deel van) de polders in te stellen: over die sturingsregel kan dus in het onderzoek niet beschikt worden; want bovendien is ervan afgezien het instrument van de maalbeperving eigenhandig in het model in te bouwen.

In toekomstige versies van het Sobek®-model zal deze maatregel wel gehanteerd kunnen worden. Daarom wordt hierna niet alleen een beschrijving gegeven van de beoordeling vanuit het oogpunt van de boezempeilen, maar ook (alvast) van de beoordeling op basis van de ingestelde maalbepervingen. Bovendien kan op basis van de simulatieresultaten, een uitspraak gedaan worden over het nut van een (tijdelijke) maalbeperving voor een bepaald poldergebied in de gegeven omstandigheden. Een en ander kan echter (nog) niet met het boezemmodel geverifieerd worden.

3.3.2 Beoordeling Friese boezem

Waterstanden

In deze paragraaf wordt uitgelegd op welke wijze het Friese boezemstelsel op waterstanden wordt beoordeeld. De uit te voeren modelsimulaties brengen namelijk het falen van het huidige boezemstelsel aan het licht brengen, voor zover dit betrekking heeft op boezempeilen en overschrijdingen daarvan.

In het 1-dimensionale stromingsmodel worden de Bewegingsvergelijking en de Continuïteitsvergelijking geëvalueerd per tak van het netwerk. De variabelen die daarbij worden opgelost zijn de waterstanden (h) en de debieten (Q). Een simulatieberekening levert dus voor elk punt in het boezemstelsel het debiet en de waterstand als functie van de tijd op.

Beoordelingscriteria voor het boezemsysteem moeten dus betrekking hebben op waterstanden en/of debieten.

Bij een simulatieprocedure wordt met sturing van de (afvoer-) kunstwerken (in Matlab® geprogrammeerd), binnen de regels van het huidige sturingsbeleid, zo goed als mogelijk een bepaald belastingsscenario ‘doorlopen’. Onder extreme omstandigheden (hevige neerslagbelasting, etc.) is de sturing zodanig dat een maximalisatie van het afvoervolume wordt nagestreefd.

De toevoer en afvoer van boezemwater, met de verhangen die daardoor optreden, kunnen ervoor zorgen dat op bepaalde locaties in het boezemstelsel waterstanden optreden die hoger liggen dan een vooraf vastgesteld maximaal toelaatbaar niveau.

Dit is ten dele het gevolg van het feit dat in de bestaande sturing geen rekening wordt gehouden met deze lokale criteria voor waterstanden: daarop wordt niet direct ‘gestuurd’. Bovendien is het moeilijk om via sturing van afvoerkunstwerken gelegen aan de randen van het boezemstelsel, waterstandsfluctuaties in bijvoorbeeld het centrum van de boezem positief te beïnvloeden.

Om na te gaan of ongeoorloofde peiloverschrijdingen hebben plaatsgevonden dienen de per tijdstap gemeten waterstanden te worden getoetst aan de criteria voor het boezempeil die gelden bij het meetpunt. Deze criteria geven de grenswaarden aan waarbinnen het boezempeil zich lokaal mag bevinden. Op die manier wordt een duidelijk beeld verkregen van de momenten waarop het boezemsysteem faalt en van de locaties waar dat plaatsvindt; waarbij het falen betrekking heeft op het (tijdelijk) niet voldoen aan de lokale vereisten. Naar verwachting zullen verschillende scenario’s voor extreme belastingen en randvoorwaarden onderling verschillende faallocaties (‘knelpunten’) en faalmomenten laten zien.

Een, onder invloed van een extreem belastingsscenario, falend boezemstelsel kan, afhankelijk van de oorzaak en de omvang van het falen, zowel lokaal als globaal gecorrigeerd worden. Als bijvoorbeeld slechts op één bepaalde locatie stelselmatig overschrijdingen plaatsvinden van de maximum peilen, ligt het meer voor de hand, zowel de oorzaak hiervan als de maatregel hiervoor, lokaal te zoeken. Als peiloverschrijdingen meer over de gehele breedte van het systeem plaatsvinden, dienen de voorgestelde maatregelen een invloedsbereik te hebben dat zich eveneens uitstrekt over het gehele systeem. Van belang is vervolgens te weten wat de effectiviteit is van de ‘globale’ en/of lokale ingrepen: worden de gesignaleerde problemen op passende wijze opgelost?

Maalbeperking

De uitweg in het huidige boezembeheer, wanneer de boezem afstevent op een eventueel ‘onhoudbare’ situatie (te hoge boezempeilen), is het instellen van een maalbeperking voor de polders. Dit instrument wordt toegepast als voorlopig ‘laatste noodgreep’ om de boezem toch nog ‘in het gareel te houden’. Wanneer een maalbeperking wordt ingesteld dan betekent het dat in bepaalde gevallen de boezem in haar functioneren tekortschiet. Het is namelijk een feit dat een goed gedoseerde (en tijdig opgeheven!) maalbeperking de polders niet per definitie hoeft te benadelen. Dus de maalbeperking moet kunnen worden toegepast voor zover het geen schade oplevert voor de polders. Treedt echter wel schade / wateroverlast op dan heeft het boezemstelsel gefaald. Dus de boezem kan ook beoordeeld worden door de via de sturing gerealiseerde maalbeperkingen nader te bekijken: zijn het voor de polders aanvaardbare maalbeperkingen geweest of hebben ze overlast / schade veroorzaakt in de polders.

Wanneer het boezemstelsel gedurende extreme periodes frequent gebruik maakt van de maalbeperkingen om boezemtoevoer te beperken, is dat een indicatie dat de middelen die beschikbaar zijn in het boezemsysteem om belastingen op te vangen en te verwerken structureel ontoereikend zijn, ook als de ingestelde maalbeperkingen geen enkele schade opleveren voor de desbetreffende polders: een maalbeperking is een symptoombestrijding.

Het tijdstip waarop een afgekondigde maalbeperking overlast gaat veroorzaken in het poldergebied, is ondermeer afhankelijk van de grootte van de maalbeperking, van de omvang van het polderland en de poldersloten, van de actuele polderpeilen en de grondwaterpeilen, van de duur en de intensiteit van de neerslag en van het verloop van het maaiveld. De toestand van de polder waarvoor een maalbeperking wordt ingesteld moet dus van tevoren bekend zijn, zodat met het tijdig opheffen van deze maatregel wateroverlast voorkomen kan worden.

Een anticiperend maalstopbeleid

In de huidige situatie wordt, bij een overschrijding van een bovengrens door een rekenkundig gemiddeld boezempeil, een maalstop afgekondigd, welke direct geldt voor alle polders tegelijk. Een alternatieve benadering in deze, is het instellen van een meer gedifferentieerder maalstopbeleid dat rekening houdt met de locatie in het boezemstelsel waar wateroverlast optreedt. Dan wordt geen gebruik gemaakt van het rekenkundig gemiddelde boezempeil, maar is een plaatselijk boezempeil een criterium voor het instellen van een maalbeperking op die locatie. Op die manier wordt efficiënter gebruik gemaakt van het instrument maalbeperking, wat de beheersing van het boezemstelsel en de daarop afwaterende systemen in extreme omstandigheden ten goede kan komen (waar het niet nodig is, wordt geen maalbeperking ingesteld).

3.3.3 Beoordelingscriteria

In deze paragraaf worden de criteria genoemd waarop het Friese boezemstelsel beoordeeld zal worden. Een criterium voor de boezemwaterstanden kan betrekking hebben op verschillende zaken. Want zoals is aangegeven in de beschrijving van het boezemstelsel zijn veel functies gebaseerd op een constant gemiddeld boezempeil. Wanneer de actuele boezemwaterstand significant en langdurig afwijkt van dit gemiddelde kunnen die functies in de verdrukking komen. Het kan bijvoorbeeld zo zijn dat de waterstand bij een vaste brug niet hoger mag worden dan Y m boven het normale peil, omdat anders het scheepvaartverkeer niet langer ongehinderd de brug kan passeren.

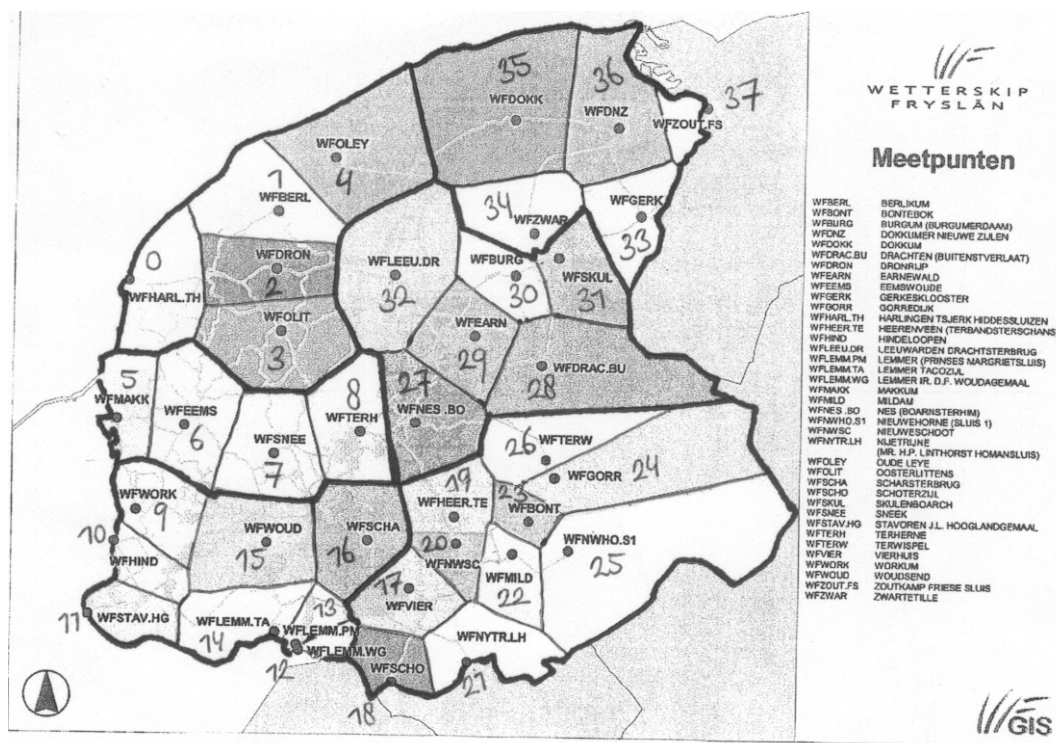
In deze studie van de Friese boezem onder extreme omstandigheden wordt echter alleen gerekend met de eisen die een bepaald veiligheidsniveau vertegenwoordigen.

Wanneer niet wordt voldaan aan een dergelijke eis, als een maximaal toelaatbaar peil wordt overschreden, treedt bijvoorbeeld gevaar op voor overstrooming van het omringende land vanuit het boezemstelsel of is er gevaar voor het bezwijken van de boezemkaden.

Het is overigens aannemelijk te veronderstellen dat bepaalde functie-eisen in een periode van extreme boezembelasting tijdelijk worden genegeerd en dat voornamelijk de veiligheidseisen nog een rol spelen in het gevoerde peilbeheer.

Waterschap Friesland heeft de Friese boezem onderverdeeld in 38 zogenaamde karakteristieke gebieden.

In de onderstaande figuur D.01 zijn deze gebieden aangegeven en genummerd van 0 t/m 37.



Figuur D.01: Karakteristieke gebieden – Nummering

Waterschap Friesland heeft door middel van statistische analyse van een jarenlange reeks van gemeten waterstanden herhalings tijden voor boezempeilen vastgesteld. De meeste boezemkaden worden gedimensioneerd op een maatgevende waterstand met een herhalings tijd van 100 jaar. Vanwege veiligheidsoverwegingen ten aanzien van wateroverlast (bijv. overstrooming van de boezemkaden) worden deze maatgevende waterstanden hier beschouwd als maximaal toelaatbare boezempeilen. In bijlage BD.01 is voor elk karakteristiek gebied dit maximumpeil weergegeven.

Uit de bijlage BD.01 valt op te maken dat de maximumpeilen per karakteristiek gebied behoorlijk kunnen verschillen. Dit heeft te maken met het feit dat in het boezemstelsel onder extreme omstandigheden aanzienlijke peilverschillen kunnen optreden tussen verschillende locaties.

Dit wordt veroorzaakt door ondermeer de inzet van de afvoerkunstwerken (waarmee verhangen op de boezem worden gecreëerd), windeffecten (op- en afwaaiing) en de configuratie van de waterlopen (vorm en grootte van dwarsdoorsneden). In het ZuidOosten bijvoorbeeld stijgen de waterstanden onder invloed van zware neerslagbelasting uit het afwaterende gebied sneller en hoger dan gemiddeld; de maximumpeilen voor de karakteristieke gebieden in het Zuidoosten liggen dan ook hoger dan elders in de provincie. In het algemeen geldt dat onder invloed van bovengenoemde oorzaken de peilfluctuaties aan de randen van het boezemsysteem groter zullen zijn dan voor gebieden meer in het centrum van de boezem.

In het Sobek®-model van de Friese boezem fungeren 38 ‘calculation points’ (rekenpunten) als meetpunten voor de waterstand. Daarmee is elk karakteristiek gebied met één meetpunt vertegenwoordigd. Binnen het model zijn die ‘calculation points’ gekozen als meetpunt, welke gelegen zijn op de plaats waar ook in de werkelijkheid meetpunten voor ondermeer het lokale boezempeil zijn gesitueerd; zie bijlage BD.02 voor de precieze locatie van deze peilpunten.

Gedurende een simulatie wordt per tijdstap de actuele boezemwaterstand bij elk meetpunt geregistreerd. Die waterstanden worden na afloop van de simulatie gebruikt om te onderzoeken of er (tijdelijke) overschrijdingen van de maximaal toelaatbare peilen hebben plaatsgevonden.

3.4 Simulatie-werkwijze

3.4.1 Inleiding

In voorgaande paragrafen is aangegeven dat het Friese boezemstelsel ondermeer beoordeeld kan worden aan de hand van gegevens betreffende waterstanden, welke worden gegenereerd gedurende een simulatie. De beoordeling geschiedt door toetsing van deze systeemgrootheden aan opgestelde criteria.

Laat de toetsing zien dat (een gedeelte van) het boezemstelsel gefaald heeft, dan moeten er maatregelen getroffen worden. Die maatregelen moeten worden ingepast in het systeem (d.i. het boezemnetwerk en de set sturingregels). Daarna moet onderzocht worden of de maatregelen het gewenste effect bereiken. Dit kan bijvoorbeeld geschieden door nogmaals een simulatie uit te voeren onder verder gelijke omstandigheden; zo kunnen in een iteratieve procedure de maatregelen geoptimaliseerd worden. Voor het simuleren met het model dienen de belastingen en de randvoorwaarden geformuleerd te worden. Deze vormen tezamen de extreme belastingsscenario's.

Het bovenstaande laat zien dat om het uiteindelijke doel te bereiken (het formuleren van passende maatregelen voor het boezemstelsel) een aantal kenmerkende fasen / stappen zijn te onderscheiden, die elkaar opvolgen en / of waarin terugkoppeling plaatsvindt. Het is zinvol om, nog voor de aanvang van het simuleren, de hoofdlijnen van het simulatieproces helder voor ogen te hebben.

Daarom wordt in de onderstaande tekst de verschillende fasen beschreven, de relaties daartussen, de keuzemogelijkheden die er zijn, etc. zodat duidelijk wordt op welke wijze wordt toegewerkt naar het bereiken van de doelstelling en welke overwegingen daaraan ten grondslag liggen. Dit 'stappenplan' wordt bij het daadwerkelijk simuleren doorlopen. Overigens is bij de formulering van de doelstelling en de onderzoeksvragen al in hoofdlijnen uiteengezet via welke stappen het doel bereikt moet worden. Onderstaand verhaal is daar een meer concrete uitwerking van.

3.4.2 Het simulatieproces

Binnen het simulatieproces zijn globaal vier elementen te onderscheiden: Het scenario voor de (weers-) omstandigheden (de belastingen en randvoorwaarden), het fysieke systeem (het boezemstelsel met de kunstwerken), de sturingsstrategie voor de kunstwerken en de 'output' (de resultaten van een simulatie, ondermeer: waterstanden en afvoerdebieten).

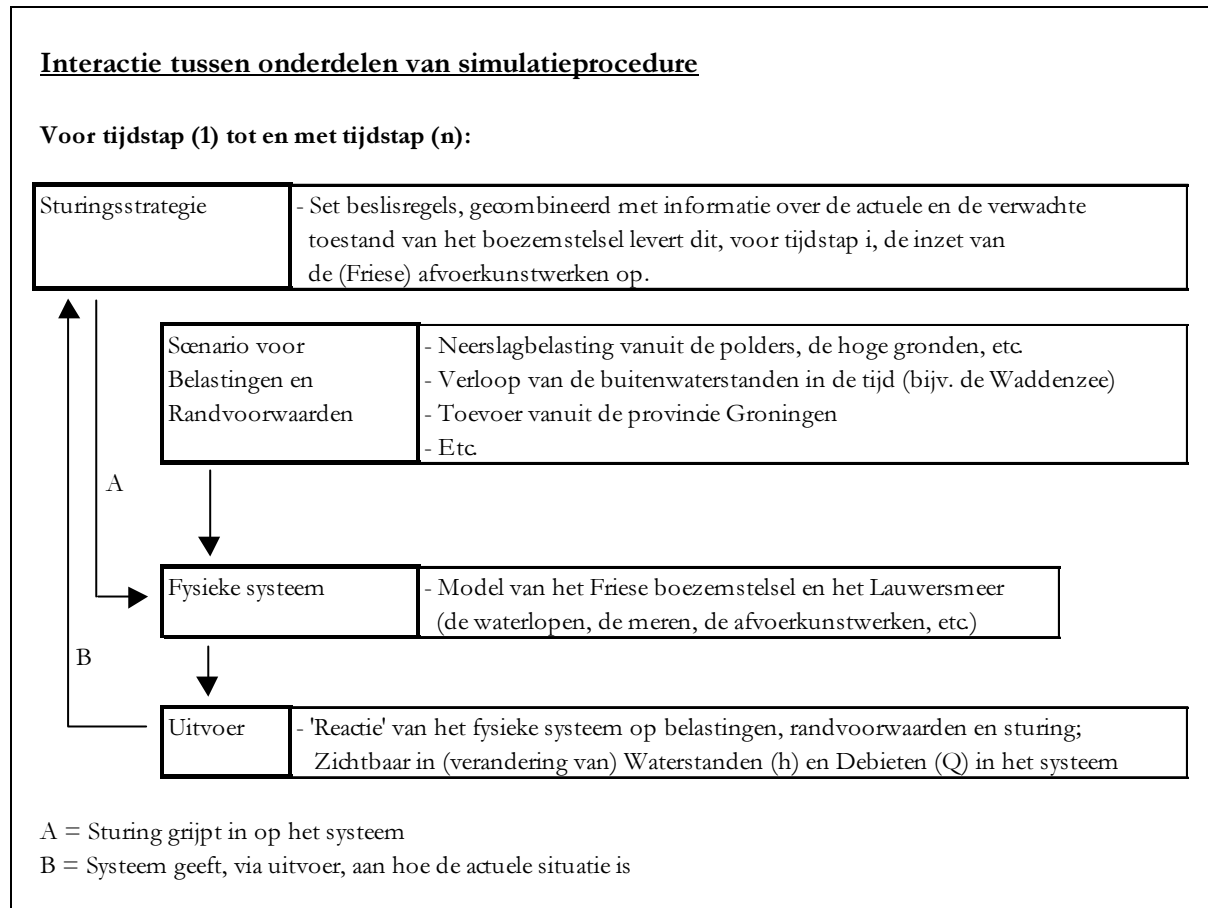
In de onderstaande figuur L.01 staan deze vier elementen met hun onderlinge relaties afgebeeld.

Het scenario

Er wordt een bepaald scenario gedefinieerd, dat de belasting vormt voor het boezemstelsel. Het zijn de omstandigheden waarin het boezemstelsel gedurende een bepaalde tijdsduur (de simulatieperiode) moet functioneren.

Dus een scenario staat voor de 'input' van het model en is een logisch samenstel van grootheden: neerslag, buitenwaterstanden, initiële binnenwaterstanden, etc.

In dit onderzoek worden, vanwege het doel van het onderzoek, telkens min of meer extreme scenario's ontwikkelt, zodat het boezemstelsel bovengemiddeld wordt belast en aldus de grenzen van het incasseringsvermogen van de boezem worden verkend. Daarnaast worden de extreme scenario's geacht omstandigheden te beschrijven die zich op een bepaald tijdstip in de 21^{ste} eeuw voor zullen doen. Dit is een nevenvereiste vanwege het gestelde in de doelstelling.



Figuur L.01: Elementen van het simulatieproces met onderlinge relaties

Een mogelijkheid om een extreem belastingscenario te creëren, welke een toekomstige situatie weerspiegelt, is om historische data van grootheden als uitgangspunt te nemen en deze te corrigeren voor de ontwikkelingen die de grootheden naar verwachting gaan doormaken in de komende tijd.

Door uit het brede bereik van alle mogelijke extreme scenario's die gevallen te selecteren, die tezamen een goede representatie geven van dit bereik, wordt het benodigde aantal scenario's vastgesteld. Het gevolg van deze aanpak zou moeten zijn, dat het boezemstelsel in combinatie met de set van maatregelen die in het onderzoek bepaald wordt, dan in staat moet zijn om een willekeurig gekozen extreem scenario uit het genoemde bereik op een passende wijze 'te verwerken'.

Het fysieke systeem

Het fysieke systeem, het Friese boezemstelsel, het onderwerp van studie, wordt zoals gezegd extreem belast door combinaties van relevante invloedsgrootheden.

Met de koppeling van het fysieke systeem met de nog nader te noemen sturingsstrategie kan de boezem 'real-time' beheerd / gestuurd worden.

Deze verbinding gebeurt via de afvoerkunstwerken van de boezem (gemalen en spuisluizen) en de sluizen van de Slachtedijk (welke laatste een boezemscheiding kunnen bewerkstelligen). Met de 'real-time' sturing kan het boezemstelsel in principe (mits de omstandigheden niet al te ongunstig zijn) op de gewenste wijze 'door het extreme scenario geloodst' worden.

De sturingsstrategie

De sturingsstrategie is in feite een set beslisregels, met behulp waarvan de sturing van elk kunstwerk voor een bepaald moment wordt vastgesteld.

De sturingsstrategie heeft een bepaalde structuur: de aangestuurde inzet van de verschillende afvoerkunstwerken is een functie van een aantal parameters (tijd, plaats, beschikbare capaciteiten, locale boezemwaterstanden, buitenpeilen, etc.), dus afhankelijk van de actuele situatie in het boezemnetwerk.

Daarnaast bepalen ook verwachtingen die men heeft ten aanzien van de ontwikkeling van bepaalde grootheden voor de komende dagen de sturingsstrategie; bijvoorbeeld het voorspelde verloop van het boezempeil of van de buitenwaterstanden.

Met de sturingsstrategie wordt dus geanticipeerd op de gegeven en de verwachte omstandigheden, op een wijze zoals het ook in de werkelijkheid zou gebeuren: de sturingsstrategie (hier: de geprogrammeerde Matlab®-sturing) weerspiegelt het huidige sturingsbeleid van Waterschap Friesland.

De uitvoerresultaten

Tenslotte is er de ‘output’ van een simulatieronde (gedurende de simulatie zijn dus actief: het scenario voor de systeembelasting, het fysieke boezemmodel en de sturingsstrategie met hun onderlinge wisselwerking). De ‘output’ bestaat uit het verloop van waterstanden en afvoerdebieten in de tijd voor respectievelijk de meetpunten en de kunstwerken in het boezemstelsel.

In de paragraaf over de beoordeling van de boezem is aangegeven hoe deze uitvoergegevens worden gehanteerd als beoordelingsmateriaal. Hierna wordt aangegeven wat gedaan kan worden als na de analyse van de uitvoerresultaten blijkt dat het boezemsysteem heeft gefaald gedurende de simulatie.

Een eerste mogelijkheid om de prestaties van het boezemstelsel te verbeteren is om de uitgangspunten waarop de sturing gebaseerd is te wijzigen of de variabele grootheden in de sturing te veranderen. Zo kan bijvoorbeeld de volgorde van inzet van de afvoerkunstwerken gewijzigd worden of er kan een aanpassing gemaakt worden in de bedrijfstoestanden die in de sturing gedefinieerd zijn. Ook de inslag- en uitslagpeilen van de gemalen kunnen (gemotiveerd) veranderd worden: “Ditmaal dient het gemaal het uitmalen te starten bij een binnenpeil dat 50 mm lager ligt dan de aanvankelijk aangehouden waarde”. Etc.

De sturing wordt zodoende preciezer afgestemd op de situatie waarmee het boezemstelsel geconfronteerd wordt. (Het sturingsbeleid met de overwegingen die eraan ten grondslag liggen, is dus mogelijk voor verbetering vatbaar) Op die manier kan, tot op zekere hoogte, het gedrag van het boezemsysteem en daarmee de ‘output’ van een simulatie, beïnvloed worden richting een toestand die wel ‘aanvaardbaar’ is.

Naast het aanpassen van de sturing staan er meer mogelijkheden ter beschikking om het systeem via één of meerdere ingrepen te laten voldoen aan de beoordelingscriteria (welke hier betrekking hebben op boezemwaterstanden). Zo kan een vergroting van de afvoercapaciteit van het boezemsysteem, door op een goed gekozen locatie een gemaal of spuisluis bij te plaatsen, het disfunctioneren van het boezemstelsel onder gegeven extreme omstandigheden voorkomen. Een dergelijke maatregel kan overigens gecombineerd worden met een verbeterde sturing van de bestaande kunstwerken.

Het aanbrengen van maatregelen en het achterhalen van hun effectiviteit ten aanzien van de geconstateerde problemen is hierbij een iteratieve procedure: door het herhaaldelijk uitvoeren van simulaties waarbij telkens de maatregel wat wordt bijgesteld, kan een ‘passende’ oplossing gerealiseerd worden; de voorgestelde maatregelen dienen voorts proportioneel te zijn ten opzichte van de (gunstige) effecten die ermee bereikt worden: het is, in deze, een streven naar hoge rendementen; de combinatie van maatregelen die, voor een gegeven vergroting van de boezemprestatie, het minst ingrijpend is in de realisatie ervan, geniet dan de voorkeur.

Uiteindelijk moet het geoptimaliseerde boezemstelsel in staat zijn om diverse extreme belastingsscenario’s op een passende wijze te ‘doorlopen’; zodanig dat voortdurend wordt voldaan aan alle beoordelingscriteria.

Hoofdstuk 4

Belastingen en randvoorwaarden

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de grootheden die bepalend zijn voor de grootte en de ‘vorm’ van de belastingen en randvoorwaarden van het Friese boezemstelsel. Daarnaast wordt voor een aantal van deze grootheden uiteengezet welke (eventuele) veranderingen zij hebben ondergaan gedurende de 20^{ste} eeuw; dit om een referentiekader te bieden.

Tenslotte wordt voor de grootheden aangegeven welke verwachte ontwikkelingen zij gaan doormaken in de 21^{ste} eeuw. Voor het samenstellen van scenario’s voor de boezembelasting en de randvoorwaarden is dit waardevolle kennis, met name wanneer de wens bestaat een toekomstige toestand na te bootsen (bijv. een extreme situatie in het jaar 2030).

4.2 Overzicht belastingen en randvoorwaarden

Verschillende grootheden hebben (indirecte) invloed op het functioneren van het Friese boezemstelsel. Onderstaand worden deze grootheden genoemd.

1. Zeespiegelstijging (Waddenzee)
2. Temperatuurfluctuaties
3. Stormklimaat
4. Getijdeverloop (Waddenzee)
5. Peil IJsselmeer
6. Doorvoer naar omliggende provincies
7. Neerslag
8. Peil Lauwersmeer
9. Verdamping
10. Bodemdaling

Opmerkingen:

- Temperatuurfluctuaties bepalen mede de omvang van de zeespiegelstijging en van de neerslag.
- Het stormklimaat is van belang vanwege de invloed die (zware) stormen hebben op de boezem- en buitenwaterstanden door de opwaaiing en afwaaiing die zij veroorzaken.
- Het gevoerde peilbeheer op zowel het IJsselmeer als het Lauwersmeer beïnvloedt de lozingsmogelijkheden van de Friese boezem.

De grootheden laten in het Sobek®-model van de Friese boezem hun invloed gelden via de randvoorwaarden en de laterale debieten (d.i. de boezembelasting).

De verschillende scenario’s voor de extreme omstandigheden (qua randvoorwaarden en belastingen) waarin het boezemstelsel zich bevindt, worden dus samengesteld uit bovengenoemde grootheden (hierna genaamd: ‘boezemgrootheden’).

Wanneer een scenario wordt gedefinieerd, dat niet alleen extreem is, maar ook een toekomstige toestand representeert (bijv. de situatie in het jaar 2030), is het van belang na te gaan of de 'boezemgrootheden' aan verandering onderhevig zijn voor de komende jaren: Welke verwachtingen heeft men daarover, bijv. ten aanzien van de ontwikkeling van de (mondiale) temperatuur. Bij het samenstellen van de scenario's moeten de ontwikkelingen / de veranderingen, die de 'boezemgrootheden' in de loop der tijd gaan doormaken worden verdisconteerd, zodat een realistisch scenario wordt verkregen voor de beoogde toekomstige toestand.

4.3 Ontwikkeling boezemgrootheden in de afgelopen eeuw

4.3.1 Inleiding

De 'boezemgrootheden' hebben ook in de afgelopen eeuw een bepaalde karakteristieke ontwikkeling doorgemaakt. Alvorens de verwachtingen te beschrijven, die men heeft ten aanzien van deze grootheden voor de komende eeuw, is het goed om deze verwachtingen in het licht te plaatsen van de ontwikkelingen van de afgelopen eeuw. Op die manier wordt een referentiekader geboden; Er kan nagegaan worden in welke verhouding de voorspellingen staan tot het gebeurde uit het verleden. Daarom volgt nu voor de 'boezemgrootheden' "Temperatuur", "Neerslag", "Zeespiegelstijging" en "Stormklimaat" een beschrijving van de veranderingen die deze hebben doorgemaakt in de 20^{ste} eeuw.

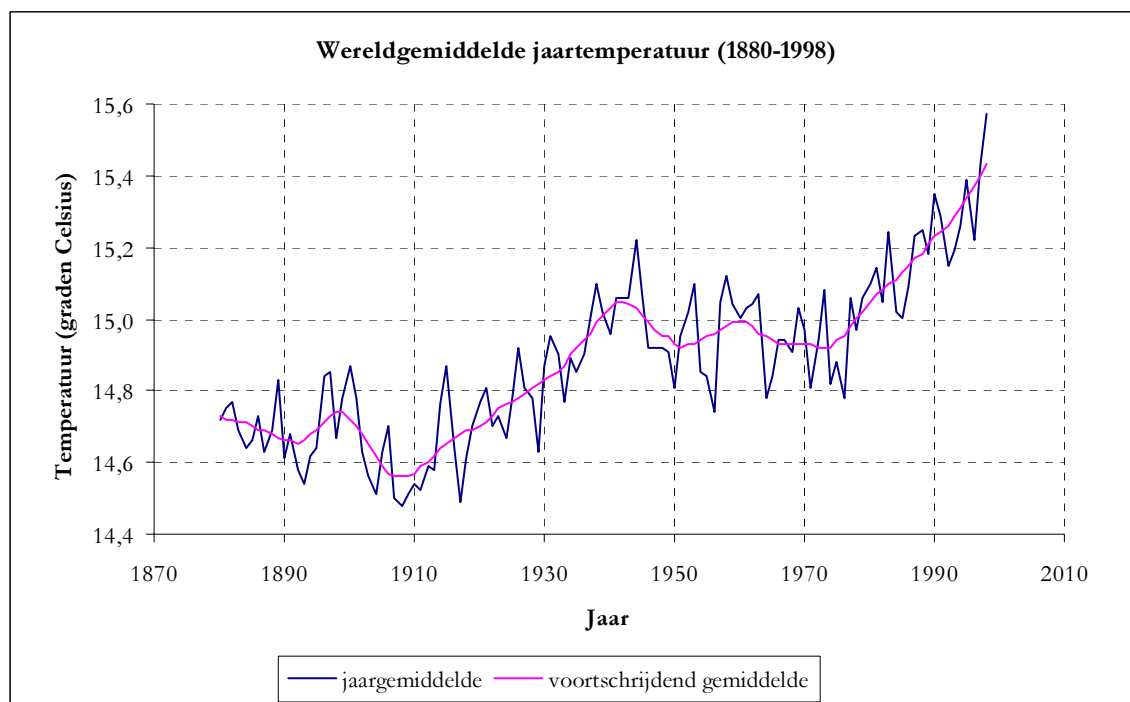
4.3.2 Temperatuur

Op wereldniveau

Mondiaal gezien is de gemiddelde temperatuur in de afgelopen eeuw met 0.6 °C gestegen. Die temperatuur is het gemiddelde van de luchttemperatuur boven het landoppervlak en de temperatuur van het zeewater. De temperatuur boven land vertoonde echter een snellere stijging dan die van het zeewater.

Qua extremen kan opgemerkt worden dat zeer lage temperaturen minder vaak voorkomen, maar dat zeer hoge temperaturen frequenter worden gehaald. Juist die extremen hebben een belangrijk aandeel in de temperatuurstijging op wereldniveau.

Het verloop van de wereldgemiddelde jaartemperatuur in de tijd staat in de onderstaande figuur E.01 afgebeeld. De grafiek van het voortschrijdend gemiddelde laat zien dat de (min of meer) lineaire temperatuurstijging welke wordt ingezet rond het jaar 1910, in het begin van de jaren veertig wordt onderbroken voor een lichte daling en een jarenlange schommeling rond een temperatuur van 14.95 °C, en pas in de loop van de zeventiger jaren weer wordt voortgezet.

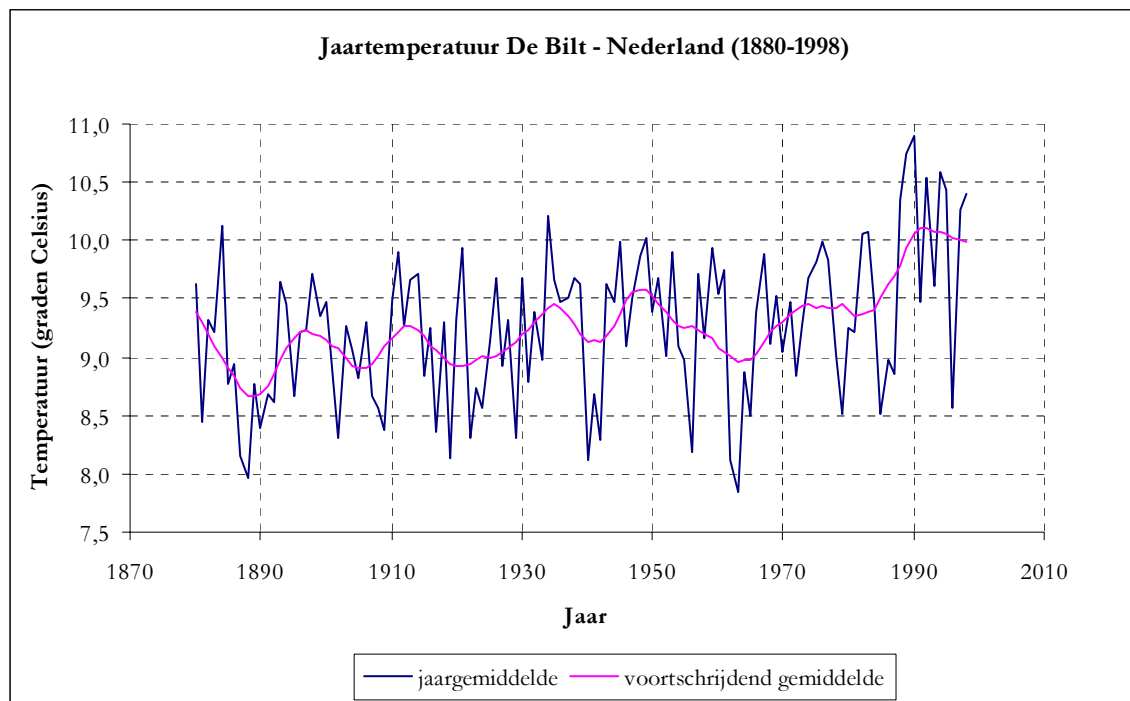


Figuur E.01: Wereldgemiddelde jaartemperatuur (Bron: K.N.M.I.)

Op nationaal niveau

Uit temperatuurmetingen, verricht gedurende de afgelopen 120 jaar op locatie De Bilt (Utrecht), kan worden opgemaakt dat de gemiddelde jaartemperatuur van de laatste 20 jaar 0.7°C hoger ligt dan die van de eerste 20 jaar van de vorige eeuw; zie ook onderstaande figuur E.02, waarin de gemiddelde jaartemperatuur van De Bilt is uitgezet tegen de tijd. In de figuur E.02 is tevens waar te nemen dat vóór het jaar 1980 de grafiek van het voortschrijdend gemiddelde rond een bepaalde constante waarde slingert. Het blijkt dat de 0.7°C temperatuurstijging voor een groot deel het gevolg is van klimaatfluctuaties. Wijzigingen in de meetmethoden en meetomstandigheden door de jaren heen hebben echter ook enige invloed gehad op de gemeten temperatuurontwikkeling.

Deze klimaatfluctuaties vallen in dit geval echter binnen het natuurlijke patroon van die temperatuurschommelingen, die zich uitstrekken over een relatief lange periode en welke gerelateerd zijn aan de variaties in de aanvoerrichtingen van de lucht. In Nederland is de temperatuur namelijk sterk afhankelijk van de heersende windrichting. Daarom is er redelijkerwijs geen verband te ontdekken tussen de eerdergenoemde mondiale temperatuurstijging en de bij De Bilt waargenomen 0.7°C temperatuurstijging.



Figuur E.02: Jaargemiddelde temperatuur De Bilt (Bron: K.N.M.I.)

4.3.3 Neerslag

Vaker extreme neerslag

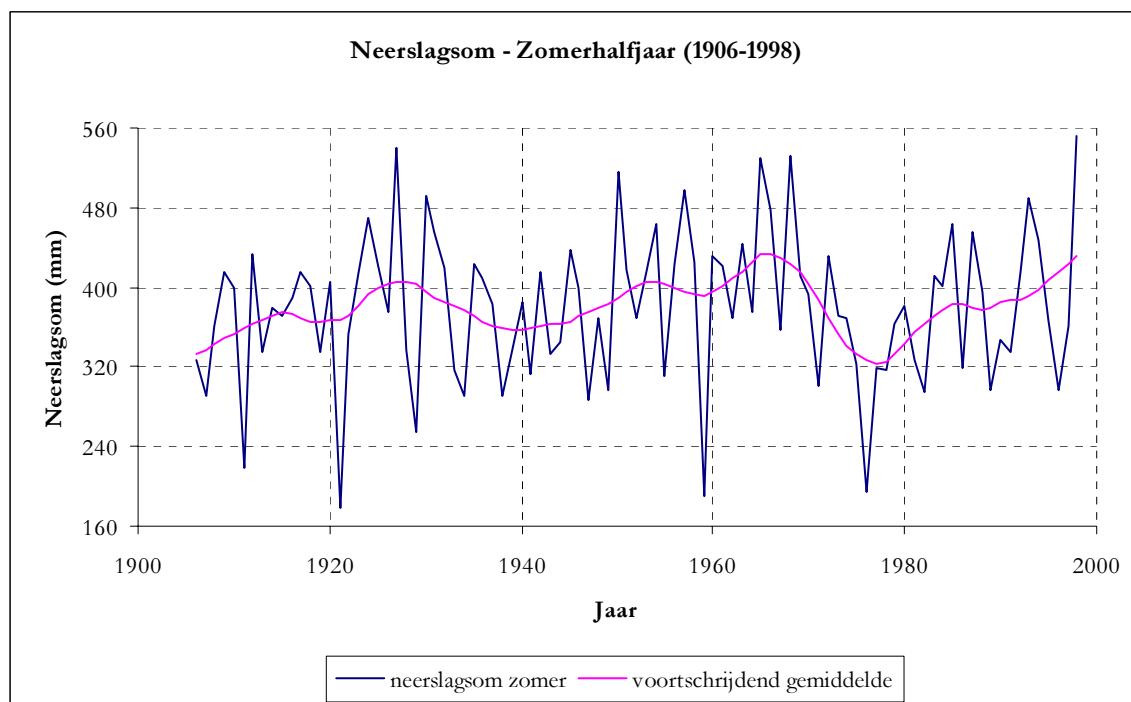
Uit onderzoek (Universiteit van Wisconsin-Milwaukee – V.S.) blijkt dat in de afgelopen eeuw de gemiddelde hoeveelheid neerslag op aarde niet is toegenomen, maar dat de variaties rond dit gemiddelde wel zijn toegenomen. Dit betekent dat de kans op extremen in de neerslag (hevige buien) groter geworden is. In aansluiting hierop laten simulaties met klimaatmodellen zien dat, wanneer het klimaat warmer wordt, om het even of dit wordt veroorzaakt door een versterkt broeikaseffect of dat het onderdeel uitmaakt van een periodieke golfbeweging in de gemiddelde temperatuur op aarde, er vaker extreme regenbuien ontstaan.

Op basis van neerslaggegevens van verschillende meetstations in Nederland wordt geconcludeerd dat de jaarlijkse neerslaghoeveelheden gemiddeld zijn toegenomen met 10%.

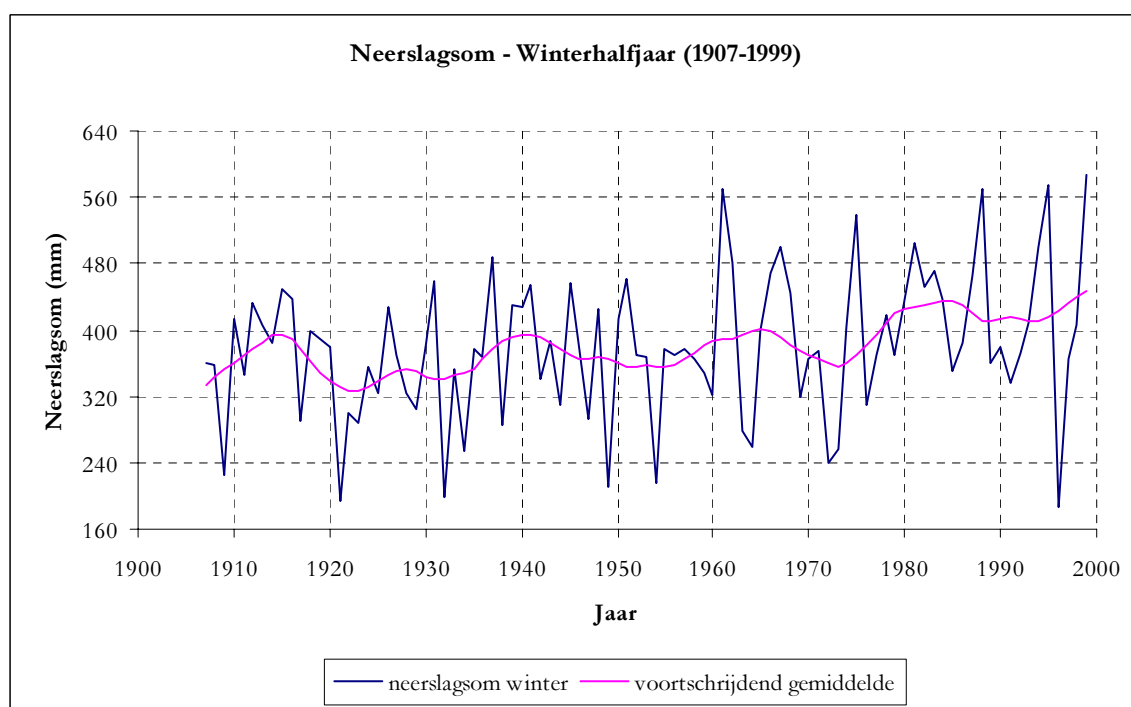
Een dergelijke stijging is deels toe te schrijven aan het frequenter voorkomen van extreme regenbuien (een toename van 2 tot 4 %).

Jaar- en seizoensommen Nederland

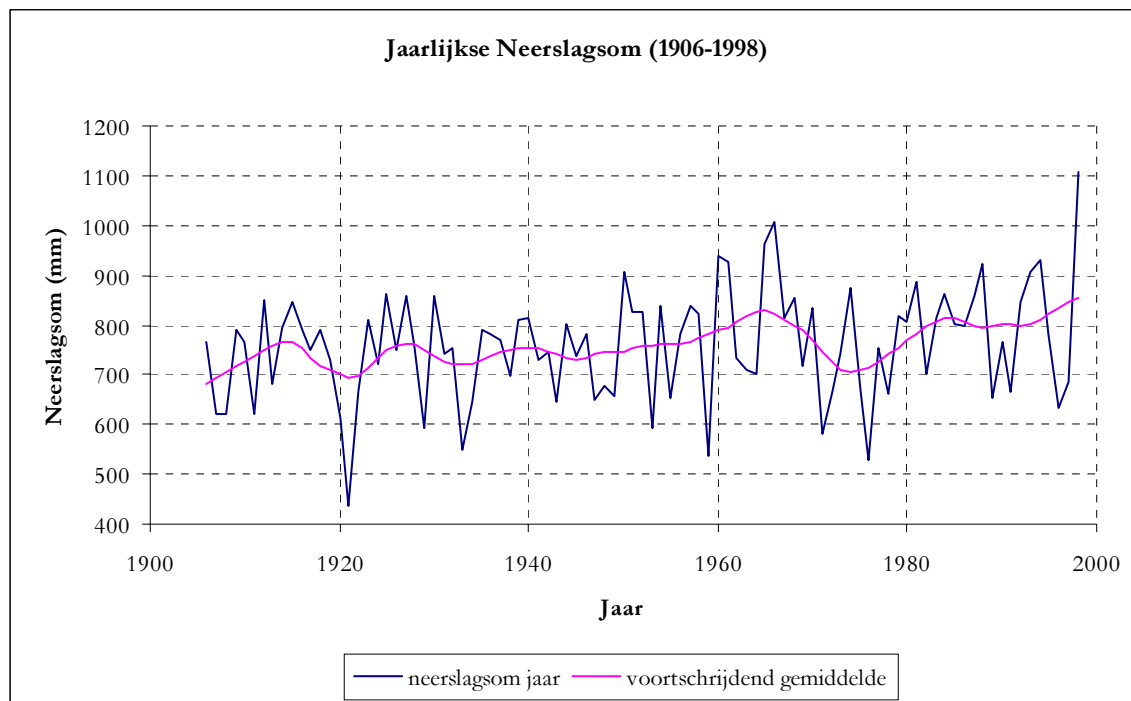
Om een, voor heel Nederland, representatieve weergave van het neerslagverloop in de 20^{ste} eeuw te verkrijgen, zijn de neerslaggegevens van dertien, verspreid over het land liggende, meetstations gebruikt bij de berekening van het landelijk gemiddelde. De reden hiervoor is dat de neerslag qua patroon en omvang van plaats tot plaats sterk kan verschillen. In de onderstaande figuren E.03 tot en met E.05 zijn de landelijk gemiddelde neerslagsommen uitgezet tegen de tijd, voor het zomer- en winterseizoen en voor het gehele jaar.



Figuur E.03: Landelijk gemiddelde neerslagsom – Zomerhalfjaar (Bron: K.N.M.I.)



Figuur E.04: Landelijk gemiddelde neerslagsom – Winterhalfjaar (Bron: K.N.M.I.)



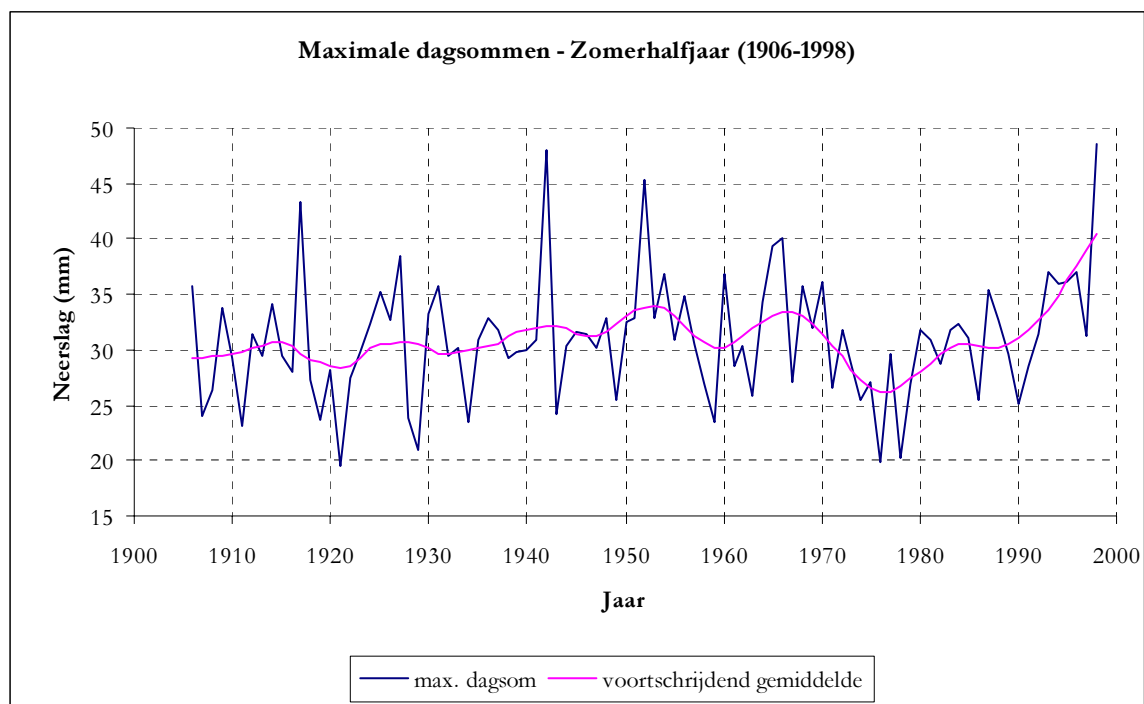
Figuur E.05: Landelijk gemiddelde jaarlijkse neerslagsom (Bron: K.N.M.I.)

Het blijkt dat het zomerhalfjaar en het winterhalfjaar gemiddeld evenveel bijdragen aan de jaarsom. Uit de bovenstaande figuur E.05 valt af te lezen dat de tweede helft van de vorige eeuw meer neerslag heeft voortgebracht dan de eerste helft. Dit verschil in neerslaghoeveelheden is vooral tot stand gekomen in de winterseizoenen. Gegeven het feit dat ‘warme’ winters over het algemeen gekenmerkt worden door veel neerslag, kan de waargenomen temperatuurstijging in het laatste deel van de vorige eeuw, gekoppeld worden aan de neerslagtoename in dezelfde periode.

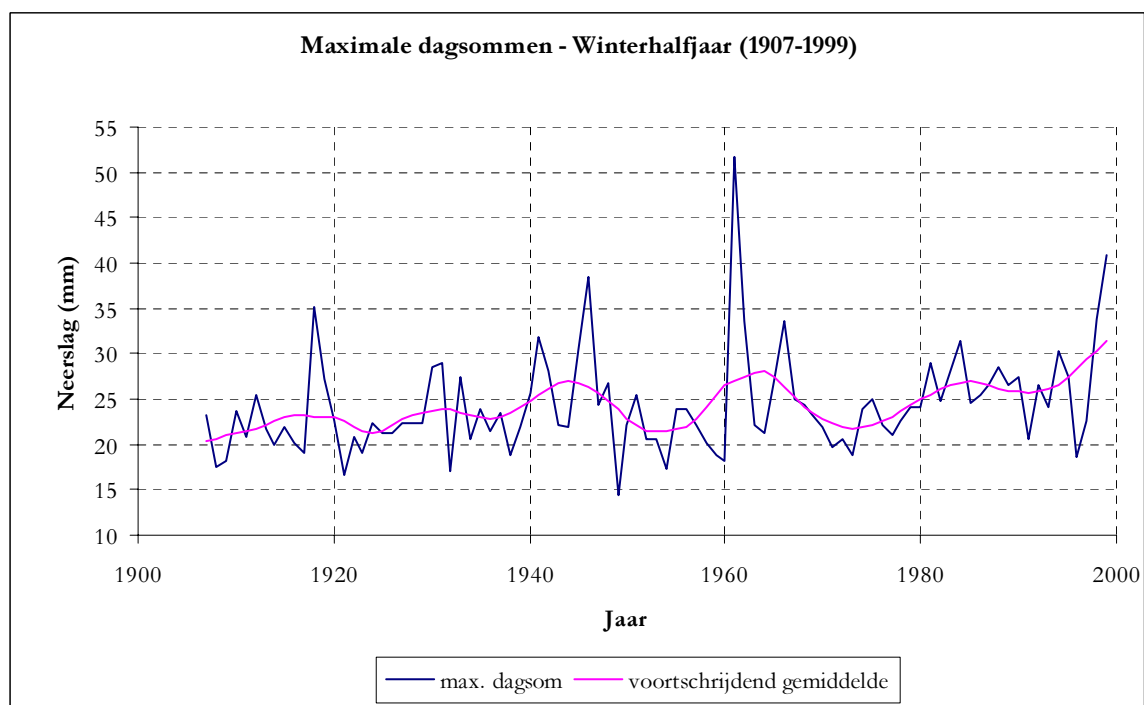
Dagsommen Nederland

Hoge dagsommen van de neerslag zijn een indicatie voor de ‘aanwezigheid’ van (kortdurende) extreme buien of neerslagperiodes gedurende die dag.

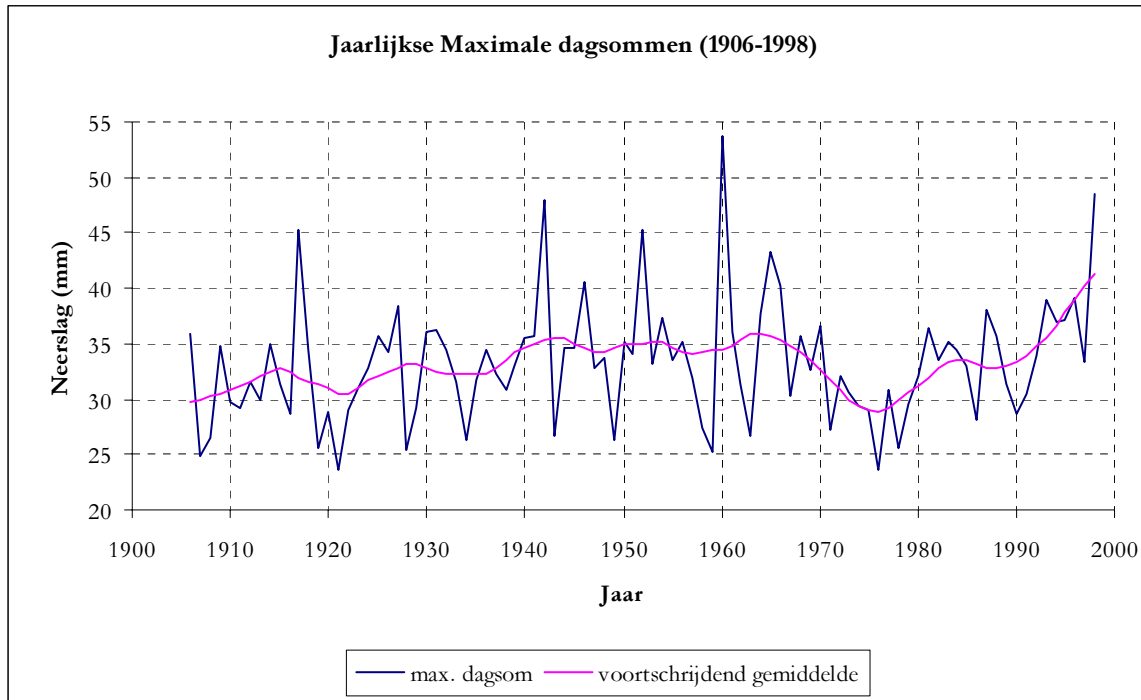
De onderstaande figuren E.06 tot en met E.08 geven het verloop van de maximale dagsom - een gemiddelde over Nederland - voor het zomerseizoen, voor het winterseizoen en voor het hele jaar, gedurende de 20^{ste} eeuw. Uitgezet is dus telkens de hoogste gemiddelde dagsom die waargenomen is in de beschouwde periode (d.i. een half jaar of een heel jaar). Om een representatieve waarde voor heel Nederland te verkrijgen, zijn de waarden voor de maximale dagsommen van dertien meetstations in Nederland onderling gemiddeld. Daarom moet rekening gehouden worden met het feit dat elk individueel meetstation significant hogere of lagere maximale dagsommen heeft geregistreerd dan het landelijk gemiddelde.



Figuur E.06: Maximale dagsommen voor Nederland – Zomerhalfjaar (Bron: K.N.M.I.)



Figuur E.07: Maximale dagsommen voor Nederland – Winterhalfjaar (Bron: K.N.M.I.)



Figuur E.08: Jaarlijkse maximale dagsommen voor Nederland (Bron: K.N.M.I.)

Uit de figuren E.06 tot en met E.08 is op te maken dat de maximale dagsommen van het zomerseizoen hoger liggen dan die van het winterseizoen. (Eerder is echter vastgesteld dat beide seizoenen gemiddeld evenveel bijdragen aan de jaarsom van de neerslag)

Hevige neerslag in betrekkelijk korte tijd (terug te vinden in hoge etmaalsommen) kan zowel in het zomer- als in het winterseizoen wateroverlast veroorzaken. In het winterseizoen werken echter de hoge vochtigheid van de grond en de relatief hoge grondwaterstand (waardoor minder water in de grond geborgen kan worden) nog extra in het nadeel.

De maximale dagsommen van het winterseizoen in de laatste decennia van de afgelopen eeuw, liggen structureel hoger dan die van de eerste decennia; zie het verloop van het voortschrijdend gemiddelde. De vraag is echter of hier sprake is van een doorgaande opwaartse trend. Hetzelfde verhaal gaat in mindere mate op voor het zomerseizoen en voor het hele jaar: voor die periodes worden met name de jaren negentig gekenmerkt door hoge dagsommen, met het jaar 1998 als toppunt: een dagsom van 48.5 mm (als zomerseizoen- én jaarmaximum).

4.3.4 Zeespiegel

Uitzetting van het zeewater door temperatuurstijging wordt gezien als de belangrijkste oorzaak van de mondiale zeespiegelstijging in de afgelopen 100 jaar, deze bedroeg gemiddeld 1 à 2 mm per jaar, dus 10 à 20 cm per eeuw. Daarnaast hebben een afname van het volume aan landijs (gletsjers e.d.) én, in mindere mate, het afsmelten van ijskappen ter hoogte van Groenland een aandeel in de zeespiegelstijging. In Antarctica is de omvang van de ijskappen in de loop der jaren toegenomen, hetgeen de zeespiegelstijging enigszins heeft afgeremd.

Uit onderzoek blijkt dat de waargenomen zeespiegelstijging slechts voor ongeveer de helft is toe te schrijven aan de ontwikkeling van het klimaat in de afgelopen eeuw, dus als gevolg van bovengenoemde oorzaken; de andere helft is nog een naijlend gevolg van de fluctuaties in het klimaat, die zich hebben voorgedaan in voorgaande eeuwen. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat de watermassa's uit der aard met enige vertraging op de klimaatfluctuaties reageren.

Lokaal kan de waargenomen zeespiegelstijging significant afwijken van het mondiale gemiddelde. Verschillen van plaats tot plaats in bodemdaling / -stijging, windsterktes en windrichtingen, zoutgehalte en temperatuur van het zeewater, etc., zorgen voor deze afwijkingen.

Dit gegeven is ook langs de Nederlandse kust al waar te nemen; in de onderstaande tabel TE1 is de relatieve zeespiegelstijging voor een zestal meetstations aan de kust weergegeven. Dit geldt voor de periode [1900 – 1999].

De zeespiegelstijging is relatief, omdat deze wordt bepaald ten opzichte van het N.A.P.- niveau, het nationale referentievlak voor de hoogteligging. Niet alleen is de gemiddelde zeespiegelstand aan variaties onderhevig maar ook het N.A.P.- vlak.

Meetstation	Relatieve Zeespiegelstijging (cm per eeuw)
Vlissingen	20
Hoek van Holland	22
IJmuiden	22
Den Helder	15
Harlingen	11
Delfzijl	18

Tabel TE1: Relatieve zeespiegelstijging voor meetstations Nederlandse kust (Bron: R.I.K.Z.)

4.3.5 Stormklimaat

Onderzoek van het K.N.M.I. toont aan dat gezien over de afgelopen eeuw de frequentie van stormen in de loop van de tijd niet veranderd is. Hetzelfde geldt voor de kracht van de opgetreden stormen: in de windsnelheden zijn geen duidelijke trends waar te nemen.

Het is bovendien een lastige opgave om uit de geregistreerde stormen de invloed van klimaatfluctuaties te onderscheiden. Dat heeft mede te maken met het feit dat stormen zeer onregelmatig optreden. Daarom is het bijvoorbeeld niet goed mogelijk om aan de hand van waargenomen schommelingen in de temperatuur, een uitspraak te doen over variaties in de windkarakteristieken.

4.4 Verwachte ontwikkelingen voor de komende eeuw

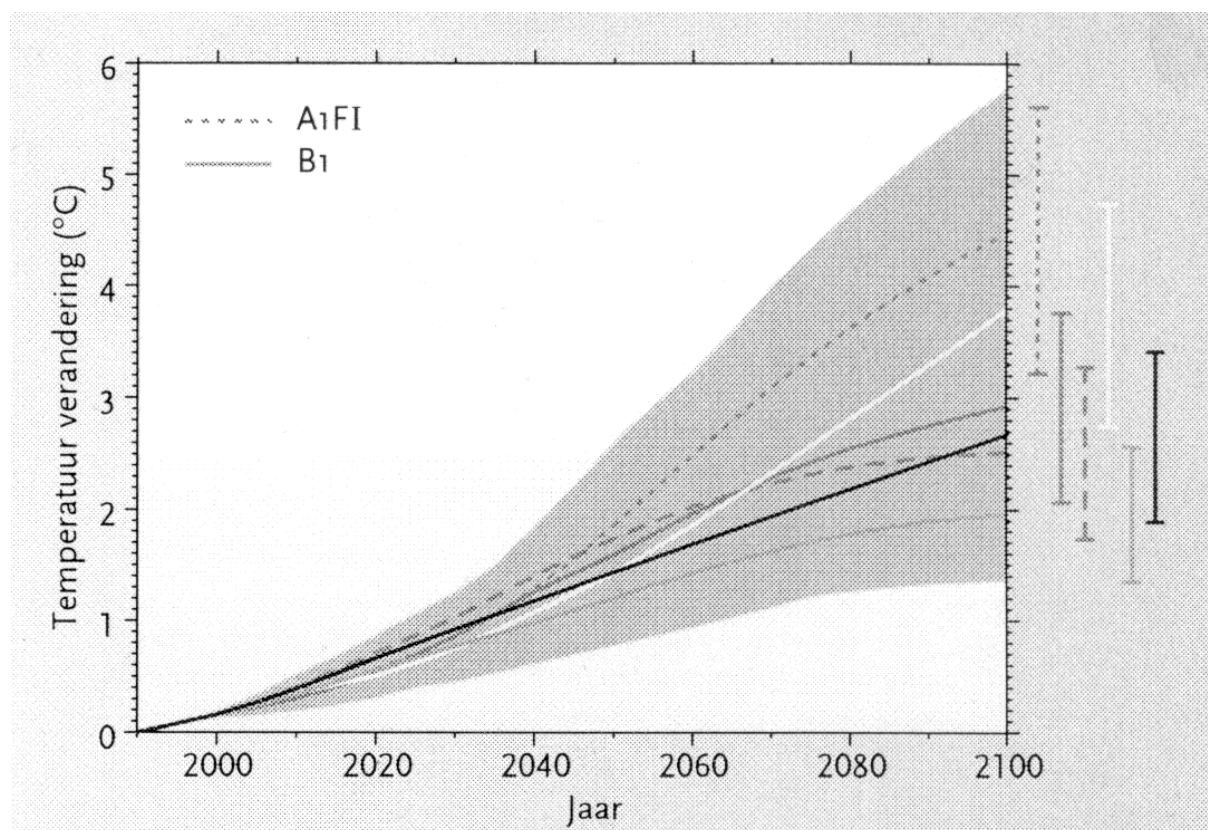
4.4.1 Inleiding

Voor de ‘boezemgrootheden’ die eerder gedefinieerd zijn, moet bepaald worden welke ontwikkeling zij gaan doormaken in de komende eeuw. Hierna wordt daarom een beschrijving gegeven van die ontwikkelingen. Omdat het voor bepaalde ‘boezemgrootheden’ voorspellingen betreft, kan het zijn dat verschillende verwachtingen voor dezelfde grootheid bestaan, geformuleerd door verschillende instanties. Nadat voor elke ‘boezemgrootheid’ een of meerdere verwachtingen besproken zijn, is het daarom zaak voor elke grootheid gemotiveerd een ‘ontwikkelingsverloop’ te kiezen ten behoeve van de samenstelling van de extreme scenario’s.

4.4.2 Temperatuur

Mondiaal niveau

In het derde klimaatrapport van het 'Intergovernmental Panel on Climate Change' (I.P.C.C.) – uitgegeven in het jaar 2001 – wordt de verwachting uitgesproken dat de wereldgemiddelde temperatuur tot aan het jaar 2100 zal stijgen naar een waarde binnen het volgende bereik: 1.4 °C – 5.8 °C. Afhankelijk van het aangehouden emissiescenario voor broeikasgassen in het klimaatmodel wordt een waarde gevonden binnen dit bereik. (Binnen het klimaatmodel speelt het emissiescenario namelijk een belangrijke rol als parameter voor de temperatuurontwikkeling) Welk emissiescenario men hanteert, hangt af van de verwachtingen die men heeft ten aanzien van de ontwikkelingen in de wereldeconomie, in de techniek, in de mondiale houding ten opzichte van milieuvraagstukken, in de aanpak van sociale ongelijkheden, etc., voor de 21^{ste} eeuw. Opgemerkt zij, dat de bovenstaande (relatief grote) spreiding in de temperatuurontwikkeling ook wordt veroorzaakt door de onderlinge verschillen in de klimaatmodellen die worden gebruikt: Eenzelfde emissiescenario toegepast in verschillende klimaatmodellen levert resultaten op die onderling niet of slechts gedeeltelijk overeenstemmen. Zie ook de onderstaande figuur E.09.



Figuur E.09: Voorspelde ontwikkelingen in de mondiale temperatuur

In de figuur E.09 zijn zes grafieken te onderscheiden. Elke grafiek is een verloop van de temperatuurverandering in de tijd, op basis van een gegeven emissiescenario voor broeikasgassen en is een gemiddelde van de uitkomsten van zeven klimaatmodellen. De emissiescenario's, op basis waarvan de zes grafieken zijn gegenereerd, zijn representatief voor het brede scala van mogelijke scenario's. De hoogst gelegen grafiek (A1FI) komt overeen met het scenario met de hoogste emissies van broeikasgassen. De laagst gelegen grafiek (B1) is gedefinieerd volgens het scenario met de laagste emissies.

Aan de rechterzijde van de figuur E.09 staan de foutenbalken per grafiek van de temperatuurstijging. De foutenbalk toont het onderscheid in resultaten (ten aanzien van de temperatuurverandering) tussen de zeven klimaatmodellen bij een gegeven emissiescenario. Het grijze gebied omvat de zes grafieken inclusief de foutenmarges. De grootte van het grijze gebied in het jaar 2100 is het eerdergenoemde bereik voor de temperatuurverandering: 1.4 °C – 5.8 °C. (Bron: I.P.C.C. – 2001)

Europees niveau

Het derde I.P.C.C.-klimaatrapport maakt tevens melding van het feit dat klimaatmodellen uitwijzen dat de ontwikkeling van de gemiddelde temperatuur in Europa min of meer hetzelfde patroon volgt als de temperatuurontwikkeling op wereldniveau, hoewel een wat ongunstiger verloop (d.i. een grotere stijging) wel valt te onderscheiden. De naar verhouding wat sterkere gemiddelde temperatuurstijging betekent voor de Noord-Europese landen dat de wintertemperaturen relatief hoog liggen, terwijl dit voor de Zuid-Europese landen juist geldt voor de zomertemperaturen. Midden-Europa ontwikkelt zich niet aanwijsbaar gunstiger of ongunstiger ten opzichte van de mondiale ontwikkelingen.

Wel zij opgemerkt dat de voorspellingen die men, op basis van de uitkomsten van rekenmodellen, doet ten aanzien van het klimaat op continentaal niveau, een (nog) hogere graad van onzekerheid hebben, dan welke gedaan worden voor de mondiale situatie.

Nationaal niveau

Voor de grootte van de temperatuurstijging tot aan het jaar 2100 voor Nederland houdt het K.N.M.I. vast aan drie mogelijke ontwikkelingen: een stijging van 1°C, een stijging van 2°C en een stijging van 4°C tot 6°C. De veranderingen in de neerslag en in de zeespiegelstijging zijn gerelateerd aan deze temperatuurstijgingen.

De drie aangenomen temperatuurontwikkelingen dienen wel met de nodige reserves te worden gehanteerd. Ze zijn namelijk deels geformuleerd op basis van bepaalde vooronderstellingen, waarvan men niet zeker weet in hoeverre zij betrouwbaar zijn.

Het K.N.M.I. geeft dan ook aan dat waarschijnlijk andere temperatuurverlopen gevonden worden, wanneer alternatieve, maar desondanks verdedigbare, vooronderstellingen als vertrekpunt dienen voor het doen van klimaatvoorspellingen. Toch beschouwt het K.N.M.I. de genoemde temperatuurscenario's als aannemelijke uitgangspunten voor studies die handelen over klimaatfluctuaties en de effecten daarvan.

De verwachtingen die het K.N.M.I. formuleert met betrekking tot de ontwikkeling van het klimaat van Nederland voor de 21^{ste} eeuw, zijn gebaseerd op de onderzoeksresultaten van de eerdergenoemde organisatie 'Intergovernmental Panel on Climate Change', welke o.m. de ontwikkelingen in het klimaat op mondiaal niveau in kaart brengt. De te verwachten klimaatfluctuaties op nationaal niveau worden zodoende afgeleid uit de mondiaal voorspelde klimaatschommelingen.

Omdat voor het maken van een dergelijke vertaalslag van mondiale naar regionale gebieden, die op alle fronten verantwoord en eenduidig is, nog bepaalde kennis en inzichten ontbreekt, kunnen nog geen voorspellingen worden gepresenteerd, die min of meer onweerlegbaar en in hoge mate betrouwbaar zijn; Anderzijds behouden voorspellingen uit der aard natuurlijk altijd enige mate van onzekerheid.

4.4.3 Neerslag

Europa

De verwachting van het I.P.C.C. is dat de neerslag in Noord-Europa zal toenemen met 5 % tot 20 % in het winterseizoen. In de zomerperiode laat de neerslag een toe- of afname zien afhankelijk van het gekozen emissiescenario voor broeikasgassen in de klimaatmodellen.

Het I.P.C.C. gaat er vanuit dat de voorspelde neerslagtoename ook een toename zal inhouden van de frequentie en intensiteit van extreme neerslaggebeurtenissen.

Men moet overigens bij de neerslagvoorspellingen rekening houden met het feit dat ze een relatief grote onzekerheid hebben. Dit is het gevolg van het gebruik van klimaatmodellen die nog onvoldoende nauwkeurig en betrouwbaar zijn voor wat betreft neerslagpredictie en daarnaast van de neerslag op zich die een grote variabiliteit vertoont in ruimte en tijd.

De voorspellingen zijn daarnaast erg afhankelijk van het type klimaatmodel dat is gehanteerd.

Nederland

Het K.N.M.I. verwacht voor Nederland een toename van de jaarlijkse gemiddelde neerslaghoeveelheid met 3%, wanneer de jaarlijkse gemiddelde temperatuur stijgt met 1°C;

Tussen de temperatuurstijging en de neerslaghoeveelheid wordt een min of meer rechtlijnig verband verondersteld. Deze procentuele toename is niet evenredig verdeeld over de seizoenen: de winterperiode zal voor de temperatuurstijging van 1°C, 6% meer neerslag genereren; het zomerseizoen daarentegen slechts 1%.

Volgens het K.N.M.I. neemt de intensiteit (bijv. in mm/uur) van extreme buien in het zomerseizoen toe met 10% voor elke graad Celsius dat de jaarlijks gemiddelde temperatuur stijgt. Onder bepaalde aannamen (met betrekking tot de zg. dauwpuntsdepressie) verandert de frequentie van dergelijke buien niet.

De totale hoeveelheid neerslag in een bepaalde natte periode in het winterseizoen neemt eveneens toe met 10% per graad Celsius temperatuurstijging. Deze procentuele toename is voor de helft het gevolg van een toegenomen intensiteit.

Volgens het I.P.C.C. en het K.N.M.I. bestaat er een verband tussen de actuele temperatuur en de neerslaghoeveelheden die gemeten worden. Feit is namelijk dat warmere lucht meer waterdamp kan bevatten, zodat bij hogere temperaturen de neerslagintensiteit evenredig hoger ligt. Dit laatste laat ook de totale hoeveelheid neerslag toenemen. Het verband tussen temperatuur en neerslag geldt voor zowel kortdurende buien als langdurige natte periodes.

Voor de frequenties van buien en natte periodes wordt aangenomen dat die in de toekomst niet zullen veranderen.

4.4.4 Zeespiegelstijging

Mondiaal

De mondiaal gemiddelde zeespiegelstijging zal zich volgens de inzichten van het I.P.C.C. ontwikkelen naar een waarde binnen het bereik: [+0.09 m tot +0.88 m] aan het einde van de 21^{ste} eeuw.

Het I.P.C.C. heeft een globale schatting gemaakt van welke processen in welke mate een bijdrage leveren aan deze zeespiegelstijging:

- Thermische uitzetting van het zeewater: +75%
- Smelten van landijs (gletsjers e.d.): +35%
- Smelten van ijskappen bij Groenland: +10%
- Toename van volume aan sneeuw en ijs op Antarctica: -20%

(In het tweede klimaatrapport van het I.P.C.C. – uitgegeven in het jaar 1995 – werd overigens nog melding gemaakt van een bereik voor de verwachte zeespiegelstijging van: [+0.13 m tot +0.94 m]. Aangebrachte verbeteringen aan de rekenmodellen in de jaren daarna resulteerden echter in een correctie tot het bovengenoemde bereik)

Net als bij de mondiale temperatuurontwikkeling is ook bij de zeespiegelstijging de keuze van een bepaald emissiescenario voor broeikasgassen en de keuze van een specifiek type klimaatmodel van grote invloed op de wijze waarop het zeespiegelniveau zich in de 21^{ste} eeuw, binnen de aangegeven grenswaarden, zal gaan ontwikkelen.

Vanwege de traagheid waarmee het zeewater reageert op klimaatfluctuaties (d.i. negatieve of positieve expansie door een overeenkomstige temperatuurdaling of –stijging) zal de zeespiegel, ook als de concentraties van broeikasgassen zich zullen stabiliseren op een bepaald niveau, nog jarenlang blijven stijgen.

Een (zeer globale) schatting is bijvoorbeeld dat de zeespiegel als gevolg van temperatuur-uitzetting van het zeewater zal zijn gestegen tot een waarde binnen het bereik [+0.50 m tot +1.50 m] aan het begin van het volgende millennium (het jaar 3000), wanneer het scenario wordt aangehouden dat de broeikasgasconcentraties zich vanaf een bepaald moment stabiliseren op een niveau dat twee keer zo hoog ligt als dat van de tegenwoordige situatie.

Het wisselende proces van smelten en ‘aangroei’ van ijskappen reageert eveneens met enige vertraging op veranderingen in het klimaat. Bij stabiliserende broeikasgasconcentraties zal het mondiale volume aan ijskappen pas in een later stadium een overeenkomstige evenwichtssituatie bereiken, net als dát deel van de zeespiegelstijging dat gerelateerd is aan de smeltende ijskappen.

Europa

De zeespiegelstijging langs de Europese kust zal zich naar verwachting (I.P.C.C.) op dezelfde wijze ontwikkelen als de gemiddelde zeespiegelstijging op het mondiale vlak.

Nederland

Ook wanneer de frequentie en de intensiteit van zware stormen op de Noordzee en Waddenzee in de toekomst niet veranderen, zal er dankzij de substantiële stijging van het zeespiegelniveau, een toename te zien zijn in de frequentie waarmee extreem hoge waterstanden voorkomen langs de Nederlandse kust.

Hoe groot een dergelijke frequentie-toename van hoog water zal zijn met medeneming van de veranderingen in het stormklimaat, is vooralsnog moeilijk in te schatten, omdat men nog niet in staat is de ontwikkelingen in de parameters die de stormen kenmerken (frequentie, intensiteit, e.d.) op een verantwoorde wijze te kwantificeren.

Wanneer het vaste land als referentievlak genomen wordt heeft bodemdaling (d.i. verlaging van het referentievlak), naast de ontwikkelingen in het klimaat (bijv. het smelten van ijskappen, de uitzetting van zeewater onder invloed van temperatuurstijgingen, etc.), ook een aandeel in de zeespiegelstijging. De som van de twee bijdragen levert de relatieve zeespiegelstijging op.

Over de afgelopen twee eeuwen (19^{de} en 20^{ste} eeuw) bedroeg de relatieve zeespiegelstijging voor Nederland ongeveer 20 cm. Daarvan is globaal de helft (10 cm) te verklaren door de uitwerking van klimaatfluctuaties. Van de overige 10 cm zeespiegelstijging was 5 cm het gevolg van de zogenaamde tektonische bodemdaling en de andere 5 cm heeft een onbekende oorzaak (d.i. of gerelateerd aan het zeewaterniveau of aan bodembewegingen).

Als de trend van de afgelopen eeuw dus wordt voortgezet in de komende 100 jaar, dan zal de bodemdaling (of de zeespiegelstijging, afhankelijk van het gekozen referentievlak) rond het jaar 2100 zo'n 10 cm bedragen, ongeacht de klimaatontwikkelingen in die periode.

De omvang van de zeespiegelstijging relateert het K.N.M.I. aan het aangehouden scenario voor de temperatuurstijging. In onderstaande tabel TE2 staan de verwachtingen voor de relatieve zeespiegelstijging tot aan het jaar 2100 vermeld.

Scenario's voor het jaar 2100	
Temperatuurstijging	Relatieve Zeespiegelstijging
+ 1°C	+ 20 cm
+ 2°C	+ 60 cm
+ 4°C tot + 6°C	+ 110 cm

Tabel TE2: Temperatuurscenario's gekoppeld aan relatieve zeespiegelstijging (Bron: K.N.M.I.)

Bovenstaande voorspellingen kunnen overigens niet ieders goedkeuring wegdragen. Onderbouwd met wetenschappelijke onderzoeksresultaten wordt betoogd dat er voorlopig geen reden is om aan te nemen dat de 21^{ste} eeuw gekenmerkt wordt door een versnelde zeespiegelstijging. Zie Lit. [05]. Een vervolg van de trend van de afgelopen twee eeuwen (d.i. een zeespiegelstijging van ca. 20 cm/eeuw) is een realistische en verdedigbare veronderstelling.

4.4.5 Stormklimaat

Het K.N.M.I. gaat ervan uit dat de frequentieverdelingen van windsterktes en windrichtingen -en daarmee van stormen - niet zullen veranderen in de loop van de 21^{ste} eeuw. Dit hangt enerzijds samen met de veronderstelling dat klimatologische circulatiepatronen niet kenmerkend zullen veranderen in de komende tijd en anderzijds met de onmogelijkheid om gefundeerde voorspellingen te doen over eventuele veranderingen hierin.

4.4.6 Getijdeverloop – Waddenzee

De verwachting is dat de amplitude van de getijde-beweging langs de Nederlandse kust zal toenemen, zie Lit. [08]. De hoogwateramplitude - het verschil tussen de evenwichtsstand en het maximum in het sinusvormige waterstandsverloop - zal, evenals de laagwateramplitude, toenemen met 50 mm per eeuw; deze waarde is een gemiddelde over Nederland.

4.4.7 Het peilbeheer van het IJsselmeer

In de huidige situatie worden de volgende peilen aangehouden op het IJsselmeer: in het winterseizoen een streefpeil van N.A.P. -0.40 m en in het zomerseizoen een streefpeil van N.A.P. -0.20 m.

Rijkswaterstaat is in het jaar 1997 een project gestart “Waterhuishouding in het Natte Hart” (WIN), hetgeen handelde over de toekomst van het IJsselmeergebied vanuit het oogpunt van de waterbeheersing. In de conclusies van het projectrapport worden enkele voorstellen gedaan met betrekking tot het peilbeheer. Zo wordt voor de periode tot 2010 voorgesteld de huidige streefpeilen te handhaven. Voor na 2010 is het voorstel om een seizoensgebonden IJsselmeerpeil in te voeren.

Rijkswaterstaat Directie IJsselmeergebied doet op basis van deze uitkomsten nader onderzoek naar een dergelijk seizoensgebonden peil en zal daarbij verschillende varianten evalueren op waterhuishoudkundige en functionele eisen (d.d. augustus 2001).

De Commissie Waterbeheer 21^{ste} eeuw heeft in het jaar 2000 een advies uitgebracht voor het waterbeheer in Nederland voor de komende eeuw. In de rapportage wordt ook het voeren van een flexibel IJsselmeerpeil aanbevolen. Dat zou namelijk voordelen bieden voor wat betreft berging, afvoer en watervoorziening.

Het eindrapport van het WIN-project doet tevens een aanbeveling voor een beleid voor de langere termijn waarbij de IJsselmeerpeilen gelijke tred houden met de gemiddelde waterstand van de Waddenzee. Dat betekent dat vanwege de voorspelde zeespiegelstijging de streefpeilen van het IJsselmeer zullen stijgen.

Het introduceren van een structurele peilverhoging en een meer variabel peilverloop betekent dat opnieuw afstemming moet plaatsvinden tussen het (vernieuwde) peilbeheer en de zaken die daarop gebaseerd zijn.

Zo veroorzaken hogere IJsselmeerpeilen ook hogere waterstanden op de IJssel, hetgeen in combinatie met hoge rivierafvoeren kritieke situaties kan opleveren (qua wateroverlast) voor de steden die aan de IJssel gelegen zijn (bijv. de stad Kampen). Een heroverweging met betrekking tot de bestaande wisselwerking tussen de IJssel en het IJsselmeer is dan wellicht noodzakelijk.

4.4.8 Het peilbeheer van het Lauwersmeer

Het gevoerde peilbeheer op het Lauwersmeer heeft direct invloed op de spuinmogelijkheden van de Friese boezem, omdat de lozing van overtollig boezemwater in het Noordoosten van Friesland verloopt via het Lauwersmeer.

Op dit moment staat echter nog niet vast hoe men het peilbeheer van het Lauwersmeer in de toekomst wil gaan vormgeven.

Verschiedende instanties, waaronder Rijkswaterstaat, de provincies Groningen en Friesland en het Waterschap Noorderzijlvest (Groningen), zijn een onderzoek begonnen om de mogelijkheden, de wensen en de noodzaak van een aangepast peilbeheer te inventariseren.

In Lit. [08] worden, op basis van voorlopige (tussen-) resultaten van genoemde onderzoeken, voor het toekomstig peilbeheer alvast drie mogelijkheden voorgesteld. Ten eerste een handhaving van het huidige streefpeil van N.A.P. -0.93 m. Ten tweede een gemiddeld Lauwersmeerpeil dat wordt toegestaan te variëren binnen het volgende bereik: [N.A.P. -1.20 m tot N.A.P. -0.65 m]. Ten derde een dusdanig verhoogd streefpeil dat lozing vanuit de Friese boezem op het Lauwersmeer permanent onmogelijk is; Waterschap Friesland houdt in haar onderzoeken een dergelijke situatie aan voor het jaar 2100.

4.4.9 Doorvoer naar omliggende provincies

Het is moeilijk te voorspellen op welke wijze de doorvoer van het Friese boezemwater naar de omliggende provincies zich in de toekomst zal gaan ontwikkelen, omdat dit van veel (onzekere) factoren afhankelijk is.

Bevindt de Noordelijke regio zich echter in extreme (weers-) omstandigheden, bijvoorbeeld: hevige neerslag over een langere duur, dan is het reëel aan te nemen dat de watervraag vanuit de nabij Friesland gelegen provincies betrekkelijk gering is, omdat in die gebieden dan eerder wateroverschotten voorkomen - vanwege de zware neerslagbelasting - dan watertekorten.

4.4.10 Verdamping

In het algemeen is verdamping een belangrijke factor in de waterbalans van het Friese boezemgebied (d.i. het stroomgebied Friesland exclusief de afgekoppelde gebieden).

Gemiddeld over een periode van 20 jaar (1970 – 1989) bedraagt het procentuele aandeel van de verdamping in het totale jaarlijkse afvoervolume, 51.9 %.

Het overige deel komt voor rekening van de afvoerkunstwerken (44.4 %) en van de doorvoer naar omliggende provincies (3.7 %). Qua grootte is de jaarsom van de verdamping gemiddeld 58.3 % van de jaarsom van de neerslag.

In dit onderzoek wordt echter gekeken naar het functioneren van het Friese boezemstelsel onder extreme omstandigheden, d.i. een combinatie van bovengemiddelde boezembelasting (als gevolg van hoge neerslagafvoeren uit de afwaterende gebieden) en ongunstige randvoorwaarden (bijvoorbeeld: verhoogde buitenwaterstanden). Voor een dergelijke situatie van o.m. hevige en langdurige neerslag wordt aangenomen dat de verdamping in het gebied dan verhoudingsgewijs van zeer beperkte omvang is. Daarom wordt in dit onderzoek niet met de verdamping gerekend.

4.4.11 Bodemdaling

Volgens Lit. [08] wordt de bodemdaling in de provincie Friesland veroorzaakt door tektonische bewegingen, inklinking en oxidatie van klei en veen, gaswinning en zoutwinning.

De eerstgenoemde component is reeds verdisconteerd in de scenario's voor de relatieve zeespiegelstijging. De overige componenten van de bodemdaling worden in dit onderzoek niet meegenomen.

Hoofdstuk 5

Van neerslag naar boezembelasting

5.1 Welke extreme neerslagperiodes?

In de doelstelling is aangegeven dat (het gedrag van) de Friese boezem wordt beschouwd onder extreme omstandigheden. Dit betekent ondermeer dat een boezembelasting wordt gehanteerd die voortkomt uit de afvoer van grote (maatgevende) neerslagoverschotten vanuit de afwaterende gebieden, welke laatste ontstaan uit hevige en langdurige neerslag in het stroomgebied.

De vraag is dan welke extreme neerslagperiodes gekozen moeten worden om als uitgangspunt te dienen voor het definiëren van een extreme boezembelasting: welke neerslagpatronen moeten worden aangehouden en welke neerslaghoeveelheden.

5.2 Negendagensommen

In dit onderzoek is ervoor gekozen om extreme neerslaggebeurtenissen die zich in het verleden hebben voorgedaan te gebruiken als basis voor de formulering van de belastingen van het Friese boezemstelsel.

Omdat een extreme neerslagperiode gekenmerkt wordt door de omvang van de neerslagvolumina in een tijdsduur van Y dagen, kan een dergelijke periode uit een jarenlange reeks van geregistreerde neerslaghoeveelheden worden geselecteerd door de totale omvang van de neerslag over een gegeven aantal dagen te gebruiken als criterium.

Bij het gebruik van de stochastische methode voor de definitie van belastingen en randvoorwaarden van een watersysteem wordt voor de duur van de stochast neerslag vrij algemeen een periode van negen dagen gehanteerd (Lit. [09]).

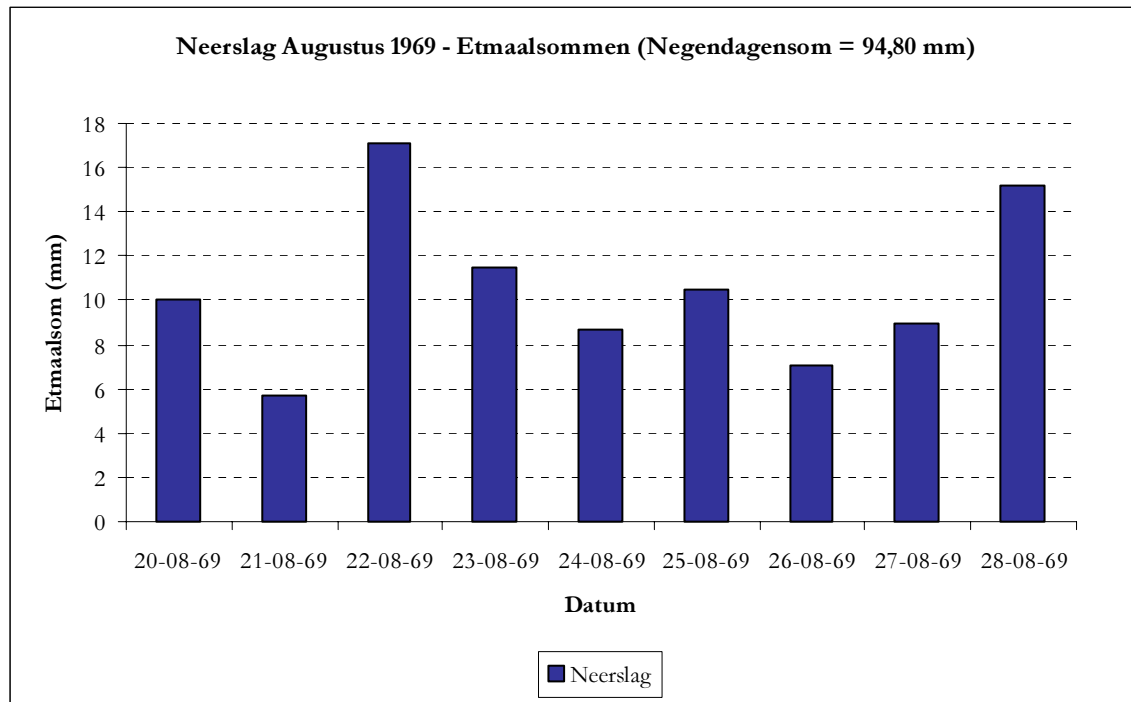
(Door binnen deze neerslagduur combinaties te maken van neerslagpatronen en neerslagvolumina worden diverse neerslaggebeurtenissen gecreëerd (bijv. een periode van langdurige uniforme neerslag of juist een periode waarin hevige (kortdurende) neerslag wordt afgewisseld met momenten van weinig tot geen neerslag). Er bestaan tegenwoordig methoden waarmee negendaagse neerslagpatronen gegenereerd kunnen worden, welke goed overeenkomen met kenmerkende patronen die in de werkelijkheid door het K.N.M.I. zijn waargenomen)

In onderhavig onderzoek wordt de periode van negen dagen gebruikt om direct uit een neerslagreeks van het tijdvak 1957-2000 de neerslaggebeurtenissen te selecteren. Er wordt dus gebruik gemaakt van werkelijk opgetreden combinaties van neerslagpatronen en –volumina.

Van de zes meetstations waarvan bij het K.N.M.I. langjarige neerslaggegevens (ondermeer: etmaalsommen) bekend zijn (Den Helder, De Bilt, Groningen, Twente, Vlissingen, Maastricht) is het meetstation Groningen het dichtst gelegen bij de provincie Friesland. Hoewel een gegeven neerslaggebeurtenis (neerslagpatroon en –volume) niet locatiespecifiek hoeft te zijn (hetgeen betekent dat een extreme bui geregistreerd bij meetstation Twente evengoed ter plaatse van de provincie Friesland had kunnen optreden en dus als uitgangspunt kan dienen voor de bepaling van de boezembelasting) is toch gekozen om de neerslagwaarden van het meest nabij gelegen meetstation te gebruiken, dus: Groningen. De bij dit meetstation geregistreerde etmaalsommen bestrijken een periode van 44 jaar (1957 tot en met 2000).

Om een extreme negendaagse neerslaggebeurtenis uit de meerjarige neerslagreeks te selecteren, zijn negendagensommen berekend. Een negendagensom is een sommatie van de etmaalsommen van de neerslag over een periode van negen dagen.

Bij het bepalen van de negendagensommen wordt telkens een dag opgeschoven: de negendagensom wordt bijvoorbeeld bepaald voor de eerste negen dagen van de maand januari van het jaar 1981. Vervolgens wordt een negendagensom bepaald vanaf de tweede dag van januari 1981. Daarna wordt geteld vanaf de derde dag, etc. Per decennium (bijv. 1981-1990) is het totaal aantal negendagensommen op die manier circa 3560. In de onderstaande figuur F.01 zijn ter illustratie de etmaalsommen weergegeven voor de negen dagen vanaf de datum 20 augustus 1969, de negendagensom hierbij bedraagt: 94.80 mm.



Figuur F.01: Etmaalsommen Augustus 1969

Vervolgens zijn de negendagensommen gerangschikt op grootte. Een grote negendaagse neerslagsom (hoog geklasseerd) duidt op een extreme neerslagperiode. In bijlage BF.01 staat per decennium een tabel met de twaalf grootste negendagensommen. (Voor de periode [1957-1960] de vijf hoogste negendagensommen)

De hoogste negendagensom uit de tabellen bedraagt 105.3 mm en valt in de negen dagen vanaf 25 september 1993. De laagste negendagensom heeft een grootte van 67.4 mm en is opgetreden in de negen dagen vanaf 25 juni 1972. Tussen de verschillende decennia bestaat een behoorlijk verschil in de omvang van de twaalf grootste negendagensommen. Zo is de laagste waarde (plaats 12) uit de periodes [1961-1970] (87 mm) en [1991-2000] (87 mm) nog ruim groter dan de hoogste waarde (plaats 1) uit de periode [1971-1980] (73.5 mm) en ongeveer gelijk aan de hoogste waarde uit de periode [1981-1990] (87.1 mm). Dus de periodes [1961-1970] en [1991-2000] hebben relatief hoge extreme negendagensommen ten opzichte van de andere decennia. Voor de periode [1957-1960] is zowel de hoogste waarde uit de tabel als de laagste waarde groter dan de respectieve waarden van de periodes [1971-1980] en [1981-1990]. De negendagensommen die gebruikt gaan worden voor de simulaties zullen dus voortkomen uit de periodes [1961-1970] en [1991-2000], zodat gewerkt wordt met de hoogste neerslagsommen uit een periode van 44 jaar. Overigens is binnen de top twaalf van genoemde periodes het verschil tussen de hoogste en laagste waarden al ca. 18 mm (resp. 105 mm tegen 87 mm). Naast de omvang van de neerslagsom bepaalt dan het neerslagpatroon welke negendaagse neerslagperiode wordt gehanteerd in een simulatie.

In bijlage BF.02 staan de twaalf hoogste negendagensommen per decennium gesorteerd op datum. Uit de tabellen valt op te maken dat een extreme neerslaggebeurtenis zich vaak uitstrekt over een periode die langer is dan negen dagen.

Zo vertegenwoordigt de negendagensom, die als begindatum 8 september 1970 heeft, een extreme negendaagse periode (105.1 mm). Maar wanneer de etmaalsommen over negen dagen gesommeerd worden vanaf de datum 9 september 1970, levert dat ook een hoge negendagensom op (103.7 mm). Hetzelfde geldt voor de datums 10 september tot en met 13 september 1970. De begindatums 8 september 1970 tot en met 13 september 1970 vertegenwoordigen dus, via de bijbehorende negendagensommen, een periode in die maand, veel langer dan negen dagen, van hevige neerslag.

Hetzelfde gaat op voor de andere gesorteerde datums in de verschillende tabellen. Op die manier kunnen de 53 negendagensommen ($4 \times 12 + 5$) gegroepeerd worden in 18 periodes van extreme neerslag. Voor de tijdvakken [1961-1970] en [1991-2000] zijn in de top-twaalf-tabellen in totaal acht van deze periodes te onderscheiden (Zie bijlage BF.02: resp. de nummers 2 t/m 5 en 15 t/m 18). De periodes vallen in januari (1), juli (1), augustus (1), september (4), oktober (1). Uit deze acht neerslagperiodes kunnen extreme belastingsscenario's voor het boezemsysteem (met een duur van negen dagen) worden ontwikkeld.

De geselecteerde neerslagreeksen gelden in dit onderzoek voor het gehele afwaterende gebied. Dat betekent dat een extreme neerslagperiode op hetzelfde moment in het hele afwaterende gebied op gelijke wijze actief is. Dit is niet geheel conform de werkelijkheid: vaak zal hevige neerslag meer plaatselijk optreden: ruimtelijke variabiliteit van de neerslag; dit zal in ieder geval leiden tot een, naar verhouding, lichtere neerslagbelasting op de boezem. Daarom is het gerechtvaardigd om, uit het oogpunt van maatgevendheid, de conservatieve benadering van uniforme neerslag aan te houden.

5.3 Frequenties van negendaagse neerslagperiodes

Interessant is te weten met welke regelmaat de geselecteerde extreme negendaagse neerslagperiodes zich in de praktijk voordoen. Het K.N.M.I. heeft op basis van neerslaggegevens van de Bilt overschrijdingsfrequenties bepaald van neerslagsommen. Deze frequenties zijn ook toepasbaar voor de provincie Friesland.

De overschrijdingsfrequenties zijn berekend voor neerslagperiodes van twee, vier, zeven en tien dagen. Daarom is voor de negendaagse periode lineair geïnterpoleerd tussen de waarden (neerslagsommen) voor de zevendaagse en de tiendaagse periode. Een steekproef uit de frequentietabel wijst namelijk uit dat, bij een gegeven overschrijdingsfrequentie, de omvang van de neerslagsommen vanaf de tweedaagse tot de tiendaagse periode redelijk lineair toeneemt. In de onderstaande tabel TF1 zijn de negendagensommen met de bijbehorende overschrijdingsfrequenties bij de door het K.N.M.I. berekende neerslagsommen gevoegd.

Neerslagsom (mm) voor een gegeven aantal dagen met frequentie van overschrijding								
Overschrijdingsfrequentie				Dagen				
				2	4	7	9	10
10	x per	1	jaar	20	-	-	-	-
5	x per	1	jaar	28	-	-	-	-
2	x per	1	jaar	35	42	54	61	65
1	x per	1	jaar	41	51	64	73	77
1	x per	2	jaar	48	59	74	84	89
1	x per	5	jaar	56	70	87	98	104
1	x per	10	jaar	63	79	97	110	116
1	x per	20	jaar	69	87	106	120	127
1	x per	50	jaar	78	98	119	135	143
1	x per	100	jaar	85	106	129	146	154
Bron: K.N.M.I.								

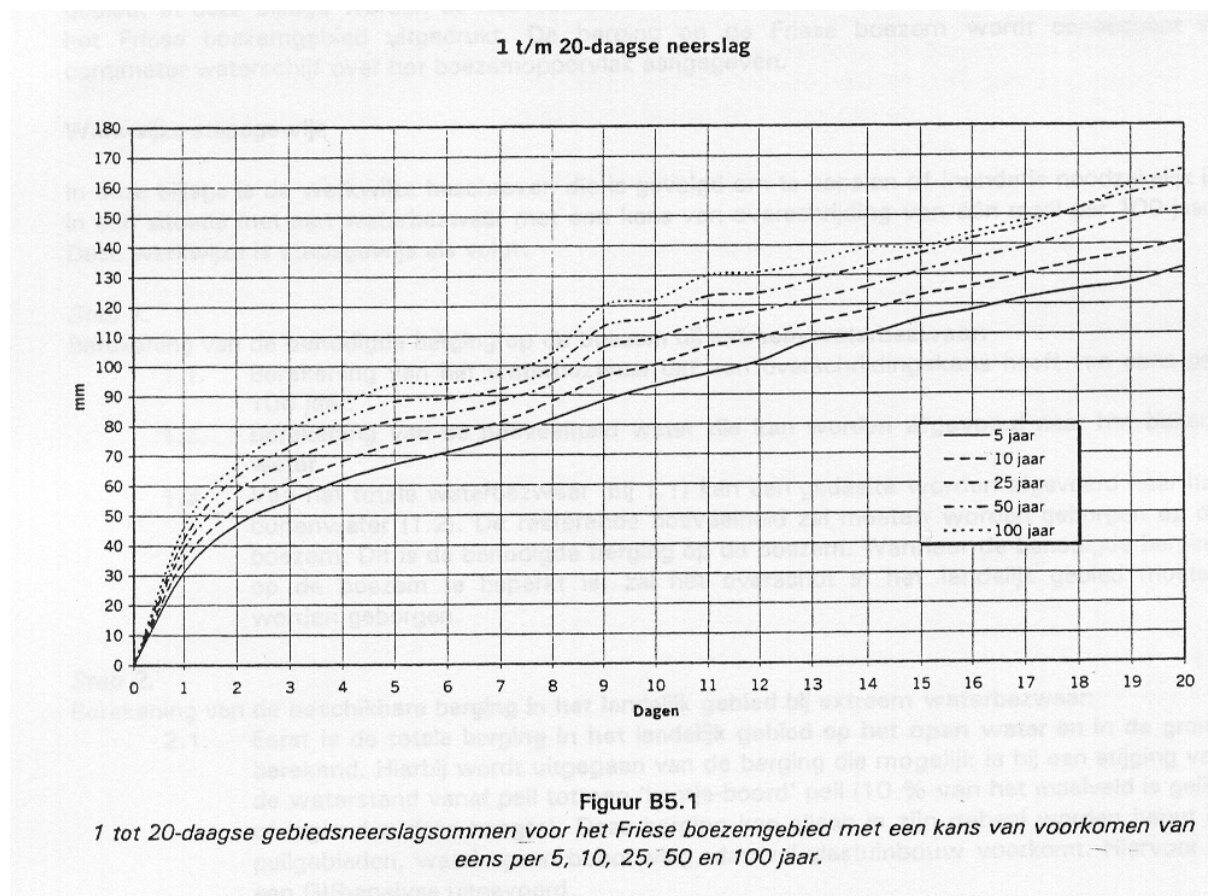
Tabel TF1: Overschrijdingsfrequenties neerslag

Het blijkt dat de hoogste negendagensom (d.i. 105.3 mm, uit het tijdvak [1991-2000]) een overschrijdingsfrequentie heeft die ligt tussen 1 x per 5 jaar en 1 x per 10 jaar.

De laagste negendagensom (d.i. 67.4 mm, uit het tijdvak [1971-1980]) heeft een overschrijdingsfrequentie die ligt tussen 2 x per 1 jaar en 1 x per 1 jaar.

Waterschap Friesland heeft voor de provincie Friesland overschrijdingsfrequenties bepaald van 1- tot 20-daagse neerslagsommen. Daarbij is gebruik gemaakt van neerslaggegevens van zes K.N.M.I.-meetstations in de provincie.

Zie de onderstaande figuur F.02 waarin de overschrijdingsfrequenties voor de x-daagse neerslagsommen zijn aangegeven (d.i. 1 x per 5, 10, 25, 50 en 100 jaar).



Figuur F.02: Neerslagsommen – overschrijdingsfrequenties

Uit de bovenstaande figuur F.02 blijkt dat de hoogste negendagensom (d.i. 105.3 mm) een kans van voorkomen heeft die ligt tussen 1 x per 10 jaar en 1 x per 25 jaar. Een lagere frequentie dus dan berekend is door het K.N.M.I.

Ter vergelijking: een 9-daagse neerslagsom met een overschrijdingsfrequentie van 5 jaar heeft bij Waterschap Friesland een omvang van ca. 88 mm, terwijl bij het KNMI deze een grootte heeft van ca. 98 mm.

Een overschrijdingsfrequentie van 50 jaar geeft bij Waterschap Friesland een negendagensom van 113 mm, en bij het KNMI een negendagensom van 135 mm.

De aanzienlijke verschillen tussen de negendaagse neerslagsommen bij een gegeven kans van voorkomen kunnen – mogelijk – voor een deel verklaard worden uit het onderscheid in de statistische methodes (tussen Waterschap Friesland en het K.N.M.I.) die zijn gehanteerd om tot de overschrijdingsfrequenties te komen. Daarnaast kunnen de verschillen veroorzaakt worden door het gegeven dat de frequenties van het K.N.M.I. gebaseerd zijn op neerslaggegevens van één meetstation, terwijl de frequenties van Waterschap Friesland afgeleid zijn uit neerslagcijfers van zes meetstations. Vanwege de geconstateerde verschillen tussen de overschrijdingsfrequenties moeten deze voornamelijk als indicatief gezien worden.

5.4 Correctie neerslagsommen voor toekomstige ontwikkelingen

Een simulatie heeft betrekking op een bepaald jaar van deze (21ste) eeuw, bijv. het jaar 2030. Daarom kunnen de data van de geselecteerde neerslagperiodes niet zonder meer worden gebruikt. Dit heeft te maken met het feit dat de neerslag in de komende eeuw aan verandering onderhevig is, onder de voorwaarde dat de scenario's voor de temperatuurstijging zich inderdaad zo gaan ontwikkelen zoals sommigen verwachten.

In de neerslagperiodes moet dus die (mogelijk optredende) verandering in de neerslag tot aan het 'simulatiejaar' verwerkt worden. Hiertoe is het jaar 2000 als uitgangspunt gekozen: de ontwikkeling in de neerslag vanaf dit jaar wordt geïntegreerd in de data van de verschillende neerslagperiodes. Een verfijning zou zijn om in de neerslagdata ook de neerslagontwikkeling vanaf het jaar waaruit de neerslagsom gekozen is (bijv. uit het jaar 1969) tot aan het jaar 2000 mee te nemen. Deze verfijning is niet gemaakt.

Voor het winterhalfjaar wordt aangenomen dat voor een natte periode de totale hoeveelheid neerslag toeneemt met 10% per graad Celsius temperatuurstijging.

De extreme neerslagperiodes van negen dagen worden in dit verband beschouwd als 'natte periodes', zodat bovenstaand gegeven daarvoor geldt.

Voor het zomerhalfjaar wordt aangenomen dat de intensiteit van de extreme buien toeneemt met 10% per graad Celsius temperatuurstijging. (toegenomen intensiteit = in dezelfde periode, bijvoorbeeld een bui met een tijdsduur van 25 minuten, valt er meer neerslag (in mm): een toename in de intensiteit laat dus de hoeveelheid neerslag ook toenemen) De buien die voorkomen in de gekozen neerslagperiodes worden als extreem aangemerkt, zodat bovenstaand gegeven daarvoor geldt.

(Voor de zomermaanden kan je niet echt spreken van natte periodes, zoals in de wintermaanden: zij worden daarentegen gekenmerkt door het buiige karakter, daarom druk je de neerslag in de zomer ook eerder uit in intensiteiten en in de winter in totale hoeveelheden) Voorts wordt voor de frequenties van buien en natte periodes aangenomen dat die in de toekomst niet zullen veranderen.

Een en ander brengt met zich mee dat er voor gekozen is de etmaalsommen van de geselecteerde negendaagse neerslagperiodes te verhogen met 10% per graad Celsius temperatuurstijging. Het bovenstaande laat zien dat het niet uitmaakt of deze periodes in de zomer vallen of in de winter: de verhouding tussen de temperatuurstijging en de neerslagtoename is voor beide halfjaren hetzelfde. (Daarbij is tevens aangenomen dat voor de zomerperiode de intensiteitstoename van de afzonderlijke buien zich één op één vertaalt in een neerslagtoename)

5.5 Voortraject en natraject

De negendagensommen zijn bepaald om extreme neerslagperiodes te achterhalen. De simulatietijd dient echter langer dan negen dagen te zijn. Door namelijk een voortraject van een aantal dagen in de simulatietijd op te nemen, wordt de invloed van een (kunstmatige) begintoestand van de boezem weggewerkt, voordat de negendaagse periode van extreme boezembelasting (verkregen uit een hoge negendagensom) aanvangt. Met een ‘kunstmatige’ begintoestand wordt bijvoorbeeld bedoeld: de gehele boezem precies op streefpeil (N.A.P. -0.52 m), dus geen verhangen, geen waterstromingen in het netwerk. Als daarnaast voor het voortraject de dagen worden gekozen die ook in de werkelijkheid aan de extreme negendaagse neerslagperiode voorafgegaan zijn, wordt bij aanvang van de boezembelasting afgeleid uit deze periode, een toestand van het boezemsysteem verkregen die realistisch is.

Een natraject (ná de negendaagse neerslagperiode) is noodzakelijk omdat het voorstelbaar is dat de hevige neerslag van deze periode nog niet geheel verwerkt is in het boezemsysteem na afloop van de negende dag. Dit laatste is zeker het geval wanneer een aantal dagen achtereen meer neerslag valt dan de poldergemalen in dezelfde tijd kunnen uitmalen. Voor dit natraject worden de dagen genomen die ook in werkelijkheid na de neerslagperiode komen. Het is dus goed mogelijk dat deze dagen ook nog neerslag bevatten van relatief grote omvang. Er is voor gekozen om zowel het voortraject als het natraject acht dagen te laten duren: een voldoende lange periode ten behoeve van bovenstaande doeleinden. De geselecteerde neerslagperiodes (reeksen van hoge etmaalsommen) hebben dan een lengte van 25 dagen.

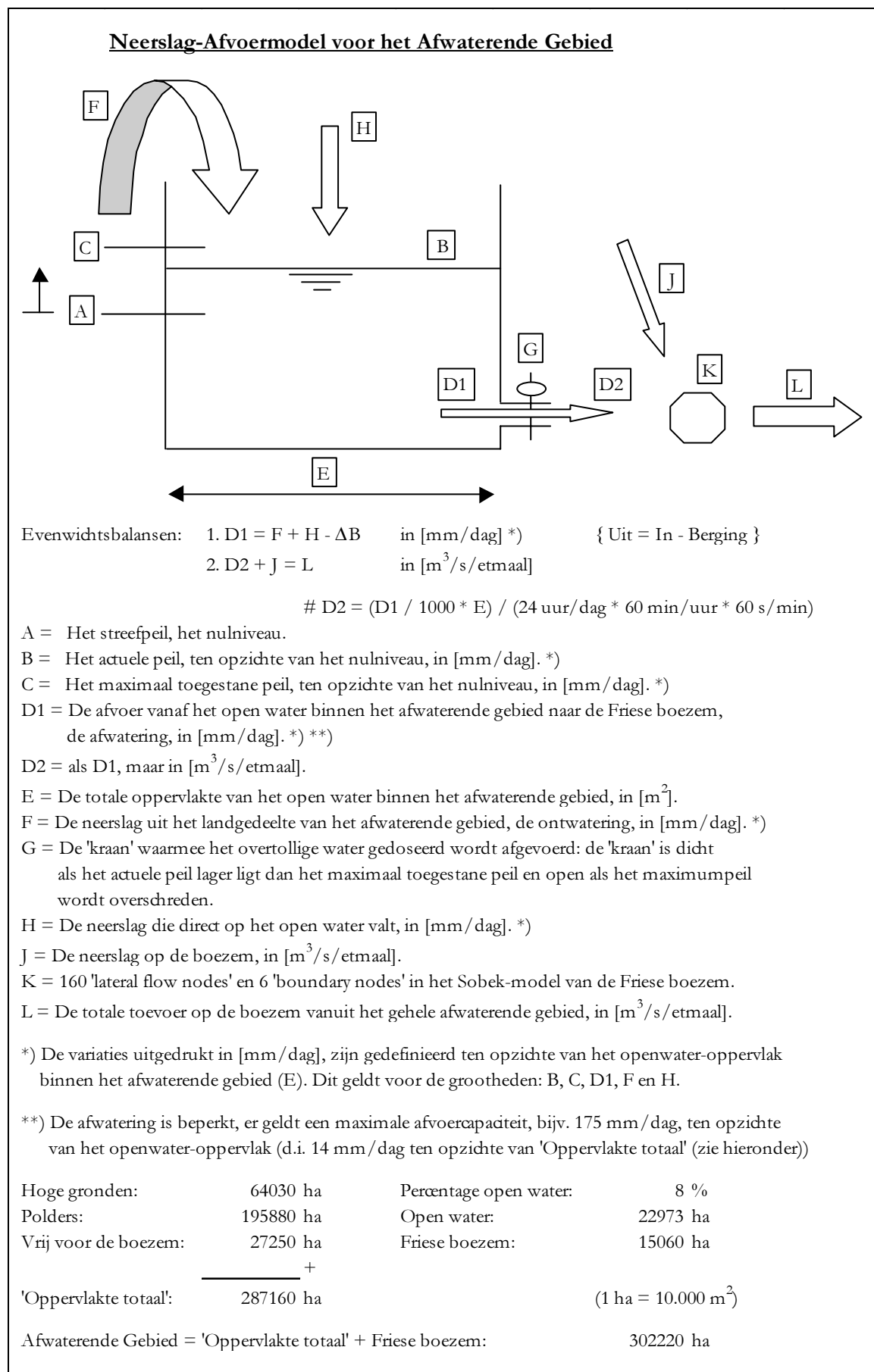
5.6 Neerslag-Afvoermodel voor Afwaterende Gebied

De neerslag die valt in een gebied (bijv. een polder) gedurende een etmaal is, vooral als het extreme buien betreft, qua omvang niet altijd gelijk aan de boezembelasting in dezelfde periode vanuit dat gebied. Dit houdt ondermeer verband met het feit dat de poldergemalen een begrensde capaciteit hebben: of de neerslag nu 24 of 36 mm/etmaal bedraagt, als de maalcapaciteit 12 mm/etmaal bedraagt, maakt dat verschil in neerslag voor de boezembelasting per dag niets uit. De boezem zal, onder de aanname dat alle neerslag wordt weggemalen, in het ene geval gedurende 2 dagen een belasting van 12 mm/etmaal te verwerken krijgen en in het andere geval gedurende 3 dagen. Een dergelijke vertaalslag van de neerslag in het afwaterende gebied naar de belasting op de boezem vanuit dit gebied, is gemaakt met behulp van een neerslag-afvoermodel van het afwaterende gebied.

Het geheel van sloten en kanalen in het afwaterende gebied (het open water) wordt in dit model samengenomen en voorgesteld als één reservoir met één kenmerkend peil.

De aanvoer van water naar het reservoir stelt dan de neerslag voor die valt in het afwaterende gebied en die met ontwatering op de sloten terechtkomt. De afvoer uit het reservoir is de lozing van overtollig water vanuit het open water (van het afwaterende gebied) op de Friese boezem. In het Sobek®-model vindt deze boezemtoevoer plaats via de laterale debieten en via enkele randvoorwaarden.

In de onderstaande figuur F.03 is het neerslag-afvoermodel schematisch weergegeven.



Figuur F.03: Neerslag-Afvoermodel voor het afwaterende gebied

Bij het neerslag-afvoermodel zijn de volgende aannames en overwegingen gemaakt:

1. De in het model gebruikte neerslagreeks bestaat uit etmaalsommen, daarom is de grootte van de tijdstap in het neerslag-afvoermodel één etmaal: er kan dus niet per uur of per dagdeel achterhaald worden wat de afwatering bedraagt: de berekende dagelijkse afvoer is een daggemiddelde (in $\text{m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$).
2. De totale neerslag die op een dag valt wordt direct afgevoerd naar de sloten vanuit het land waarop het valt (ontwatering). Er wordt dus geen water geborgen in en op de grond. Dit houdt verband met het feit dat het in dit onderzoek om extreme neerslagsituaties gaat, waarvoor dan wordt aangenomen dat de grond al (of: algauw) volledig verzadigd is. Dit laatste leidt tevens tot de aanname dat de vertraging tussen het moment van neerslag en het moment van ontwatering van diezelfde neerslag klein genoeg is om daar geen rekening mee te hoeven houden (de grond werkt als een verhard oppervlak). Alle neerslag komt dus instantaan in de sloten terecht.
3. De afvoercapaciteit van het reservoir (het open water) zou een gewogen gemiddelde moeten zijn van de afvoercapaciteiten van de drie typen afwaterende gebieden; De hoge gronden lozen het water onder vrij verval via regelbare stuwen. De vrij voor de boezem liggende gebieden lozen het water onder vrij verval zonder tussenkomst van kunstwerken en de polders lozen het overtollig water met behulp van gemalen.
 De gebiedsoppervlakte als percentage van het totale afwaterende gebied is de volgende: de hoge gronden: 22 %, de polders: 68 % en de vrij voor de boezem liggende gebieden: 10 %. De polders zouden dus voor een groot gedeelte de gewogen gemiddelde afvoercapaciteit bepalen.
 Van de polders is bekend dat de huidige maalcapaciteit ca. 12 mm/dag bedraagt (dus een totale dagelijkse neerslaghoeveelheid van 12 mm kan binnen één etmaal worden uitgemalen).
 Aangenomen wordt dat de hoge gronden met haar kunstwerken ook in staat zijn om met minstens deze capaciteit overtollig water te lozen op de boezem. De afvoer van de vrij voor de boezem liggende gebieden is tot op zekere hoogte onbegrensd qua omvang (mm/dag). Maar vanwege de bovengenoemde oppervlakte-verdeling wordt de maalcapaciteit van de polders als uitgangspunt genomen voor de afvoercapaciteit van het reservoir.
 Daarnaast is de verwachting voor de komende decennia dat de maalcapaciteiten steeds aangepast zullen worden aan de actuele omstandigheden: wanneer als gevolg van klimaatfluctuaties extreme neerslagsituaties zich gaan voordoen met een grotere hevigheid (verhoogde neerslagintensiteit), zal daar op geanticipeerd worden door de maalcapaciteiten proportioneel te vergroten; op die wijze wordt de toename van de kans op wateroverlast in de polders als gevolg van de verhevigde neerslag beperkt gehouden.
 De afvoercapaciteit van het reservoir in het neerslag-afvoermodel is dus afhankelijk van de aangehouden schatting voor de klimaatontwikkelingen (ondermeer wat betreft temperatuur en neerslag) en tevens van het beschouwde richtjaar, waarvoor de simulatie met het Sobek®-model representatief moet zijn, bijvoorbeeld het jaar 2030.
 Concreet is voor het neerslag-afvoermodel de aanname gemaakt dat de afvoercapaciteit met hetzelfde percentage toeneemt als de neerslaghoeveelheden van de geselecteerde neerslagreeks.
4. Initieel staat het peil in de sloten (het open water) op streefpeil (het nulniveau). In het model is daarnaast een maximaal toelaatbaar peil gedefinieerd, hoger gelegen dan het streefpeil. Elke verhoging van het open-water-peil boven dit maximumpeil wordt per dag volledig of gedeeltelijk weggewerkt door lozing op de Friese boezem. Volledige verwerking van de peilverhoging wil zeggen dat het open-water-peil weer uitkomt op het streefpeil. Gedeeltelijke verwerking vindt plaats, wanneer de opgebouwde peilverhoging (boven het nulniveau) groter is dan de afvoercapaciteit van de poldergemalen; het open-waterpeil blijft dan, na uitmalen, hoger gelegen dan het streefpeil en dat is meteen de (ongunstige) uitgangspositie voor de volgende dag.
 Het verschil tussen het streefpeil en het maximumpeil is open-waterberging; in dit model is voor deze berging 100 mm aangehouden.

Stijgt het peil op een bepaalde dag niet boven het maximumpeil uit, dan wordt dus niet ingegrepen door nivellering van deze peilstijging via uitmaling: de ‘100 mm – berging’ wordt benut. Deze marge van 100 mm is een vrij willekeurig gekozen waarde, maar is ervoor bedoeld om te voorkomen dat direct afvoer uit het reservoir (het open water) plaatsvindt bij elke minimale peilverhoging. In plaats daarvan wordt eerst een bepaald wateroverschot opgebouwd, alvorens dat overtollige water geloosd wordt. De aanname is dus dat de poldergemalen pas worden ingezet, bij een bepaalde gerealiseerde peilstijging op het open water, boven het reguliere streefpeil.

Het doel van de afwatering is kortom de handhaving van het streefpeil, door peilverhogingen groter dan een vastgestelde toelaatbare marge (d.i. 100 mm) zo volledig mogelijk (afhankelijk van de maalcapaciteit) te nivelleren.

5. Na de laatste dag van de extreme negendaagse neerslagperiode (welke wordt voorafgegaan door een periode van acht dagen, het voortraject), wordt in het model altijd overtollig water geloosd, ongeacht of het open-waterpeil hoger of lager ligt dan het maximumpeil. Op die manier wordt voorkomen dat een kleine resthoeveelheid van de neerslag van de negendaagse periode in het reservoir achterblijft en niet tijdig geloosd wordt (het is namelijk de bedoeling alle neerslag van deze negen dagen en van de acht dagen daarvoor, zo snel mogelijk te lozen). Dit langdurig overblijven van een resthoeveelheid kan bijvoorbeeld voorkomen als in de periode na de extreme negen dagen geen of weinig neerslag meer valt, zodat het maximumpeil, via welke het uitmalen geïnitieerd wordt, niet meer bereikt wordt.
6. Aan de hand van kentallen voor afwaterende (polder-) systemen is het percentage aan oppervlaktewater in het Friese afwaterende gebied vastgesteld op 8 %. Dit is exclusief het boezemwater, dus het betreft alleen het open water in de polders, op de hoge gronden en in de vrij voor de boezem liggende gebieden.
7. Er is voor gekozen de directe neerslag op de boezem, welke daar een instantane peilverhoging veroorzaakt, in het Sobek®-model op het boezemwater te brengen (na omrekening in debieten) via de ‘Lateral Flow nodes’.
Bij de in het neerslag-afvoermodel berekende gedoseerde (vanwege de maximale afvoercapaciteit van het reservoir) toevoer op de boezem, welke het gevolg is van (hevige) neerslag in het afwaterende gebied, wordt daarom de neerslag op het boezemwater opgeteld.

5.7 Neerslag-Afvoermodel: Methode

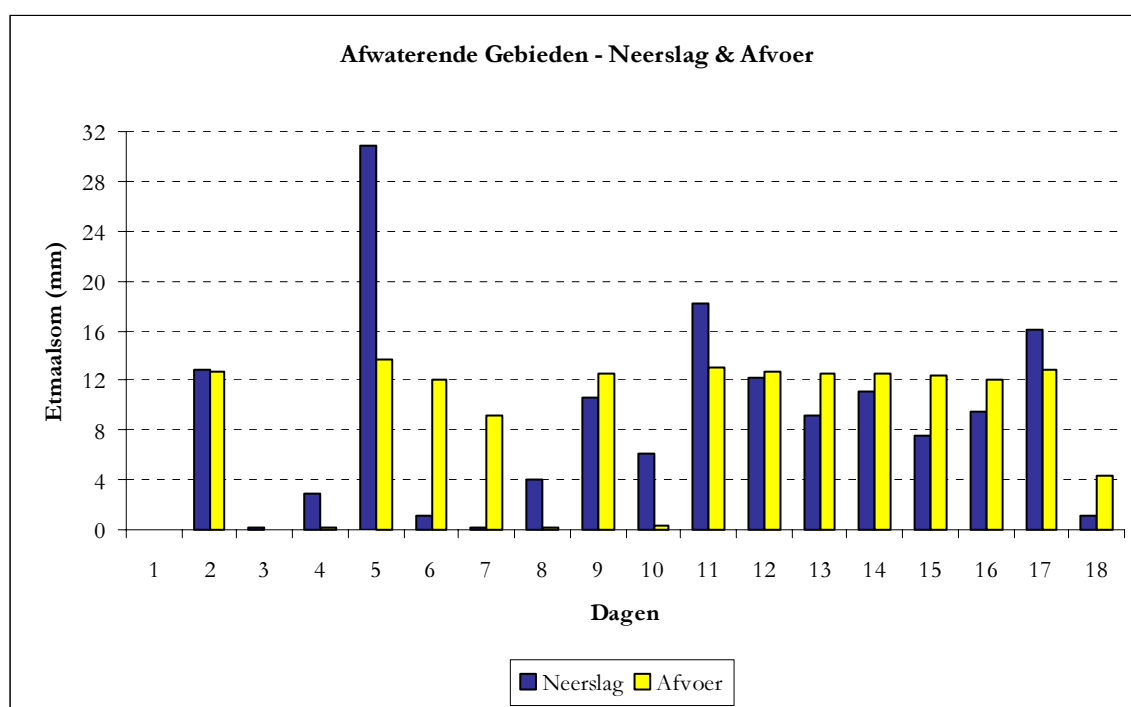
Zoals hierboven beschreven is, wordt een extreme negendaagse neerslagperiode uitgebreid naar een reeks van 25 dagen. Die reeks van etmaalsommen dient als invoer in het bovenstaande neerslag-afvoermodel. Daaraan voorafgaand moeten deze neerslagdata aangepast worden aan de, bij de aangehouden temperatuurontwikkeling, behorende verwachte veranderingen in de neerslag. De uitvoer bestaat uit de totale dagelijkse toevoer op de Friese boezem.

In het neerslag-afvoermodel wordt bijgehouden wanneer de neerslag, gevallen in de extreme negendaagse periode het afvoerpunt van het reservoir gepasseerd is. Dat moment is afhankelijk van de omvang van de neerslag in die negen dagen en van het patroon ervan.

Als bijvoorbeeld, naar verhouding, de meeste neerslag valt aan het begin van de negendaagse periode, dan heeft het reservoir de negen dagen van hevige neerslag (bijvoorbeeld) in de eerste dag ná die negen dagen al helemaal verwerkt (d.i. de negendaagse neerslagbelasting volledig geloosd op de boezem); terwijl het volledig afvoeren van een op de laatste dag van de negendaagse periode optredende extreme neerslagpiek (bijvoorbeeld) nog de volle drie dagen daarna in beslag kan nemen. In het laatste geval bestaat het totaal afgevoerde volume overigens niet alleen uit de neerslagpiek maar ook uit de neerslag die in de drie dagen nog valt in het afwaterende gebied.

Is de extreme negendaagse neerslagperiode het reservoir gepasseerd, dan wordt het neerslag-afvoermodel niet verder doorlopen. Alle toevoer op het boezemsysteem die daarna nog zou plaatsvinden heeft namelijk betrekking op het eerdergenoemde natraject, terwijl het richtpunt in dit onderzoek de voorliggende negen dagen zijn: hoe reageert het boezemstelsel op een dergelijke langdurige extreme neerslagbelasting? De gegenereerde toevoer op de boezem (met de eenheid $\text{m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$) is zodoende een reeks van hooguit 25 dagen.

In de onderstaande figuur F.04 is ter illustratie een neerslagreeks (etmaalsommen) uitgezet tegen de tijd, samen met de overeenkomstige afvoer naar de Friese boezem (afwatering), welke laatste is berekend met het neerslag-afvoermodel. Zowel de neerslag als de afvoer heeft de eenheid [mm] per dag en heeft betrekking op het gehele afwaterende gebied, welke een oppervlakte heeft van 302.220 ha; dit is inclusief het boezemwater. De neerslagreeks is gebaseerd op neerslaggegevens van de maand augustus uit het jaar 1969; deze oorspronkelijke waarden zijn gecorrigeerd, op de wijze zoals in de paragraaf over de correctie van neerslagsommen voor toekomstige ontwikkelingen is beschreven, voor een temperatuurontwikkeling tot het richtjaar 2030 volgens de middenschatting (d.i. een stijging van 0.6°C).



Figuur F.04: De afwaterende gebieden – neerslag en afvoer

Uit de bovenstaande grafieken van de neerslag en de boezemtoevoer komt duidelijk naar voren dat het begrensde afvoervermogen van het afwaterende gebied ervoor zorgdraagt dat pieken in de neerslag worden afgevlakt in de toevoer op de boezem: deze laatste heeft een in verhouding veel gelijkmatiger verloop.

Hoofdstuk 6

Belastingscenario BasisSimulatie

6.1 Inleiding

In deze paragraaf wordt een extreem belastingscenario voor het Friese boezemsysteem gedefinieerd, “BasisSimulatie” genaamd. Hierna worden de belangrijkste belastingen en randvoorwaarden beschreven; in bijlage BG.01 wordt een nadere uitleg gegeven van de totstandkoming van deze grootheden, daarnaast komen de resterende elementen van het belastingscenario aan bod.

6.2 Temperatuurontwikkeling

Uitgangspunt in dit belastingscenario is dat gewerkt wordt met de middenschatting voor de temperatuurstijging (zie het hoofdstuk over de belastingen en randvoorwaarden). De middenschatting geeft voor het jaar 2100 (en gerekend vanaf het jaar 2000) een temperatuurstijging van 2°C. Daarnaast wordt voor het jaar waarvoor het belastingscenario representatief is, het jaar 2030 aangehouden. Dit betekent dat gerekend wordt met een temperatuurstijging van 0.6°C (lineair geïnterpoleerd).

6.3 Toevoer naar het boezemstelsel

Uit de eerdergenoemde acht extreme neerslagperiodes (welke vallen in de tijdvakken [1961-1970] en [1991-2000]) is voor de formulering van dit belastingscenario de neerslagperiode uit de maand augustus van het jaar 1969 gekozen.

(De periodes onderscheiden zich door verschillen in neerslagpatronen en neerslagintensiteiten. De keuze voor de periode van augustus 1969 is vrij willekeurig: in principe zouden alle acht periodes een keer aan bod moeten komen)

Uit deze maand dient de neerslag van de negen dagen vanaf de datum 20 augustus 1969 dan als basis voor de bepaling van de boezembelasting. Deze negen dagen geven een negendagensom van 94.8 mm.

Deze negendaagse neerslagreeks wordt zoals eerder aangegeven aangevuld met een voortraject van acht dagen en een natraject van acht dagen, totaal 25 dagen.

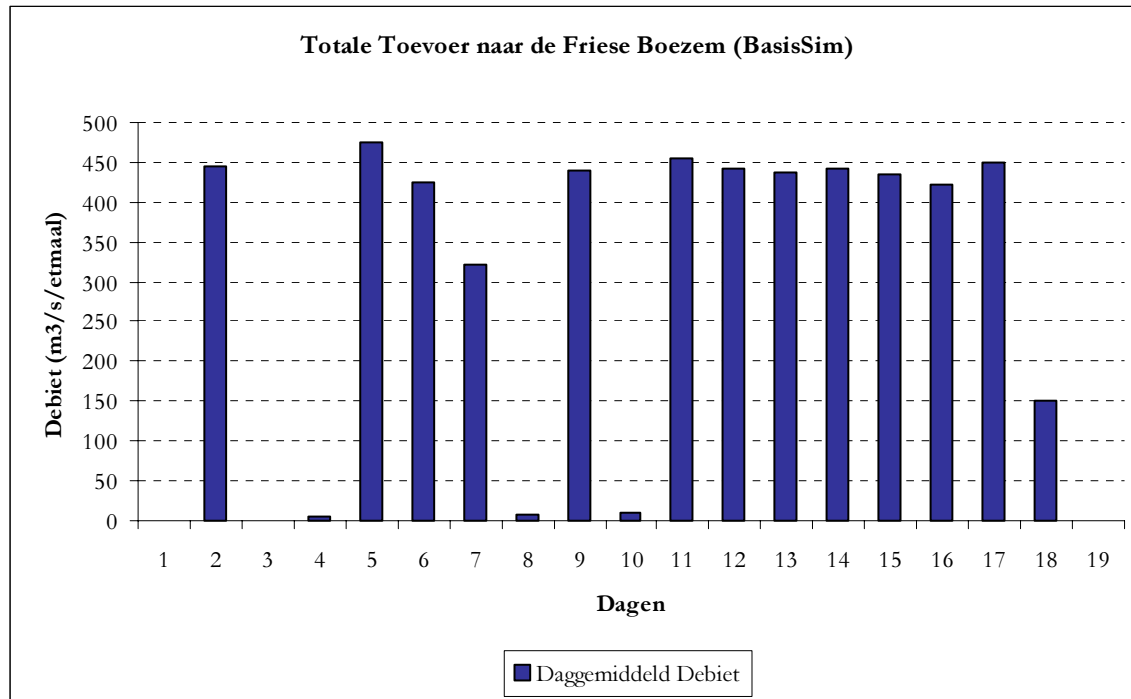
Eerder is genoemd dat de neerslaghoeveelheden worden verhoogd met 10 % per graad Celsius temperatuurstijging. Daarom worden de waarden (etmaalsommen) van de, nu 25-daagse, neerslagreeks verhoogd met 6 %, overeenkomstig de aangehouden temperatuurstijging van 0.6°C. Op die wijze wordt een extreme neerslagreeks voor het jaar 2030 gecreëerd.

Met het bovenbeschreven neerslag-afvoermodel voor de afwaterende gebieden wordt deze neerslagreeks vervolgens omgezet in een toevoer op de Friese boezem. Dit levert een boezembelasting op met een duur van 18 dagen. Dit betekent dat alle neerslag van de negen dagen van de extreme negendagensom én de acht dagen van het voortraject na 18 dagen uit het reservoir van het neerslag-afvoermodel is geloosd op de boezem. Een extra dag is dus benodigd om de neerslag die in de eerste 17 dagen valt volledig af te voeren.

Er is voorts gekozen om voor de simulatieperiode een duur van 19 dagen aan te houden: aan de gegenereerde 18-daagse boezembelasting wordt 1 dag toegevoegd waarvoor de toevoer vanuit de afwaterende gebieden gelijk nul is. Op die manier kan nagegaan worden hoe snel de boezem weer op orde is als de boezemtoevoer stopt: kan de boezem binnen één dag weer op streefpeil komen?

Bij de analyse moet wel bedacht worden dat die laatste dag niet overeenkomt met de van de 19^{de} dag van de neerslagreeks afgeleide boezembelasting.

In de onderstaande figuur G.01 is de boezembelasting weergegeven, zoals gebaseerd op de extreme neerslagperiode van augustus 1969. Het betreft de totale dagelijkse boezemtoevoer vanuit alle afwaterende gebieden (in m³/s/etmaal: een daggemiddelde).



Figuur G.01: Daggemiddelde boezembelasting

6.4 Buitenwaterstanden: Waddenzee

Op de Waddenzee wordt geloosd bij Harlingen en bij Lauwersoog, beide onder vrij verval. De randvoorwaarde bij de afvoerkunstwerken is dus het Waddenzeegetijde.

Voor het kwantificeren van deze randvoorwaarde is de getijdereeks van het jaar 1994 als uitgangspunt genomen (in het Sobek®-model zijn oorspronkelijk belastingen en randvoorwaarden van het jaar 1994 geïmplementeerd). Uit dat jaar wordt een extreme periode geselecteerd. Dat betekent dat de waterstanden (zowel de eb- als vloedstanden) relatief hoog liggen.

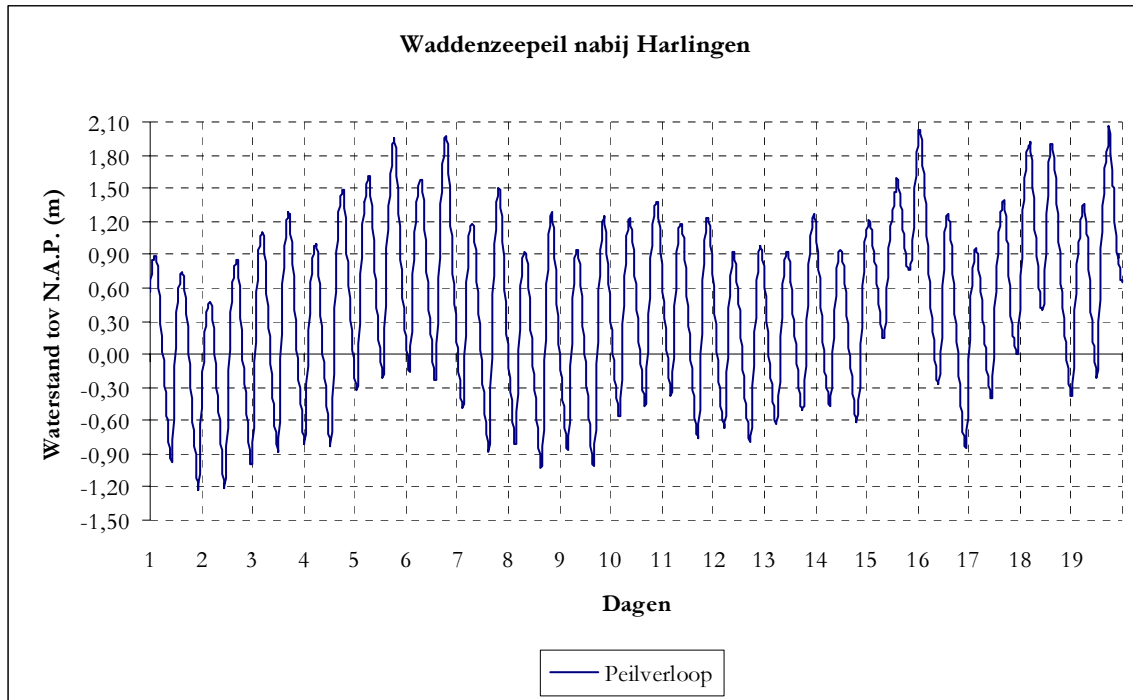
Door hoge buitenwaterstanden te kiezen wordt de afvoer naar de Waddenzee vanuit de Friese boezem naar verhouding moeilijker gemaakt.

Aan de middenschatting voor de temperatuurstijging (2°C in het jaar 2100) is een gemiddelde zeespiegelstijging gerelateerd van +0.60 m tot aan het jaar 2100. Lineair interpoleren levert voor het jaar 2030 een stijging van de zeewaterstand op van +0.18 m.

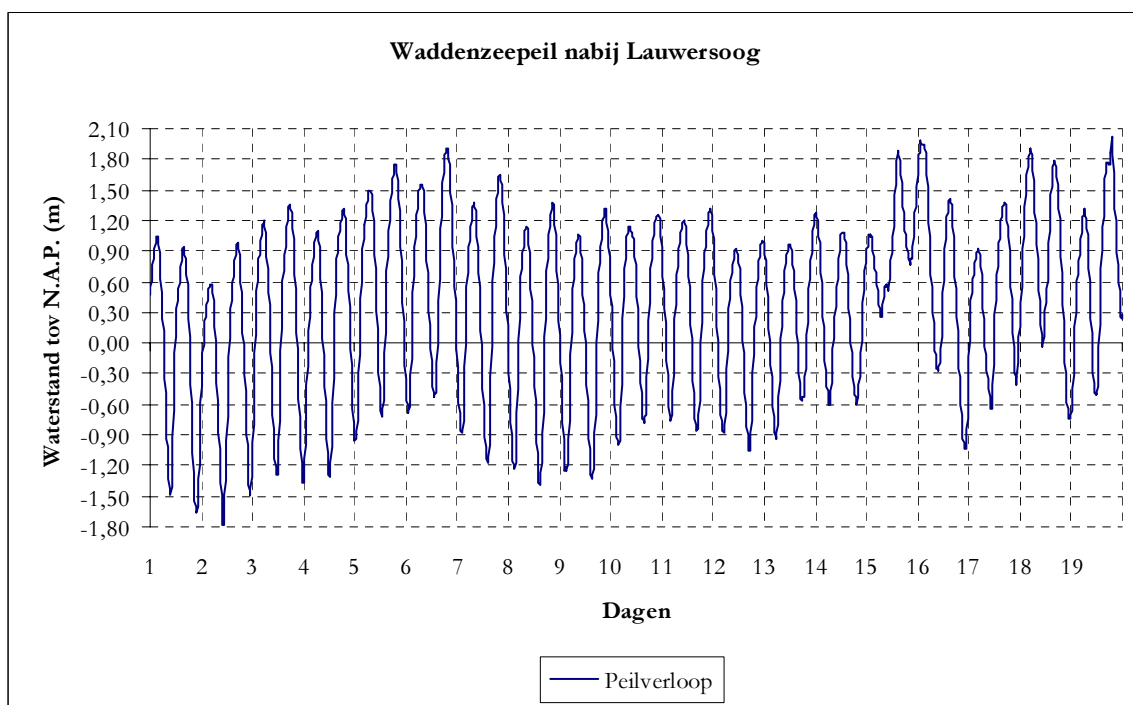
Deze (verwachte) structurele verhoging van het zeewaterpeil is verwerkt in de geselecteerde getijdeperiode van hoge waterstanden door alle waarden te verhogen met 0.18 m.

In de onderstaande figuren G.02 en G.03 staat het (aangepaste) Waddenzeegetijde als randvoorwaarde voor Harlingen en Lauwersoog afgebeeld.

Een periode van hevige neerslag wordt dus gecombineerd met een periode van relatief hoge buitenwaterstanden. Statistisch onderzoek wijst uit dat beide verschijnselen onafhankelijk van elkaar optreden: extreme neerslag geeft geen vergrote kans op hoge buitenwaterstanden.



Figuur G.02: Harlingen – Waddenzeegetijde



Figuur G.03: Lauwersoog – Waddenzeegetijde

6.5 Buitenwaterstanden: IJsselmeer

Op het IJsselmeer wordt boezemwater geloosd via het Hooglandgemaal te Stavoren en het Woudagemaal te Lemmer. Het op een bepaald moment realiseerbare maalvermogen is mede afhankelijk van het niveau van de binnen- en buitenpeilen. Zo kan een aanhoudende harde zuidwestenwind door opstuwing van het IJsselmeer dermate hoge waterstanden aan de Friese kust veroorzaken, dat de maalcapaciteit merkbaar negatief beïnvloed wordt: verlaging van het afvoerdebiet door een toegenomen – te overwinnen – verval over het kunstwerk. Bovendien zorgt afwaaiing tegelijkertijd voor lage waterstanden aan de boezemzijde van de gemalen, hetgeen ook nadelig werkt: verdere vergroting van het verval.

In het gebruikte Sobek®-model van de Friese boezem is de maalcapaciteit van beide gemalen niet gedefinieerd als functie van (ondermeer) het verval over het kunstwerk.

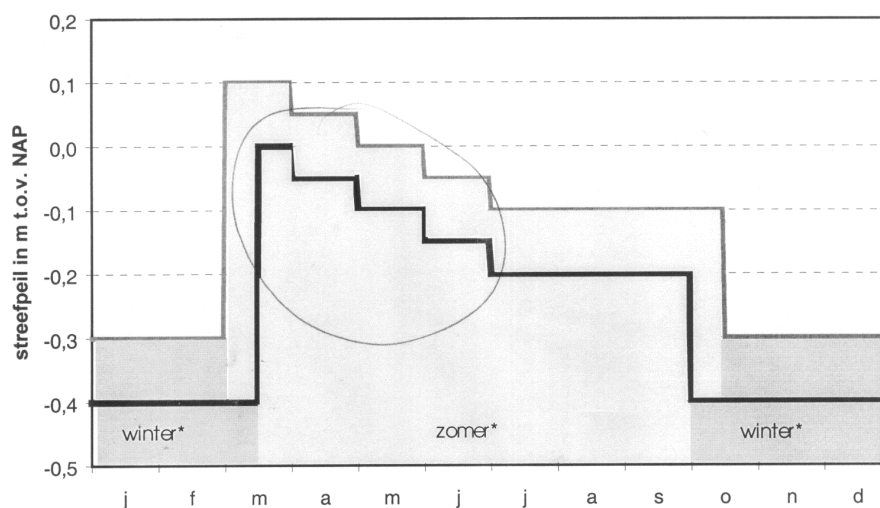
In plaats daarvan zijn voor het Hooglandgemaal en het Woudagemaal de mogelijke afvoervermogens geformuleerd die in ‘normale’ omstandigheden gehaald worden: resp. 65 m³/s, 74 m³/s, 95 m³/s en 65 m³/s, 72 m³/s.

Een in het model geïmplementeerde verval-afhankelijkheid van het maalvermogen zou een meer maatgevende situatie kunnen opleveren voor het boezemsysteem, omdat het voor de afvoermogelijkheden ongunstig kan uitpakken vanwege de genoemde opstuwing en afwaaiing van peilen.

Er is voor gekozen om structurele veranderingen in de streefpeilen van het IJsselmeer wel van invloed te laten zijn (in het model) op de bovengenoemde maalcapaciteiten.

Met behulp van de Q,h-relatie van het gemaal wordt de (blijvende) verandering in het maalvermogen bepaald aan de hand van het verschil tussen de huidige streefpeilen en de streefpeilen die gehanteerd gaan worden in het jaar, waarvoor de simulatie gedaan wordt. Het voorstel is om omstreeks het jaar 2010 een seizoensgebonden peil voor het IJsselmeer in te voeren. Tot op heden is nog niet besloten welk peilverloop wordt gehanteerd.

Een mogelijk verloop wordt weergegeven in de onderstaande figuur G.04.



Figuur G.04: Mogelijk verloop van het streefpeil van het IJsselmeer (d.i. de donkere lijn)

Bron: Integrale Visie IJsselmeergebied 2030

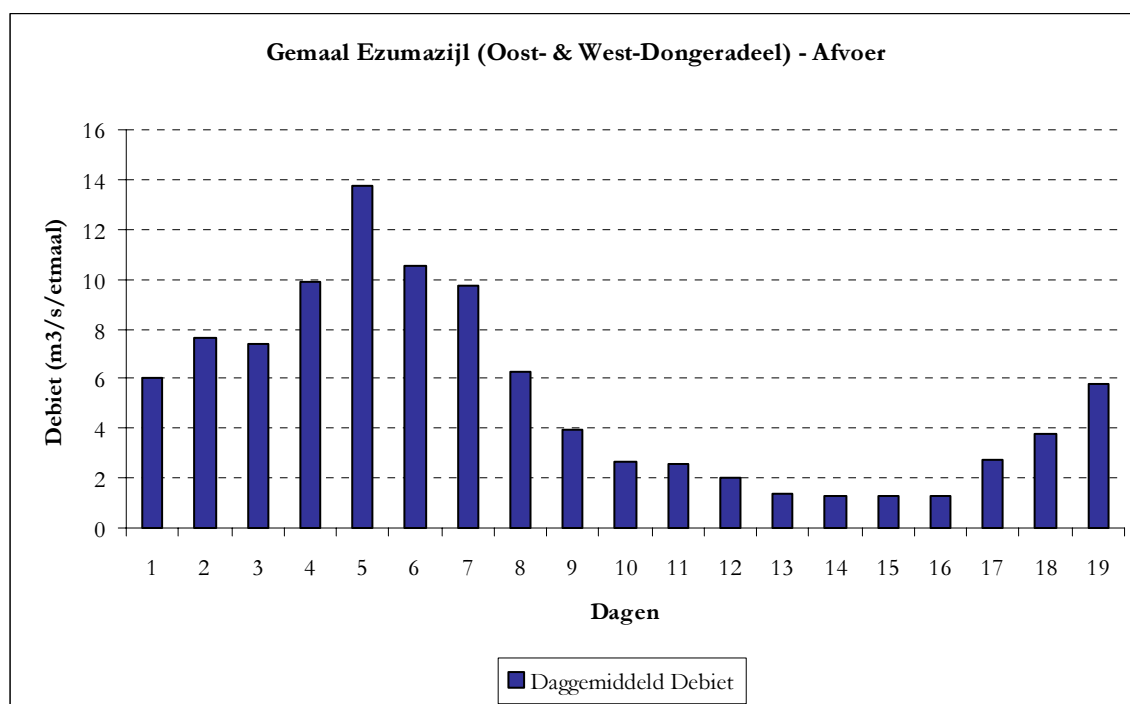
Wanneer van bovenstaand peilverloop wordt uitgegaan voor de situatie in het ‘simulatiejaar’ 2030, hoeft het maalvermogen van het Hoogland- en het Woudagemaal niet aangepast te worden. De in deze simulatie gehanteerde neerslagreeks van augustus 1969 valt namelijk niet in de periode dat het seizoensgebonden peil afwijkt van het huidige peilverloop: De getrapte peilverhoging (zie de figuur G.04) treedt op in de maanden maart tot en met juni.

6.6 Gemaal Ezumazijl & Reitdiepsluizen

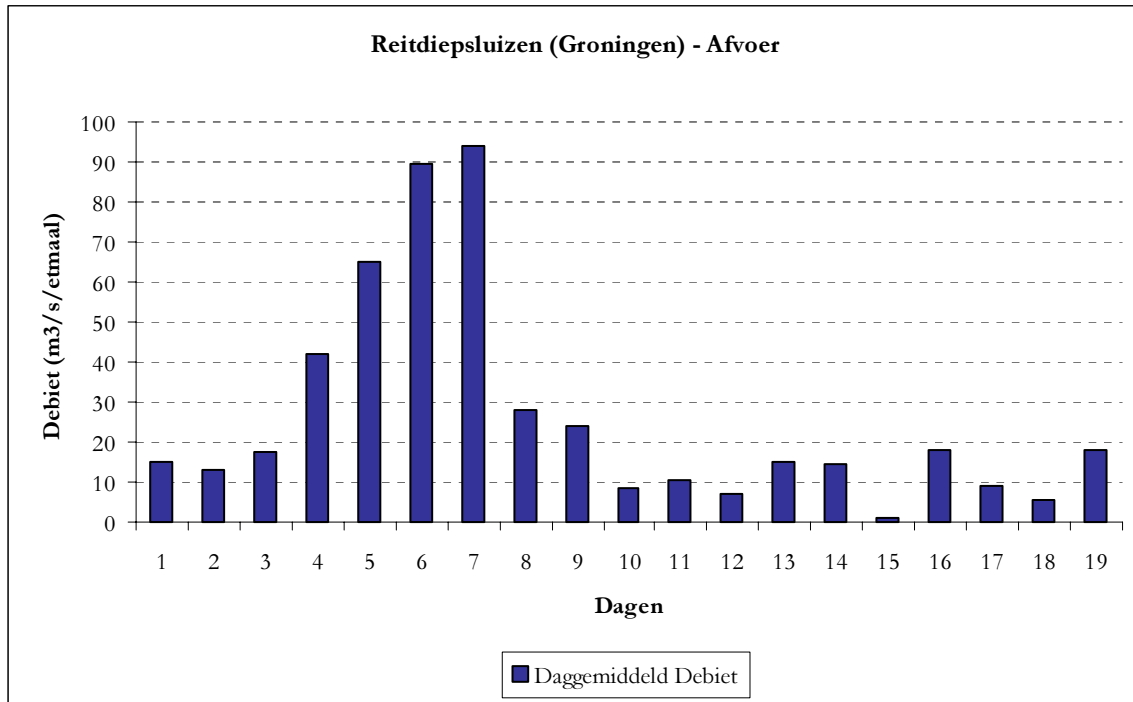
Via het gemaal Ezumazijl en de Reitdiepsluizen wordt overtollig water, afkomstig van respectievelijk een van de Friese boezem afgekoppeld gebied en van de provincie Groningen, geloosd op het Lauwersmeer. Deze kunstwerken zijn in het Sobek®-model opgenomen als randvoorwaarden in de vorm van een afvoerdebit als functie van de tijd.

Vergelijking van de boezemtoevoer gedurende het jaar 1994 met het patroon en de grootte van deze randvoorwaarden in ditzelfde jaar, laat zien dat het verloop van het debiet in de tijd voor beide gevallen min of meer hetzelfde is: wanneer bijvoorbeeld een extreme toevoer op de boezem vanuit het afwaterende gebied plaatsheeft, wordt via het gemaal Ezumazijl en de Reitdiepsluizen in dezelfde periode een overeenkomstige vergrootte toevoer op het Lauwersmeer gerealiseerd. Omdat de boezemtoevoer in het tot stand te brengen belastingscenario extreem is geformuleerd, worden deze randvoorwaarden, toevoeren op het Lauwersmeer, ook extreem genomen. Dit is gedaan door uit afvoergegevens van het gemaal Ezumazijl en de Reitdiepsluizen uit het jaar 1994 een periode te selecteren waarin een hoge afvoer heeft plaatsgevonden.

Om die extreme periode representatief te laten zijn voor het ‘simulatiejaar’ 2030, worden de afvoergegevens gecorrigeerd voor de verwachte toename in de neerslag, net als bij de neerslagreeks voor de boezembelasting is gebeurd. Uitgangspunt is weer dat per graad Celsius temperatuurstijging de neerslag toeneemt met 10%. De 0.6°C-temperatuurstijging tot aan het jaar 2030 betekent dus een neerslagtoename van 6%. Wanneer wordt uitgegaan van een directe relatie tussen de hoeveelheid neerslag die valt in een gebied en de omvang van het afgevoerde volume uit dat gebied, bedraagt de procentuele toename van het afvoerdebit voor het gemaal Ezumazijl en de Reitdiepsluizen ook 6%. In de onderstaande figuren G.05 en G.06 wordt voor de kunstwerken de (daggemiddelde) afvoer getoond als functie van de tijd.



Figuur G.05: Gemaal Ezumazijl – Daggemiddelde afvoer



Figuur G.06: Reitdiepsluizen – Daggemiddelde afvoer

6.7 Doorvoersluis-duiker Kuinre, Noord-Oostpolder

De doorvoersluis-duiker Kuinre (Noord-Oostpolder) wordt gebruikt om water af te tappen van de Friese boezem. Voor dit belastingscenario is er echter voor gekozen deze randvoorwaarde op een afvoerdebiet van 0.00 m³/s te houden. Dus er vindt geen aftapping van boezemwater plaats. De aanname is namelijk dat, in het geval de provincie Friesland te kampen heeft met een extreme neerslagperiode, de (weers-) omstandigheden in de aangrenzende gebieden (dus ook de Noord-Oostpolder) zodanig zijn dat geen sprake is van een omvangrijk watertekort, welke laatste wateraftappingen nodig zou maken.

6.8 Doorvoersluis-duiker Gaarkeuken – Groningen

Via de doorvoersluis-duiker Gaarkeuken wordt boezemwater afgevoerd naar de provincie Groningen. In dit belastingscenario wordt deze doorvoer echter niet geactiveerd. Een doorvoerstop gedurende extreme (weers-) omstandigheden in de regio (hevige neerslag, etc.) is namelijk een realistische aanname, omdat de doorvoer bedoeld is om watertekorten in de provincie Groningen op te heffen.

6.9 Lauwersmeerpeil

Het gevoerde beleid ten aanzien van het Lauwersmeerpeil is van grote invloed op de lozingscapaciteit van de Friese boezem in de Noord-Oosthoek (via de schutsluis en spuisluis van Dokkumer Nieuwe Zijlen en de Friese sluis bij Zoutkamp). In dit belastingscenario (dus voor het 'simulatiejaar' 2030) wordt het huidige peilbeheer nog gehandhaafd. Dat betekent dat op het Lauwersmeer een gemiddeld peil van N.A.P. -0.93 m wordt nagestreefd.

Hoofdstuk 7

Analyse Resultaten BasisSimulatie

7.1 Algemeen

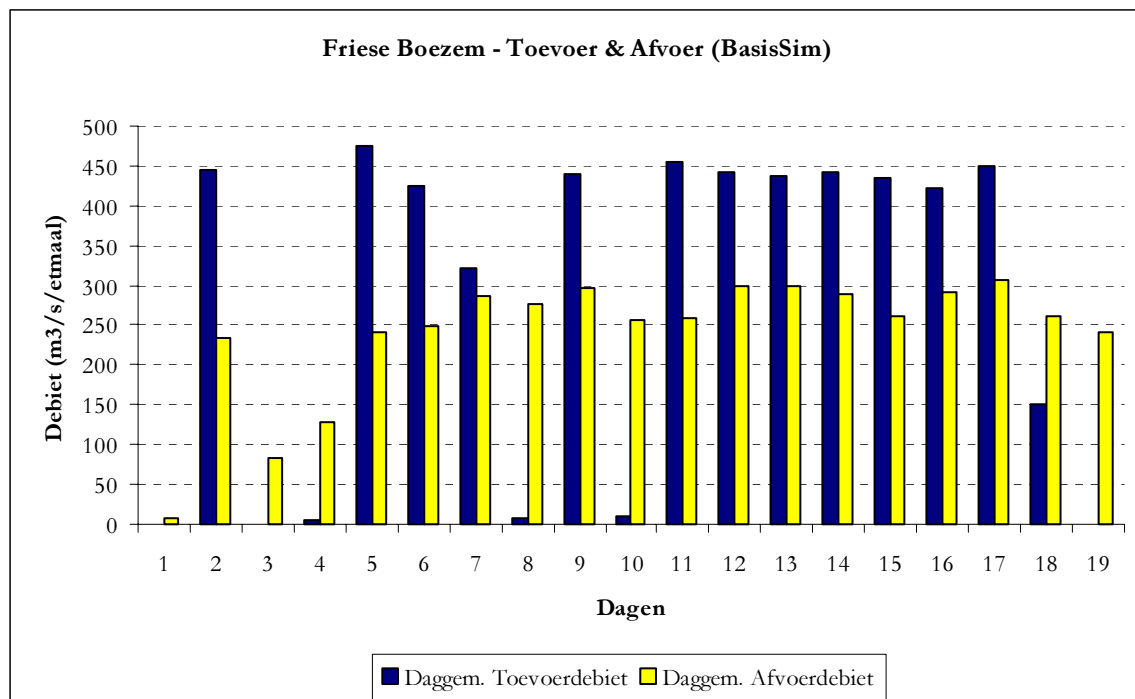
7.1.1 Inleiding

In onderstaande paragrafen worden de resultaten van de simulatie met het belastingscenario, genaamd “BasisSimulatie”, besproken. Op die manier wordt inzicht verkregen in het gedrag van het Friese boezemstelsel gedurende een extreme periode, qua belastingen en randvoorwaarden. Daarnaast wordt (per karakteristiek gebied) nagegaan of overschrijdingen van maximaal toelaatbare boezempeilen hebben plaatsgevonden en wat de oorzaken daarvan zijn.

7.1.2 Vier periodes van extreme boezembelasting

In het scenario BasisSimulatie bevinden zich vier periodes van extreme boezembelasting. In deze periodes overtreft de boezemtoevoer de boezemafvoer in omvang. De belastingperiodes zijn ook waar te nemen in de peilverlopen van meetpunten in het boezemsysteem.

In de onderstaande figuur H.01 is de totale daggemiddelde boezemtoevoer, welke gebaseerd is op een neerslagreeks uit de maand augustus van het jaar 1969, uitgezet voor het aantal (19) dagen van de simulatieperiode, tezamen met de in deze simulatie gerealiseerde totale daggemiddelde boezemafvoer. Opgemerkt zij, dat in deze simulatie niet gebruik is gemaakt van het instrument om maalbepalingen voor de poldergebieden in te stellen.



Figuur H.01: Het Friese boezemstelsel – boezembelasting en boezemafvoer

Dagen																			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
Toevoerdebiet (m ³ /s/etmaal)																			
0	444	0	5	476	424	323	7	441	11	454	443	438	441	435	422	450	150	0	
Afvoerdebiet (m ³ /s/etmaal)																			
7	234	83	128	241	248	287	275	297	257	260	299	298	289	261	292	306	261	242	

Tabel TH1: Het Friese boezemstelsel – daggemiddeld toevoerdebiet en afvoerdebiet

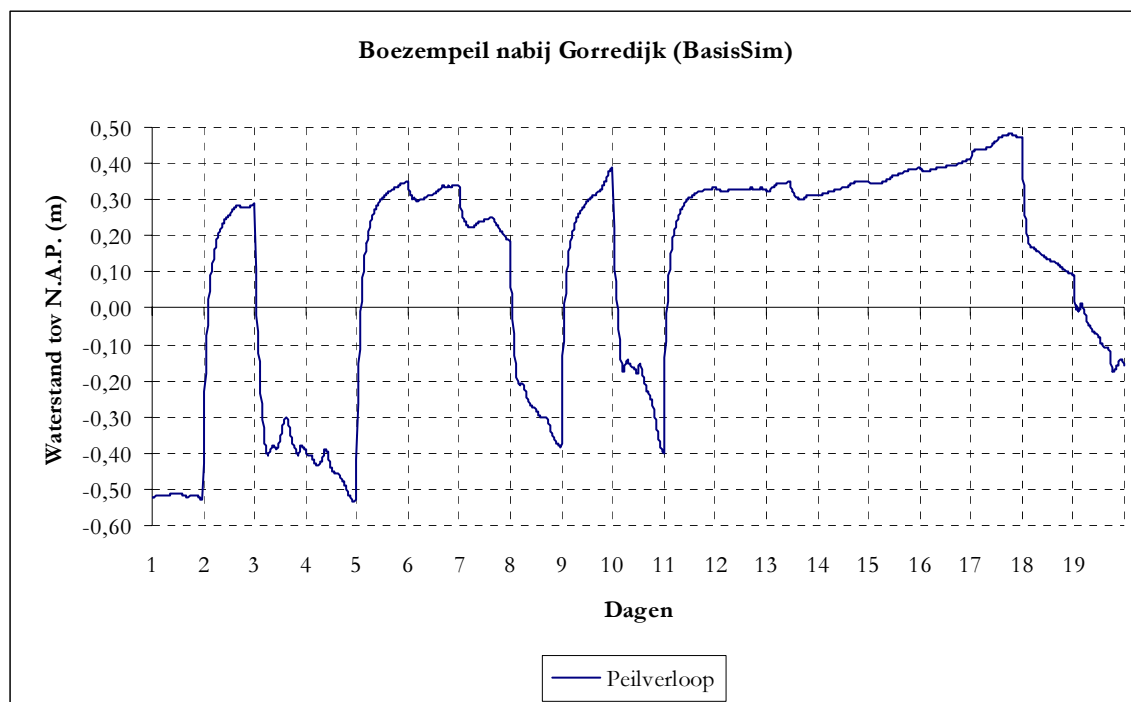
De bovenstaande figuur H.01 laat zien dat vier ‘periodes’ van boezemtoevoer zijn te onderscheiden:

- Dag 2
- Dag 5 tot en met Dag 7
- Dag 9
- Dag 11 tot en met Dag 18

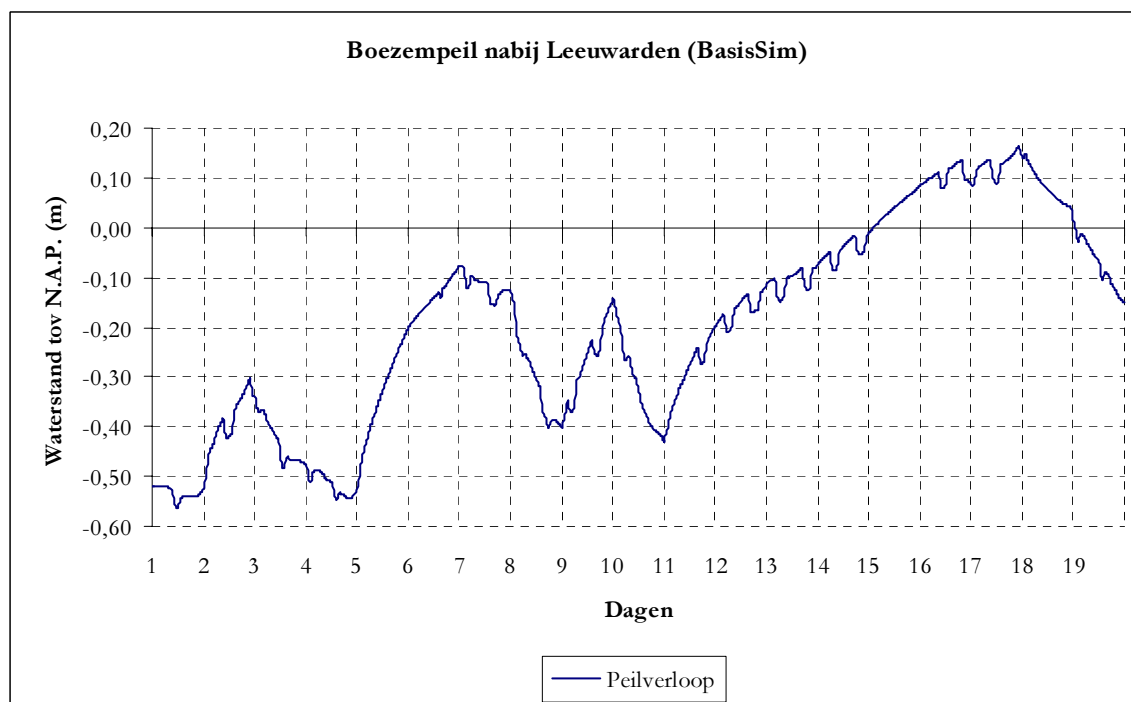
Tussen twee opeenvolgende ‘periodes’ zijn één of meer dagen van weinig of geen boezembelasting. Elke ‘periode’ heeft per dag een toevoer die ligt tussen 425 m³/s/etmaal en 475 m³/s/etmaal, behalve op dag 7 (ca. 325 m³/s/etmaal) en dag 18 (ca. 150 m³/s/etmaal).

Hierna wordt nagegaan of het boezemstelsel in staat is geweest om elke ‘periode’ van extreme boezemtoevoer adequaat te verwerken met de middelen die in die omstandigheden beschikbaar zijn. In figuur H.01 is alvast te zien dat in elk van de ‘periodes’ de boezembelasting de boezemafvoer ruimschoots overtreft, met uitzondering van dag 18.

De verschillende ‘belastingperiodes’ zijn ook zichtbaar in de waterstanden die zijn gemeten op 38 locaties verspreid over het boezemstelsel: de pieken in het verloop van de waterstand in de tijd komen overeen met de extreme boezembelasting gedurende die dag (-en). Ter illustratie hiervan is in de onderstaande figuren H.02 en H.03 het waterstandsverloop gegeven voor het meetpunt nabij respectievelijk Gorredijk (in het Zuidoosten van de provincie) en Leeuwarden.



Figuur H.02: Waterstandsverloop meetpunt Gorredijk



Figuur H.03: Waterstandsverloop meetpunt Leeuwarden

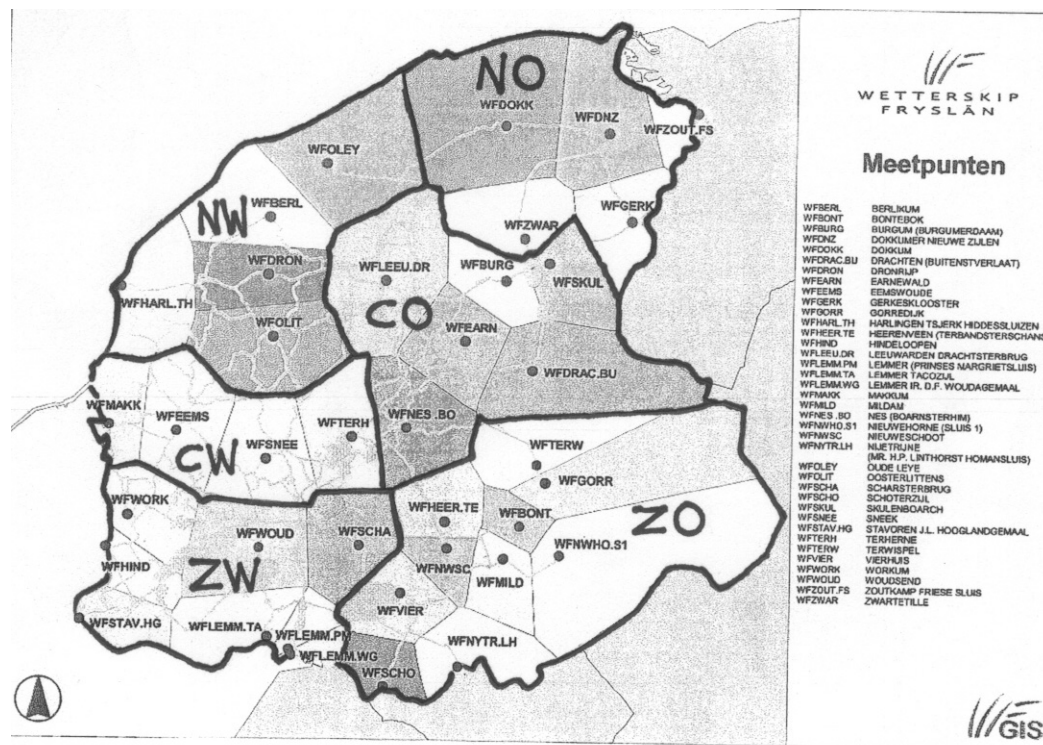
7.1.3 Indeling meetpunten boezemstelsel

Ten behoeve van de hierna volgende beschrijving van het gedrag van het boezemstelsel is aan de hand van de kaart van de karakteristieke gebieden de volgende (arbitraire) indeling gemaakt voor de meetpunten, tabel TH2:

Gebied	Meetpunten
Noord-West	0 t/m 4
Centraal-West	5 t/m 8
Zuid-West	9 t/m 16
Zuid-Oost	17 t/m 26
Centraal-Oost	27 t/m 32
Noord-Oost	33 t/m 37

Tabel TH2: Gebiedsindeling meetpunten

In de onderstaande figuur H.04 zijn deze gebieden weergegeven.



Figuur H.04: Gebiedsindeling provincie Friesland

7.1.4 Waterstandsgrafieken

Bij de navolgende bespreking van de ‘belastingperiodes’ wordt ondermeer gebruik gemaakt van grafieken waarin voor de 38 meetpunten (x-as) de waterstand is uitgezet (y-as), welke aan het einde van elke dag wordt gemeten. Die registraties zijn dus telkens momentopnames van de toestand van het gehele boezemsysteem, maar geven een goed beeld van de voorkomende verschillen in peilen en peilstijgingen tussen locaties in het boezemstelsel. De onderstaande figuur H.05 is een voorbeeld van een dergelijke grafiek; de 38 meetpunten zijn genummerd van 0 t/m 37; in het hoofdstuk over de beoordeling van het Friese boezemstelsel staat in de figuur D.01 aangegeven met welke locaties in het boezemsysteem deze nummering van de meetpunten overeenkomt.

7.1.5 Bergingsoverschot

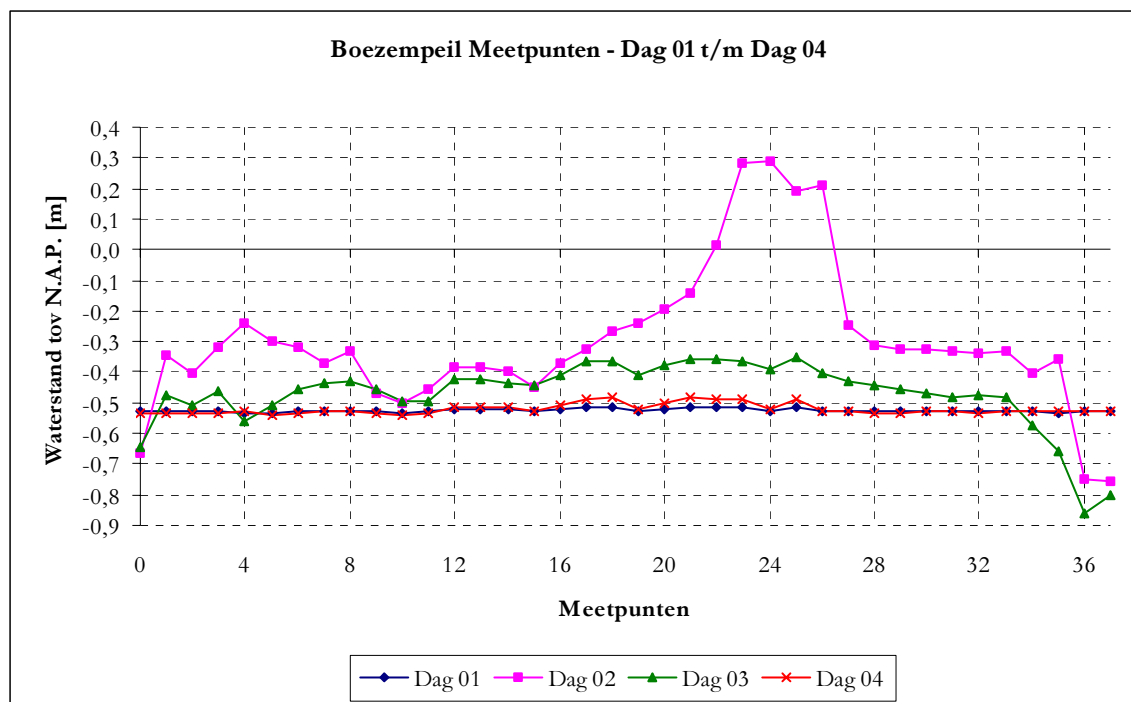
In de onderstaande paragrafen wordt het begrip bergingsoverschot gebruikt; de betekenis ervan is de volgende: als op een bepaald moment het gemiddelde boezempeil hoger ligt dan het streefpeil, is het totale volume aan boezemwater in het systeem groter dan in de uitgangssituatie (de boezem op streefpeil). Dit volumeverschil tussen de actuele en de oorspronkelijke toestand wordt hier het bergingsoverschot genoemd. Deze grootte wordt uitgedrukt in $[m^3/s/etmaal]$.

Als op een dag het bergingsoverschot $24 m^3/s/etmaal$ bedraagt, dient de boezemafvoer de volgende dag een omvang te hebben van minimaal $24 m^3/s/etmaal$ óf de boezemafvoer moet de boezemtoevoer met deze grootte overtreffen, om de boezem op die dag in ieder geval weer (gemiddeld) op streefpeil te brengen. In bijlage BH.02 is een grafiek opgenomen waarin het daggemiddelde bergingsoverschot staat uitgezet tegen de tijd (d.i. de 19 dagen van de simulatieperiode) en tevens een tabel met de bijbehorende waarden.

7.2 Eerste deel (dag 1 t/m dag 4)

7.2.1 Waterstanden op dag 1

In de onderstaande figuur H.05 zijn de waterstanden voor de verschillende meetpunten op de eerste dag tot en met de vierde dag uitgezet.



Figuur H.05: Waterstand Meetpunten – dag 1 t/m dag 4

De Friese boezem is initieel op streefpeil, N.A.P. -0.52 m. Zoals uit de figuur H.05 blijkt wordt dit peil gedurende de eerste dag gehandhaafd in het boezemsysteem. Deze dag vindt nog geen toevoer plaats vanuit het afwaterende gebied.

7.2.2 Waterstanden op dag 2

Als gevolg van een naar verhouding hoge toevoer op de boezem, stijgen de waterstanden op de tweede dag.

Het totale daggemiddelde afvoerdebiet op de tweede dag bedraagt: 234 m³/s/etmaal. De boezembelasting op de tweede dag is echter groter: 444 m³/s/etmaal. Dit verklaart de verhoogde waterstanden aan het einde van deze dag, zie figuur H.05: met de toevoer die de boezemafvoer overtreft wordt water geborgen in het systeem. Dit gegeven hoeft niet direct problemen op te leveren: als de dagen die erop volgen minder of helemaal niet extreem zijn (qua ondermeer de neerslagbelasting), dan wordt het boezemsysteem ruimschoots in de gelegenheid gesteld de ontstane wateroverschotten op redelijke termijn weg te werken.

Als in de figuur H.05 het waterstandsverloop van de tweede dag wordt beschouwd, valt op dat het boezempeil, gezien over de gehele provincie (vertegenwoordigd door de 38 meetpunten), niet gelijkmatig gestegen is.

Voor de meetpunten die nabij de volgende afvoerkunstwerken liggen, de Tsjerk Hiddessluizen, de sluizen van Dokkumer Nieuwe Zijlen en de Friese sluis bij Zoutkamp (respectievelijk de nodes 0, 36 & 37) zijn de peilen zelfs gedaald ten opzichte van de vorige dag; de lozing onder vrij verval creëert een waterstandsverhang (noodzakelijk voor de toestroming van boezemwater naar het kunstwerk) met het laagste punt bij het afvoerkunstwerk.

Op eenzelfde manier zijn de lage waterstanden in het Zuidwestelijke gebied te verklaren (de nodes 9, 10 & 11): het onttrekken van water aan het boezemstelsel door de werking van het Hooglandgemaal zorgt ervoor dat de peilen in het invloedsgebied van het gemaal minder stijgen (stijging ten opzichte van de eerste dag) dan elders in het boezemgebied.

Bij het Woudagemaal is dit effect minder sterk waarneembaar (de nodes 12 t/m 17). Dat is waarschijnlijk gelegen in het feit dat het Woudagemaal in de loop van de tweede dag wordt uitgeschakeld, terwijl het Hooglandgemaal de gehele dag blijft uitmalen, zij het in de tweede daghelft op een lager vermogen.

Daarnaast heeft het boezemstelsel in de Zuidwesthoek van de provincie een groot bergend oppervlak vanwege de Friese meren die daar gelegen zijn. Dat verklaart ook de relatief geringe peilstijgingen op de tweede dag in dat gebied: de verhouding tussen het plaatselijk op de boezem afgevoerde neerslagvolume en het lokaal beschikbare bergend oppervlak bepaalt de peilstijging die optreedt. In het Zuidoosten zijn de waterstanden juist aanzienlijk gestegen (de nodes 20 t/m 26): naar een niveau van N.A.P. -0.20 m tot N.A.P. +0.30 m. In het Centrale en Noordelijke gedeelte van de provincie bevinden de boezempeilen zich in het volgende bereik: [-0.40 m tot -0.20 m].

Maar met het oog op overschrijding van de maximaal toelaatbare peilen is het niet gezegd dat de gebieden waar de waterstanden, onder de gegeven extreme omstandigheden, tot uitzonderlijke hoogten stijgen (bijvoorbeeld de Zuidoosthoek), per definitie 'gevaar lopen' en dat de gebieden waar de peilstijgingen beperkt blijven (bijvoorbeeld het Zuidwesten), altijd gevrijwaard blijven van 'kritieke situaties'. Voor elk karakteristiek gebied gelden namelijk weer andere criteria met betrekking tot de maximaal toelaatbare boezemwaterstand. Zie het hoofdstuk over de beoordeling van het boezemstelsel en bijlage BD.01.

7.2.3 Waterstanden op dag 3 en dag 4

Bij afwezigheid van boezembelasting op de derde en vierde dag kan het bergingsoverschot van de tweede dag gedurende deze dagen volledig worden weggewerkt.

Op de dagen 3 en 4 is er vrijwel geen toevoer op de boezem. Daarentegen wordt wel boezemwater geloosd. Het op de derde dag door de boezemsluizen gerealiseerde afvoervolume ($83 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$) laat het bergingsoverschot van de tweede dag afnemen van $203 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$ tot $120 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$. De vierde dag begint dus nog met een bergingsoverschot op de boezem; dit is ook te zien aan het waterstandsverloop van de derde dag, zie figuur H.05: het boezempeil ligt voor vrijwel alle meetpunten nog steeds boven het streefpeil.

Wanneer het Hooglandgemaal en het Woudagemaal gedurende de gehele derde dag waren ingezet, zou het afvoerdebiet zijn vergroot met $167 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$ (d.i. $95 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal} + 72 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$: de respectieve maalcapaciteiten). Het totaal afgevoerde debiet zou daarmee uitkomen op: $250 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$.

Het was dus goed mogelijk geweest om het bergingsoverschot van de tweede dag al volledig te 'verwerken' op de derde dag. Echter, omdat ook op de vierde dag de boezemtoevoer zeer gering is, bestaat de noodzaak daartoe niet: het wegwerken van het bergingsoverschot kan in deze omstandigheid over twee dagen verdeeld worden; hetgeen ook geschiedde: aan het einde van de vierde dag resteert een minimaal bergingstekort van $3 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$ op de boezem.

Dit is terug te zien in de boezempeilen: bij vrijwel alle meetpunten is het niveau van het streefpeil weer bereikt, zie figuur H.05.

7.2.4 Verschillend peilverloop tussen meetpunten

In aansluiting op de waarneming in figuur H.05 dat de gemeten peilen aan het einde van de tweede dag in niveau verschillen, wordt hierna aangegeven waarom deze peilverschillen bestaan.

Zie de bovenstaande figuren H.02 en H.03 waarin voor twee meetpunten in het boezemsysteem de waterstand is uitgezet tegen de tijd.

Wat opvalt aan de grafieken is dat de peilstijgingen die optreden, de uiteindelijke maxima die op bepaalde dagen worden bereikt, per meetpunt (naar verwachting) verschillend zijn. Ook de stijgsnelheden zijn onderling verschillend.

Deze verschillen in het verloop van het boezempeil worden mede veroorzaakt door het verschil in fysieke omstandigheden nabij de meetpunten. De kenmerken van de waterloop waarin het meetpunt zich bevindt (dwarsprofiel, kanaallengte), het aantal lozingen op de boezem binnen een straal van Y km vanaf het meetpunt, de omvang van deze lozingen, het oppervlak aan boezemwater in de omgeving van het meetpunt (bergend vermogen: bijv. de relatieve nabijheid van de Friese meren), de ligging van de meetpunten ten opzichte van de afvoerkunswerken van de boezem, et cetera, bepalen de wijze waarop het boezempeil nabij het meetpunt reageert op wateraanvoer en –afvoer; bovendien kunnen waterstromingen in het systeem slechts dan plaatsvinden, wanneer verhangen (en dus peilverschillen) bestaan.

7.2.5 Peilveranderingen door veranderde toevoer-afvoerverhouding

De verhouding tussen de omvang van de boezemafvoer en de boezembelasting bepaalt het peilverloop in het boezemstelsel.

Het waterstandsverloop van de tweede dag, zie figuur H.05, is tot stand gekomen onder invloed van een boezembelasting die flink groter is dan het gerealiseerde afvoervolume. Op de derde dag is de toevoer-afvoerverhouding, zoals gezien, heel anders. Die verandering zorgt ervoor dat de van de tweede dag aanwezige verhangen in het boezemstelsel waterstromingen op gang brengen, welke uiteindelijk de bestaande peilverschillen nivelleren: er wordt op natuurlijke wijze toegewerkt naar een nieuwe ‘stabiele’ toestand. Dit is goed te zien aan het peilverloop op de derde dag, zie de figuur H.05: de grootste peildalingen ten opzichte van de tweede dag hebben zich voorgedaan in het Zuidoostelijk deel van de provincie; In het Zuidwesten, bij het Hoogland- en het Woudagemaal, zijn de peilen nauwelijks gedaald. In de Noordelijke provinciehelft zijn de opgetreden peildalingen onderling van dezelfde orde van grootte. Dit alles leidt ertoe dat aan het einde van de derde dag de waterstanden voor het grootste deel van de boezem zich bevinden in het volgende peilbereik: $[-0.55 \text{ m}]$ tot $[-0.35 \text{ m}]$ ten opzichte van N.A.P. (Alleen in de omgeving van de Tsjerk Hiddessluizen en van de sluizen van Dokkumer Nieuwe Zijlen en Zoutkamp zijn de waterstanden (flink) lager)

7.2.6 Conclusie eerste deel

De conclusie voor de eerste vier dagen is dat de boezem de eerste (korte) extreme ‘periode’ van boezembelasting (dag 2) goed doorgekomen is, in de zin dat bij aanvang van de volgende periode (vanaf de vijfde dag) de boezem in ieder geval weer op streefpeil is (aan het einde van de tweede dag zijn er nog aanzienlijke waterstandsverhogingen, maar die worden in de daaropvolgende dagen volledig weggewerkt). Uit de analyse van de komende dagen moet blijken of dit een goede uitgangspositie is geweest; het is mogelijk dat het boezemsysteem voordeel gehad zou hebben van een lager gemiddeld boezempeil aan het begin van de vijfde dag. Door voormalen kan dit gerealiseerd worden.

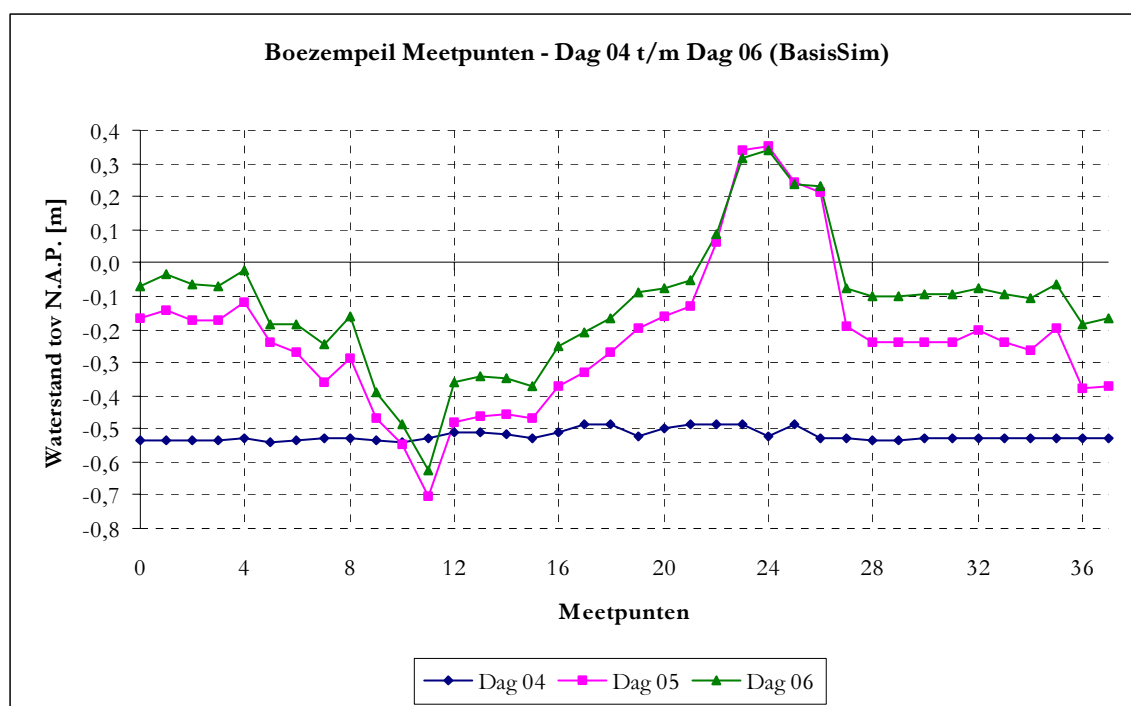
7.3 Tweede deel (dag 5 t/m dag 8)

In deze paragraaf worden de waargenomen waterstanden op de vijfde tot en met de achtste dag gerelateerd aan de opgetreden boezembelasting en de gerealiseerde boezemafvoer.

7.3.1 Waterstanden op dag 5 en dag 6

Op de vijfde en zesde dag worden voor vrijwel het gehele boezemstelsel peilstijgingen waargenomen, doordat de boezemtoevoer de boezemafvoer op die dagen overtreft.

Dit gedeelte van de simulatieperiode is begonnen met de boezem op streefpeil: dat was namelijk de situatie aan het einde van de vierde dag. In onderstaande figuur H.06 is voor de vierde tot en met de zesde dag de waterstand, gemeten aan het einde van de dag, uitgezet tegen de verschillende meetpunten.



Figuur H.06: Waterstand Meetpunten – dag 4 t/m dag 6

Uit de bovenstaande figuur H.06 valt op te maken dat de eerste twee dagen van de extreme periode (qua boezembelasting), de vijfde en zesde dag, worden gekenmerkt door stijgende boezemwaterstanden (op enkele meetpunten na).

Deze peilstijgingen zijn het gevolg van het feit dat de lozing van boezemwater gedurende die dagen in omvang achterblijft bij de toevoer op het boezemstelsel vanuit de afwaterende gebieden; er wordt een bergingsoverschot opgebouwd. Op de vijfde dag bedraagt de boezemtoevoer namelijk: 476 m³/s/etmaal, tegen een afvoer van 241 m³/s/etmaal. Op de zesde dag heeft de boezembelasting een omvang van 424 m³/s/etmaal, terwijl die dag boezemwater geloosd wordt met een gemiddeld debiet van 248 m³/s/etmaal.

7.3.2 Niet-uniforme peilstijging gezien over de boezem op dag 5

Net als op de tweede dag is de stijging van de waterstanden op de vijfde dag, gezien over de boezem, niet uniform. Zie bovenstaande figuur H.06.

In het Noordwesten van de provincie is het peil gestegen tot circa N.A.P. -0.15 m. De peilstijgingen (ten opzichte van de vierde dag) worden, vanaf Noord-West via Centraal-West naar het Zuidwesten toe, steeds geringer, tot aan een flinke peildaling (ca. 0.17 m) voor het meetpunt nabij het Hooglandgemaal te Stavoren. Vanaf de Zuidwesthoek naar het Zuidoosten van Friesland nemen de peilstijgingen weer sterk in omvang toe. Voor meetpunt 24 wordt een maximum bereikt: een peil van circa N.A.P. $+0.35$ m.

In het Centraal- en het Noordoosten zijn de waterstanden ook gestegen, maar veel minder dan op sommige locaties in de Zuidoosthoek. De gemeten peilen in beide gebieden zijn redelijk uniform: ze bevinden zich allen in de buurt van het niveau: N.A.P. -0.24 m, met uitzondering van de waterstanden afkomstig van meetpunten bij de kunstwerken van Dokkumer Nieuwe Zijlen en Zoutkamp: die zijn veel lager, circa N.A.P. -0.37 m.

De hoogste boezemwaterstanden op dag 5 worden dus gevonden in het Zuidoosten, de laagste waterstanden in het Zuidwesten van de provincie. Ofwel: in het Zuidwesten zijn de peilen het minst gestegen vanaf het streefpeil (d.i. de uitgangspositie) en in het Zuidoosten het meest.

7.3.3 Dag 5 en dag 6: identiek patroon waterstanden

Wat opvalt in de figuur H.06 is, dat het waterstandsverloop over de boezem voor dag 6 hetzelfde patroon heeft als van dag 5.

De grafiek van dag 6 ligt alleen op een hoger niveau ten opzichte van dag 5: in alle karakteristieke gebieden (waargenomen door de meetpunten) stijgen, gedurende dag 6, de waterstanden met ongeveer dezelfde grootte; behalve voor bepaalde locaties in het Zuidoosten, daar wordt geen peilstijging waargenomen. Het gesommeerde afvoerdebiet van dag 6 is ongeveer van dezelfde grootte als van dag 5 (resp. $248 \text{ m}^3/\text{s/etmaal}$ en $241 \text{ m}^3/\text{s/etmaal}$), ook de onderverdeling van dit totale debiet naar de verschillende afvoerkunstwerken is vrijwel gelijk aan die van de vijfde dag. Zie bijlage BH.01. [04]

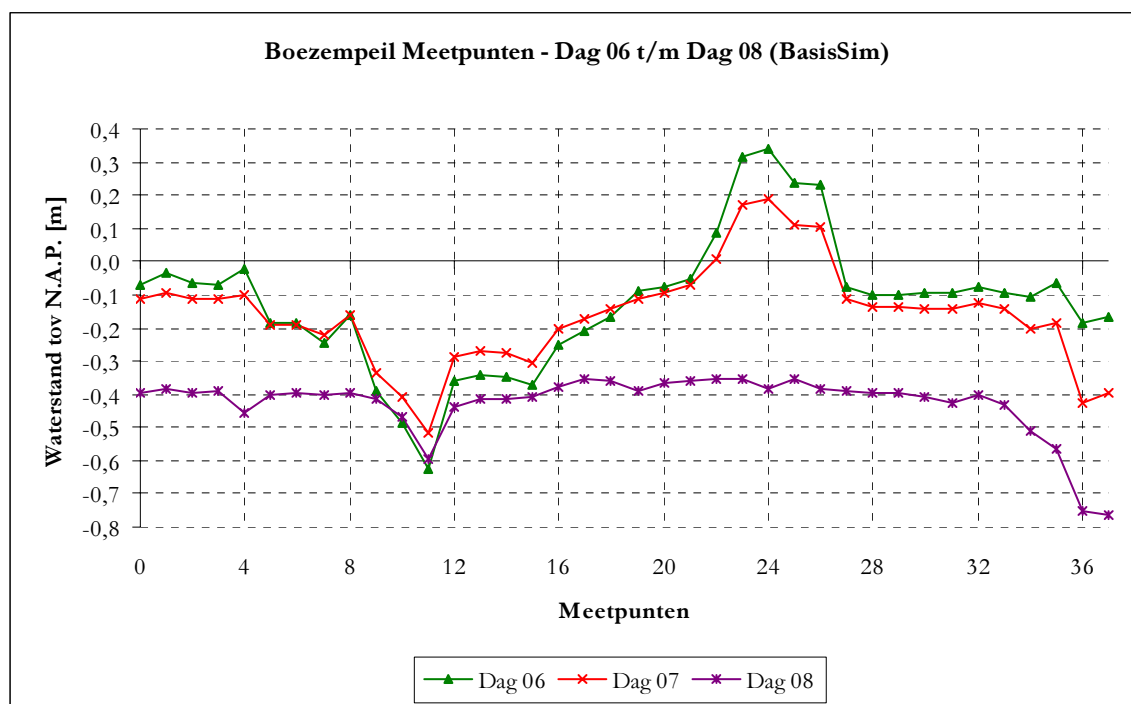
Net als op de vijfde dag overtreft de boezembelasting op de zesde dag ruimschoots de boezemafvoer, zoals eerder is gezien. Op dag 5 bedraagt het verschil: $235 \text{ m}^3/\text{s/etmaal}$, op de zesde dag: $176 \text{ m}^3/\text{s/etmaal}$. Dus feitelijk is het enige onderscheid tussen beide dagen de boezembelasting die op de zesde dag wat lager is dan de dag ervoor. Kennelijk is het op de vijfde en zesde dag waargenomen 'patroon' van boezempeilen (voor de 38 meetpunten verspreid over de boezem) een bepaalde 'stabiele' toestand voor het boezemstelsel, welke wordt ingenomen als de boezemtoevoer de boezemafvoer veruit overtreft en de inzet van de kunstwerken is, zoals eerder in deze paragraaf is beschreven. Het lijkt erop dat alleen een belangrijke wijziging in de omvang van de boezembelasting of in de lozingsmogelijkheden deze ingenomen toestand kan opheffen.

7.3.4 Waterstanden op dag 7

Met een wat lagere boezembelasting en een hogere boezemafvoer dan op de voorgaande dagen doen zich op de zevende dag peilstijgingen voor in de gebieden waar de waterstand relatief laag was en peildalingen in de gebieden waar aanvankelijk hoge waterstanden werden waargenomen.

Op de zevende dag is de belasting op de boezem wat verminderd ten opzichte van de voorgaande dagen, nu: 323 m³/s/etmaal. De grootte van de afvoer (d.i. 287 m³/s/etmaal) benadert nu de toevoer, zodat het op de vijfde en zesde dag opgebouwde bergingsoverschot maar weinig toeneemt, namelijk met 36 m³/s/etmaal. Zie bijlage BH.02.

In de onderstaande figuur H.07 is voor de dagen 6 tot en met 8 de waterstand aan het slot van de dag uitgezet voor de 38 meetpunten in de karakteristieke gebieden.



Figuur H.07: Waterstand Meetpunten – dag 6 t/m dag 8

Er vindt op de zevende dag, ten opzichte van de zesde dag, een herverdeling van waterstanden plaats: in het Noordwesten, het Noordoosten, het Centraaloosten en in het oostelijk deel van de Zuidoosthoek dalen de boezemwaterstanden. In het Centraalwesten en het westelijk deel van de Zuidoosthoek behouden de peilen min of meer hetzelfde niveau en in het Zuidwesten stijgen de waterstanden. Zie bovenstaande figuur H.07. Dus het eerdergenoemde ‘patroon’ van de 38 peilen over de boezem, zie figuur H.06 de dagen 5 en 6, blijft ook op de zevende dag bestaan, maar onder invloed van een lagere boezembelasting en een vergrootte inzet van de afvoerkunswerken (te Harlingen wordt nu wel boezemwater geloosd en tevens is het totale afvoerdebiet naar het Lauwersmeer toegenomen), nemen de piek (Zuidoost) en het dal (Zuidwest) in het ‘patroon’ in grootte af.

7.3.5 Waterstanden op dag 8

Met een, qua omvang, te verwaarlozen boezembelasting, maar een gecontinueerde boezemafvoer, worden de verhoogde boezempeilen aanzienlijk omlaag gebracht tot een redelijk uniform niveau.

Op dag 8 is er vrijwel geen toevoer op de boezem ($7 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$). De afvoer van water blijft echter gehandhaafd ($275 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$), zodat het bergingsoverschot wordt verkleind (met $268 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$ tot een omvang van $175 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$) en de boezemwaterstanden dalen tot een min of meer uniform niveau van N.A.P. -0.40 m . Alleen in het Noordoostelijk en het Zuidwestelijk gebied liggen de waterstanden plaatselijk op een (aanzienlijk) lager niveau (net als op de zevende dag). Zie bovenstaande figuur H.07.

Het streefpeil van N.A.P. -0.52 m wordt deze dag dus niet gehaald. Omdat aan het einde van de achtste dag een redelijk uniform peilniveau wordt bereikt, zijn in bepaalde gebieden de waterstanden die dag meer gedaald dan op andere locaties, dat heeft enerzijds te maken met de gecontinueerde afvoer van boezemwater en anderzijds met de natuurlijke herverdeling door waterstromingen binnen het systeem onder invloed van waterstandsverhangen.

7.3.6 Conclusie tweede deel

Het blijkt niet mogelijk te zijn om op de achtste dag de boezem weer op streefpeil te krijgen. Wanneer in eerdere dagen was voorgemalen, zou dit waarschijnlijk wel haalbaar zijn geweest. Nu wordt de negende dag begonnen met reeds verhoogde boezempeilen.

Met de achtste dag heeft het boezemsysteem, vanwege de afwezigheid van een aanzienlijke boezembelasting, dus ruimte gekregen om 'orde op zaken te stellen', om terug te keren tot het niveau van het streefpeil. Het blijkt echter niet mogelijk te zijn om dat binnen één dag te realiseren met de afvoercapaciteit die op dat moment beschikbaar is; daarvoor is het in de voorgaande dagen opgebouwde bergingsoverschot te groot, ofwel: de boezemwaterstanden bevinden zich bij aanvang van dag 8 op een te hoog niveau. Het gevolg is dat de negende dag in een minder gunstige uitgangspositie aanvangt, namelijk in een situatie met reeds verhoogde boezemwaterstanden (gemiddeld ca. 0.12 m hoger). Wellicht was het daarom verstandig geweest om op de derde en vierde dag meer boezemwater te lozen dan strikt noodzakelijk was voor het bereiken van het streefpeil (aan het einde van de vierde dag is de gehele boezem namelijk weer op streefpeil).

Dus als voor de derde en vierde dag het beleid was geweest om het boezempeil verder te verlagen dan het streefpeil, omdat duidelijk was dat binnenkort een periode van zware boezembelasting zou optreden (de dagen 5 tot en met 7), zou dat een gunstig effect gehad hebben op de situatie bij aanvang van de negende dag. Omdat het totale afvoervermogen op de dagen 3 en 4 nog lang niet aangesproken was (het Hooglandgemaal en het Woudagemaal waren bijvoorbeeld nog niet ingeschakeld of op minder dan halve kracht, zie bijlage BH.01), was deze extra peilverlaging ook beheertechnisch mogelijk.

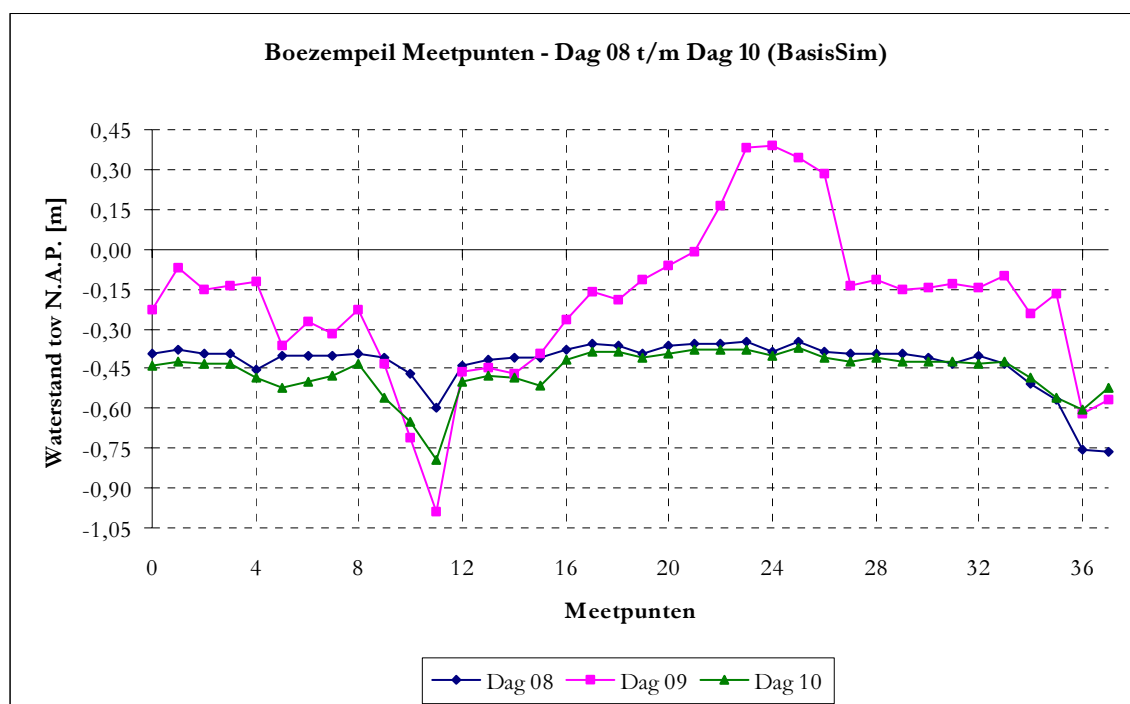
7.4 Derde deel (dag 9 t/m dag 10)

In deze paragraaf worden de op de negende en de tiende dag waargenomen waterstanden in verband gebracht met de boezembelasting van die dagen en de tot standgebrachte boezemafvoer.

7.4.1 Waterstanden op dag 9

Op de negende dag zijn de afvoerkunswerken niet in staat de volledige boezemtoevoer te verwerken, met als gevolg dat in een groot gedeelte van de boezem peilstijgingen optreden (in het ZuidWesten dalen de peilen juist of blijven op hetzelfde niveau)

In de onderstaande figuur H.08 zijn de waterstanden van de dagen 8 tot en met 10 uitgezet voor de verschillende meetpunten in het boezemsysteem.



Figuur H.08: Waterstand Meetpunten – dag 8 t/m dag 10

Op de negende dag overtreft de afwatering op de boezem de lozing op het buitenwater (resp. 441 m³/s/etmaal en 297 m³/s/etmaal), met stijgende waterstanden als gevolg en dus een toenemend bergingsoverschot (een stijging tot 319 m³/s/etmaal).

De peilveranderingen ten opzichte van de vorige dag zijn, gezien over de boezem, niet van gelijke grootte, zie de bovenstaande figuur H.08. Het leidt tot een patroon van waterstanden die gelijkenis vertoont met die van bijvoorbeeld de vijfde dag (Net als de vijfde dag is de negende dag aangevangen met een boezemstelsel waarin de peilen in de verschillende karakteristieke gebieden bij benadering op hetzelfde niveau liggen). In het gehele boezemsysteem stijgen de waterstanden (in de Zuidoosthoek veel meer dan elders), behalve in het Zuidwesten; daar veranderen de peilen vrijwel niet of dalen juist sterk. Dit laatste geldt voor de meetpunten in de directe omgeving van het Hooglandgemaal te Stavoren. De peilen in de buurt van Dokkumer Nieuwe Zijlen en Zoutkamp zijn, net als in voorgaande dagen, naar verhouding aan de lage kant.

7.4.2 Waterstanden op dag 10

De tiende dag wordt gekenmerkt door een zeer geringe boezembelasting en een daarmee vergeleken hoge afvoer van boezemwater. Peildalingen over de gehele boezem zijn het gevolg, hetgeen uiteindelijk resulteert in een redelijk uniform boezempeil, te vergelijken met de situatie op de achtste dag.

Op de tiende dag wordt er vanuit het afwaterende gebied vrijwel niet geloosd op de boezem (11 m³/s/etmaal). De afvoer van boezemwater gaat echter door (257 m³/s/etmaal), zodat de verhoogde boezempeilen gedeeltelijk kunnen worden weggewerkt: in bijna alle gebieden dalen de waterstanden, zie bovenstaande figuur H.08. Zoals ook bij eerdere dagen gezien is, is de gerealiseerde waterstandsdeling niet uniform over de boezem (in het oostelijke deel van de Zuidoosthoek bijvoorbeeld dalen de waterstanden veruit het meest, met ca. 0.80 m). Wel zijn de waterstandsdingen zodanig dat een redelijk uniform boezempeil wordt bereikt aan het einde van de tiende dag: de peilen van de meeste meetpunten bevinden dan zich in het volgende bereik: [N.A.P. – 0.40 m tot N.A.P. –0.50 m]

Uitzondering hierop vormt het gebied rondom het Hooglandgemaal, daar variëren de waterstanden tussen N.A.P. –0.55 m en N.A.P. –0.80 m. De toestand van de boezem aan het einde van de tiende dag is, qua waterstanden, ongeveer dezelfde als van de achtste dag: het boezempeil bevindt zich voor een groot gedeelte van het boezemsysteem op vrijwel hetzelfde niveau. Alleen voor het Zuidwesten en in Centraal-West zijn de waterstanden ‘veel’ lager dan op de achtste dag (verschil ≥ 0.10 m).

7.4.3 Verschil in bergingsoverschotten verklaard

Het waterstandsverloop van de achtste en tiende dag komt grotendeels redelijk overeen; peilverschillen doen zich voor in het Zuid- en Centraalwesten, alwaar het boezemoppervlak groot is. Daarom verschillen de bergingsoverschotten van beide dagen toch aanzienlijk.

Het bergingsoverschot is op de tiende dag afgenomen van 319 m³/s/etmaal tot 72 m³/s/etmaal. In vergelijking hiermee was het bergingsoverschot van de achtste dag nog flink groter, namelijk 175 m³/s/etmaal, dit ondanks de grote overeenkomst in boezemwaterstanden tussen beide dagen, zie figuur H.08. Dit verschil in de omvang van het bergingsoverschot wordt vooral verklaard uit het feit dat de weinige locaties, waarvoor tussen de beide dagen wel relatief grote peilverschillen bestaan, juist in de Zuidwesthoek en in het Centraal-Westen zijn gelegen. Een peilverschil van Y cm staat in dit gebied namelijk voor een veel groter volume aan (extra) boezemwater dan een zelfde peilverschil in bijvoorbeeld het Noordwesten van de provincie. Dit heeft te maken met de aanwezigheid van een groot boezemoppervlak in het Zuid- en Centraalwesten, vanwege de Friese meren die daar gelegen zijn. In het Noordwesten is, voor een gebied van dezelfde grootte, het beschikbare boezemoppervlak veel kleiner.

7.4.4 Conclusie derde deel

De situatie ná de negende dag met extreme boezembelasting is enigszins gunstiger ten opzichte van de situatie bij aanvang van de negende dag: wat lagere boezemwaterstanden (een kleiner bergingsoverschot).

Wederom is gebruikgemaakt van een dag met geringe boezembelasting (dag 10), om de extreme boezemtoevoer van de voorgaande dag (dag 9), welke van een grotere orde bleek te zijn dan de op dat moment beschikbare afvoercapaciteit, verder te verwerken. De eendaagse extreme boezembelasting (dag 9) heeft er enerzijds voor gezorgd dat het gemiddelde boezempeil, welke aan het einde van dag 8 nog hoger lag dan het streefpeil, niet verder verlaagd kon worden tot streefpeil of tot een nog lager peil gedurende de negende én de tiende dag; Terwijl deze peilverlaging mogelijk gewenst was, gezien de extreme periode die nog komen moet (vanaf dag 11);

Anderzijds is de situatie ten opzichte van dag 8 uiteindelijk niet slechter geworden in de zin dat aan het einde van de tiende dag de boezempeilen op hetzelfde niveau liggen of nog lager en het bergingsoverschot afgenomen is: de bergingsmogelijkheden van het boezemsysteem zijn daarmee vergroot.

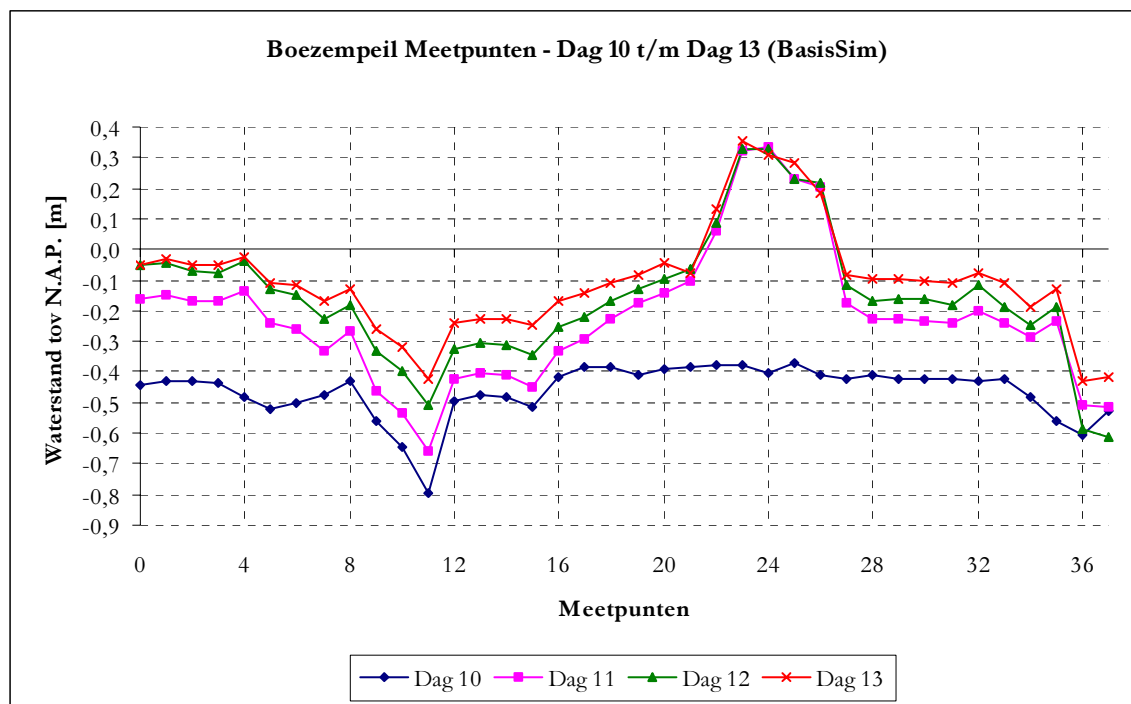
7.5 Vierde deel (dag 11 t/m dag 19)

In deze paragraaf wordt het waterstandsverloop in het boezemsysteem voor de dagen 11 tot en met 19 beschreven en gerelateerd aan de boezembelasting en de boezemafvoer in die dagen.

7.5.1 Waterstanden op dag 11

Op de eerste dag van de vierde extreme belastingperiode worden over de gehele boezem verhogingen van het waterpeil waargenomen, maar met een verschillende grootte.

In de onderstaande figuur H.09 zijn voor de dagen 10 tot en met 13 de waterstanden gegeven, zoals waargenomen in de verschillende karakteristieke gebieden.



Figuur H.09: Waterstand Meetpunten – dag 10 t/m dag 13

De elfde dag is de eerste dag van een reeks met extreme toevoeren op de boezem. Deze dag begint met de boezem op een redelijk uniform peil, zij het dat deze gemiddeld hoger ligt dan het streefpeil, namelijk tussen N.A.P. -0.50 m en N.A.P. -0.40 m, zie dag 10 in de figuur H.09. Op dag 11 overtreft de boezembelasting (454 m³/s/etmaal) weer ruimschoots de boezemafvoer (260 m³/s/etmaal), zodat het bergend vermogen van de boezem wordt aangesproken en de waterstanden stijgen. De peilstijgingen zijn volgens het bekende patroon;

In het Zuidwesten zijn de peilstijgingen gering, waardoor de waterstanden relatief laag liggen. De peilstijgingen nemen vanuit het Zuidwesten via het Centraalwesten naar het Noordwesten in omvang toe. Dit is evenzeer het geval voor de Zuidoosthoek, hoe oostelijker, hoe hoger de waterstanden. Het Centraaloosten en het Noordoosten worden gekenmerkt door een redelijk uniforme peilstijging tot een niveau van ongeveer N.A.P. -0.23 m.

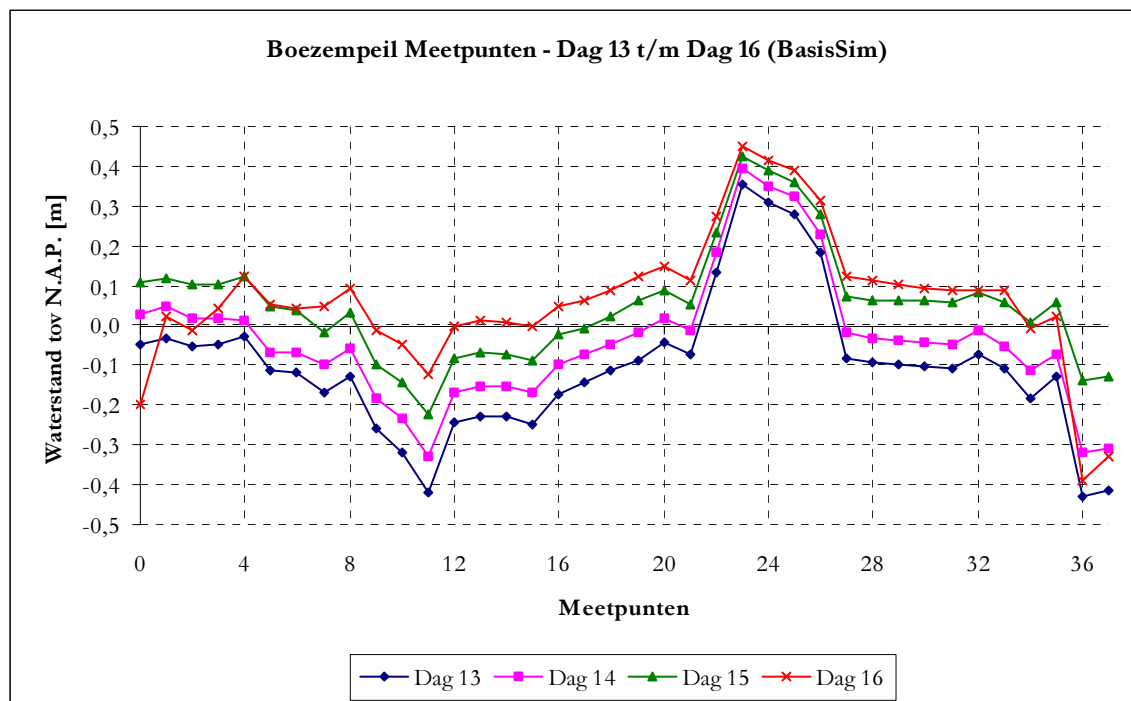
7.5.2 Waterstanden op dag 12 t/m dag 17

Gedurende de vierde extreme periode bestaat een redelijk constante verhouding (qua grootte) tussen de boezemafvoer en de boezemtoevoer. Dit zorgt voor een bijna lineair toenemend bergingsoverschot en dus continu stijgende boezempeilen.

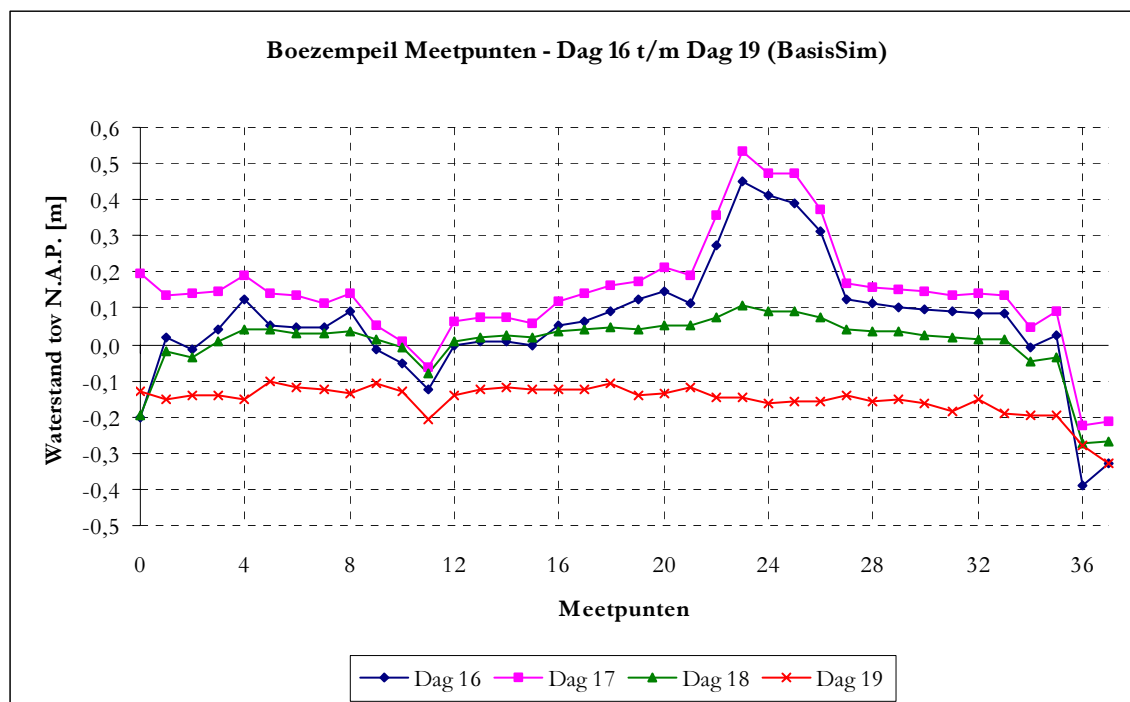
De dagen 12 tot en met 17 zijn qua grootte van de boezemtoevoer en –afvoer vrijwel identiek aan dag 11, zie de figuur H.01: de laagste boezembelasting in deze periode bedraagt $422 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$ op dag 16 en de hoogste belasting is $450 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$ op dag 17. De totale afvoersom varieert tussen $261 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$ op dag 15 en $306 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$ op dag 17.

Gedurende een periode van zeven dagen (dag 11 t/m dag 17) bestaat er dus een redelijk constante verhouding tussen de boezemafvoer en de –toevoer.

Die verhouding ligt in het volgende bereik: $[0.57 - 0.69]$. Het gevolg is dat het bergingsoverschot vanaf de elfde dag bijna lineair toeneemt in de tijd, zie bijlage BH.02, tot een maximum van $1151 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$ op dag 17. Daarnaast wordt het patroon van waterstanden voor de 38 meetpunten over de boezem, zoals ingezet op de elfde dag (en tevens al eerder waar te nemen, bijvoorbeeld op de vijfde dag), ook gedurende de zes volgende dagen gehandhaafd; En onder invloed van een dagelijks toevoeroverschot ligt het waterstandsverloop van elke volgende dag gemiddeld op een hoger niveau. Zie de figuur H.09 en de onderstaande figuren H.10 en H.11. Dus voor de genoemde verhouding tussen de boezembelasting en de boezemafvoer is een dergelijk waterstandsverloop over de boezem blijkbaar de in te nemen toestand; en deze blijft bestaan zolang de afvoer-toevoerverhouding niet ingrijpend verandert.



Figuur H.10: Waterstand Meetpunten – dag 13 t/m dag 16



Figuur H.11: Waterstand Meetpunten – dag 16 t/m dag 19

7.5.3 Waterstanden op dag 18

Op dag 18 is de boezembelasting flink in omvang afgenomen, in tegenstelling tot de boezemafvoer. Peildalingen, welke per gebied in grootte verschillen, zijn daarvan het gevolg. Aan het einde van de dag wordt een redelijk uniform peilniveau verkregen.

Op dag 18 wordt er vanuit de afwaterende gebieden relatief weinig geloosd op het boezemstelsel: 150 m³/s/etmaal. De boezemafvoer blijft echter van dezelfde grootte-orde als in de voorgaande dagen, namelijk 261 m³/s/etmaal, zodat het bergingsoverschot enigszins wordt verminderd (tot 1040 m³/s/etmaal) en de hoge waterstanden over de gehele breedte van de boezem een daling inzetten. Wat opvalt is dat het boezempeil in het Zuidwesten betrekkelijk weinig daalt, terwijl de daling (vanaf de Zuidwesthoek) naar het Noordwesten en naar het Zuidoosten toe steeds groter wordt. De daling in het Centraaloosten en het Noordoosten is hiermee vergelijkbaar. In het oostelijk deel van de Zuidoosthoek lagen de waterstanden aan het einde van dag 17 op een veel hoger niveau dan elders op de boezem. Maar de peildalingen in dat gebied gedurende dag 18 zijn van een grotere omvang dan op andere locaties.

De verschillen in peildalingen tussen verschillende plaatsen op de boezem, leiden ertoe dat aan het slot van dag 18 de waterstanden op een redelijk uniform niveau liggen. De meeste gemeten peilen variëren op dat moment tussen N.A.P. -0.05 m en N.A.P. +0.10 m.

7.5.4 Waterstanden op dag 19

Op dag 19 worden de op dag 18 ingezette peildalingen verder voortgezet, onder invloed van een gecontinueerde boezemafvoer en een tot nul gereduceerde boezembelasting. Het streefpeil van de Friese boezem wordt echter niet bereikt.

Op dag 19 vindt er geen lozing plaats op de boezem. Omdat er nog steeds een groot bergingsoverschot is, wordt wel boezemwater afgevoerd naar het buitenwater (omvang: 242 m³/s/etmaal), maar deze afvoer is lang niet groot genoeg om de boezem weer op streefpeil te krijgen: de boezemwaterstanden variëren aan het einde van dag 19 tussen N.A.P. -0.20 m en N.A.P. -0.10 m; deze niveaus liggen beduidend hoger dan de bedoelde N.A.P. -0.52 m, zie figuur H.11. Dit is ook op te maken uit het nog resterende bergingsoverschot, deze heeft een omvang heeft van 798 m³/s/etmaal. Opvallend is dat de vanaf het einde van dag 18 over de gehele boezem voortgezette peildalingen bij benadering even groot zijn, zodat op dag 19 net als op dag 18 op een redelijk uniform boezempeil wordt uitgekomen (zeker in vergelijking met de situatie op dag 17 en eerder) Dus op dag 18 heeft een, ten opzichte van het toevoervolume, hoog afvoervolume gezorgd voor een nivellering van de op dag 17 bestaande peilverschillen tussen locaties in het boezemsysteem, hetgeen heeft geleid tot een betrekkelijk uniform boezempeil. Op dag 19 zorgt een gecontinueerde hoge boezemafvoer vervolgens voor een gelijkmatige verlaging van deze boezemwaterstand. Zie figuur H.11.

7.5.5 Conclusie vierde deel

De verhouding tussen de boezembelasting en de boezemafvoer bepaalt het waterstandsverloop over de boezem. Onder gunstige omstandigheden kan het bergingsoverschot van dag 19 binnen drie dagen worden weggewerkt.

Voor het waterstandsverloop over de Friese boezem (zoals deze voor de negentien dagen staat weergegeven in de figuren H.05 tot en met H.11) blijkt het verschil uit te maken of de boezembelasting op een gegeven dag de boezemafvoer overtreft of dat juist het afvoervolume groter is dan de boezemtoevoer. In het eerste geval ontstaat een waterstandsverloop met grote peilverschillen in het boezemstelsel (zie in de genoemde figuren de dagen 2, 5 t/m 7, 9 en 11 t/m 17), in het tweede geval wordt in het gehele boezemsysteem een meer gelijkmatig peilniveau gerealiseerd (zie in de figuren de dagen 3, 4, 8, 10, 18 en 19).

Het op dag 19 resterende bergingsoverschot bedraagt 798 m³/s/etmaal. Gemiddeld is in de periode van dag 5 tot en met dag 19 afgevoerd met een debiet van 274 m³/s/etmaal. Wanneer dit afvoervermogen in de dagen na dag 19 blijvend gerealiseerd kan worden en de boezembelasting daarbij, net als op dag 19, op nul blijft steken, kan het genoemde bergingsoverschot in iets minder dan drie dagen worden weggewerkt; de boezemwaterstand is dan weer teruggekeerd tot streefpeil.

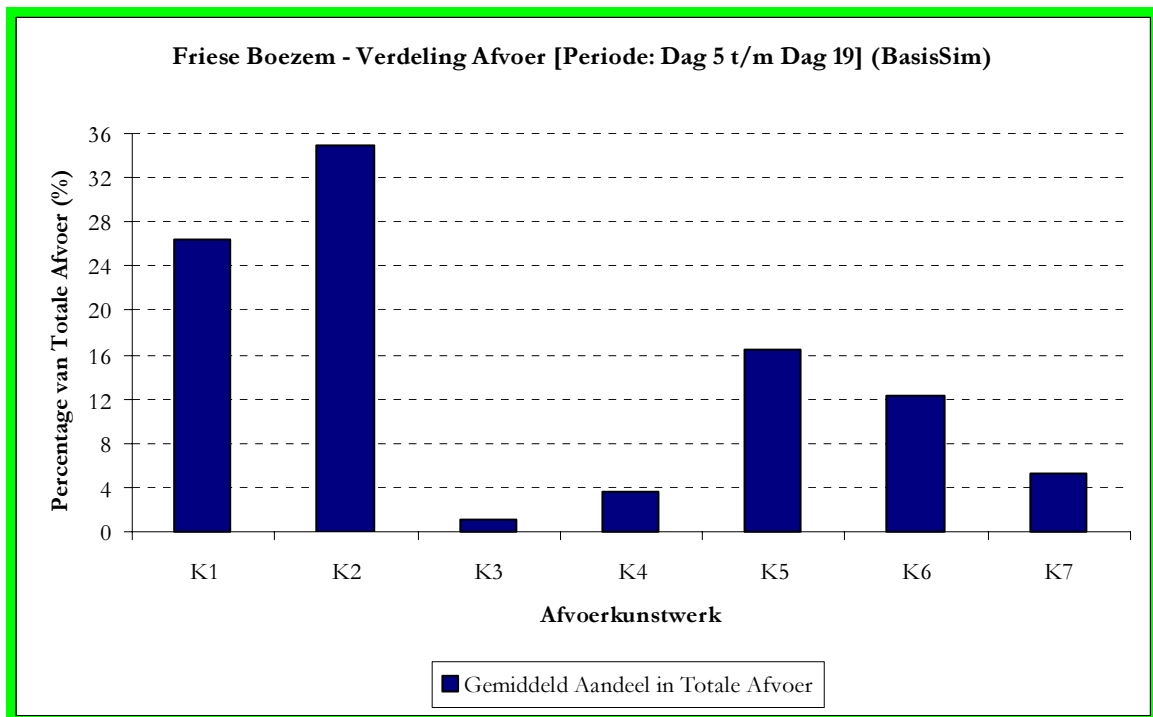
7.6 Inzet afvoerkunstwerken Friese boezem

Hierna wordt de werking nagegaan van de verschillende afvoerkunstwerken van het boezemsysteem, gedurende de simulatieperiode.

7.6.1 Dag 5 tot en met dag 19: aandeel in de boezemafvoer

Het Woudagemaal en het Hooglandgemaal zijn tezamen verantwoordelijk voor een groot gedeelte van de totale dagelijkse boezemafvoer. Daarnaast spelen de sluizen van Dokkumer Nieuwe Zijlen en Zoutkamp een significante rol in de afvoer van boezemwater, in tegenstelling tot de Tsjerk Hiddessluizen.

In de onderstaande figuur H.12 is het procentuele aandeel van de verschillende afvoerkunstwerken in de totale dagelijkse afvoersom (in m³/s/etmaal) weergegeven; dit is een gemiddelde over de periode van dag 5 tot en met dag 19. (de vijfde dag begint met de boezem op streefpeil, dit is dus gelijk aan de uitgangssituatie van de eerste dag) In deze periode varieert de totale dagelijkse afvoersom binnen het volgende bereik: [241 m³/s/etmaal – 306 m³/s/etmaal].



<i>Afvoerkunstwerk</i>	<i>Code</i>	Gem. Aandeel in Totale Afvoer (%)	Minimum (%)	Maximum (%)
Het Woudagemaal	K1	26,4	23,5	29,8
Het Hooglandgemaal	K2	34,8	31,0	39,3
De Kleine Tsjerk Hiddessluizen	K3	1,1	0,0	2,6
De Grote Tsjerk Hiddessluizen	K4	3,7	0,0	8,1
De Dokkumer Nieuwe Zijlen Spuisluis	K5	16,4	14,0	18,9
De Dokkumer Nieuwe Zijlen Schutsluis	K6	12,4	10,4	14,5
De Friese Sluis bij Zoutkamp	K7	5,2	4,2	6,5
Σ		100,0		

Figuur H.12: Procentueel aandeel kunstwerken in boezemafvoer

Om een indicatie te geven van de spreiding in de bijdragen van de kunstwerken aan de dagelijkse afvoersom is in de bovenstaande tabel van figuur H.12 naast het over meerdere dagen gemiddelde aandeel ook de maximale en de minimale bijdrage aangegeven die op een bepaalde dag door het kunstwerk geleverd wordt (in procenten), binnen de genoemde vijftiendaagse periode.

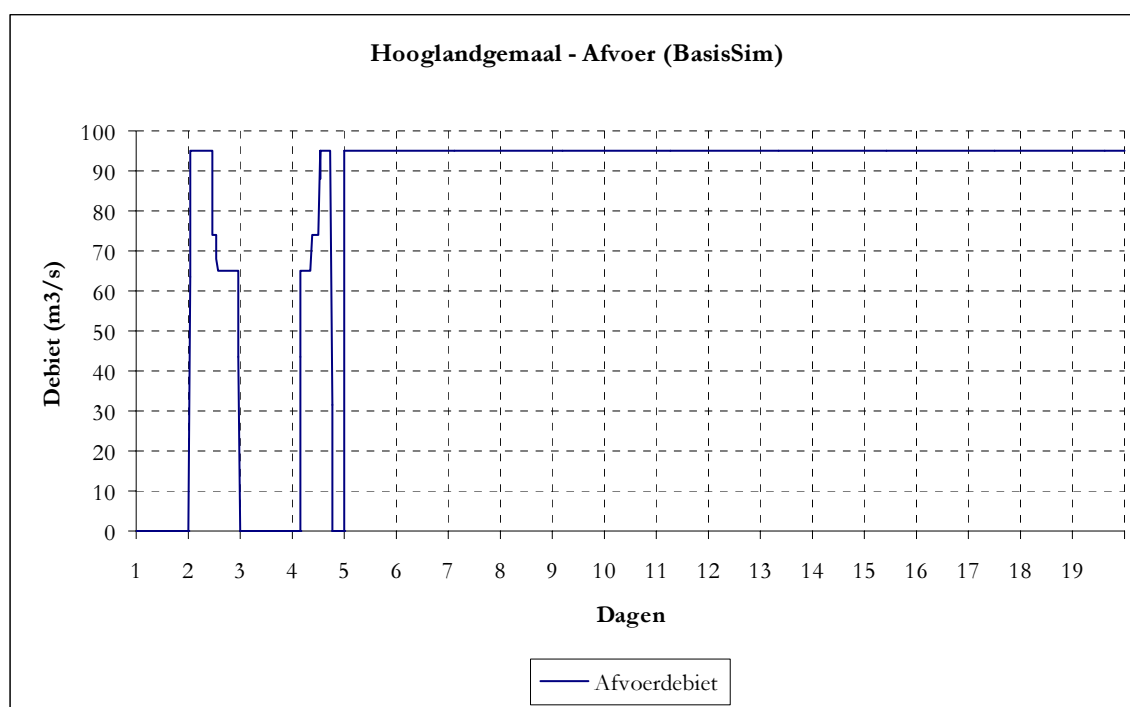
Uit de figuur H.12 wordt duidelijk dat het Woudagemaal en het Hooglandgemaal, in deze simulatie met het boezemstelsel in extreme omstandigheden qua belastingen en randvoorwaarden, een grote bijdrage leveren aan de afvoer van overtollig boezemwater. De Tsjerk Hiddessluizen en de Friese sluis bij Zoutkamp lozen daarentegen relatief weinig water.

Uit de tabel valt op te maken dat in het Zuidwesten van het boezemstelsel gemiddeld 61.2 % van het totale afvoervolume wordt geloosd. In het Noordwesten bedraagt het aandeel in de totale afvoer gemiddeld 4.8 %. In het Noordoosten wordt dan de resterende 34.0 % van het overtollige boezemwater geloosd. Het zwaartepunt van de afvoer ligt dus inderdaad in het Zuidwesten van het boezemsysteem. De bijdrage van de Noordwestelijke afvoer is naar verhouding minimaal.

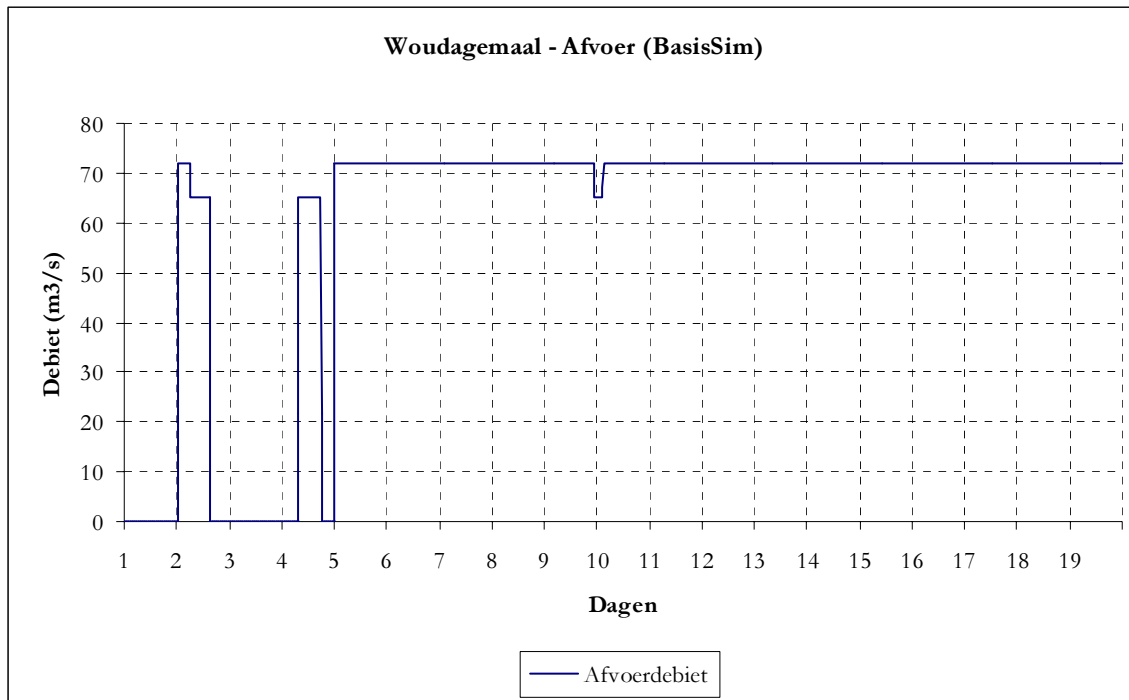
7.6.2 Het Woudagemaal en het Hooglandgemaal

De beide boezemgemalen zijn bijna continu in bedrijf.

Op de eerste en de derde dag van de simulatieperiode worden de twee gemalen in het Zuidwesten van de provincie niet in werking gesteld. Op de tweede en de vierde dag worden de beide gemalen wel ingezet maar niet voortdurend op vol vermogen en/of niet de gehele dag. Zie de onderstaande figuren H.13 en H.14 en bijlage BH.01. Vanaf de vijfde dag tot aan de laatste dag (dag 19) lozen het Hooglandgemaal en het Woudagemaal (vrijwel) continu op volle sterkte, respectievelijk met de volgende capaciteiten: 95 m³/s en 72 m³/s. De gemalen zijn dus in die periode tezamen goed voor een constante dagelijkse afvoer van 167 m³/s/etmaal.



Figuur H.13: Het Hooglandgemaal – Afvoer



Figuur H.14: Het Woudagemaal – Afvoer

7.6.3 De Tsjerk Hiddessluizen

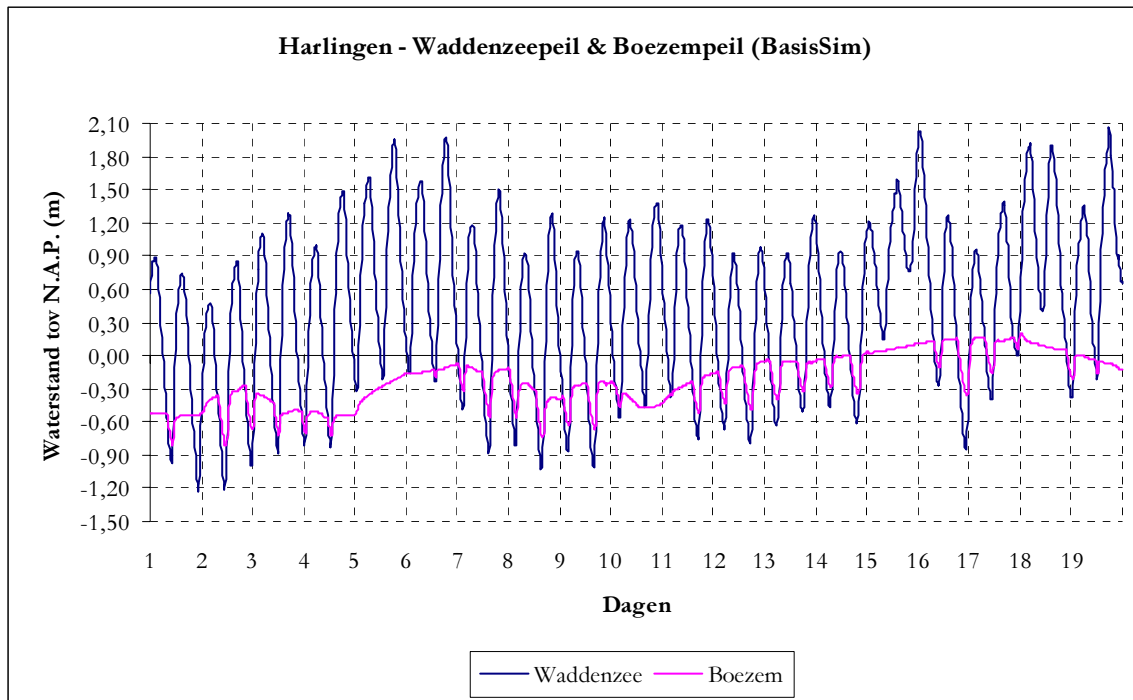
De Grote en Kleine Tsjerk Hiddessluizen dragen in de periode vanaf de vijfde dag nooit meer dan 10.7 % bij aan het totale dagelijkse afvoervolume.

De dagen dat niet gespuid wordt

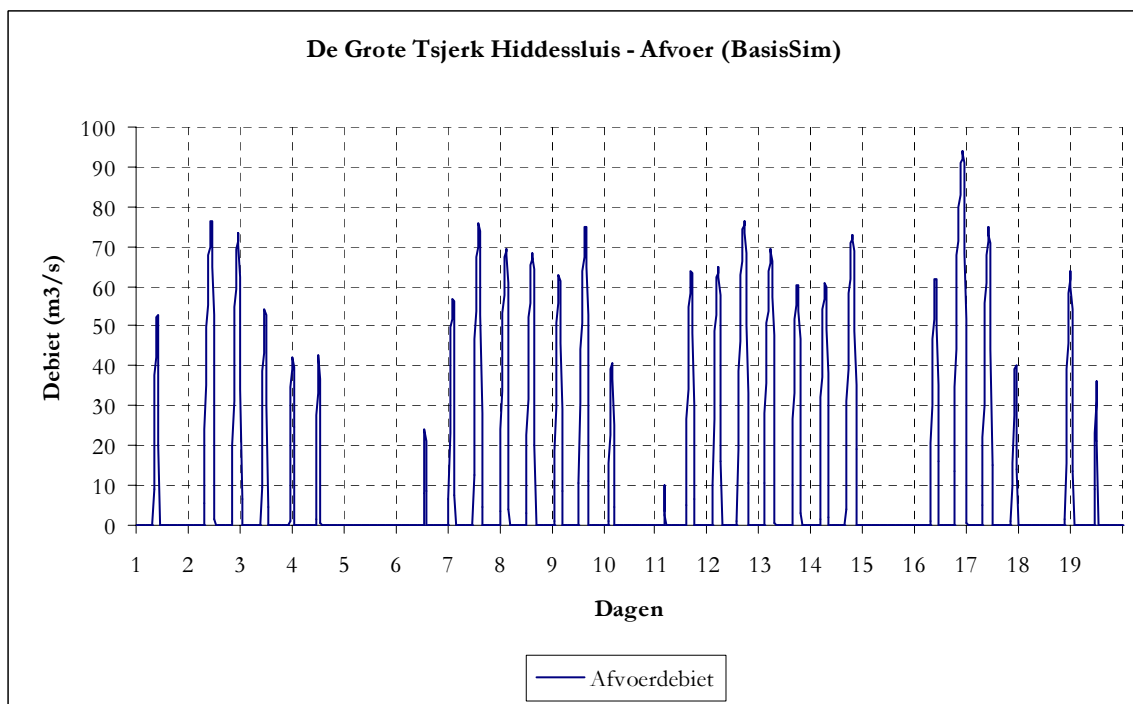
Veel ebperiodes worden benut om te spuien, op een aantal dagen verhinderen hoge buitenwaterstanden echter de afvoer onder vrij verval. Het blijkt dat hoge binnenwaterstanden geen garantie zijn voor (hoge) afvoeren. Het beschikbare verval is steeds bepalend en dat is op elk moment de verhouding tussen het actuele binnen- en buitenpeil.

Het Waddenzeegetijde nabij Harlingen bevat gedurende de negentiendaagse simulatieperiode 36 laagwaterstanden, zie de onderstaande figuur H.15. De getijdeperiode, welke één ebperiode en één vloedperiode bevat, is dus wat langer dan een daghelft. Toch kunnen op de meeste dagen twee laagwaterstanden worden waargenomen.

Voor het lozen van overtollig boezemwater worden door de Tsjerk Hiddessluizen in totaal 28 ebperiodes benut. Op de eerste dag wordt de tweede ebperiode niet gebruikt om te spuien, omdat vanwege het ontbreken van waterbezwaren op de boezem die dag, er geen reden is om water te lozen. In de afvoergrafieken van de Tsjerk Hiddessluizen, zie ter illustratie de onderstaande figuur H.16: de afvoer van de Grote Tsjerk Hiddessluis, valt op dat gedurende de vijfde en zesde dag niet of nauwelijks water geloosd wordt, terwijl daar, gezien de aanzienlijke waterbezwaren op die dagen, wel noodzaak toe bestaat (zie ook bijlage BH.01).



Figuur H.15: Boezempeil en Waddenzeegetijde nabij Harlingen



Figuur H.16: De Grote Tsjerk Hiddessluis – Afvoer

De reden hiervoor is dat de buitenwaterstand (het Waddenzee-getijde) zich, ook in de ebperiodes, bijna continu boven het peil aan de boezemzijde van het kunstwerk bevindt, zodat vrijwel niet onder vrij verval geloosd kan worden. Zie figuur H.15. Op de vijfde dag blijven de sluisen daarom dicht; Op de zesde dag zijn de buitenpeilen (met name de laagwaterstanden) gemiddeld even hoog als de dag ervoor, maar inmiddels is het boezempeil dusdanig gestegen dat toch een geringe lozing mogelijk is.

Aan het begin van de vijfde dag is het niveauverschil tussen het binnen- en buitenpeil relatief groot; in de loop van deze en de volgende dag neemt dit verschil steeds meer af, met als uiteindelijke gevolg dat de tweede laagwaterperiode van de zesde dag benut kan worden om een kleine hoeveelheid water te spuien, omdat nu een positief verval bestaat. Op de zevende dag zijn de buitenwaterstanden lager dan voorheen en met het boezempeil inmiddels op een hoog niveau wordt er naar verhouding behoorlijk gespuid, zie de figuur H.16 en bijlage BH.01.

Op de vijftiende dag heeft het boezempeil nabij Harlingen een hoog niveau bereikt (namelijk > N.A.P. +0.00 m: de grootste peilstijging tot dan toe), maar op die dag is de buitenwaterstand ook extreem hoog: het volledige etmaal ligt deze nog hoger dan de binnenwaterstand, zie figuur H.15. Daarom blijven de Tsjerk Hiddessluizen gesloten en vindt er die dag geen afvoer van overtollig boezemwater plaats vanuit die locatie in het boezemsysteem.

Ook op de achttiende dag kan een ebperiode, ondanks een sterk verhoogd boezempeil, niet benut worden en ook ditmaal vanwege laagwaterstanden die nog een niveau hoger liggen.

Stijgend boezempeil bij gestremde afvoer

Wanneer spuien niet mogelijk is, stijgen de binnenwaterstanden, zodat vanuit de boezem gewerkt wordt naar de creatie van een positief verval over de sluizen.

Er bestaat een wisselwerking tussen de binnen- en buitenpeilen: als op dag A niet gespuid kan worden, omdat gedurende die dag geen positief verval aanwezig is, heeft dat tot gevolg dat de peilen aan de boezemzijde stijgen (zie figuur H.15, de vijfde dag), mits het overtollige boezemwater ondertussen niet elders afgevoerd wordt. Die peilstijgingen zijn misschien op zich ongewenst, maar zijn juist weer gunstig voor het spuien, omdat hiermee toegewerkt wordt naar het creëren van een positief verval over de sluizen. Met de peilstijgingen aan de boezemzijde neemt dus de kans toe dat in de dagen die volgen op dag A, wél (een aanzienlijk volume) gespuid kan worden (zie figuur H.15, de zesde en de zevende dag), mits de buitenwaterstanden inmiddels niet een evenredige stijging ondergaan. Tijdelijk sterk verhoogde buitenpeilen hoeven op termijn dus niet per se nadelig te zijn voor het peilbeheer van het boezemstelsel, omdat de hierdoor veroorzaakte boezempeilstijgingen ook bijdragen aan grotere afvoermogelijkheden (voor wat betreft het spuien onder vrij verval).

Spuien: fluctuerende afvoervolumes

Het door de Tsjerk Hiddessluizen gerealiseerde afvoervolume kan van dag tot dag sterk verschillen. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat het spuien afhankelijk is van het beschikbare verval over het kunstwerk en dus van het verloop van de binnen- en buitenwaterstanden.

In bijlage BH.01 is voor de Grote Tsjerk Hiddessluis het daggemiddelde debiet in een figuur uitgezet tegen de tijd (in m³/s/etmaal). Uit deze figuur én de figuur H.16 valt bijvoorbeeld op te maken dat op de zevende dag beide laagwaters worden benut om water te lozen, hetgeen afvoerpieken geeft van respectievelijk 56 m³/s en 76 m³/s; daggemiddeld betekent dit dan een afvoerdebiet van 14.2 m³/s/etmaal. In de figuur van de daggemiddelde debieten is te zien dat de afvoer via de Grote Tsjerk Hiddessluis per dag sterk kan variëren; op negen dagen bevindt het afvoerdebiet zich tussen 13 m³/s/etmaal en 19 m³/s/etmaal, met een uitschieter naar 24 m³/s/etmaal, op acht dagen ligt het gemiddelde afvoerdebiet in het bereik van 1 m³/s/etmaal tot 7 m³/s/etmaal en op twee dagen vindt er geen afvoer plaats. Op de negen dagen dat er een behoorlijke afvoer is, zijn per dag de beide laagwaters gebruikt om boezemwater te lozen, zie figuur H.15. Op de acht dagen dat er naar verhouding weinig afvoer plaatsvindt, kan per dag één van de twee laagwaters niet benut worden omdat het boezempeil te laag ligt óf er wordt gedurende de beide laagwaters wél geloosd, maar dan is de spuiduur relatief kort, zodat het afvoervolume betrekkelijk gering is. De sterke fluctuaties in het gerealiseerde afvoervolume via de Grote Tsjerk Hiddessluis wordt dus veroorzaakt door het feit dat de afvoer direct afhankelijk is van het beschikbare verval over de sluis.

Aangezien de laagwaterstanden van het Waddenzeegetijde in de tijd sterk variëren, evenals het boezempeil nabij Harlingen, zie figuur H.15, is ook het verval sterk variabel. Dit verklaart de waargenomen variaties in het afvoervolume. De bovenstaande waarnemingen voor de Grote Tsjerk Hiddessluis gaan ook op voor de Kleine Tsjerk Hiddessluis.

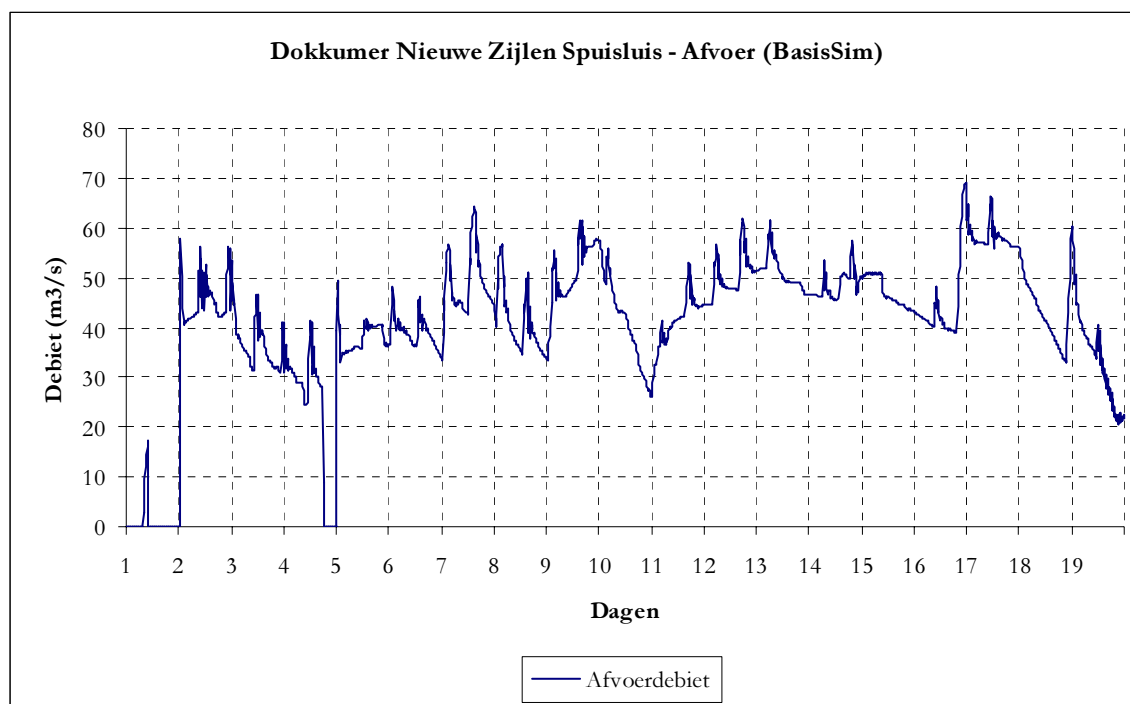
7.6.4 De sluizen van Dokkumer Nieuwe Zijlen en Zoutkamp

De sluizen van Dokkumer Nieuwe Zijlen en Zoutkamp in het Noordoosten zorgen voor een bijna continue lozing van boezemwater en vormen mede daardoor het tweede belangrijke afvoerpunt voor de Friese boezem, naast de gemalen in het Zuidwesten.

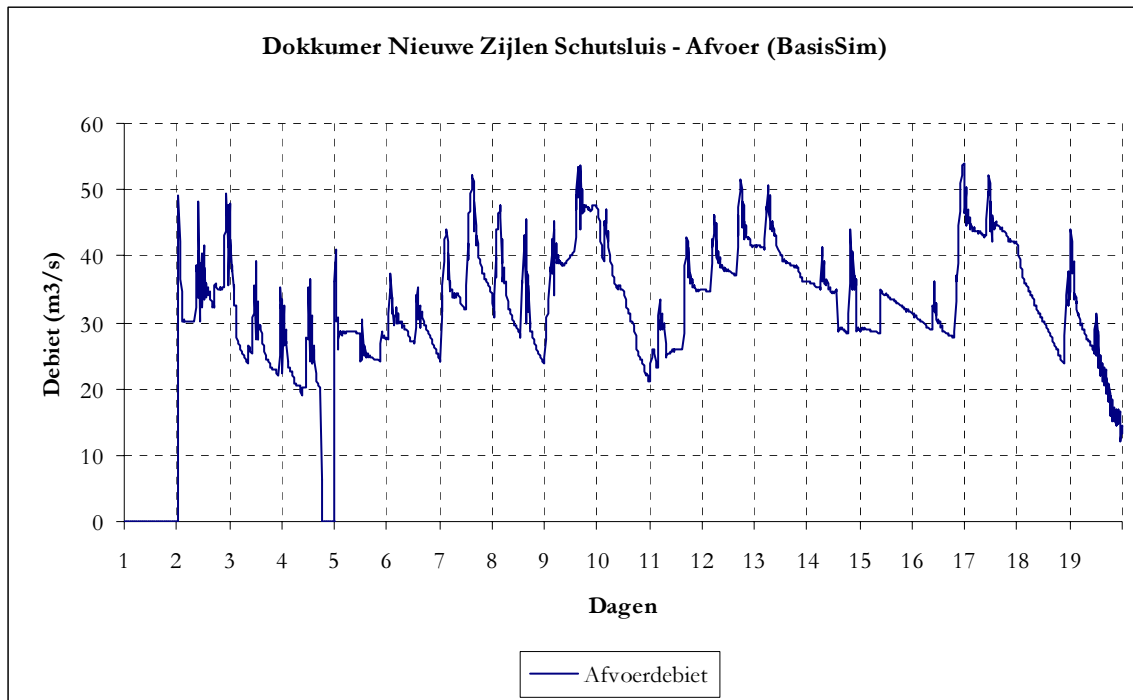
Voortdurende lozing

Doordat er bijna voortdurend verval is over de sluizen van Dokkumer Nieuwe Zijlen en Zoutkamp, wordt voor het overgrote deel van de negentiendaagse simulatieperiode boezemwater afgevoerd.

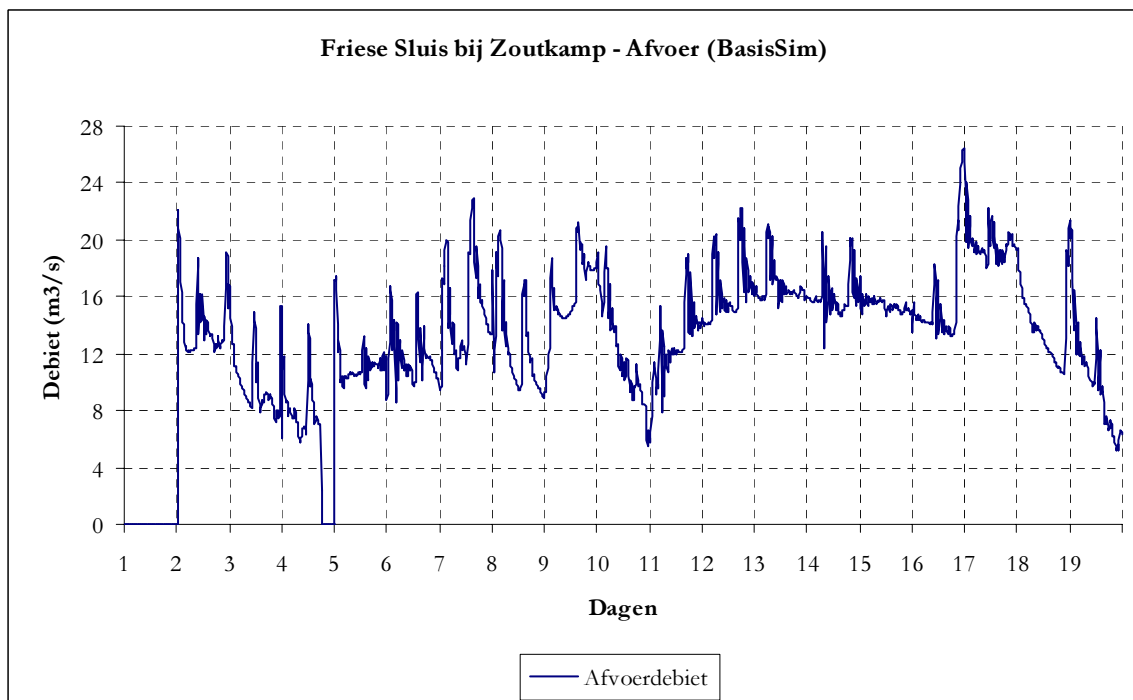
De afvoergrafieken van de spuisluis en de schutsluis van Dokkumer Nieuwe Zijlen en van de Friese sluis bij Zoutkamp, zie de onderstaande figuren H.17, H.18 en H.19, laten zien dat, behalve op dagdelen van de eerste en vierde dag, er voortdurend boezemwater geloosd wordt (tegen het einde van de vierde dag bereikt het boezempeil het streefpeil, zodat de sluizen worden gesloten). Blijkbaar is anders dan bij Harlingen (de Tsjerk Hiddessluizen) de buitenwaterstand (hier: het Lauwersmeerpeil) vrijwel continu lager dan de binnenwaterstand (d.i. het plaatselijke boezempeil); er is altijd positief verval beschikbaar.



Figuur H.17: De spuisluis van Dokkumer Nieuwe Zijlen – Afvoer



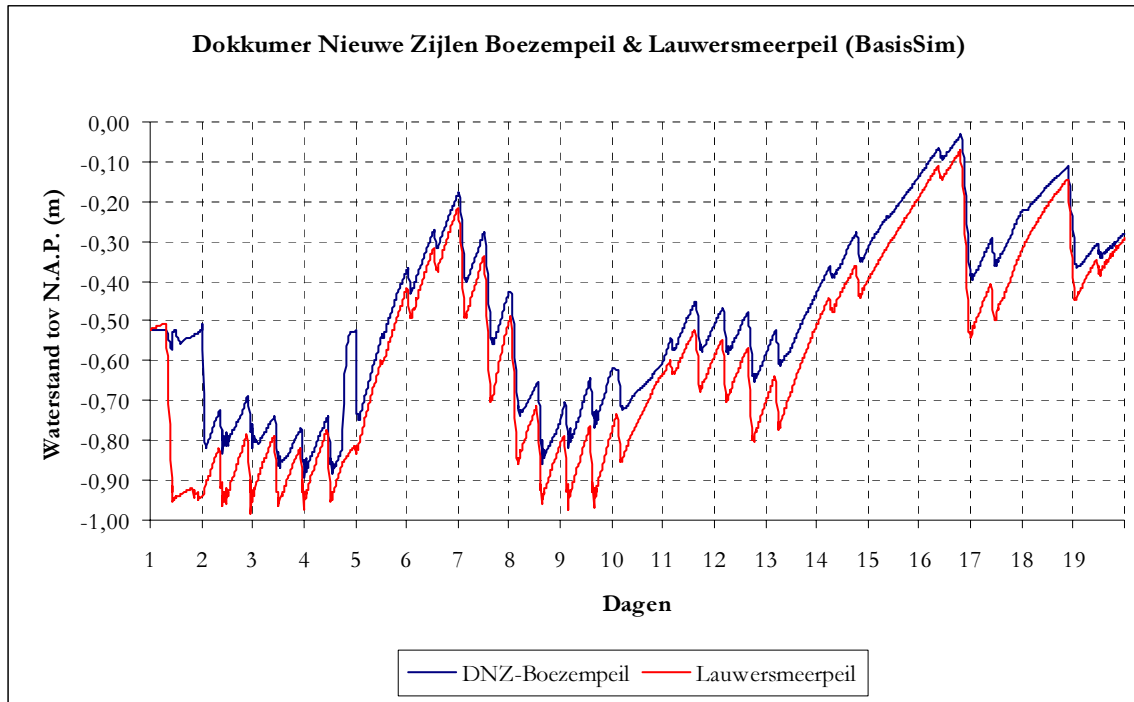
Figuur H.18: De schutsluis van Dokkumer Nieuwe Zijlen – Afvoer



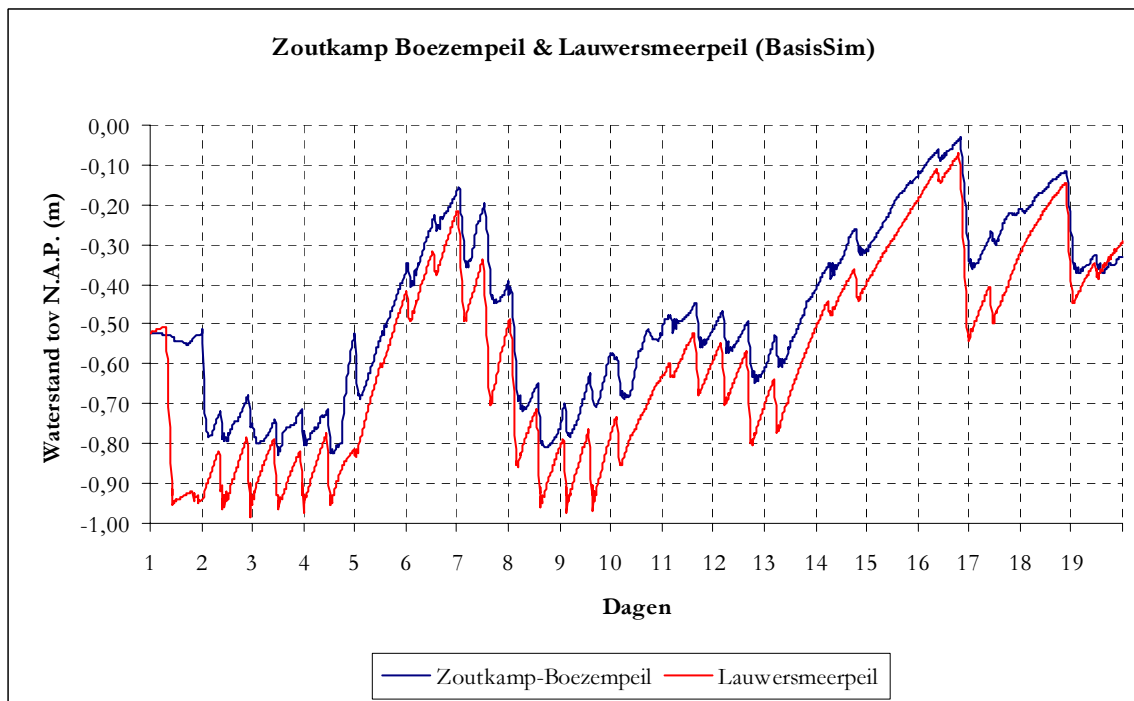
Figuur H.19: De Friese sluis bij Zoutkamp – Afvoer

Wanneer het waterstandsverloop van een punt op de boezem in de buurt van Dokkumer Nieuwe Zijlen of Zoutkamp wordt vergeleken met het verloop van het Lauwersmeerpeil, valt op dat er onderling een grote overeenkomst is: het patroon / de vorm van de grafieken is vrijwel hetzelfde. Zie de onderstaande figuren H.20 en H.21. Daarnaast is waar te nemen dat de waterstand van het boezempunt vrijwel de gehele simulatieperiode boven die van het Lauwersmeer ligt;

er is dus inderdaad bijna voortdurend een positief verval (d.i. 'richting' het Lauwersmeer) over de sluizen aanwezig. Het water stroomt dus altijd in één richting door de sluizen, namelijk vanuit de Friese boezem naar het Lauwersmeer. Bij een optredend negatief verval (d.i. het Lauwersmeerpeil hoger dan het boezempeil) zouden de sluizen onmiddellijk gesloten worden.



Figuur H.20: Boezempeil Dokkumer Nieuwe Zijlen en Lauwersmeerpeil



Figuur H.21: Boezempeil Zoutkamp en Lauwersmeerpeil

Gelijkmatig afvoerpatroon

Voor de sluizen van Dokkumer Nieuwe Zijlen en Zoutkamp geldt dat, gezien over de simulatieperiode, de dagelijkse afvoervolumes van dezelfde orde van grootte zijn.

Uit de grafieken waarin het daggemiddelde afvoerdebiet is uitgezet tegen de tijd voor de sluizen van Dokkumer Nieuwe Zijlen en Zoutkamp, zie bijlage BH.01, wordt duidelijk dat het lozingspatroon van de kunstwerken redelijk gelijkmatig is; voor de D.N.Z.-spuisluis bevindt het afvoerdebiet zich voor 16 van de 19 dagen tussen 34 m³/s/etmaal en 51 m³/s/etmaal; voor de D.N.Z.-schutsluis geldt dat het gemiddelde afvoerdebiet, behalve voor de eerste en vierde dag, in het volgende bereik ligt: 25 m³/s/etmaal tot 44 m³/s/etmaal; via de Friese sluis bij Zoutkamp wordt op de meeste dagen geloosd met een daggemiddeld debiet variërend van 10 m³/s/etmaal tot 17 m³/s/etmaal. Hiermee vergeleken vertonen de Tsjerk Hiddessluizen een veel grilliger afvoerpatroon.

Sluizen volledig geopend en open verbinding met het Lauwersmeer

De sluizen van Dokkumer Nieuwe Zijlen en Zoutkamp lozen met de hoogste capaciteit, die in de geldende omstandigheden mogelijk is. Daardoor ontstaat een permanente, open verbinding met het Lauwersmeer.

Uit gegevens over de bedrijfstoestanden van de sluizen van Dokkumer Nieuwe Zijlen en Zoutkamp blijkt dat de kunstwerken tijdens het continue lozen van overtollig boezemwater volledig geopend zijn. De doorstroomopeningen van de sluizen en daarmee de afvoerdebieten worden dus niet (tijdelijk) verkleind door deuren of schuiven die ten dele gesloten worden, hetgeen een gevolg zou kunnen zijn van een beslisregel in de sturing. De op deze wijze gerealiseerde afvoerdebieten zijn in de gegeven omstandigheden dus de maximaal haalbare. In feite staan de sluizen na de eerste dag de gehele 18-daagse periode in een open verbinding met het Lauwersmeer (op een korte tijd op de vierde dag na), het boezemwater kan vrij langs de kunstwerken stromen. Daarom vormt het Lauwersmeer als het ware een uitbreiding van de Friese boezem. Het (bergend) boezemoppervlak wordt hierdoor aanzienlijk vergroot. Deze bijna permanente open verbinding verklaart het feit dat het waterstandsverloop van locaties aan de boezemzijde van het afvoerkunstwerk grote gelijkenis vertoont met die van het Lauwersmeer, zie de figuren H.20 en H.21.

Lauwersmeer is onderdeel van Friese boezem

Doordat voor het Lauwersmeer een lager streefpeil wordt gehanteerd dan voor de Friese boezem, is het Lauwersmeer het laagste punt in het Noordoosten van Friesland, zodat overtollig boezemwater daar vrijelijk naartoe kan stromen.

Enerzijds maakt het Lauwersmeer, onder de gegeven extreme omstandigheden, deel uit van het Friese boezemstelsel, anderzijds wordt voor beiden een apart peilbeheer gehanteerd, met eigen sturingsregels, etc.

Bovendien zijn de streefpeilen van beide watersystemen verschillend. Voor de Friese boezem wordt getracht het gemiddelde boezempeil in de buurt van N.A.P. -0.52 m te houden. Voor het Lauwersmeer wordt een streefpeil van N.A.P. -0.93 m gehandhaafd.

Het blijkt dat in het Noordoostelijk deel van de provincie Friesland de boezempeilen nabij de afvoerkunstwerken van Dokkumer Nieuwe Zijlen en Zoutkamp voortdurend de laagste zijn ten opzichte van de peilen van andere meetpunten in dat gebied.

Zoals te zien valt in de figuren H.20 en H.21 ligt het Lauwersmeerpeil structureel nog lager dan deze laagste boezempeilen; vanaf het moment dat de sluizen van Dokkumer Nieuwe Zijlen en Zoutkamp worden geopend (aan het einde van de eerste dag) stijgt en daalt het Lauwersmeerpeil bijna synchroon met deze boezempeilen, maar dus altijd op een lager niveau, zodat het verhang vanaf de Friese boezem naar het Lauwersmeer blijft bestaan.

In het Noordoosten is het Lauwersmeer dus structureel het laagste punt van het (vergrootte) Friese boezemstelsel. Dat verklaart ook de permanente waterstroming naar dit meer vanuit de boezem.

Met het hanteren van een streefpeil op het Lauwersmeer, dat lager ligt dan het streefpeil van de Friese boezem wordt dus als het ware een laaggelegen reservoir gecreëerd waar naartoe (een deel van) het overtollige Friese boezemwater continu en op natuurlijke wijze kan afstromen. Het gevoerde peilbeheer op het Lauwersmeer is dus in principe gunstig voor de Friese boezem.

Spuisluizen van Lauwersoog hebben invloed op boezempeil

De watertoevoer vanuit Friesland en Groningen veroorzaakt op het Lauwersmeer peilstijgingen die met de spuisluizen van Lauwersoog genivelleerd kunnen worden.

Zoals hiervoor gezien, stroomt overtollig boezemwater via de sluizen van Dokkumer Nieuwe Zijlen en Zoutkamp naar het, qua waterpeil, laagst gelegen punt in het Noordoostelijke gebied van de provincie, het Lauwersmeer. Deze watertoevoer vanuit de Friese boezem tezamen met lozingen vanuit de provincie Groningen en vanuit de zogenaamde afgekoppelde gebieden (gelegen in de provincie Friesland) veroorzaakt peilstijgingen op het meer, die met waterafvoer naar de Waddenzee via de spuisluizen van Lauwersoog (in principe) weer teniet gedaan kunnen worden; met deze spuisluizen moet het Lauwersmeerpeil namelijk beheerst worden; daarbij wordt toegewerkt naar het handhaven van het streefpeil.

De afvoer via de spuisluizen van Lauwersoog heeft merkbaar invloed tot in de Friese boezem; dit is af te leiden uit de waterstanden en de gerealiseerde afvoervolumes.

In de afvoergrafieken van de sluizen van Dokkumer Nieuwe Zijlen en Zoutkamp, zie de figuren H.17, H.18 en H.19, zijn met korte tussenpozen afvoerpieken waar te nemen. De momenten dat die afvoerpieken optreden komen overeen met het tijdstip waarop de spuisluizen van Lauwersoog geopend worden om overtollig water te spuien. De afvoer van Lauwersmeerwater naar de Waddenzee vergroot dus de toevoer van boezemwater via de kunstwerken naar het Lauwersmeer. Op die manier heeft de lozing bij Lauwersoog invloed tot in de Friese boezem; dat is ook te zien in de figuren H.20 en H.21, de peildalingen in het verloop van het boezempeil zijn, net als voor het Lauwersmeerpeil, het gevolg van het spuien bij Lauwersoog.

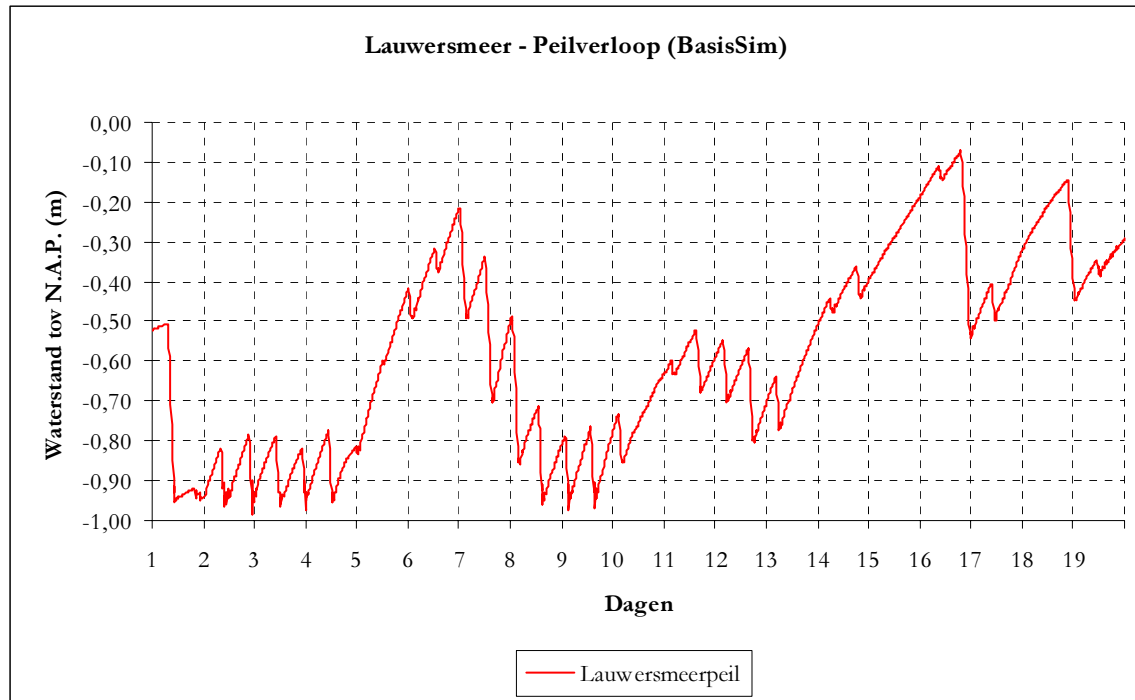
De mate waarin de spuisluizen van Lauwersoog overtollig water afvoeren en dus het streefpeil van het Lauwersmeer handhaven, bepaalt blijkbaar direct de realiseerbare afvoervolumes via de sluizen van Dokkumer Nieuwe Zijlen en Zoutkamp. Het afvoerbeleid voor het Lauwersmeer beïnvloedt dus het peilverloop van de Friese boezem.

7.7 Het Lauwersmeer en de sluizen van Lauwersoog

7.7.1 Streefpeil Lauwersmeer niet gehandhaafd

De spuisluisen van Lauwersoog zijn onvoldoende in staat overtollig water te lozen; de eerste grote waterstandsverhoging kan nog geheel genivelleerd worden, met de tweede peilstijging, vanaf de tiende dag, komt het Lauwersmeer niet meer terug op het niveau van het streefpeil.

In de onderstaande figuur H.22 is het peilverloop van het Lauwersmeer uitgezet tegen de tijd.

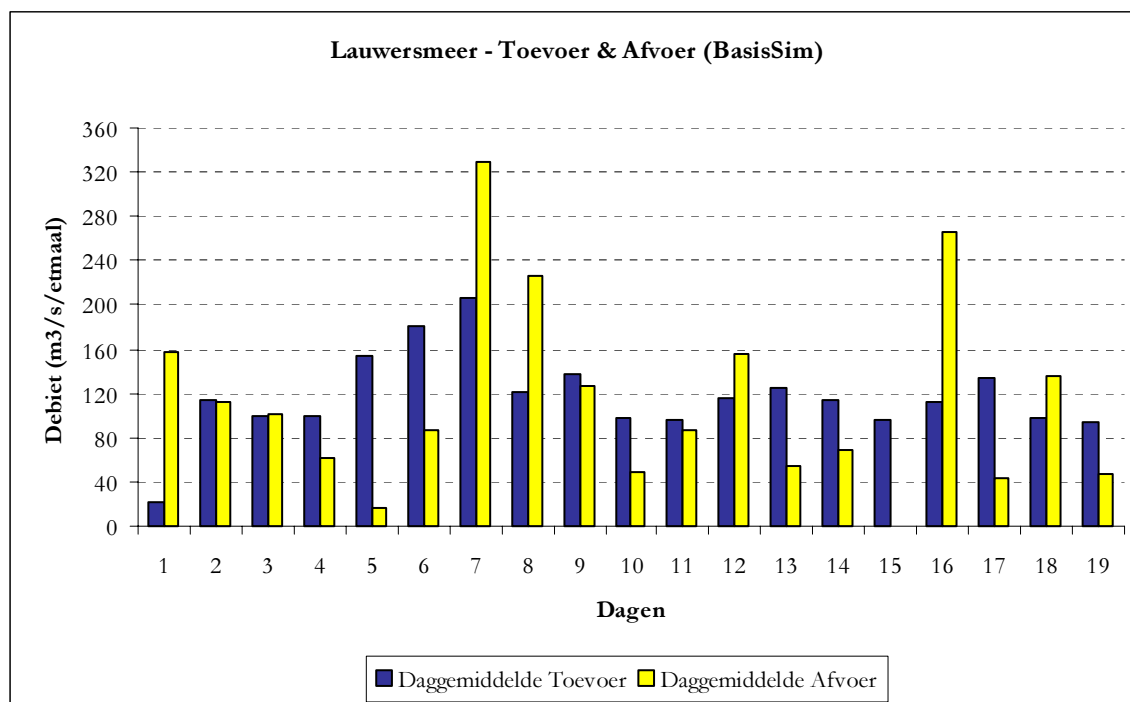


Figuur H.22: Peilverloop Lauwersmeer

De figuur H.22 laat zien dat het streefpeil van het Lauwersmeer (N.A.P. $-0,93$ m) lang niet altijd gehandhaafd kan blijven. Zo valt een flinke peilstijging waar te nemen vanaf dag 5, die doorgaat tot aan het einde van dag 6. Vanaf dag 7 wordt een daling ingezet, die in de loop van dag 8 resulteert in een waterstandsniveau dat ligt in de buurt van het streefpeil. Vanaf dag 10 stijgt de waterstand weer en hoewel er na deze dag ook nog verscheidene peildalingen voorkomen (door het spuien bij Lauwersoog), komt het Lauwersmeerpeil niet meer terug op het streefpeil.

Op de dagen 5 en 6 overtreft de watertoevoer op het Lauwersmeer veruit de waterafvoer naar de Waddenzee, vandaar de optredende peilstijgingen. Het verschil in omvang tussen de toevoer en afvoer over de twee dagen bedraagt: $231 \text{ m}^3/\text{s/etmaal}$ (d.i. $138 \text{ m}^3/\text{s/etmaal} + 93 \text{ m}^3/\text{s/etmaal}$). Zie de onderstaande figuur H.23.

Op de dagen 7 en 8 is het omgekeerde het geval: de afvoer van water is groter dan de toevoer. Nu is het verschil in grootte over twee dagen: $230 \text{ m}^3/\text{s/etmaal}$ (d.i. $124 \text{ m}^3/\text{s/etmaal} + 106 \text{ m}^3/\text{s/etmaal}$). Dus het toevoeroverschot van de dagen 5 en 6 is in de twee dagen erna weer volledig weggewerkt, doordat een afvoeroverschot gecreëerd is. Daarom is op het einde van dag 8 het Lauwersmeerpeil weer vrijwel terug op streefpeil: dit is hetzelfde niveau als op de vierde dag, de dag vóór de tweedaagse periode van hoge toevoerbelasting. Zie figuur H.22. Op de negende dag vervolgens, is de afvoer bijna gelijk aan de toevoer van water naar het Lauwersmeer (resp. $126 \text{ m}^3/\text{s/etmaal}$ en $137 \text{ m}^3/\text{s/etmaal}$), zodat het meerpeil rond het streefpeil blijft schommelen.



Figuur H.23: Lauwersmeer – Watertoevoer en waterafvoer

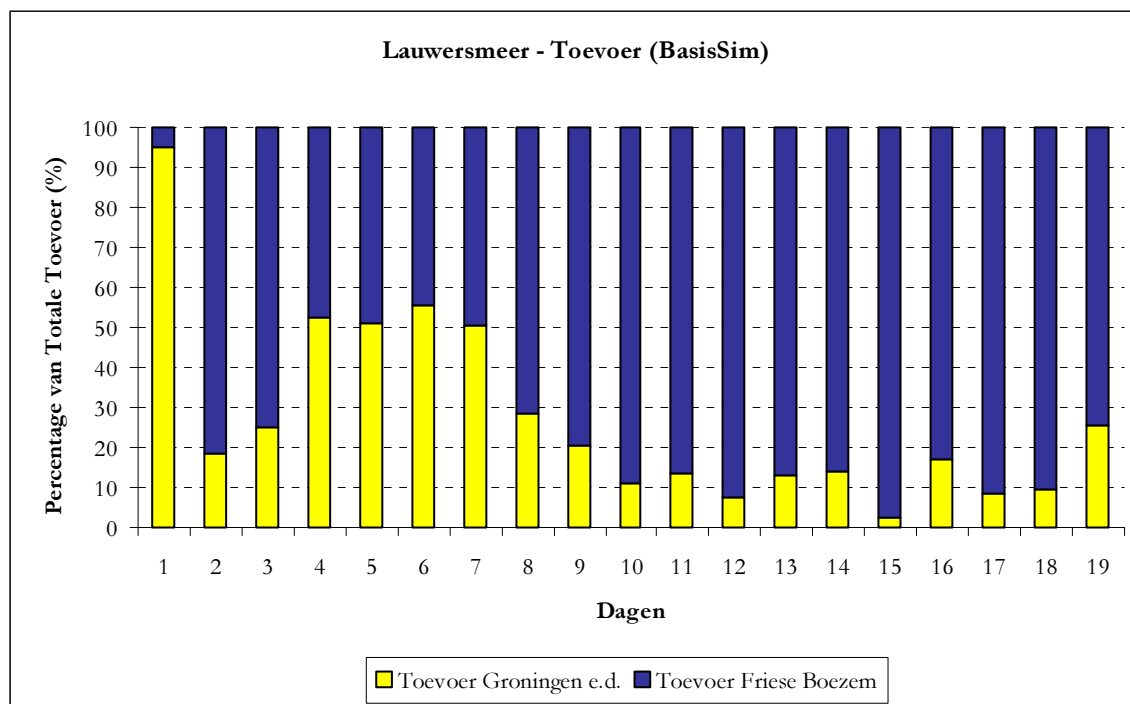
Uit de figuur H.23 is op te maken dat vanaf de tiende dag de dagelijkse toevoer van overtollig water de dagelijkse afvoer overtreft, behalve op de dagen 12, 16 en 18. Het toevoeroverschot laat de gemiddelde waterstand stijgen, het afvoeroverschot zorgt voor een daling van het gemiddelde peil, maar het blijkt dat de afvoeroverschotten op de genoemde drie dagen onvoldoende groot zijn om het peil weer terug te brengen op streefpeil: Na een dag met een afvoeroverschot, bijvoorbeeld dag 16, wordt de peilstijging weer voortgezet, als is het vanaf een wat lager niveau. Zie figuur H.22. De spuisluizen van Lauwersoog zijn in de gegeven omstandigheden dus niet in staat om het Lauwersmeer op streefpeil te houden.

7.7.2 Verdeling van de toevoer naar het Lauwersmeer.

Voor het merendeel van de negentien simulatiedagen domineert het Friese boezemstelsel, qua toevoervolume, de belasting op het Lauwersmeer.

In de onderstaande figuur H.24 is per dag de verdeling van de toevoer naar het Lauwersmeer uitgezet (in procenten). Het gaat enerzijds om de toevoer vanuit de provincie Groningen via de Reitdiepsluizen en vanuit een zogenaamd ‘afgekoppeld’ gebied via het gemaal Ezumazijl (Friesland) en anderzijds om de toevoer vanuit het Friese boezemstelsel.

Uit de figuur H.24 blijkt dat vanaf de negende dag de toevoer naar het Lauwersmeer voornamelijk bepaald wordt door de lozing vanuit de Friese boezem, deze laatste is dan namelijk $\geq 80\%$ van de totale toevoerbelasting (behalve op de laatste dag: 74%). Op de vijfde en zesde dag, de dagen met een naar verhouding hoge belasting op het Lauwersmeer, wordt de toevoer van overtollig water voor 50% bepaald door de Reitdiepsluizen (Groningen) en het Gemaal Ezumazijl en voor 50% door Dokkumer Nieuwe Zijlen (spuisluis en schutsluis) en de Friese sluis bij Zoutkamp.



Figuur H.24: Lauwersmeer – Verdeling van de watertoevoer

7.7.3 Niet alle laagwaterperiodes kunnen worden gebruikt

De spuisluizen van Lauwersoog benutten niet alle laagwaterperiodes om te spuien; de oorzaak is dan dat geen of een te klein verval over de sluisen aanwezig is. In dagen met weinig waterafvoer stijgt het Lauwersmeerpeil, hetgeen gunstig is voor de realisatie van verval, zodat dagen met hoge afvoervolumes volgen.

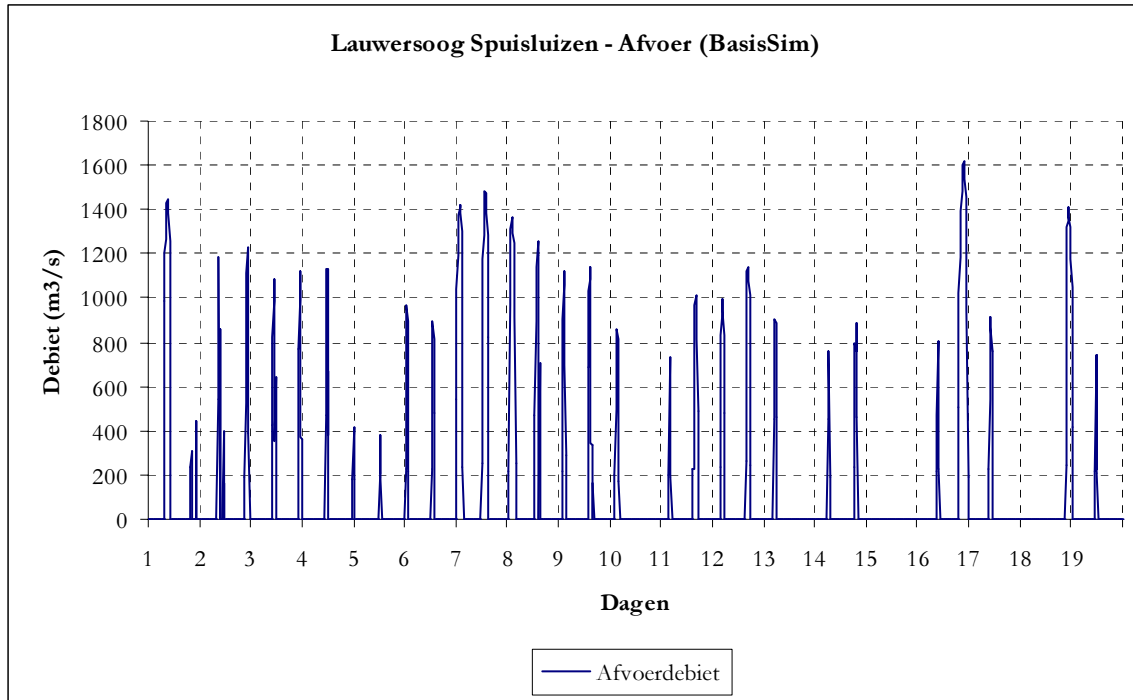
Vanaf de tiende dag bevindt het Lauwersmeerpeil zich continu boven N.A.P. -0.93 m, het streefpeil. Dit betekent dat vanaf dat moment elke voorkomende laagwaterperiode zal worden aangegrepen om het overtollige water te spuien, vooropgesteld dat het beschikbare verval in zo'n situatie groter is dan 0.12 m (sturingsregel). Desalniettemin blijft, zoals gezien, de gerealiseerde lozing qua volume achter bij het binnenkomende water; op drie dagen na (zie hiervoor).

Het Waddenzeegetijde nabij Lauwersoog kent gedurende de negentiendaagse simulatieperiode 36 laagwaterstanden. Dus er komen bijna twee laagwaters per dag voor. Uit de onderstaande figuur H.25 waarin het afvoerverloop van de spuisluizen van Lauwersoog staat weergegeven valt af te leiden dat juist vanaf de tiende dag niet elke ebperiode wordt benut.

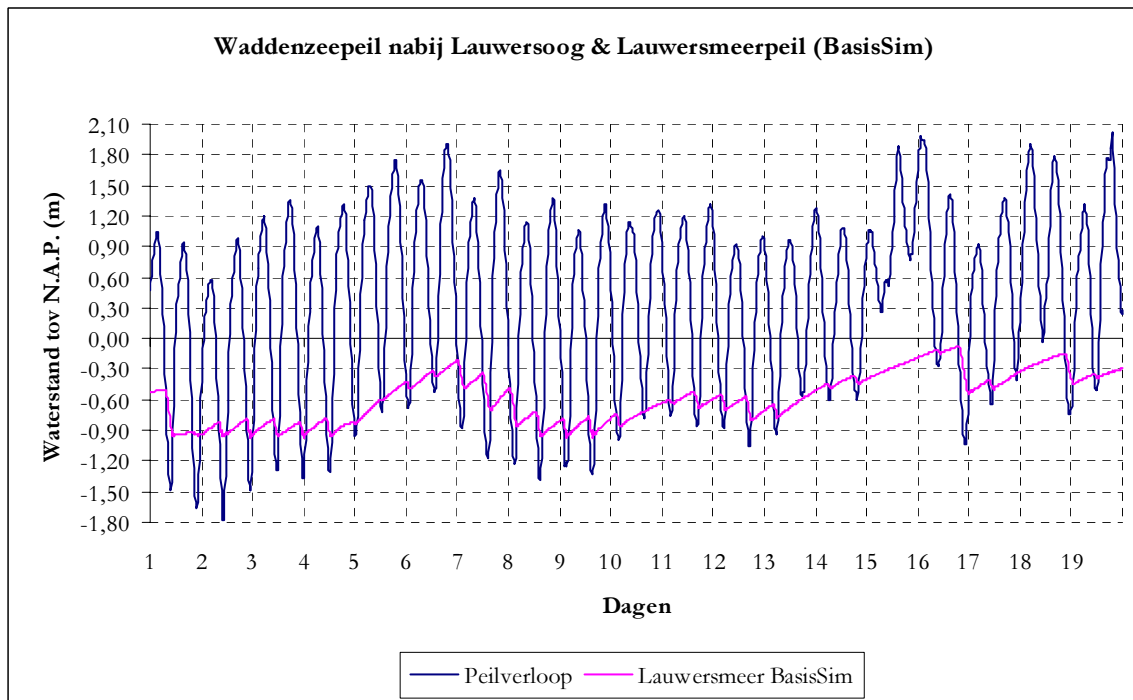
Op de tiende dag wordt alleen de eerste ebperiode gebruikt om te lozen, net als op de dertiende dag. Op de vijftiende dag worden geen van beide ebperiodes aangewend om water kwijt te raken, hoewel het meerpeil inmiddels tot een hoog niveau is gestegen, zie figuur H.22. Daarnaast gaan de laatste ebperiode van de zeventiende dag en de eerste ebperiode van de achttiende dag ongebruikt voorbij. De reden hiervoor is dat het verval over de sluisen tijdens de laagwaterperiode niet groter wordt dan 0.12 m: de voorwaarde voor de sluisen om te (kunnen) spuien; ten opzichte van het vaak sterk gestegen binnenpeil blijft de buitenwaterstand, zelfs in het dal van de periodieke getijde-beweging, op een te hoog niveau steken. Een en ander is te zien in de onderstaande figuur H.26, waarin het Waddenzeegetijde en het peilverloop van het Lauwersmeer zijn uitgezet.

De stijgende waterstanden aan de meerzijde, welke het gevolg zijn van de beperkte spui mogelijkheden, zorgen er op natuurlijke wijze voor dat de spui momenten op termijn groter worden (net als bij de Tsjerk Hiddessluizen te Harlingen): het verval wordt op die manier vanaf de kant van het Lauwersmeer gecreëerd.

Daarnaast dragen vanzelfsprekend dalende ebwaterstanden bij aan de verlenging van de spuiduur. Dit is te zien bij de zevende, de achtste en de zestiende dag. Deze dagen worden gekenmerkt door hoge afvoeren en ebwaterstanden die zijn gedaald, zie de figuren H.23 en H.26; in de dagen die hieraan voorafgaan is het meerpeil gestegen tot een hoog niveau en is de afvoer gering geweest, mede als gevolg van hoge buitenwaterstanden. Op de zestiende dag is goed te zien dat hoge afvoeren in korte tijd een flinke peildaling kunnen bewerkstelligen, zie figuur H.22.



Figuur H.25: De spuisluizen van Lauwersoog – Afvoer



Figuur H.26: Peilverloop Lauwersmeer en Waddenzeegetijde

7.8 Overschrijding Waterstandscriteria

7.8.1 Waarneming: Overschrijdingen van maximumpeilen

Uit de grafieken waarin de waterstand is uitgezet tegen de tijd (voor elk van de 38 meetpunten (karakteristieke gebieden) in het boezemsysteem) blijkt dat voor vrijwel alle meetpunten het lokale boezempeil het lokaal geldend waterstandscriterium overschrijdt in de laatste extreme periode van de boezemtoevoer (dag 11 t/m dag 18) – zie ter illustratie hiervan bijlage BH.04 waarin voor vier meetpunten gelegen in respectievelijk het Noordwesten, het Noordoosten, het Zuidwesten en het Zuidoosten van de provincie het waterstandsverloop is gegeven tezamen met het maximaal toelaatbare peil; zie bijlage BD.02 voor de precieze locatie van deze vier meetpunten. De extreme toevoeren op de boezem voorafgaand aan deze laatste periode laten de waterstanden behoorlijk stijgen, maar voor vrijwel alle meetpunten wordt het waterstandscriterium daarbij slechts dicht genaderd en niet overschreden.

Opgemerkt zij dat, na het overschrijden van het maximumpeil voor een meetpunt / karakteristiek gebied (in de laatste extreme periode), het boezempeil in de periode die dan volgt altijd verder doorstijgt en dus niet meer onder het maximumniveau uitkomt; zie bijlage BH.04.

Het moment van overschrijding van het maximumpeil in de laatste extreme periode is niet voor alle 38 meetpunten hetzelfde; het duurt enige dagen voordat in vrijwel alle karakteristieke gebieden de maximumpeilen zijn overschreden. De eerste peiloverschrijdingen manifesteren zich op dag 12: twee meetpunten in het Centraalwesten en één meetpunt in het Noordwesten registreren die dag een waterstandsverloop die op een bepaald moment uitstijgt boven het maximaal toelaatbare niveau. In bijlage BH.03 zijn de karakteristieke gebieden aangegeven waarin deze meetpunten zijn gelegen.

Op dag 13 is het aantal karakteristieke gebieden waarin overschrijdingen van maximumpeilen plaatsvinden al toegenomen tot een totaal van twaalf; Delen van het Noordwesten, het Centraalwesten, het Zuidwesten en het Zuidoosten zijn hierbij betrokken, zie bijlage BH.03. In het Oosten van de provincie blijven de meeste boezempeilen ook deze dag dus nog op een aanvaardbaar niveau. Op dag 14 wordt het ‘peiloverschrijdingsgebied’ (zie bijlage BH.03) verder uitgebreid met zeven nieuwe karakteristieke gebieden; de uitbreiding vindt vooral plaats in oostelijke richting; het westelijke gedeelte van het Centraaloosten en een daarbij gelegen gebied in het Centraalwesten zijn nu bij de peiloverschrijdingen betrokken.

Op dag 15 bevindt het boezempeil zich in 30 van de 38 karakteristieke gebieden boven de voor elk gebied geldende maxima; een toename ten opzichte van dag 14 met elf nieuwe karakteristieke gebieden. Deze dag zijn nu in het gehele Noordwestelijke gebied de boezempeilen hoger dan aanvaardbaar is; hetzelfde geldt voor het Centraalwestelijke gebied, het Centraaloosten en het Zuidwesten (op het karakteristieke gebied nabij het Hooglandgemaal na). In het Noordoostelijke en het Zuidoostelijke gebied blijven de peiloverschrijdingen ruwweg beperkt tot de westelijke gebiedshelft.

Op dag 16 en dag 17 breidt het ‘peiloverschrijdingsgebied’, dat bij aanvang van dag 16 al vrijwel de gehele provincie beslaat (zie dag 15), zich in het Noordoostelijke en Zuidoostelijke gebied verder uit in oostelijke richting. Uiteindelijk resteren nog slechts vier karakteristieke gebieden, waarbinnen het waterstandsverloop zich nog altijd beneden het maximum bevindt.

Het zijn de gebieden nabij Dokkumer Nieuwe Zijlen, de Friese sluis bij Zoutkamp en het Hooglandgemaal te Stavoren; dus de locaties achter een aantal afvoerkunstwerken van de Friese boezem. Het vierde gebied ligt in de Zuidoosthoek van de provincie. Vanaf dag 18 dalen de waterstanden in de gehele boezem weer onder invloed van een lagere boezembelasting, dus de omvang van het ‘peiloverschrijdingsgebied’ op dag 17 is het hoogst haalbare.

De overschrijding van de maximumpeilen in de verschillende karakteristieke gebieden strekt zich dus uit over een periode van zes dagen (dag 12 tot en met dag 17). Het zwaartepunt ligt echter bij de dagen 13 tot en met 15, in die dagen worden de eerste peiloverschrijdingen waargenomen in 27 karakteristieke gebieden. De andere dagen (dag 12, 16 en 17) zijn samen goed voor 7 karakteristieke gebieden.

7.8.2 Verklaring: Overschrijdingen van maximumpeilen

Omdat het afvoerend vermogen van de Friese boezem qua grootte achterblijft bij de extreme boezembelasting, leveren langdurige periodes van hoge toevoeren op de boezem sterk verhoogde waterstanden op (bergingsoverschotten), welke op den duur maximaal toelaatbare peilniveaus overschrijden.

Vanaf dag 5 tot en met dag 19 heeft de totale afvoer (van de boezem naar het buitenwater) een omvang die varieert in het volgende bereik: { $241 \text{ m}^3/\text{s/etmaal}$ – $306 \text{ m}^3/\text{s/etmaal}$ }

Gedurende deze vijftien dagen zijn er zoals gezegd drie periodes van extreme toevoer op de boezem (met een gemiddelde omvang van ca. $425 \text{ m}^3/\text{s/etmaal}$), afgewisseld met dagen met weinig of geen toevoer. In de extreme periodes overtreft de toevoer dus altijd het beschikbare afvoervermogen, met peilstijgingen als gevolg. Dit vormt tot en met dag 10 nog geen probleem, omdat de peilverhogingen tot dan toe niet leiden tot overschrijding van de maximumpeilen.

Daarnaast zijn de dagen met (vrijwel) geen toevoer gebruikt om een inhaalslag te maken ten aanzien van beheersing (d.i. verlaging) van de boezempeilen. Zo zijn de boezempeilen aan het einde van dag 10 weer ‘teruggekeerd’ naar een niveau dat in de buurt komt van het streefpeil.

Dit is ook te zien aan het bergingsoverschot op die dag: deze is ten opzichte van de voorgaande dagen afgenomen tot $72 \text{ m}^3/\text{s/etmaal}$. Ter vergelijking: dit is de maximale afvoercapaciteit van het Woudagemaal; wanneer dit gemaal dus een etmaal lang op vol vermogen werkt, kan het bergingsoverschot van de tiende dag volledig worden weggewerkt, aangenomen dat het bergingsoverschot ondertussen niet verder vergroot wordt.

De extreme periode vanaf dag 11 duurt zeven dagen en de boezemtoevoer schommelt daarbij continu rond $425 \text{ m}^3/\text{s/etmaal}$. Dus gedurende zeven dagen worden grotere hoeveelheden water op de boezem geloosd, dan het stelsel in staat is, in de gegeven omstandigheden, af te voeren. De peilstijgingen die daarvan het gevolg zijn, bereiken een omvang die niet aanvaardbaar is, omdat hiervoor geldende maxima worden overschreden.

Te hoge boezempeilen treden het eerst op in het Westen van de provincie. Hiervoor is aangegeven dat de meeste peiloverschrijdingen optreden in de periode van dag 13 tot en met dag 15 (zie ook bijlage BH.03). Op dag 13 concentreren de peiloverschrijdingen zich ruwweg in het gebied rondom het Woudagemaal te Lemmer en de Tsjerk Hiddessluizen te Harlingen: delen van het Noord-, Centraal- en ZuidWestelijke gebied van de provincie. In de twee dagen die daarop volgen worden ook de Oostelijk gelegen gebieden bij de peiloverschrijdingen betrokken. Op dag 13 bedraagt het bergingsoverschot $+550 \text{ m}^3/\text{s/etmaal}$. Met een oppervlakte van het boezemwater van 15060 ha komt dit overschot overeen met een gemiddelde stijging van het boezempeil boven streefpeil (N.A.P. -0.52 m) van $+0.32 \text{ m}$.

Het bergingsoverschot van dag 15, d.i. $+876 \text{ m}^3/\text{s/etmaal}$, staat voor een gemiddelde stijging van $+0.50 \text{ m}$ boven het streefpeil. Het grootste bergingsoverschot wordt bereikt op dag 17, deze bedraagt dan $+1151 \text{ m}^3/\text{s/etmaal}$, gemiddeld betekent dat een peilstijging van $+0.66 \text{ m}$.

Op dag 12 treden, zoals gezien, de eerste peiloverschrijdingen op in een drietal gebieden. Die dag is het bergingsoverschot: $+410 \text{ m}^3/\text{s/etmaal}$ (gemiddelde peilstijging: $+0.24 \text{ m}$). Bevindt zich in het boezemstelsel dus een surplus aan water van meer dan ca. $400 \text{ m}^3/\text{s/etmaal}$, dan kan verwacht worden dat op bepaalde locaties in het systeem de peilen hoger dan toelaatbaar stijgen, te beginnen in het Westelijke gedeelte van de provincie.

Aangezien het overschrijden van grenswaarden met betrekking tot het boezempeil hier geldt als een criterium voor het al of niet adequaat functioneren van het boezemstelsel, kan gesteld worden dat het boezemsysteem voor de laatste periode van extreme boezembelasting tekortgeschoten is. Ten aanzien van de mogelijkheden die het boezemsysteem ter beschikking had om overtollig water af te voeren, is de vierde extreme periode qua duur te lang geweest (zeven aaneengesloten dagen van hoge boezemtoevoer) en / of is de omvang van de dagelijkse watertoevoer in die periode te groot geweest.

Hoofdstuk 8

Maatregelen ter voorkoming van peiloverschrijdingen

8.1 Evaluatie van de inzet van de afvoerkunstwerken

8.1.1 Algemeen

In de onderstaande tabel TK1 zijn de zogenaamde normale en hoge capaciteiten van de afvoerkunstwerken van de Friese boezem vermeld. Wanneer alle afvoerkunstwerken op de normale capaciteit werken bedraagt het totale afvoervermogen 202 m³/s/etmaal. Wanneer de omstandigheden zo zijn dat alle kunstwerken de maximale afvoercapaciteit kunnen realiseren, bedraagt de gesommeerde capaciteit van het boezemsysteem, 268 m³/s/etmaal. In de tabel TK1 is tevens aangegeven wat het procentuele aandeel van elk kunstwerk is in dit totale afvoervermogen. In de nu volgende paragrafen wordt deze tabel TK1 aangehaald om de ‘prestaties’ van de verschillende afvoerkunstwerken gedurende de uitgevoerde simulatie na te gaan.

<u>Friese Boezemstelsel - Afvoercapaciteiten</u>				
Afvoerkunstwerk	Normale capaciteit		Hoge capaciteit	
	(m ³ /s/etm)	(%)	(m ³ /s/etm)	(%)
Tsjerk Hiddessluizen	13	6,4	19	7,1
Dokkumer Nieuwe Zijlen	49	24,3	70	26,1
Friese Sluis Zoutkamp	10	5,0	16	6,0
Hooglandgemaal	65	32,2	93	34,7
Woudagemaal	65	32,2	70	26,1
Σ	202	100,0	268	100,0

Tabel TK1: Normale en hoge afvoercapaciteit van kunstwerken Friese boezem

In de onderstaande tabel TK2 is per afvoerkunstwerk het afvoerdebiet gegeven, gemiddeld voor de periode van dag 5 tot en met dag 19. Daaruit blijkt dat alle afvoerkunstwerken vrijwel met de hoge capaciteit werken (zie ook tabel TK1), met uitzondering van de Tsjerk Hiddessluizen.

Friese Boezemstelsel - Afvoer		
	Gemiddelde Afvoerdebiet Periode:	
Afvoerkunstwerk	dag 5 t/m dag 19 (m ³ /s/etm)	Info
Tsjerk Hiddessluizen	13,8	Normale capaciteit
Dokkumer Nieuwe Zijlen	79,2	Hoge capaciteit
Friese Sluis Zoutkamp	14,4	Hoge capaciteit
Hooglandgemaal	94,9	Hoge capaciteit
Woudagemaal	71,9	Hoge capaciteit
Σ	274,3	

Tabel TK2: Het gemiddelde afvoerdebiet voor kunstwerken Friese boezem

8.1.2 Het Hooglandgemaal en het Woudagemaal

Op de vierde dag kon met de gemalen voorgemalen worden tot aan de maximaal toelaatbare verlaging van het boezempeil, maar het effect op het voorkomen van peiloverschrijdingen is minimaal.

De vijfde dag begint met de boezem op streefpeil. (in de simulatie). Het Friese boezempeil mag (gemiddeld) niet meer dan 0.05 m worden onderschreden: de maximaal toelaatbare peilverlaging wanneer wordt voorgemalen; dit komt overeen met een peil van N.A.P. -0.57 m.

Een peildaling van 0.05 m is een waterschijf van:

Volume = 0.05 m * 15060 ha (boezemoppervlak) * 10000 m²/ha = 7.53 * 10⁶ m³.

Dit is een daggemiddeld debiet van 7.53 * 10⁶ m³ / 86400 s/etmaal = 87.2 m³/s/etmaal.

Op de vierde dag maalt het Hooglandgemaal boezemwater uit op (daggemiddeld) 49.4 % van het maximale vermogen. Wanneer het gemaal de hele dag in werking gesteld was op volle sterkte, zou dat voor die dag een vergroting van het afvoerdebiet inhouden van 48.1 m³/s/etmaal.

Het Woudagemaal werkt de vierde dag daggemiddeld op 39.2 % van de maximale capaciteit. Het onbenutte deel van het vermogen, 60.8 %, heeft een grootte van 43.8 m³/s/etmaal.

De beide gemalen samen zouden op de vierde dag dus een extra afvoerdebiet kunnen bewerkstelligen van 91.9 m³/s/etmaal. Het was dus theoretisch mogelijk geweest de maximaal toegestane peilverlaging (ten opzichte van het streefpeil) van 0.05 m op de vierde dag tot stand te brengen door het volledig inzetten van de gemalen.

Echter, het bergingsoverschot op dag 17 bedraagt 1151 m³/s/etmaal. Daarmee vergeleken is het volume gerealiseerd door het voormalen, 87.2 m³/s/etmaal, van een geringe omvang. Het voormalen zal dus relatief weinig effect sorteren voor wat betreft het voorkomen van peiloverschrijdingen in de tweede helft van de simulatieperiode.

De peiloverschrijdingen in het Zuidwesten kunnen niet voorkomen worden door de gemalen, ondanks de continue inzet met de maximale capaciteit. Het afvoerend vermogen van de gemalen schiet tekort.

Het feit dat de gemalen vanaf de vijfde dag voortdurend op vol vermogen werken betekent dat vanaf dag 5 niet meer in gunstige zin gestuurd kan worden met de gemalen: een andere sturing kan slechts de omvang van de lozing verkleinen, hetgeen in de gegeven omstandigheden ongewenst is. De afvoer in het Zuidwesten heeft dus het maximum bereikt.

Ondanks deze volledige inzet van de maalcapaciteit kan niet voorkomen worden dat (ook) in het Zuiden en dus het Zuidwesten van de provincie (alwaar de gemalen gesitueerd zijn) de waterstanden in de laatste extreme periode (dag 11 tot en met dag 18) te hoog stijgen; op de dertiende dag treden de eerste peiloverschrijdingen in het Zuidwesten op (het voorkomen van te hoge peilen betekent dat zich teveel water in het gebied bevindt).

Het Zuidelijke deel van het Friese boezemstelsel ligt in de invloedssfeer van het Woudagemaal en het Hooglandgemaal. De te hoge peilen in dit gebied komen dan ook voor rekening van deze gemalen. Omdat gedurende de simulatieperiode de maximaal mogelijke afvoer is gerealiseerd, moet de conclusie zijn dat het afvoervermogen in het Zuidwesten in deze tekortschiet; voor de gegeven omstandigheden zijn de afvoercapaciteiten van de beide gemalen niet groot genoeg.

8.1.3 De Tsjerk Hiddessluizen

De via de Tsjerk Hiddessluizen gerealiseerde afvoer is (gemiddeld) in lijn met de afvoercapaciteit onder normale omstandigheden. De bijdrage aan de totale afvoer is echter gering.

Zie tabel TK1, de lozingscapaciteiten van de Tsjerk Hiddessluizen (Groot + Klein) bedragen regulier, 13 m³/s/etmaal en in gunstige omstandigheden, 19 m³/s/etmaal. Deze capaciteiten worden op bepaalde dagen wel gehaald en zelfs hoger, vanwege een sterk verhoogd boezempeil: grote vervallen over de sluizen; zie bijlage BH.01.

Dus de gerealiseerde afvoer is vergeleken met de capaciteiten niet per se erg gering. Maar per dag kan de omvang van de afvoer wel erg verschillen; de ene dag wordt geloosd met de maximale capaciteit, de andere dag wordt slechts een klein deel van het afvoervermogen aangesproken; dit vanwege de verval-afhankelijkheid van de sluizen. Gemiddeld over de dagen 5 tot en met 19 is het afvoerdebiet voor de Tsjerk Hiddessluizen: 13.8 m³/s/etmaal. Dit komt overeen met de normale capaciteit. Zie tabel TK2.

Met alle kunstwerken werkend op de normale capaciteit is het aandeel van de Tsjerk Hiddessluizen in de totale afvoercapaciteit (theoretisch): 6.4 %. Wanneer alle kunstwerken opereren met de maximale capaciteit is het aandeel van de Tsjerk Hiddessluizen in het totale afvoervermogen: 7.1 %. Zie tabel TK1. In deze simulatie was het gemiddelde aandeel van de Tsjerk Hiddessluizen: 4.8 %. Dit heeft te maken met het feit dat de Tsjerk Hiddessluizen werken op de normale capaciteit (gemiddeld) en de overige kunstwerken op de hoge capaciteit. Zie tabel TK2. De procentuele bijdrage van de Tsjerk Hiddessluizen aan de afvoer van overtollig boezemwater in extreme omstandigheden (alle kunstwerken op volle sterkte ingezet) is dus gering, maar wel in lijn met het afvoervermogen van deze sluizen.

Hoewel de Tsjerk Hiddessluizen naar vermogen hebben afgevoerd, treden toch peiloverschrijdingen op in het invloedsg gebied. Het afvoervermogen in het Noordwesten is in deze extreme omstandigheden te gering.

Aan het afvoervermogen van de Tsjerk Hiddessluizen kan door sturing weinig meer verbeterd worden: bijna alle ebperiodes worden benut om water te lozen; als een ebperiode niet is gebruikt, is er in de meeste gevallen geen positief verval over de sluizen aanwezig.

Het Noordwestelijke en het Centraalwestelijke gebied liggen in de invloedssfeer van de Tsjerk Hiddessluizen. Juist in deze omgeving treden de eerste peiloverschrijdingen op, zie bijlage BH.03, de dagen 12 en 13.

Hieruit valt af te leiden dat de Tsjerk Hiddessluizen in de gegeven omstandigheden niet in staat de boezempeilen in nabij gelegen gebieden voldoende ‘onder controle’ te houden. Vergeleken met de waterbezwaren op de Friese boezem in deze gebieden, zijn de gerealiseerde afvoervolumes van een te beperkte omvang; gedurende de simulatieperiode had meer boezemwater geloosd moeten worden via het Noordwestelijke afvoerpunt, in verband met de peilbeheersing.

8.1.4 Dokkumer Nieuwe Zijlen, Zoutkamp en Lauwersoog

Zowel de boezemsluizen in het Noordoosten als de sluizen van Lauwersoog hebben naar vermogen overtollig water geloosd. Door sturing van de kunstwerken kan het afvoervolume echter niet vergroot worden, hoewel dit wenselijk is in verband met peiloverschrijdingen in het gebied.

De spuisluis en de schutsluis van Dokkumer Nieuwe Zijlen en de Friese sluis bij Zoutkamp spuien, zoals gezien, voortdurend boezemwater en zijn daarbij volledig geopend (maximale doorstroomopening). In de gegeven omstandigheden wordt op deze wijze het maximale afvoervolume gerealiseerd. Door sturing kan de afvoer via deze sluizen dus niet verder vergroot worden. Tabel TK2 laat zien dat de sluizen geloosd hebben met de afvoercapaciteit onder gunstige omstandigheden (hoge capaciteit).

Daarnaast bleken de spuisluizen van Lauwersoog niet in staat te zijn het Lauwersmeerpeil op streefpeil te houden gedurende de simulatie. Dit is in negatieve zin van invloed geweest op het verval over de sluizen van Dokkumer Nieuwe Zijlen en Zoutkamp; wanneer het Lauwersmeerpeil consequent op streefpeil gehouden was, kon mogelijk een nog hoger afvoervolume via deze boezemsluizen gerealiseerd worden, hoewel op een bepaald moment de afmetingen van de toevoerkanalen en van de kunstwerken zelf in dit afvoervolume de beperkende factor zijn.

Door verbeterde sturing kan de lozing via de spuisluizen van Lauwersoog echter niet vergroot worden; elke ebperiode is waar mogelijk aangegrepen om overtollig water te lozen; de gerealiseerde afvoer is in deze extreme omstandigheden de hoogst haalbare.

De sluizen van Dokkumer Nieuwe Zijlen en Zoutkamp nemen in deze simulatie een aanzienlijk deel van de boezemafvoer voor hun rekening; voor de periode vanaf dag 5 tezamen gemiddeld 34.0 % van de totale afvoersom, zie figuur H.12. De tot standgebrachte afvoer is echter niet voldoende om de boezemwaterstanden in het (Noord-) Oostelijke gebied op een aanvaardbaar niveau te houden; vanaf de veertiende dag treden de eerste peiloverschrijdingen op in het Centraaloosten en vanaf de vijftiende dag zijn ook in delen van het Noordoosten de peilen te hoog, zie bijlage BH.03.

Dus hoewel het immer aanwezige verval over de boezemsluizen een continue lozing garandeert naar het ‘lager gelegen’ Lauwersmeer, is de omvang daarvan blijkbaar te gering. In het verlengde daarvan (vanwege de onderlinge afhankelijkheid) kan geconcludeerd worden dat het afvoervolume van de spuisluizen van Lauwersoog eveneens onvoldoende van omvang is geweest.

In de gegeven omstandigheden kan een hogere Noordoostelijke afvoer met de bestaande middelen echter niet tot stand gebracht worden.

8.2 Maatregelen

8.2.1 Vergroting van de afvoercapaciteit

Het afvoerend vermogen van het boezemsysteem wordt ondermeer vergroot door de plaatsing van een extra afvoerkunstwerk in het Noordwesten van het boezemstelsel.

Uit de voorgaande paragraaf blijkt dat met de bestaande kunstwerken het totale afvoervolume (in de extreme omstandigheden waarin het boezemstelsel verkeert) niet verder vergroot kan worden; een alternatieve sturing geeft hierin geen beter resultaat.

Eerder is gezien dat juist dit afvoervolume tekortschiet ten opzichte van de boezembelasting. Dus om te voorkomen dat het bergingsoverschot gedurende een opeenvolging van ‘extreme’ dagen te groot wordt ($> \text{ca. } 400 \text{ m}^3/\text{s/etmaal}$ geeft de eerste peiloverschrijdingen), zal het afvoerend vermogen van het boezemsysteem verder vergroot moeten worden.

Dit kan geschieden door het ‘bijplaatsen’ van extra afvoerkunstwerken in het boezemnetwerk.

De BasisSimulatie laat zien dat de boezemafvoer voornamelijk plaatsvindt via de afvoermiddelen in het Zuidwesten en het Noordoosten; de peiloverschrijdingen treden op den duur in vrijwel het gehele boezemsysteem op, maar het vangt aan in de Westelijke helft van de provincie, zie bijlage BH.03. Het ligt dus in de rede een vergroting van de afvoercapaciteit te bewerkstelligen in het Noordwesten van de provincie.

Ten behoeve van het voorkomen van peiloverschrijdingen in de (Noord-) Oostelijke helft van het boezemstelsel is een vergroting van de boezemafvoer in het Noordoosten wenselijk. Een dergelijke verhoging van de afvoercapaciteit kan geschieden door aldaar een directe lozing vanuit de boezem op de Waddenzee tot stand te brengen. Onderstaand wordt aangegeven waarom een dergelijke maatregel een reële optie is.

De Lauwersoogspuisluizen zijn voor het peilbeheer van het Lauwersmeer de enige sturingsmiddelen, qua waterafvoer. Het beheer van deze sluizen is in handen van de provincie Groningen. Zij bepaalt dus bijvoorbeeld het moment van spuien, de spuiduur en de per tijdseenheid te lozen hoeveelheid Lauwersmeerwater én op die wijze het verloop van het meerpeil.

Omdat de Friese boezem in de Noordoosthoek loost onder vrij verval, is het boezembeheer niet onafhankelijk van het gevoerde peilbeheer op het Lauwersmeer.

Dit kan voor de boezem in het nadeel werken (zoals ook uit BasisSimulatie blijkt). Zeker als wordt overwogen om in de toekomst een ander peilbeheer te hanteren, bijvoorbeeld het introduceren van variabele (hogere) streefpeilen. (het huidige peilbeheer, mits effectief uitgevoerd, is voor de Friese boezem nog betrekkelijk gunstig; omdat het streefpeil relatief laag ligt)

Een alternatief peilbeheer voor het Lauwersmeer kan de afvoermogelijkheden voor de Friese boezem in het Noordoosten sterk nadelig beïnvloeden: Bij een structureel (veel) hoger streefpeil voor het Lauwersmeer zijn de sluizen van Dokkumer Nieuwe Zijlen en Zoutkamp qua afvoervermogen ($\text{m}^3/\text{s/etmaal}$) weinig meer waard.

Overigens is tijdens de simulatie voortdurend getracht het meerpeil op streefpeil te houden, dus Friesland had ditmaal ‘alle medewerking van Groningen’, maar die peilhandhaving kon niet over de volledige periode gerealiseerd worden.

Het is dus het overwegen waard om de extra benodigde boezemafvoer in het Noordoosten volledig onafhankelijk te maken van het actuele Lauwersmeerpeil. Dit zou betekenen dat de extra lozing niet plaatsvindt op het Lauwersmeer.

Want ook wanneer gekozen zou worden voor het uitmalen van boezemwater op het Lauwersmeer, hetgeen kan geschieden ongeacht de hoogte van het meerpeil (d.i. inderdaad een grotere onafhankelijkheid), is het niet denkbeeldig dat de provincie Groningen restricties op kan leggen ten aanzien van bijvoorbeeld de geloosde volumes boezemwater.

De extra boezemafvoer dient dus gerealiseerd te worden via een directe lozing op de Waddenzee.

Met de extreme omstandigheden waaraan het boezemstelsel in de simulatie blootgesteld staat (o.a. hoge buitenwaterstanden, hoge neerslagbelasting), is het uitmalen van boezemwater hierbij een geschiktere methode, dan het spuien (op de Waddenzee);

zie hoe het de Tsjerk Hiddessluizen te Harlingen en de Lauwersoogspuisluizen vergaan is in BasisSimulatie: de verval-afhankelijkheid van deze kunstwerken zorgt (over meerdere dagen gezien) voor sterk fluctuerende afvoerdebieten.

(Het voordeel van gemalen is dat van tevoren vaststaat welke afvoercapaciteit haalbaar is. Dat is vooral in extreme omstandigheden waardevolle kennis, omdat in zo'n situatie, alle afvoerkunstwerken bijna permanent worden ingeschakeld (zoals de simulatie liet zien) en dan is het mogelijk, wat de gemalen betreft, een nauwkeurige uitspraak te doen over het realiseerbare afvoerdebiet, terwijl daarover voor de spui- en schutsluizen in het stelsel (veel) meer onzekerheid bestaat.

Anderzijds kan het spuivermogen voor de komende uren worden afgeleid uit kennis van de getijdebeweging langs de Friese kust, uit voorspellingen met betrekking tot windopzetten, uit de verwachtingen die men heeft ten aanzien van het verloop van het boezempeil, etc.

Maar blijft staan dat het spuivermogen in de tijd sterk variabel kan zijn; zie bijvoorbeeld de afvoergrafiek van de Tsjerk Hiddessluizen, bijlage BH.01)

Uitbreiding van de maalcapaciteit levert de gewenste verhoging in het afvoervolume.

Er is dus voor gekozen om de verhoging van de boezemafvoercapaciteit te realiseren door het 'bijplaatsen' van een tweetal kunstwerken in respectievelijk het Noordwesten van de provincie nabij Harlingen en het Noordoosten nabij Lauwersoog. In beide gevallen vindt de lozing dus direct plaats op de Waddenzee. Om in extreme omstandigheden een bepaald afvoervolume te kunnen garanderen is gekozen voor een uitbreiding van de maalcapaciteit: gemaal Harlingen en gemaal Lauwersoog.

(Het beperken van het bergingsoverschot gebeurt in dit onderzoek dus puur vanuit het capaciteitsgegeven en niet door de boezembelasting 'kunstmatig' te beperken (bijv. maaltops) of door ingrepen in het boezemstelsel toe te passen, anders dan de aanleg van afvoerkunstwerken (bijv. vergroting van het boezemoppervlak))

8.2.2 Twee extra gemalen: SimulatiePlus

De simulatie waarbij het gemaal Harlingen en het gemaal Lauwersoog zijn toegevoegd aan het boezemnetwerk wordt SimulatiePlus genoemd. De belastingen en randvoorwaarden zijn identiek aan die van BasisSimulatie.

De afvoercapaciteiten van het gemaal Harlingen en van het gemaal Lauwersoog is vastgesteld op basis van het verschil tussen de boezembelasting en de boezemafvoer in BasisSimulatie. In de laatste extreme neerslagperiode bedraagt de boezemtoevoer gemiddeld 440 m³/s/etmaal. De boezemafvoer is dan gemiddeld 290 m³/s/etmaal; een verschil van 150 m³/s/etmaal. Globaal gesproken moeten de beide gemalen dit afvoerdebiet tezamen kunnen leveren. Met medeneming van verwachte verliezen in de afvoer via de bestaande afvoerkunstwerken door wederzijdse beïnvloeding (het gemaal Harlingen vs. de Tsjerk Hiddessluizen en het gemaal Lauwersoog vs. de sluizen van Dokkumer Nieuwe Zijlen) is een toename in de maalcapaciteit aangehouden van 175 m³/s; dit is 85 m³/s voor het gemaal Harlingen en 90 m³/s voor het gemaal Lauwersoog. Op basis van de resultaten van SimulatiePlus en van aanvullende simulaties kunnen de benodigde maalcapaciteiten meer nauwkeurig worden bepaald.

Het gemaal Harlingen

Het gemaal Harlingen met het toevoerkanaal en de aansluiting op het Van Harinxmakanaal was reeds geïmplementeerd in het Sobek®-model, maar was in BasisSimulatie nog niet geactiveerd. (het Van Harinxmakanaal is tevens het toevoerkanaal voor de Tsjerk Hiddessluizen).

Het gemaal Harlingen wordt aangestuurd via de in Matlab® geprogrammeerde set beslisregels van het Friese peilbeheer.

Het gemaal Lauwersoog

De sturing van het gemaal Lauwersoog wordt in Sobek® geregeld via in- en uitslagpeilen. Het inslagpeil voor het gemaal is een lokale boezemwaterstand van N.A.P. -0.44 m. Wanneer het boezempeil lokaal dus $+0.08$ m uitstijgt boven het streefpeil, wordt het gemaal Lauwersoog ingezet om te 'assisteren' bij de waterafvoer. Het is goed mogelijk dat de lozing via het gemaal, van invloed is op de gelijktijdige lozing via de sluizen van Dokkumer Nieuwe Zijlen (beïnvloeding van het verval); De extra afvoer via het gemaal dient dan de reductie in de afvoer via de sluizen meer dan evenredig te compenseren. Het uitslagpeil is N.A.P. -0.62 m.

Het laterale kanaal

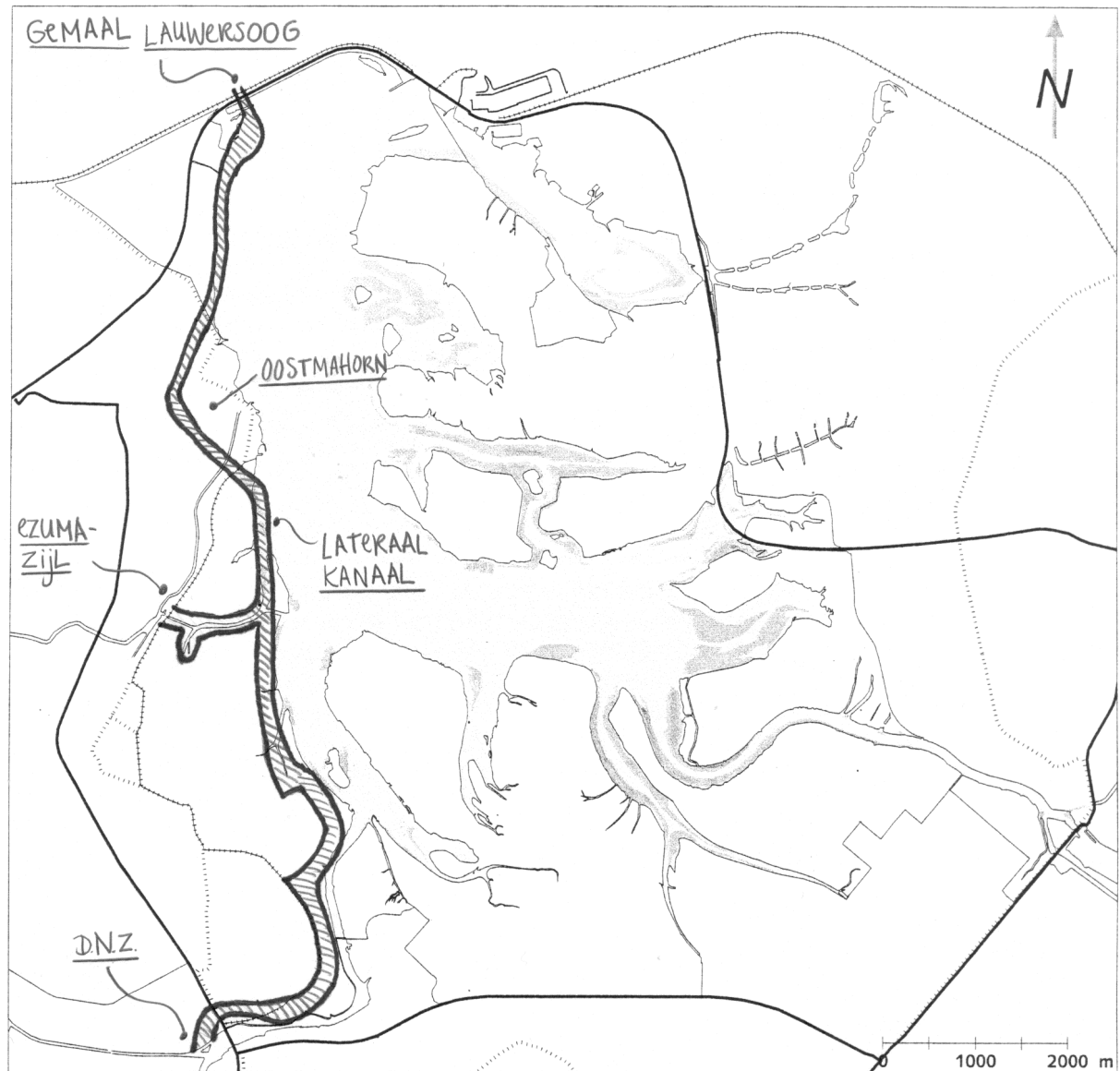
Het gemaal Lauwersoog wordt gekoppeld aan de Friese boezem door middel van een zogenaamd lateraal kanaal. Dit kanaal loopt langs de Friese zijde van het Lauwersmeer. In de onderstaande figuur K.01 is een traject voor het laterale kanaal aangegeven. Het kanaal wordt aan de oostzijde met een dijk gescheiden van het Lauwersmeer; aan de westzijde wordt waar mogelijk 'gebruik gemaakt' van bestaande kades. Het kanaal gaat aan de westzijde langs het dorp Oostmahorn, om de jachthaven te ontzien die aan het Lauwersmeer gelegen is.

De aanleg van het laterale kanaal volgens het traject zoals is aangegeven in figuur K.01, beïnvloedt bepaalde infrastructurele objecten in de omgeving, de belangrijkste:

- De autoweg vanaf Dokkumer Nieuwe Zijlen naar het dorp Anjum (in Noord-Zuidrichting, deze loopt 'over' de D.N.Z.-schutsluis en de D.N.Z.-spuisluis). Deze weg wordt gekruist bij de aansluiting van het laterale kanaal op de Friese boezem ter hoogte van Dokkumer Nieuwe Zijlen.
- De autoweg N361 en een secundaire weg, welke lopen over de afsluitdijk van het Lauwersmeer bij Lauwersoog. Deze worden gekruist bij plaatsing van het afvoerkunstwerk in de afsluitdijk.
- Een schutsluis nabij Ezumazijl, welke in de bestaande situatie uitkomt op het Lauwersmeer.
- Een gemaal nabij Ezumazijl, deze loost oorspronkelijk op het Lauwersmeer.

Ter continuering van de bovengenoemde functies dienen bij de aanleg van het laterale kanaal aanvullend passende voorzieningen te worden getroffen.

Het dwarsprofiel van het laterale kanaal in het Sobek®-model is vastgesteld op basis van de afmetingen van de toevoerkanalen van het Hooglandgemaal, het Woudagemaal en het gemaal Harlingen (deze kanaalbreedtes lopen van 60 m tot 90 m). Bij het laatste gedeelte van het laterale kanaal, de aansluiting met het gemaal Lauwersoog, is het dwarsprofiel 25 m breder gemaakt om te voorkomen dat de boezempeilen al te zeer dalen tijdens het uitmalen.



Figuur K.01: Gemaal Lauwersoog met lateraal kanaal

Hoofdstuk 9

Analyse SimulatiePlus

9.1 Peilverschillen

De invloed van de maatregelen en van een alternatieve inzet van de bestaande kunstwerken wordt zichtbaar in de peilverschillen tussen SimPlus en BasisSim.

In SimPlus zijn twee gemalen ‘toegevoegd’ aan het systeem ter vergroting van het afwaterend vermogen van het Friese boezemstelsel. Om de invloed van deze maatregelen te achterhalen zijn de boezemwaterstanden van SimPlus vergeleken met die van BasisSim. Dit is gedaan door voor elk meetpunt het verschil te nemen tussen het waterstandsverloop volgend uit SimPlus en het waterstandsverloop uit BasisSim. Daar waar op een bepaald moment een peilverschil bestaat tussen SimPlus en BasisSim is dan de invloed merkbaar van de inschakeling van het extra maalvermogen en/of van een veranderde inzet van de bestaande afvoerkunstwerken.

Belangrijk voor een juist begrip: wanneer in de navolgende tekst de grafieken worden aangehaald waarin de peilverschillen zijn uitgezet, wordt bij een vergroting van het peilverschil in de tijd gesproken van een peildaling en bij een verkleining van het peilverschil van een peilstijging. Daarnaast wordt een gegeven peilverschil op een bepaald tijdstip ook wel aangeduid als een peil of een waterstand. Er kan op deze wijze gesproken worden van peilstijgingen, peildalingen en peilen (voor SimPlus) als de situatie (de waterstandsverlopen) van BasisSim als uitgangspositie wordt gehanteerd (het referentiekader); dat is hier gedaan.

In bijlage BJ.05 is voor elk van de 38 meetpunten het waterstandsverschil tussen SimPlus en BasisSim uitgezet tegen de tijd. In deze grafieken zijn globaal vier kenmerkende periodes te onderscheiden:

- | | |
|----------------------|--|
| 1. Dag 1 t/m Dag 4 | (vrijwel geen peilverschillen) |
| 2. Dag 5 t/m Dag 7 | (dalend peil) |
| 3. Dag 8 t/m Dag 10 | (stijgend peil) |
| 4. Dag 11 t/m Dag 19 | (dalend peil, de laatste dag: stijgend peil) |

In de komende paragrafen worden deze periodes, met uitzondering van de eerste periode, besproken; de waargenomen peilverschillen worden in verband gebracht met de in SimPlus gerealiseerde boezemafvoer en de verschillen daarin met BasisSim. De eerste periode wordt niet behandeld, omdat de situatie in SimPlus identiek blijkt te zijn aan die van BasisSim.

9.2 Periode Dag 5 t/m Dag 7

9.2.1 Afvoer – Verschil dagdebieten

In de onderstaande tabellen TJ1 tot en met TJ4 is per afvoerkunstwerk en per dag het verschil gegeven tussen het gerealiseerde daggemiddelde afvoerdebiet in SimPlus en in BasisSim.

Dit verschil is de waarde van SimPlus minus de waarde van BasisSim. Ook is vermeld in procenten hoe dit verschil (in m³/s/etm) zich verhoudt ten opzichte van het daggemiddelde afvoerdebiet in BasisSim (in m³/s/etm). Op dag 6 wordt bijvoorbeeld door de spuisluis van Dokkumer Nieuwe Zijlen in SimPlus een hoeveelheid boezemwater van 37.72 m³/s/etm minder geloosd dan in BasisSim. Dit is ten opzichte van de op die dag gerealiseerde afvoer in BasisSim een procentuele afname van 96.28 %. Daarnaast is per dag en per locatie in het boezemnetwerk waar boezemwater geloosd wordt (Noordoost, Noordwest en Zuidwest), voor de kunstwerken op die locaties de som genomen van de verschillen in de dagdebieten. Wanneer deze sommaties voor de verschillende locaties per dag worden opgeteld wordt het totale afvoerverschil verkregen: de hoeveelheid boezemwater (in m³/s/etm) die, gezien over het gehele boezemsysteem, op dag Y meer of minder wordt afgevoerd in SimPlus dan in BasisSim. In de tabel TJ4 is dit totale afvoerverschil weergegeven.

ZuidWest - Verschil dagdebieten (SimPlus vs. BasisSim)					
	Woudagemaal		Hooglandgemaal		Σ
Dagen	(m ³ /s/etm)	(%)	(m ³ /s/etm)	(%)	(m ³ /s/etm)
5	-0,75	-1,05	-0,99	-1,05	-1,74
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	-2,53	-3,51	-1,09	-1,15	-3,62

Tabel TJ1: Zuidwest – Afvoerverschil kunstwerken Dag 5 t/m Dag 7

NoordWest - Verschil dagdebieten (SimPlus vs. BasisSim)							
	Tsjerk Hiddes - Klein		Tsjerk Hiddes - Groot		Gemaal Harlingen		Σ
Dagen	(m ³ /s/etm)	(%)	(m ³ /s/etm)	(%)	(m ³ /s/etm)	(%)	(m ³ /s/etm)
5	0,00	0,00	0,00	0,00	83,23	100,00	83,23
6	-0,27	-100,00	-0,85	-100,00	85,00	100,00	83,87
7	-3,89	-88,72	-12,55	-88,08	50,76	100,00	34,32

Tabel TJ2: Noordwest – Afvoerverschil kunstwerken Dag 5 t/m Dag 7

NoordOost - Verschil dagdebieten (SimPlus vs. BasisSim)									
	DNZ - spuisluis		DNZ - schutsluis		Fr. sluis Zoutkamp		Gemaal Lauw'oog		Σ
Dagen	(m ³ /s/etm)	(%)	(m ³ /s/etm)	(%)	(m ³ /s/etm)	(%)	(m ³ /s/etm)	(%)	(m ³ /s/etm)
5	-6,45	-17,14	-4,79	-17,72	-1,04	-9,35	5,99	100,00	-6,29
6	-37,72	-96,28	-28,31	-96,44	-3,09	-26,19	67,34	100,00	-1,78
7	-21,54	-44,25	-17,40	-46,24	-3,14	-20,63	27,71	100,00	-14,37

Tabel TJ3: Noordoost – Afvoerverschil kunstwerken Dag 5 t/m Dag 7

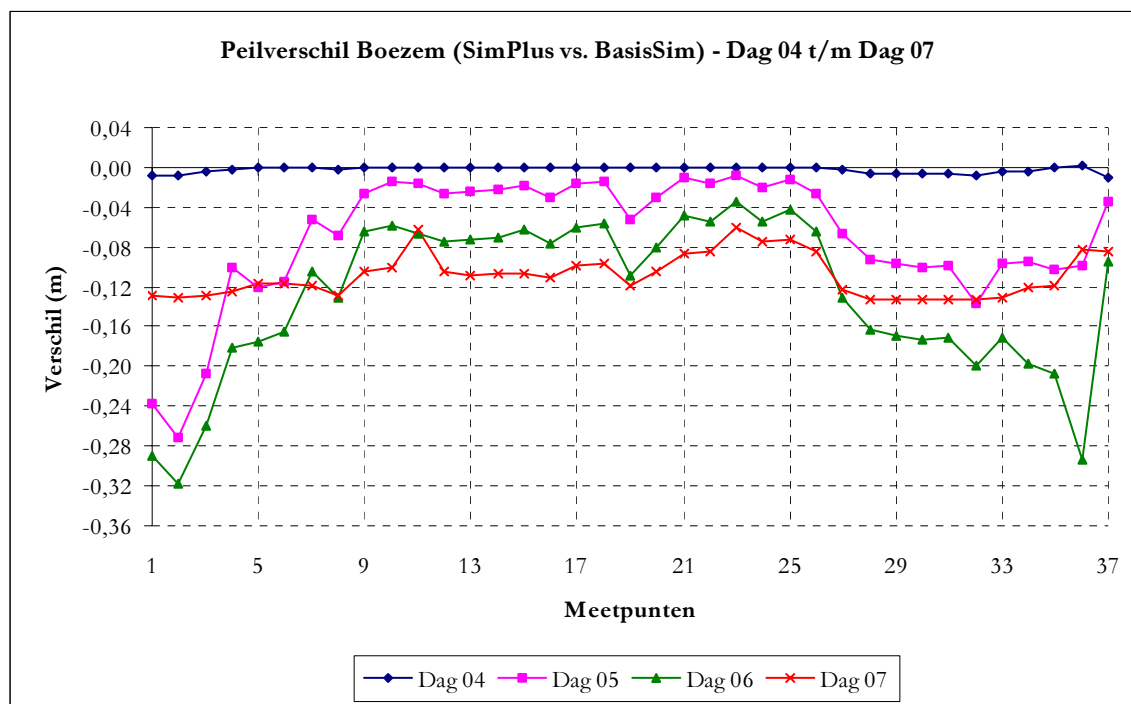
Friese Boezem - Totaal Afvoerverschil	
	Σ (NoordWest, NoordOost, ZuidWest)
Dagen	(m ³ /s/etm)
5	75,20
6	82,10
7	16,33

Tabel TJ4: Totaal afvoerverschil kunstwerken Dag 5 t/m Dag 7

9.2.2 Peilveranderingen in de eerste periode

Op dag 5 vinden op de gehele boezem peildalingen plaats, maar niet met dezelfde omvang, zie de onderstaande figuur J.01; de peildalingen zijn groter in het Noordelijke en het Centrale gedeelte van de provincie dan in het Zuidelijk deel, en het grootst in het Noordwesten.

Op dag 6 zetten de peildalingen zich over de gehele boezem verder voort. Ruwweg zijn de peilverlagingen ten opzichte van dag 5 voor alle karakteristieke gebieden even groot (behalve voor het Centraaloosten en het Noordoosten, daar is de peilverlaging groter), zie figuur J.01; dus het genoemde patroon van dag 5 van relatief lage peilen in het Noorden en het Centrum en naar verhouding hogere peilen in het Zuiden (d.i. minder peildaling gerealiseerd) blijft op dag 6 gehandhaafd, maar ligt op een lager niveau. Op dag 7 vinden ten opzichte van dag 6 peilstijgingen plaats in het Noorden en het Centrum van de provincie en verdere peildalingen in het Zuiden.



Figuur J.01: Peilverschillen in boezemsysteem – dag 04 t/m dag 07

9.2.3 Afvoer in het Zuidwesten

Uit tabel TJ1 blijkt dat het Hooglandgemaal en het Woudagemaal in het Zuidwesten van de provincie voor de dagen 5 tot en met 7 vrijwel evenveel boezemwater afvoeren in SimPlus als in BasisSim.

9.2.4 Afvoer in het Noordwesten

Het Gemaal Harlingen is gedurende vrijwel de gehele vijfde en zesde dag ingeschakeld en loost met een debiet van $+85 \text{ m}^3/\text{s}$, zie bijlage BJ.01.

In tabel TJ2 is te zien dat het daggemiddelde debiet van het Gemaal Harlingen op dag 7 aanmerkelijk lager is dan de voorgaande twee dagen; dit heeft als oorzaak dat het gemaal alleen gedurende de eerste helft van de zevende dag is ingeschakeld, zie bijlage BJ.01.

Tevens is te zien in tabel TJ2 dat het Gemaal Harlingen grote invloed heeft op de lozingscapaciteit van de Tsjerk Hiddessluizen: op de zevende dag bedraagt de reductie van het afvoerend vermogen van deze sluizen ca. 88 %. Dit zorgt ervoor dat een gedeelte van de extra afvoer, die in SimPlus wordt gerealiseerd door het Gemaal Harlingen ($+50.76 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etm}$), door een verminderde afvoer via de Tsjerk Hiddessluizen wordt teniet gedaan: Voor het Noordwesten blijft in SimPlus op de zevende dag een extra afvoer over van $+34.32 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etm}$.

9.2.5 Afvoer in het Noordoosten

De vijfde dag: het gemaal Lauwersoog en de schut- en spuisluisen

Het Gemaal Lauwersoog heeft voor de vijfde dag een laag daggemiddeld afvoerdebiet, zie tabel TJ3. Dit komt doordat het gemaal alleen aan het einde van dag 5 in werking is gesteld, zie bijlage BJ.01.

In die korte periode wordt wel afgevoerd met een gemiddeld debiet van $58 \text{ m}^3/\text{s}$.

De D.N.Z.-spuisluis en D.N.Z.-schutsluis zijn de gehele vijfde dag geopend, behalve aan het einde van de dag. Dan is geen positief verval meer aanwezig ten opzichte van het Lauwersmeer, dus worden de sluizen gesloten, want: zie bijlage BJ.03 tegen het einde van de vijfde dag daalt het boezempeil plots, terwijl het Lauwersmeerpeil nog verder doorstijgt. Net vóór dat moment van een dalend boezempeil, wordt het inslagpeil van het gemaal Lauwersoog bereikt door het, samen met het Lauwersmeerpeil stijgende, boezempeil. Dit inslagpeil is N.A.P. -0.44 m .

Een kort moment zijn dus zowel de D.N.Z.-sluizen als het gemaal Lauwersoog in werking gesteld. Het gemaal Lauwersoog zorgt er echter voor dat de boezemwaterstand ter hoogte van Dokkumer Nieuwe Zijlen daalt. Daardoor neemt het verval over de D.N.Z.-sluizen langzamerhand af, dus wordt er door deze sluizen minder afgevoerd. Tot het moment dat het boezempeil gelijk komt met het Lauwersmeerpeil en vervolgens daaronder 'duikt'. Op dat moment worden de sluizen direct gesloten en is er via Dokkumer Nieuwe Zijlen dus geen afvoer meer naar het Lauwersmeer. De afvoer vindt nu plaats via het gemaal Lauwersoog.

De Friese sluis bij Zoutkamp is wel de gehele vijfde dag geopend: er is een continue afvoer naar het Lauwersmeer.

De zesde dag: het gemaal Lauwersoog en de schut- en spuisluizen

Het gemaal Lauwersoog is vrijwel de gehele zesde dag ingeschakeld, zie bijlage BJ.01. De spuisluis en de schutsluis van Dokkumer Nieuwe Zijlen zijn daarentegen, met uitzondering van een korte periode aan het begin van dag 6, de gehele dag gesloten. De Friese sluis bij Zoutkamp is wel de volle zesde dag geopend. Zie bijlage BJ.04.

Uit tabel TJ3 blijkt dat de extra afvoer gerealiseerd met het gemaal Lauwersoog ($67.34 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etm}$) geheel wordt teniet gedaan door een vermindering van de afvoer via met name de sluisen van Dokkumer Nieuwe Zijlen: een procentuele afname ten opzichte van BasisSim met ca. 96 %. Met de inzet van gemaal Lauwersoog op deze zesde dag is de afvoer van overtollig boezemwater in de Noordoosthoek van de provincie niet toegenomen, maar zelfs licht afgenomen, met $-1.78 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etm}$.

De zevende dag: het gemaal Lauwersoog en de schut- en spuisluizen

Hierna wordt het verloop van het boezempeil nabij Dokkumer Nieuwe Zijlen op de zevende dag stap voor stap verklaard, om inzicht te krijgen in de wisselwerking tussen de sluisen van Dokkumer Nieuwe Zijlen, het gemaal Lauwersoog en het verloop van het Lauwersmeerpeil.

Gedurende dag 6 en aan het begin van dag 7 schommelt het boezempeil nabij Dokkumer Nieuwe Zijlen rond het niveau N.A.P. -0.48 m . Zie bijlage BJ.03. Op dat moment is alleen het gemaal Lauwersoog ingeschakeld.

Net na aanvang van dag 7 daalt het Lauwersmeerpeil dan sterk en tot onder het niveau van het boezempeil. Deze peildaling is het gevolg van een lozing van overtollig Lauwersmeerwater bij Lauwersoog via de spuisluizen aldaar. Doordat er nu een positief verval aanwezig is over de sluisen van Dokkumer Nieuwe Zijlen, worden deze direct geopend.

Ondertussen is het gemaal Lauwersoog nog steeds in werking. Het boezempeil daalt in deze situatie mee met het scherp dalende Lauwersmeerpeil; op een gegeven moment wordt dan nabij het gemaal Lauwersoog het 'switch-off-level' bereikt (d.i. N.A.P. -0.62 m), zodat het gemaal wordt uitgeschakeld. Ook ongeveer rond dat tijdstip worden de spuisluizen van Lauwersoog gesloten: de ingezette daling van het Lauwersmeerpeil (en ook van het boezempeil) is ten einde. Hierna stijgt het boezempeil weer, evenals het Lauwersmeerpeil, maar omdat er nog steeds een positief verval aanwezig is, zijn de spuisluis en de schutsluis van Dokkumer Nieuwe Zijlen geopend: er vindt afvoer plaats naar het Lauwersmeer.

Dan wordt op een bepaald moment het 'switch-on-level' (d.i. N.A.P. -0.44 m) van het gemaal Lauwersoog weer bereikt, zodat het gemaal opnieuw wordt ingeschakeld, dit heeft direct een daling van de boezemwaterstand nabij Dokkumer Nieuwe Zijlen tot gevolg en wel tot onder het niveau van (het nog steeds stijgende) Lauwersmeerpeil, zodat de D.N.Z.-sluisen weer worden gesloten.

Het boezempeil blijft na de ingezette daling 'hangen' op het niveau van N.A.P. -0.48 m (net als op de zesde dag). Vervolgens wordt al spoedig weer geloosd via de spuisluizen van Lauwersoog, met een scherp dalend Lauwersmeerpeil als gevolg (dit gebeurt ongeveer halverwege de zevende dag). Het Lauwersmeerpeil 'duikt' hierbij opnieuw onder het boezempeil, zodat de D.N.Z.-spuisluis en D.N.Z.-schutsluis weer worden geopend om boezemwater onder vrij verval te lozen. Het boezempeil daalt hierbij verder mee met het Lauwersmeerpeil (het gemaal Lauwersoog loost ook nog steeds boezemwater), totdat wederom het 'switch-off-level' van gemaal Lauwersoog wordt bereikt. Daarna wordt het gemaal gedurende de rest van de zevende dag niet meer in werking gezet, omdat het 'switch-on-level' niet meer wordt bereikt, hoewel het boezempeil na de daling wel weer stijgt, samen met het Lauwersmeerpeil (op het moment dat de spuisluizen van Lauwersoog worden gesloten, wordt de peildaling direct omgezet in een peilstijging).

De D.N.Z.-sluisen zijn in die tijd juist wel werkzaam: er is altijd positief verval aanwezig over de sluisen. Zie voor afvoergrafieken van de genoemde kunstwerken, de bijlagen BJ.01 en BJ.04.

Net als op de zesde dag wordt de extra afvoer via het gemaal Lauwersoog in SimPlus ook op de zevende dag meer dan gecompenseerd door een afname van de afvoer via de bestaande afvoerkunstwerken in het Noordoosten.

Het gemaal Lauwersoog werkt vooral in de eerste helft van de zevende dag en is daarmee goed voor een daggemiddeld afvoerdebiet van $+27.71 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etm}$, zie tabel TJ3. De boezemafvoer via Dokkumer Nieuwe Zijlen en Zoutkamp neemt die dag af met een percentage van respectievelijk ca. 45 % en 21 %. Dit leidt ertoe dat in SimPlus via het Noordoosten een hoeveelheid van $14.37 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etm}$ minder boezemwater wordt geloosd ten opzichte van BasisSim.

9.2.6 Verklaring van het peilverloop

Inleiding

Hierna worden de waargenomen peilveranderingen op de dagen 5 t/m 7 gekoppeld aan de geconstateerde afvoerverschillen tussen SimPlus en BasisSim. Het gemaal Harlingen blijkt een groot aandeel te hebben in de peildalingen van de vijfde en zesde dag. Een verminderde afvoer van boezemwater op de zevende dag heeft een herverdeling van waterstanden tot gevolg.

De peilveranderingen van de vijfde en zesde dag

Ten opzichte van BasisSim is de totale boezemafvoer in SimPlus op de vijfde dag toegenomen met $+75.20 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etm}$, zie tabel TJ4. Deze toename wordt veroorzaakt door een sterk vergrootte afvoer in het Noordwesten ($+83.23 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etm}$) door het inschakelen van gemaal Harlingen. Dat verklaart ook het feit dat de grootste peildalingen in het Noordwesten plaatsvinden, gevolgd door het Noordoosten en het Centrum van de provincie. De invloed van deze vergrootte afvoer is minder sterk in het Zuiden.

Op de zesde dag heeft de extra boezemafvoer een omvang van $+82.10 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etm}$, zie tabel TJ4 en is ook ditmaal het gevolg van de verhoogde afvoer in het Noordwesten. Vandaar dat de op de vijfde dag ingezette peildalingen zich voortzetten.

Op de vijfde en zesde dag is de afvoer in het Noordoosten en het Zuidwesten, in SimPlus ten opzichte van BasisSim, gelijk gebleven of licht gedaald (de afvoerkunstwerken op die locaties hebben dus feitelijk geen aandeel gehad in de waargenomen peildalingen)

In het Zuidwesten is hiertoe een ongeveer even groot volume aan boezemwater uitgemaal. In het Noordoosten is met een afwisselende inzet van óf de sluizen van Dokkumer Nieuwe Zijlen óf het gemaal Lauwersoog, gecombineerd met de Friese sluis Zoutkamp, een afvoervolume gerealiseerd met ongeveer dezelfde omvang als in BasisSim.

Dat is op het eerste gezicht opmerkelijk, omdat de vergrootte afvoer in het Noordwesten ook boezemwater ‘wegtrekt’ uit het Noordoosten, met als gevolg daarvan lagere boezempeilen in die hoek van de provincie. Dit laatste zorgt weer voor kleinere vervallen over de sluizen en dus lagere afvoeren; maar blijkbaar wordt deze verminderde afvoer voldoende gecompenseerd door de gerealiseerde afvoer via het gemaal Lauwersoog, zodat tussen de totale Noordoostelijke afvoervolumes van respectievelijk SimPlus en BasisSim weinig verschil bestaat.

De peilveranderingen van de zevende dag

Gemaal Harlingen is anders dan op de vijfde en zesde dag niet de gehele zevende dag in werking. Dat heeft zijn weerslag op de waterstanden in het boezemstelsel gedurende de dag: aanvankelijke peildalingen worden getemperd of stopgezet en gaan over in peilstijgingen.

Voor het Noordwesten en het Centraalwesten worden de eerste helft van de zevende dag nog verdere peildalingen waargenomen. In de tweede helft van de zevende dag doen zich echter peilstijgingen voor, zie bijlage BJ.05.

In het Centraaloosten en het Noordoosten wordt bij aanvang van dag 7 de peildaling van de vijfde en de zesde dag ‘stopgezet’: het boezempcil blijft in de eerste helft van de zevende dag rond een bepaald niveau ‘hangen’. In de tweede helft van dag 7 stijgen de boezempeilen, zie bijlage BJ.05.

In het Zuidwesten en het Zuidoosten wordt de eerste helft van de zevende dag gekenmerkt door voortgezette peildalingen. In het Zuidwesten dalen de peilen ook in de tweede helft van dag 7, al neemt de snelheid van de peildalingen voor bepaalde locaties af (een vlakker peilverloop). In het Zuidoosten wordt in de meeste karakteristieke gebieden de peildaling in de tweede helft van de zevende dag getemperd, hetgeen in een aantal gevallen leidt tot een lichte peilstijging tegen het einde van de dag, zie bijlage BJ.05.

In ruwweg de eerste helft van de zevende dag voert het gemaal Harlingen overtollig boezemwater af met een debiet van $+85 \text{ m}^3/\text{s}$. Dit is een voortzetting van de vijfde en zesde dag toen ook gedurende het hele etmaal geloosd werd met dit debiet, $+85 \text{ m}^3/\text{s}$. Dit verklaart de in de eerste helft van de zevende dag waargenomen verdere peildalingen in het gehele boezemstelsel, met uitzondering van het NoordOostelijke en het CentraalOostelijke gebied.

In de eerste helft van de zevende dag zijn, in de NoordOosthoek van de Friese boezem, afwisselend het gemaal Lauwersoog en de sluizen van Dokkumer Nieuwe Zijlen in gebruik, zie bijlagen BJ.01 & BJ.04. In de tweede helft van de zevende dag wordt het uitmalen definitief stopgezet en wordt alleen nog geloosd onder vrij verval.

Het feit dat op deze dag via de afvoermiddelen in het Noordoosten, een hoeveelheid van $14.37 \text{ m}^3/\text{s}$ /etmaal minder wordt geloosd (tabel TJ3), kan een reden zijn dat de boezempeilen in het NoordOostelijke en het CentraalOostelijke gebied niet, zoals elders op de boezem, dalen in de eerste helft van de zevende dag, maar in plaats daarvan op een bepaald niveau blijven ‘hangen’: dit moet dan de resultante zijn van enerzijds verlaging van de waterstanden als gevolg van het op de eerste dagheft nog in werking zijnde gemaal Harlingen en anderzijds verhoging van de peilen als gevolg van de gestremde afvoer via de NoordOostelijk gelegen afvoermiddelen.

In de tweede helft van de zevende dag is het gemaal Harlingen uitgeschakeld. Het daggemiddelde afvoerdebiet van dit gemaal (d.i. $+50.76 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etm}$, zie tabel TJ2) wordt dus feitelijk in zijn geheel gerealiseerd in de eerste dagheft. Daarnaast voeren de Tsjerk Hiddessluizen minder water af in SimPlus ten opzichte van BasisSim. Dit is het gevolg van het feit dat de eerste laagwaterperiode van dag 7 in SimPlus, anders dan in BasisSim, niet wordt benut, zie bijlage BJ.06; de tweede laagwaterperiode wordt in beide simulaties benut, maar in SimPlus wordt hierbij aanmerkelijk minder water afgevoerd, dan in BasisSim, omdat het beschikbare verval kleiner is.

In de tweede helft van de zevende dag vindt dus geen extra afvoer meer plaats via het Noordwesten (SimPlus vergeleken met BasisSim). Daarnaast is ook de afvoer via het Noordoosten verminderd, zoals hierboven is beschreven. Deze wijzigingen in de omvang van de afvoer ten opzichte van de eerste dagheft en de twee dagen daarvoor, verklaren de eerdergenoemde peilveranderingen op de tweede dagheft: er treedt een herverdeling van waterstanden op, zie in de bovenstaande figuur J.01 het peil(verschil)verloop van de dagen 6 en 7, peilstijgingen doen zich voor in de gebieden waar de waterstanden relatief laag zijn (het Noorden en het Centrum) en verdere peildalingen treden op waar de waterstanden naar verhouding hoog liggen (het Zuiden). Het is reëel te veronderstellen dat de, onder invloed van de verhoogde afvoer in het Noordwesten gecreëerde, verhangen in het boezemstelsel, door het stopzetten van diezelfde afvoer, peilnivellerende waterstromingen opgang brengen vanuit het Zuiden naar het Noorden van het boezemstelsel. Aan het einde van de zevende dag wordt zo een redelijk uniform peil verkregen: in de gehele boezem bevinden de peilverschillen zich in het volgende bereik $[-0.13 \text{ m tot } -0.07 \text{ m}]$, zie figuur J.01.

9.3 Periode Dag 8 t/m Dag 10

In de onderstaande tabellen TJ5 tot en met TJ8 staan voor de periode van dag 8 tot en met dag 10 de verschillen tussen SimPlus en BasisSim in de afvoer van de kunstwerken.

<u>ZuidWest - Verschil dagdebieten (SimPlus vs. BasisSim)</u>					
	Woudagemaal		Hooglandgemaal		Σ
Dagen	(m ³ /s/etm)	(%)	(m ³ /s/etm)	(%)	(m ³ /s/etm)
8	-3,14	-4,35	-2,33	-2,46	-5,47
9	-20,71	-28,94	-11,35	-11,95	-32,06
10	-24,65	-34,61	-20,78	-21,87	-45,43

Tabel TJ5: Zuidwest – Afvoerverschil kunstwerken Dag 8 t/m Dag 10

<u>NoordWest - Verschil dagdebieten (SimPlus vs. BasisSim)</u>							
	Tsjerk Hiddes - Klein		Tsjerk Hiddes - Groot		Gemaal Harlingen		Σ
Dagen	(m ³ /s/etm)	(%)	(m ³ /s/etm)	(%)	(m ³ /s/etm)	(%)	(m ³ /s/etm)
8	-1,86	-36,83	-6,11	-36,18	32,17	100,00	24,20
9	-2,56	-52,77	-8,52	-51,93	13,28	100,00	2,20
10	-0,42	-45,48	-1,35	-44,89	10,03	100,00	8,27

Tabel TJ6: Noordwest – Afvoerverschil kunstwerken Dag 8 t/m Dag 10

<u>NoordOost - Verschil dagdebieten (SimPlus vs. BasisSim)</u>									
	DNZ - spuisluis		DNZ - schutsluis		Fr. sluis Zoutkamp		Gemaal Lauw'oog		Σ
Dagen	(m ³ /s/etm)	(%)	(m ³ /s/etm)	(%)	(m ³ /s/etm)	(%)	(m ³ /s/etm)	(%)	(m ³ /s/etm)
8	-3,36	-8,16	-3,99	-12,21	-1,76	-13,94	0,00	100,00	-9,10
9	-5,82	-11,45	-6,13	-14,53	-1,91	-11,82	0,00	100,00	-13,86
10	-6,58	-15,97	-5,26	-15,66	-1,96	-16,19	0,00	100,00	-13,80

Tabel TJ7: Noordoost – Afvoerverschil kunstwerken Dag 8 t/m Dag 10

<u>Friese Boezem - Totaal Afvoerverschil</u>	
	Σ (NoordWest, NoordOost, ZuidWest)
Dagen	(m ³ /s/etm)
8	9,63
9	-43,72
10	-50,96

Tabel TJ8: Totaal afvoerverschil kunstwerken Dag 8 t/m Dag 10

9.3.1 Peildalingen en peilpieken

Sterke peildalingen in het Noordwesten

Op de tweede helft van de achtste dag wordt in het Noordwesten een grote peildaling waargenomen, zie bijlage BJ.05. In veel mindere mate (qua grootte) komt deze peildaling ook voor in het Centraalwesten, het Centraaloosten en het Noordoosten.

Juist op de tweede helft van de achtste dag wordt het gemaal Harlingen weer op vol vermogen ingeschakeld (d.i. een afvoercapaciteit van $85 \text{ m}^3/\text{s}$), na de eerste daghelft en de tweede daghelft van de zevende dag uitgeschakeld te zijn geweest, zie bijlage BJ.01. (dus de daggemiddelde afvoer via gemaal Harlingen van $+32.17 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etm}$, zie tabel TJ6, wordt feitelijk volledig gerealiseerd in de tweede daghelft van dag 8) Het gemaal Harlingen is dus verantwoordelijk voor de waargenomen peildalingen, maar de invloed blijft gezien de grootte van de peildalingen beperkt tot vooral het Noordwesten (de vijfde dag, in vergelijking tot deze achtste dag, laat zien dat naarmate het gemaal Harlingen over een langere periode op vol vermogen werkt, de invloed op de waterstanden in het boezemstelsel groter is, op den duur worden in het gehele systeem significante peildalingen waargenomen)

De genoemde peildaling aan het einde van de achtste dag, gaat in de eerste helft van de negende dag over in een sterke peilstijging. Dit heeft te maken met het weer uitschakelen van het gemaal Harlingen in deze daghelft. De door de afvoer via het gemaal veroorzaakte verhangen in het boezemstelsel nivelleren, na het stopzetten van de afvoer, de verschillen in de peilen die gecreëerd zijn.

Aan het einde van de tiende dag is in (vooral) het Noordwesten eenzelfde peildaling (maar kleiner van omvang), gevolgd door een evenredige peilstijging, waar te nemen, als hierboven is beschreven. Ook ditmaal is de oorzaak hiervan het voor korte tijd inschakelen van het gemaal Harlingen op volle sterkte, en wel aan het slot van de tiende dag.

Peilpieken door buiten werking zetten afvoerkunstwerken

In bijlage BJ.05, in de grafieken voor het Zuidwesten zijn pieken in het peilverloop waar te nemen bij het begin van dag 8, rond het begin van dag 10 en aan het einde van de tiende dag. Deze pieken gelden voor het gebied rond het Hooglandgemaal (node 11) en het Woudagemaal (nodes 12, 13 en 14). De verklaring hiervoor is dat op de genoemde momenten de gemalen tijdelijk niet uitmalen met de maximale capaciteit, maar met een lagere capaciteit, of zelfs buiten werking zijn gesteld; dit heeft tot gevolg dat de peilen nabij de gemalen voor een korte tijd (sterk) stijgen.

In het Noordoosten wordt aan het einde van de tiende dag een vergelijkbare piek in het peilverloop waargenomen (nodes 33 tot en met 37). Deze is het gevolg van het sluiten van de sluizen van Dokkumer Nieuwe Zijlen en Zoutkamp aan het slot van de tiende dag.

9.3.2 De afvoer in het Noordoosten

Het gemaal Lauwersoog wordt deze drie dagen niet geactiveerd. Op de achtste en op de negende dag zijn de sluizen van Dokkumer Nieuwe Zijlen en Zoutkamp de gehele dag geopend, maar tabel TJ7 laat zien dat daggemiddeld een kleiner volume water wordt afgevoerd; blijkbaar is gemiddeld een kleiner verval aanwezig in SimPlus ten opzichte van BasisSim. Voor de tiende dag geldt dat de sluizen van Dokkumer Nieuwe Zijlen en Zoutkamp continu geopend zijn, maar even voor het einde van de dag gesloten worden. Dit verklaart mede de verminderde afvoer op deze dag (in BasisSim waren de sluizen wel het volledige etmaal ingeschakeld). Gemiddeld neemt de lozing via de kunstwerken in het Noordoosten voor de achtste tot en met de tiende dag af met 13.33 %.

9.3.3 De afvoer in het Zuidwesten

Op de dagen 9 en 10 neemt de daggemiddelde afvoer via het Zuidwesten behoorlijk af, zie tabel TJ5. Het Hooglandgemaal maalt met een lagere capaciteit uit gedurende de tweede helft van de negende dag en de eerste helft van de tiende dag, zie bijlage BJ.02. Daarnaast wordt het gemaal net voor het einde van de tiende dag uitgeschakeld. Het Woudagemaal maalt deze beide dagen grotendeels niet op vol vermogen, maar op een wat lagere capaciteit, namelijk $65 \text{ m}^3/\text{s}$ in plaats van $72 \text{ m}^3/\text{s}$. Daarnaast wordt het gemaal uitgeschakeld tegen het einde van de negende dag om in de loop van de tiende dag weer in werking te worden gesteld, zie bijlage BJ.02.

Net als bij het Hooglandgemaal wordt het lozen via het Woudagemaal ook net voor het einde van de tiende dag stopgezet. Een en ander verklaart de geconstateerde reductie van de totale afvoersom vanuit het Zuidwesten (in BasisSim werken de beide gemalen op dag 9 en 10 continu op volle sterkte).

9.3.4 De afvoer in het Noordwesten

Op de dagen 9 en 10 is de extra afvoer vanuit het Noordwesten relatief gering, zie tabel TJ6. Dit heeft als oorzaak dat het gemaal Harlingen slechts een korte tijd is ingeschakeld; een kort moment aan het begin van de negende dag en een kort moment aan het einde van de tiende dag, maar daarbij wel met een capaciteit van $85 \text{ m}^3/\text{s}$, zie bijlage BJ.01. De Tsjerk Hiddessluizen voeren structureel minder water af.

9.3.5 De totale afvoer en peilveranderingen

Op de negende en de tiende dag wordt gezien over de gehele boezem veel minder water afgevoerd, zie tabel TJ8 (Het Zuidwesten heeft het grootste aandeel in deze vermindering van de afvoer, daarna het Noordoosten). In principe moet dit gegeven tot peilstijgingen leiden: er blijft die dagen een volume boezemwater van meer dan $40 \text{ m}^3/\text{s}$ /etmaal ‘achter’ in het systeem (ten opzichte van BasisSim). De tendens in het gehele boezemstelsel, met uitzondering van het Zuidwesten, is inderdaad een stijging van de peilen voor de periode van de achtste dag tot en met de tiende dag. Zie bijlage BJ.05. In het Zuidwesten vertoont het peil vanaf het begin van de achtste dag tot en met de eerste helft van de negende dag weinig verandering, is min of meer constant. Vanaf de tweede helft van de negende dag treedt dan een peilstijging op, die vanaf de tweede daghelft van de tiende dag weer overgaat in een redelijk constant peil.

9.4 Periode Dag 11 t/m Dag 19

In de onderstaande tabellen TJ9 tot en met TJ12 zijn de verschillen gegeven in de daggemiddelde afvoerdebieten tussen SimPlus en BasisSim van de verschillende kunstwerken voor de periode van de elfde tot en met de negentiende dag.

ZuidWest - Verschil dagdebieten (SimPlus vs. BasisSim)					
	Woudagemaal		Hooglandgemaal		Σ
Dagen	(m ³ /s/etm)	(%)	(m ³ /s/etm)	(%)	(m ³ /s/etm)
11	-3,00	-4,17	-3,96	-4,17	-6,96
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19	-7,50	-10,42	-11,20	-11,79	-18,70

Tabel TJ9: Zuidwest – Afvoerverschil kunstwerken Dag 11 t/m Dag 19

NoordWest - Verschil dagdebieten (SimPlus vs. BasisSim)							
	Tsjerk Hiddes - Klein		Tsjerk Hiddes - Groot		Gemaal Harlingen		Σ
Dagen	(m ³ /s/etm)	(%)	(m ³ /s/etm)	(%)	(m ³ /s/etm)	(%)	(m ³ /s/etm)
11	-2,16	-100,00	-7,09	-100,00	81,46	100,00	72,20
12	-5,87	-98,14	-19,00	-98,01	85,00	100,00	60,12
13	-5,48	-100,00	-17,42	-100,00	85,00	100,00	62,10
14	-5,72	-100,00	-18,06	-100,00	85,00	100,00	61,22
15	0,00	-	0,00	-	85,00	100,00	85,00
16	-6,81	-90,47	-21,25	-89,62	85,00	100,00	56,93
17	-4,25	-100,00	-12,96	-100,00	85,00	100,00	67,79
18	-1,42	-100,00	-4,39	-100,00	85,00	100,00	79,19
19	-1,28	-100,00	-4,01	-100,00	2,66	100,00	-2,63

Tabel TJ10: Noordwest – Afvoerverschil kunstwerken Dag 11 t/m Dag 19

NoordOost - Verschil dagdebieten (SimPlus vs. BasisSim)									
	DNZ - spuisluis		DNZ - schutsluis		Fr. sluis Zoutkamp		Gemaal Lauw'oog		Σ
Dagen	(m ³ /s/etm)	(%)	(m ³ /s/etm)	(%)	(m ³ /s/etm)	(%)	(m ³ /s/etm)	(%)	(m ³ /s/etm)
11	-6,67	-16,22	-4,20	-14,09	-1,76	-14,06	0,73	100,00	-11,90
12	-6,59	-13,13	-6,38	-15,89	-2,39	-14,48	0,00	100,00	-15,35
13	-6,70	-13,13	-5,90	-14,52	-2,62	-15,62	0,00	100,00	-15,21
14	-36,40	-75,17	-24,83	-72,75	-2,88	-17,86	58,05	100,00	-6,06
15	-47,21	-100,00	-31,39	-100,00	-1,68	-10,85	82,97	100,00	2,70
16	-40,49	-90,26	-28,83	-88,21	-1,95	-12,24	73,70	100,00	2,43
17	-21,32	-36,74	-15,69	-35,43	-4,15	-20,93	18,70	100,00	-22,46
18	-42,80	-98,93	-30,87	-98,37	-3,33	-23,99	66,41	100,00	-10,59
19	-12,95	-38,16	-12,51	-49,82	-5,39	-52,68	5,31	100,00	-25,53

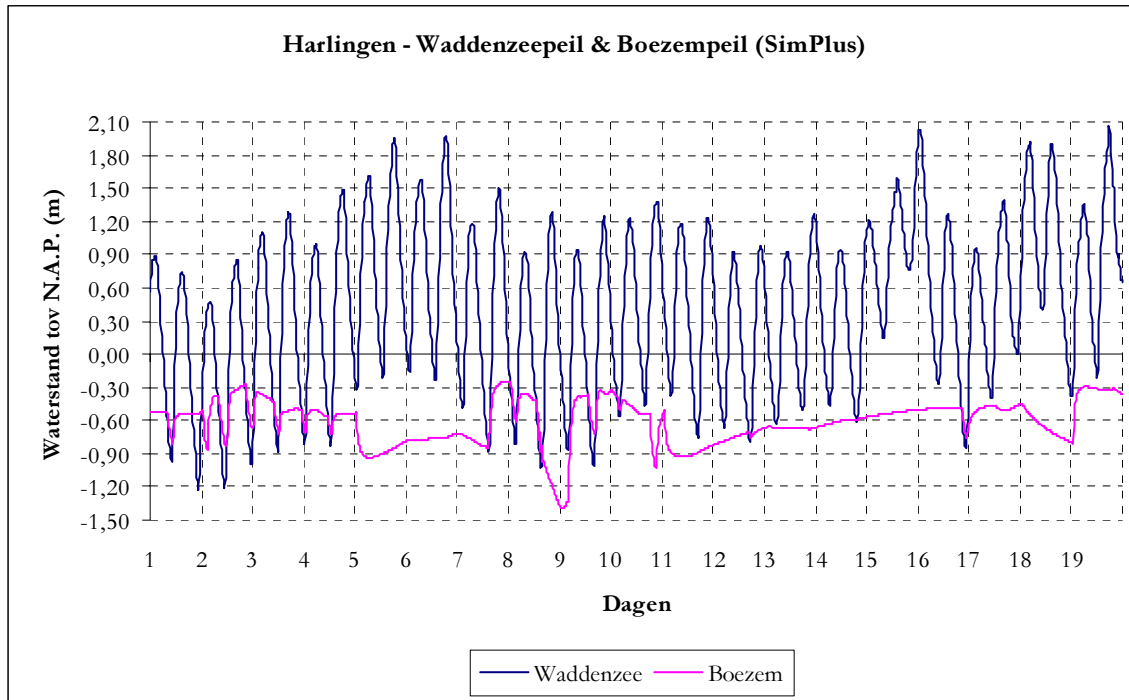
Tabel TJ11: Noordoost – Afvoerverschil kunstwerken Dag 11 t/m Dag 19

Friese Boezem - Totaal Afvoerverschil	
	Σ (NoordWest, NoordOost, ZuidWest)
Dagen	(m ³ /s/etm)
11	53,34
12	44,77
13	46,88
14	55,16
15	87,70
16	59,36
17	45,33
18	68,60
19	-46,86

Tabel TJ12: Totaal afvoerverschil kunstwerken Dag 11 t/m Dag 19

9.4.1 De afvoer in het Noordwesten

Zie tabel TJ10: In de periode van dag 11 tot en met dag 18 is het gemaal Harlingen voortdurend in werking en met de maximale capaciteit (d.i. 85 m³/s). Tegelijkertijd neemt de afvoer via de Tsjerk Hiddessluizen zeer sterk af; op de meeste dagen is het spuivolume tot nul gereduceerd (zie in tabel TJ10 de procentuele afname in de dagdebieten); er wordt die dagen dus niet geloosd. De reden hiervoor is dat gedurende deze dagen geen positief verval over de sluisen aanwezig is, zie de onderstaande figuur J.02, het Waddenzeepeil ligt voortdurend hoger dan het lokale boezempeil. De waarschijnlijke oorzaak is dat het gemaal Harlingen met het uitmalen invloed heeft op het lokale boezempeil en daarmee op het spuivermogen van de Tsjerk Hiddessluizen.



Figuur J.02: Harlingen – Waddenzeegetijde en (locaal) peilverloop van de boezem

Een en ander heeft tot gevolg dat de totale extra afvoer (in SimPlus) via het Noordwesten op de meeste dagen kleiner is dan de afvoer welke met het gemaal Harlingen alleen gerealiseerd wordt, zie in de tabel TJ10 de Σ -kolom.

In de onderstaande tabel TJ13 is dat verschil tussen het uitgemalen debiet en het totaal afgevoerde debiet weergegeven als percentage van het uitgemalen debiet. Dit verschil, de afvoerreductie, veroorzaakt doordat twee nabijgelegen kunstwerken elkaar beïnvloeden, is op vijf van de acht dagen groter dan 20 %, tot een maximum van 33,0 % op de zestiende dag, zie de tabel TJ13.

NoordWest - Uitgemalen debiet vs. Totaal afgevoerd debiet								
Dagen	11	12	13	14	15	16	17	18
Vershil (%)	11,4	29,3	26,9	28,0	0,0	33,0	20,2	6,8

Tabel TJ13: Verschil tussen uitgemalen debiet en totaal afgevoerd debiet in het Noordwesten

9.4.2 De afvoer in het Noordoosten

Uit de tabel TJ11 valt op te maken dat in het Noordoosten op de meeste dagen minder boezemwater wordt geloosd in SimPlus ten opzichte van BasisSim, zie de Σ -kolom. Op de eerste drie dagen is het gemaal Lauwersoog nog niet werkzaam. De sluizen van Dokkumer Nieuwe Zijlen en Zoutkamp spuien die dagen echter minder boezemwater op het Lauwersmeer (een procentuele afname van ca. 15 %, zie tabel TJ11), hoewel de sluizen wel voortdurend geopend staan; een kleiner beschikbaar verval is hier debet aan.

Op de dagen 14 tot en met 18 is het gemaal Lauwersoog wel werkzaam; in de loop van de veertiende dag wordt het gemaal ingezet en met een onderbreking op de zeventiende dag, wordt het uitmalen voortgezet tot het einde van de achttiende dag, zie bijlage BJ.01.

In die dagen neemt de afvoer via Dokkumer Nieuwe Zijlen sterk af; van ca. 35 % op de zeventiende dag tot 100 % op de vijftiende dag. Uit de afvoergrafieken van de sluizen van Dokkumer Nieuwe Zijlen en van het gemaal Lauwersoog valt op te maken dat ook nu de sluizen ingeschakeld zijn als het gemaal niet werkzaam is en andersom, als het gemaal wordt geactiveerd, dat de sluizen dan gesloten worden; hetzelfde mechanisme dus als eerder in de simulatieperiode. De waargenomen reductie in de afvoer via Dokkumer Nieuwe Zijlen is dus voor het grootste deel het gevolg van het tijdelijk sluiten van de sluizen. De Σ -kolom in tabel TJ11 laat zien dat het afwisselend in werking zijn van de D.N.Z.-sluizen en het gemaal Lauwersoog (gecombineerd met de lozing via Zoutkamp) meestal geen groter afvoervolume genereert; de toename in de afvoer door uitmalen is kleiner dan de gelijktijdige afname in de afvoer door lozen onder vrij verval.

Op de dagen 14 tot en met 18 loost de Friese sluis bij Zoutkamp wel voortdurend boezemwater, zij het dat het afvoervolume kleiner is, net als op de voorgaande drie dagen.

9.4.3 De afvoer in het Zuidwesten

Uit de tabel TJ9 blijkt dat, behalve voor dag 11 en dag 19, het dagelijks gerealiseerde afvoervolume in SimPlus hetzelfde is als in BasisSim. In beide simulaties werken het Hooglandgemaal en het Woudagemaal op die dagen continu met de hoogste maalcapaciteit.

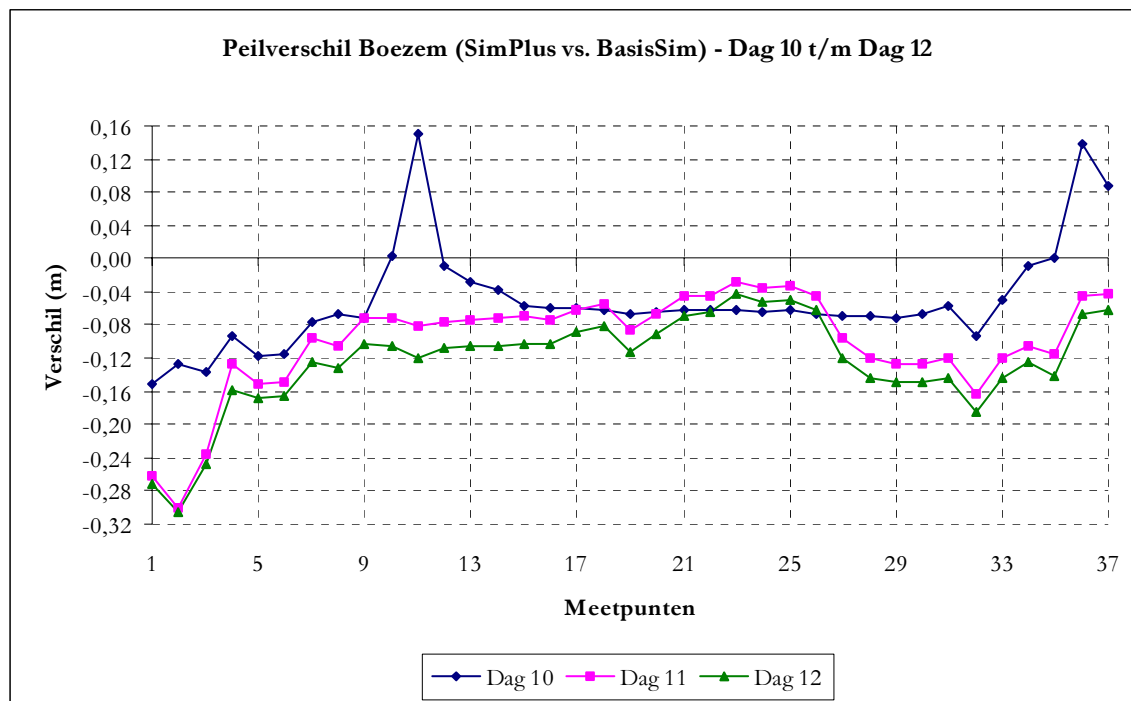
9.4.4 Peilveranderingen Dag 11 t/m Dag 14

Ten opzichte van de tiende dag zijn de peildalingen op de elfde dag het grootst in het Noordwesten, het Centraaloosten en het Noordoosten, zie de onderstaande figuur J.03.

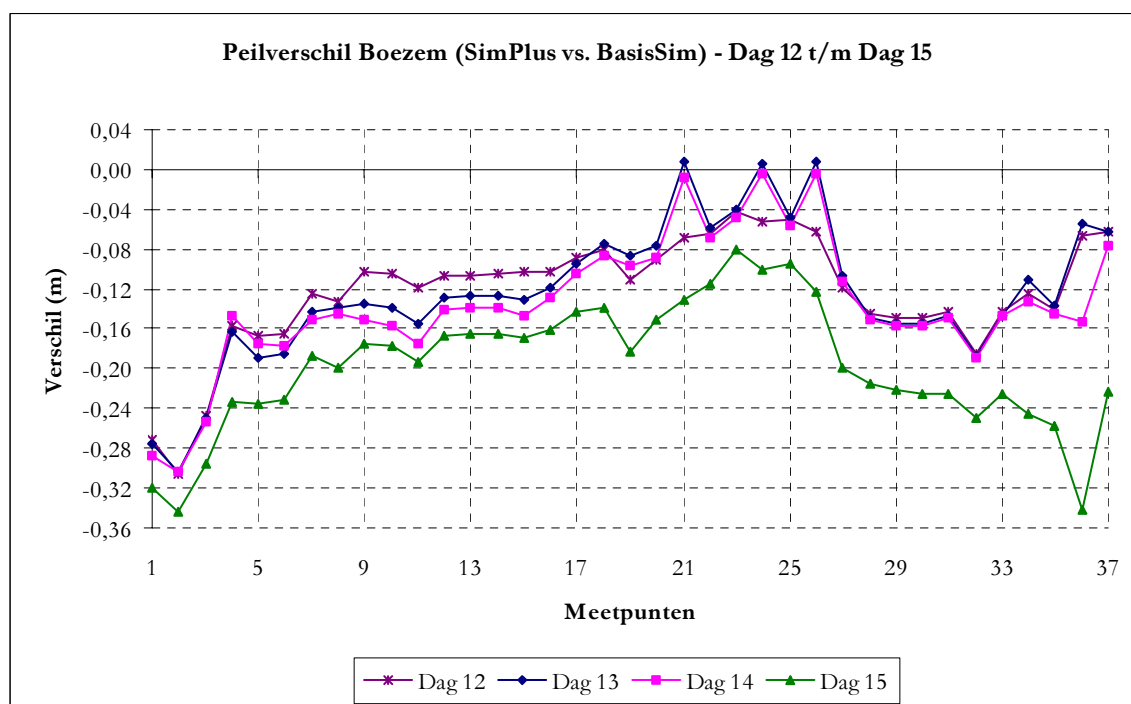
Op de twaalfde, de dertiende en de veertiende dag worden voornamelijk peildalingen waargenomen in het Centraalwesten en het Zuidwesten van de provincie. In het Noordwesten, het Noordoosten en het Centraaloosten dalen de peilen na de twaalfde dag niet veel verder meer. In het Zuidoosten zijn lichte peilstijgingen waar te nemen. Zie de figuren J.03 en J.04.

Dus de invloed van de extra afvoer in het Noordwesten (zie tabel TJ10, de Σ -kolom) wordt na verloop van tijd merkbaar in het hele boezemstelsel (de waargenomen peildalingen), te beginnen in het Noordelijk deel van de provincie.

In het Noordoosten vindt, zoals gezien, minder afvoer plaats (tabel TJ11, de Σ -kolom), in principe moet dit leiden tot hogere peilen, maar de invloed van de verhoogde afvoer in het Noordwesten is groter, zodat toch een verlaging van de peilen wordt waargenomen in het Noordoostelijke gebied.



Figuur J.03: Peilverschillen in boezemsysteem – dag 10 t/m dag 12



Figuur J.04: Peilverschillen in boezemsysteem – dag 12 t/m dag 15

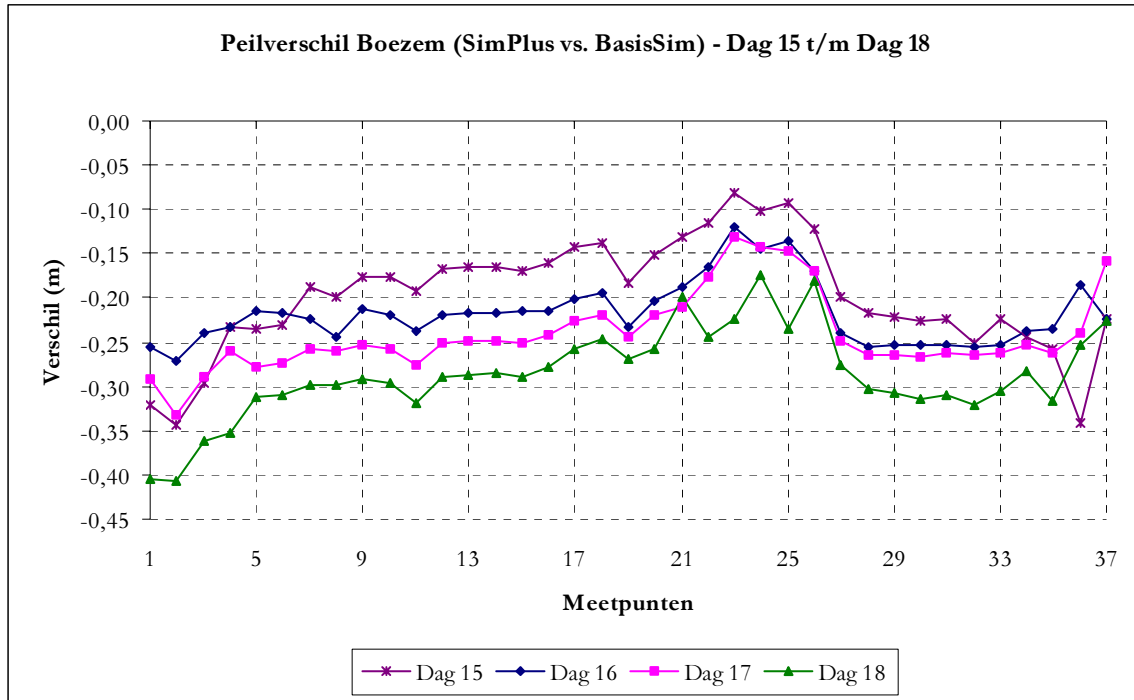
9.4.5 Peilveranderingen Dag 15 t/m Dag 19

Op de vijftiende dag vinden er peildalingen plaats in het gehele boezemstelsel, zie de figuur J.04. Op die dag is juist de totale extra afvoer uit het systeem relatief hoog, namelijk $87.70 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$, zie tabel TJ12. Deze afvoer komt vrijwel in zijn geheel voor rekening van het gemaal Harlingen.

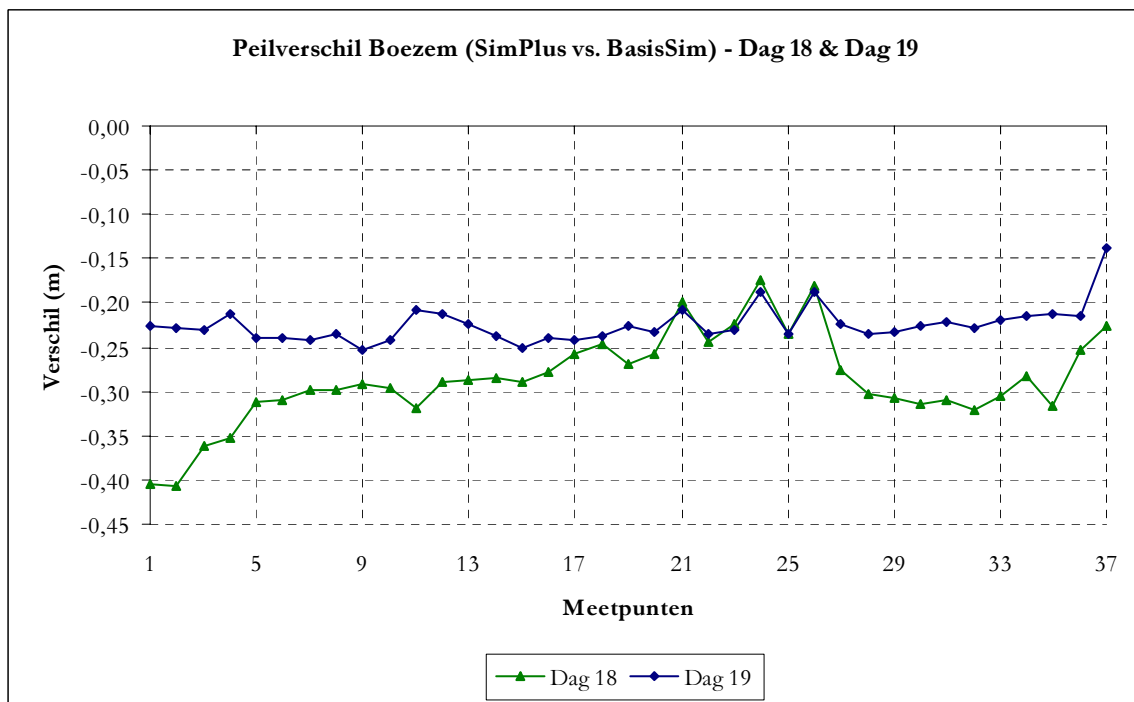
Op de zestiende, zeventiende en achttiende dag zetten deze peildalingen zich verder voort over de gehele boezem, onder invloed van met name de extra afvoer in het Noordwesten. Zie de onderstaande figuur J.05 en de bijlage BJ.05.

In het Centraaloosten en het Noordoosten vinden op de zeventiende dag (ten opzichte van de zestiende dag) geen of slechts geringe peildalingen plaats, zie de figuur J.05 en de bijlage BJ.05. Een verklaring hiervoor kan zijn dat juist op die dag de lozing via de Noordoostelijk gelegen afvoerkunstwerken veel kleiner is dan in BasisSim op dezelfde dag (een verschil van $22.46 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$, zie tabel TJ11).

Op de negentiende dag is de gerealiseerde afvoer vooral in het Zuidwesten en het Noordoosten veel kleiner dan in BasisSim. Zie de tabellen TJ9 en TJ11. Dit leidt tot een totaal afvoerverschil tussen de beide simulaties van $46.86 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$. Over vrijwel de gehele boezem zorgt dit voor peilstijgingen, zie de onderstaande figuur J.06 en bijlage BJ.05.



Figuur J.05: Peilverschillen in boezemsysteem – dag 15 t/m dag 18

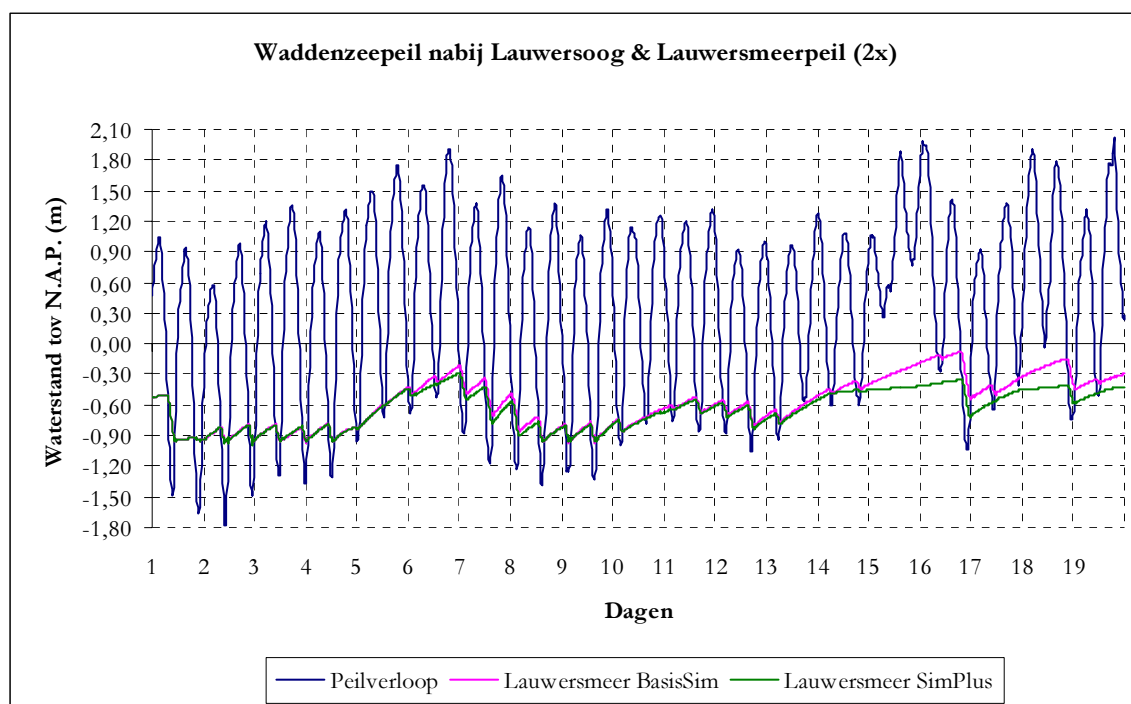


Figuur J.06: Peilverschillen in boezemsysteem – dag 18 & dag 19

9.5 Lauwersmeer en Lauwersoog

Bij een hoger Lauwersmeerpeil kunnen meer laagwaterperiodes worden benut om water te lozen. De randvoorwaarde bij de spuisluizen van Lauwersoog is een getijdereeks van de Waddenzee. In de periode van negentien dagen, bevinden zich in deze periodieke reeks 36 laagwaters.

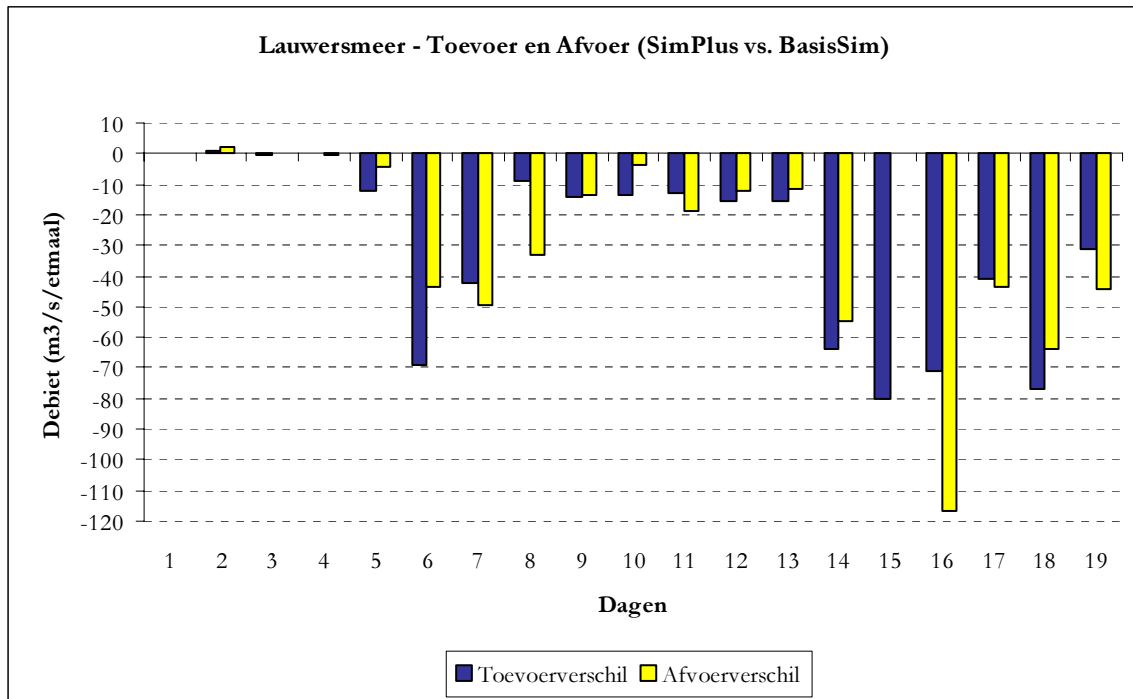
In BasisSim worden 30 laagwaterperiodes benut om overtollig Lauwersmeerwater te lozen. In SimPlus worden 27 laagwaters gebruikt om te spuien. In BasisSim en SimPlus zijn dus respectievelijk zes en negen laagwaters onbenut gelaten. Deze ‘ongebruikte’ ebperiodes doen zich voor beide simulaties voor in de dagen vanaf de tiende dag. Ter illustratie is in de onderstaande figuur J.07 het verloop van het Lauwersmeerpeil voor zowel BasisSim als SimPlus uitgezet, tezamen met het Waddenzeegetijde bij Lauwersoog.



Figuur J.07: Lauwersoog – Waddenzeegetijde en Lauwersmeerpeil (BasisSim & SimPlus)

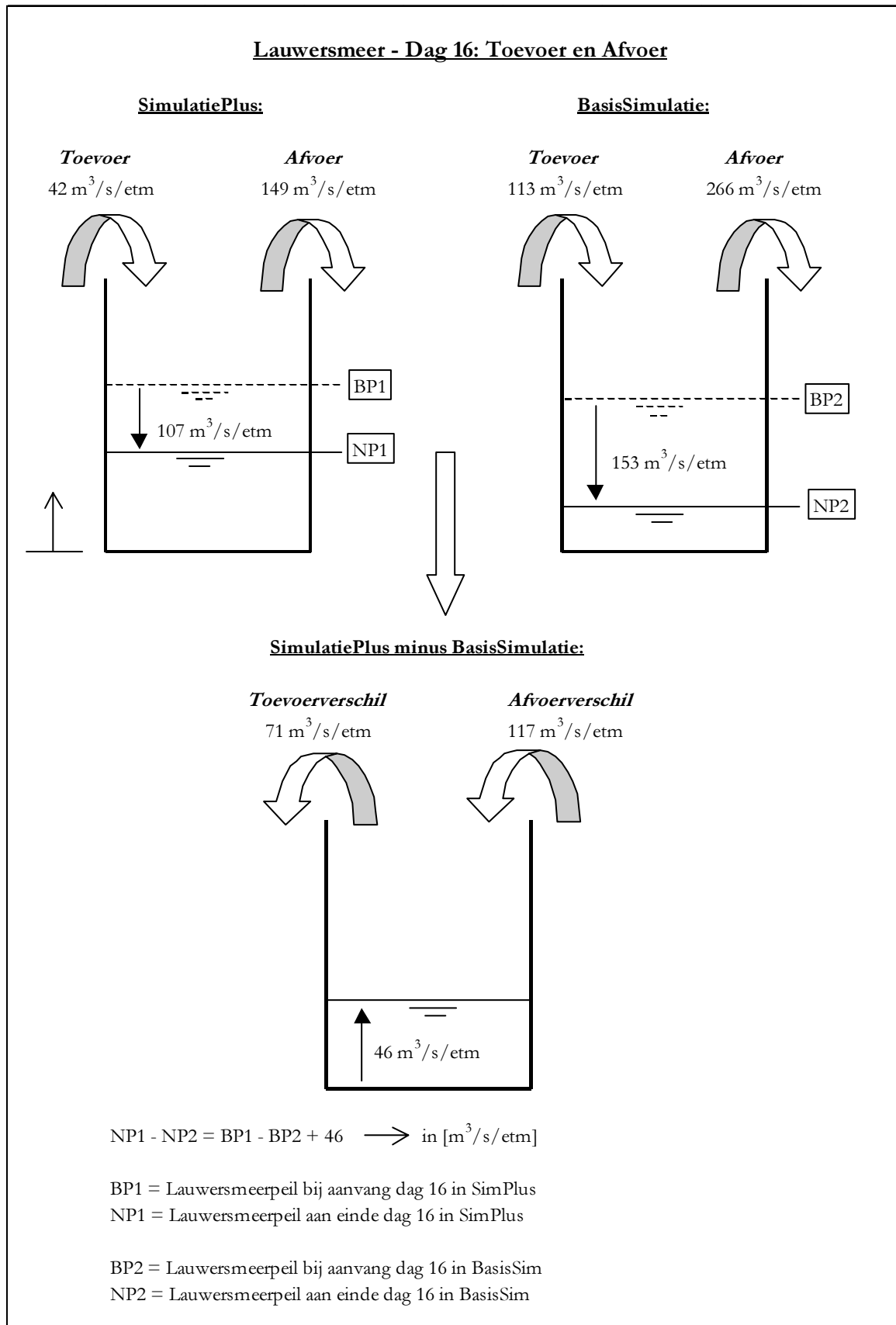
Juist vanaf de tiende dag komt het Lauwersmeerpeil, in zowel BasisSim als in SimPlus, niet meer op streefpeil (N.A.P. -0.93 m) terug; in principe moet volgens de sturingsregels van de spuisluizen van Lauwersoog dan altijd geloosd worden: bij elk laagwater dat na de tiende dag optreedt. De keren dat niet gespuid wordt na de tiende dag zijn dan het gevolg van het feit dat geen of een te klein verval aanwezig is, bij de respectieve laagwaters; dit is bij SimPlus vaker het geval dan bij BasisSim (resp. 9 keer en 6 keer).

Bij een lagere daggemiddelde toevoer op het Lauwersmeer is ook de gerealiseerde afvoer geringer, maar niet per se in dezelfde mate. Echter, over een langere periode gemiddeld, betekent een verminderde toevoer een evenredig verminderde afvoer. Ten opzichte van BasisSim wordt in SimPlus vanaf dag 5 tot en met dag 19 minder water afgevoerd naar de Waddenzee vanaf het Lauwersmeer (behalve op dag 15, dan vindt in beide simulaties geen afvoer plaats, omdat die dag zelfs de laagwaterstanden van de Waddenzee permanent hoger liggen dan het Lauwersmeerpeil, zodat spuien onder vrij verval niet mogelijk is, zie de bovenstaande figuur J.07). Anderzijds wordt vanaf dag 5 tot en met dag 19 ook minder water toegevoerd naar het Lauwersmeer in SimPlus, ten opzichte van BasisSim. (Op de dagen 1 tot en met 4 is het afvoerverschil en het toevoerverschil tussen beide simulaties naar verhouding minimaal) In de onderstaande figuur J.08 is het verschil in respectievelijk toevoer en afvoer tussen BasisSim en SimPlus uitgezet voor de negentiendaagse simulatieperiode.



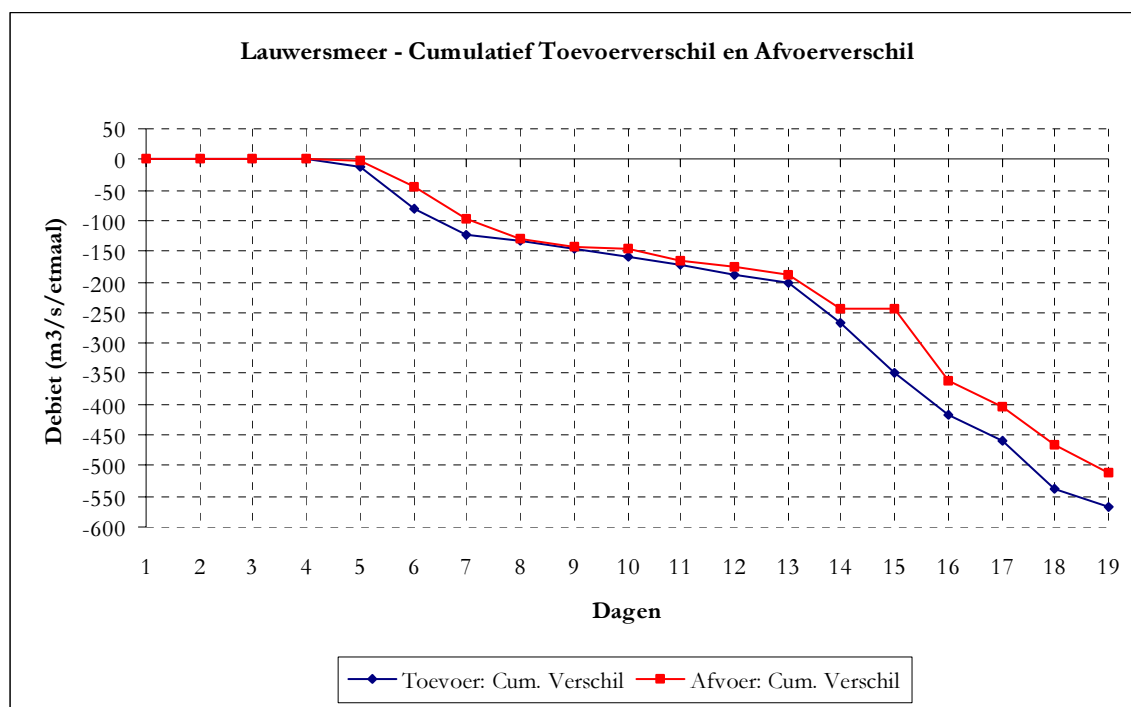
Figuur J.08: Lauwersmeer – Verschillen in toevoer en afvoer tussen SimPlus en BasisSim

Voorbeeld: op dag 16 is het toevoerverschil $-71 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$. Dit betekent dat in SimPlus een hoeveelheid water van $71 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$ minder wordt geloosd op het Lauwersmeer dan in BasisSim. Daarnaast is op dag 16 het afvoerverschil $-117 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$. Dus in SimPlus wordt die dag een volume water van $117 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$ minder afgevoerd naar de Waddenzee ten opzichte van BasisSim. Op dag 16 is de reductie in de afvoer dus groter dan de reductie in de toevoer, daarom bevindt zich deze dag in SimPlus, ten opzichte van BasisSim, een extra hoeveelheid water van $+46 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$ op het Lauwersmeer (d.i. $117 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$ minus $71 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$). Een en ander is weergegeven in onderstaande figuur J.09.



Figuur J.09: Lauwersmeer – Toevoer en afvoer van water op dag 16 (BasisSim & SimPlus)

Uit het voorbeeld en de bovenstaande grafiek J.09 blijkt dat een lagere toevoer op een bepaalde dag niet altijd een lagere afvoer van dezelfde grootte-orde tot gevolg heeft. Zo is op de zesde dag het toevoerverschil in absolute zin een stuk groter dan het afvoerverschil, terwijl twee dagen later, op de achtste dag, het omgekeerde het geval is. De vraag is vervolgens of wellicht over meerdere dagen gezien het (gesommeerde) toevoerverschil zich qua grootte verhoudt tot het (gesommeerde) afvoerverschil. In onderstaande figuur J.10 zijn deze cumulatieve toevoerverschillen en afvoerverschillen uitgezet; bijvoorbeeld: op dag 10 bedraagt het cumulatieve toevoerverschil $-160 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$; deze waarde wordt verkregen door de toevoerverschillen van dag 1 tot en met dag 10 te sommeren.



Figuur J.10: Lauwersmeer – Cumulatief toevoer- en afvoerverschil (SimPlus vs. BasisSim)

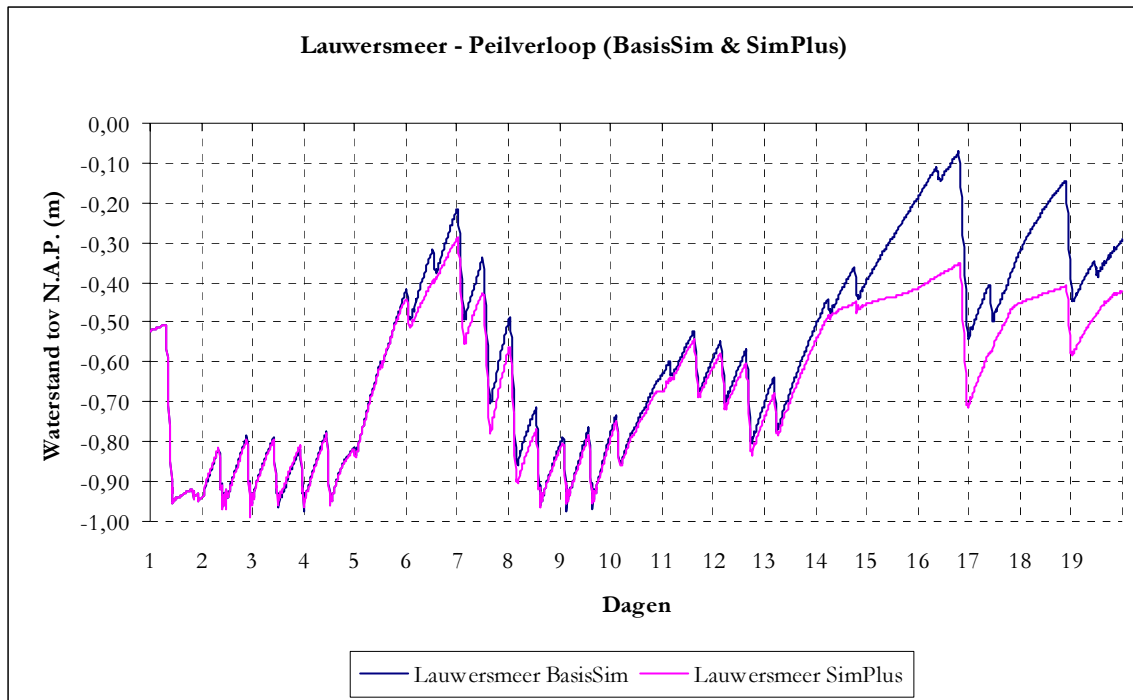
Opvallend in de bovenstaande grafiek J.10 is dat vanaf dag 1 tot en met dag 14 het cumulatieve toevoerverschil vrijwel gelijk is aan het cumulatieve afvoerverschil; bijvoorbeeld: op dag 14 bedraagt het cumulatieve toevoerverschil $-267 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$, terwijl het cumulatieve afvoerverschil $-243 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$ bedraagt.

Dit betekent dat vanaf dag 1 tot en met dag 14 een totale hoeveelheid water van $267 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$ minder is toegevoerd naar het Lauwersmeer (in SimPlus ten opzichte van BasisSim) en een totale hoeveelheid van $243 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$ minder is afgevoerd naar de Waddenzee. Over meerdere dagen gezien betekent een verminderde toevoer dus een min of meer evenredig verminderde afvoer.

In het verlengde hiervan het volgende: In de grafiek J.10 is te zien dat op de zesde dag het cumulatieve toevoerverschil in absolute zin groter is dan het cumulatieve afvoerverschil (resp. $-81 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$ en $-46 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$). Ten opzichte van BasisSim bevindt zich in SimPlus op de zesde dag dus een hoeveelheid water van $35 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$ (d.i. $81 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$ minus $46 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$) minder op het Lauwersmeer.

Dit betekent dat het Lauwersmeerpeil in SimPlus die dag gemiddeld lager ligt dan in BasisSim. Op de zevende dag is er nog steeds een dergelijk 'tekort' aan water, zie de bovenstaande grafiek J.10. Echter, op de achtste dag wordt deze discrepantie weer rechtgetrokken, doordat voor die dag het afvoerverschil in absolute zin groter is dan het toevoerverschil, zie de grafiek J.08: dit betekent dat de afvoer in SimPlus naar verhouding laag is en de toevoer relatief hoog.

Dit heeft tot gevolg dat het cumulatieve toevoerverschil op de achtste dag weer gelijk is aan het cumulatieve afvoerverschil: het ‘tekort’ aan water op het Lauwersmeer is weggewerkt, gemiddeld ligt het Lauwersmeerpeil in SimPlus weer op hetzelfde niveau als in BasisSim. Dit is ook af te lezen in onderstaande grafiek J.11 waarin het Lauwersmeerpeil is uitgezet voor beide simulaties: vanaf de tweede helft van de achtste dag zijn de peilverlopen van BasisSim en SimPlus weer identiek (zoals ze dat ook waren in de periode vóór de zesde dag) en dit blijft min of meer het geval tot aan de veertiende dag. In de grafiek J.11 is tevens het hierboven beschreven peilverschil tussen SimPlus en BasisSim op de zesde en zevende dag waar te nemen.



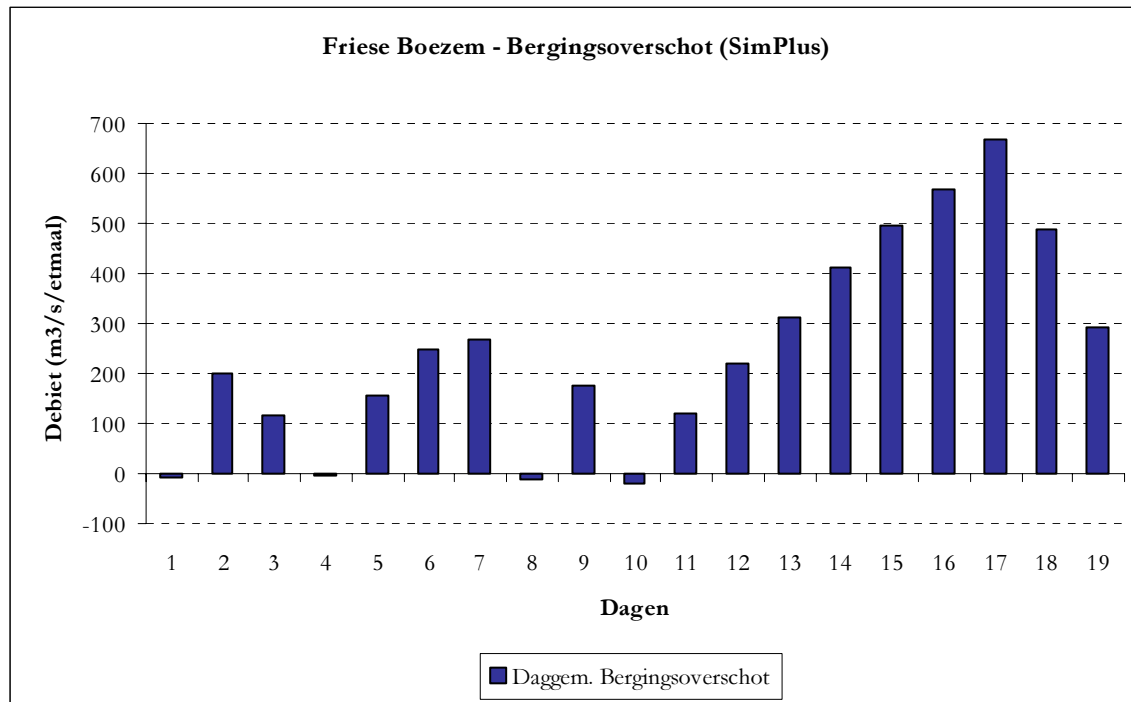
Figuur J.11: Waterstandsverloop op het Lauwersmeer in BasisSim en SimPlus

Opvallend is verder de vijftiende dag, zie grafiek J.08, het toevoerverschil bedraagt $-80 \text{ m}^3/\text{s}$ /etmaal, terwijl er geen afvoerverschil is. Dit zorgt ervoor dat het cumulatieve toevoerverschil die dag behoorlijk groter wordt dan het cumulatieve afvoerverschil (Dit betekent dat op dag 15 zich minder water in het Lauwersmeer bevindt, in SimPlus ten opzichte van BasisSim).

Op dag zestien wordt dit grootte-verschil weer enigszins rechtgetrokken, doordat op die dag in SimPlus relatief weinig afvoer is, in relatie tot de toevoer. Grafiek J.10 laat echter zien dat ook in de dagen die daarna nog volgen een bepaald, min of meer constant, grootte-verschil tussen het cumulatieve toevoerverschil en het cumulatieve afvoerverschil blijft bestaan: dit verschil wordt niet volledig weggewerkt (zoals op de achtste dag wel gebeurde), hiertoe zou de toevoer in SimPlus de afvoer ruimschoots moeten overtreffen, dit gebeurt niet: voor de resterende dagen 17 tot en met 19 geldt dat het dagelijkse toevoerverschil en afvoerverschil van dezelfde grootte-orde zijn. Een en ander betekent dat het Lauwersmeerpeil in SimPlus vanaf de vijftiende dag structureel lager ligt dan in BasisSim, dit is inderdaad het geval, zoals te zien is in de grafiek J.11.

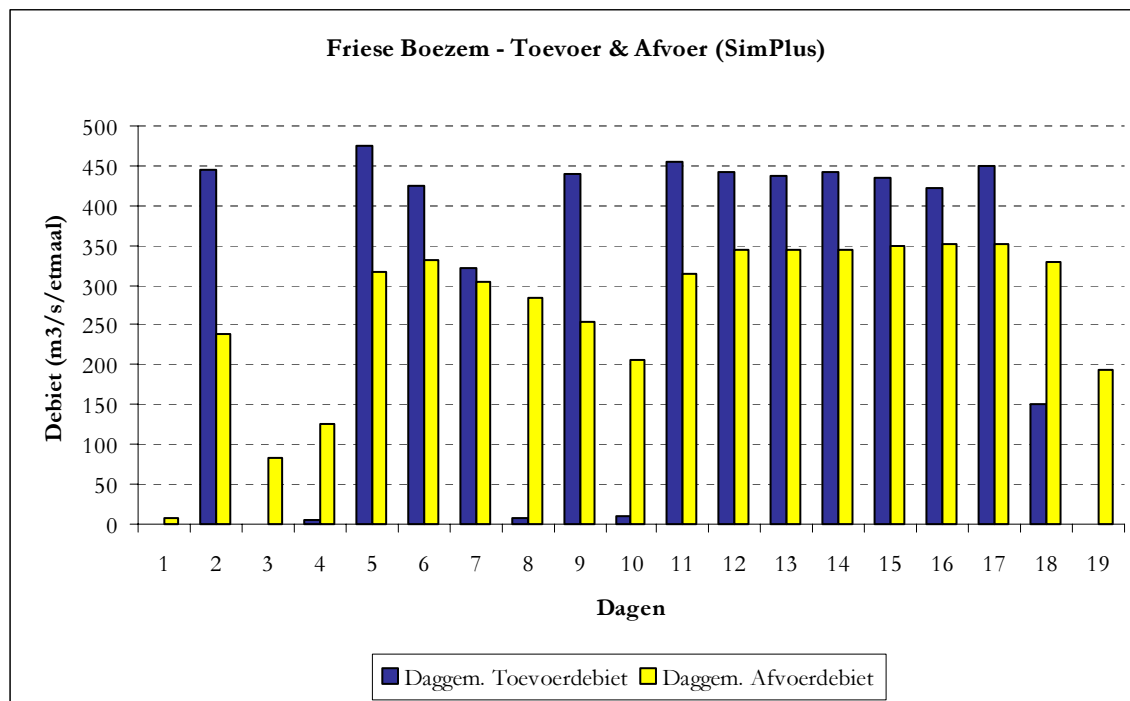
9.6 Peiloverschrijdingen in SimPlus

Uit de waterstandsverlopen van de 38 meetpunten in het boezemnetwerk blijkt dat aan het einde van de tiende dag het boezempeil voor veel meetpunten weer dichtbij het streefpeil ligt of zelfs lager. Dit komt overeen met de waarneming dat op de tiende dag het bergingsoverschot zich rond het nulniveau bevindt; exact: $-19 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$, zie figuur J.12. (In BasisSim was het bergingsoverschot op de tiende dag nog $+72 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$)



Figuur J.12: Verloop omvang bergingsoverschot Friese boezem in SimPlus

De laatste extreme periode van de boezembelasting (de dagen 11 tot en met dag 18) wordt dus aangevangen met het boezemstelsel gemiddeld iets onder streefpeil (vanwege het negatieve bergingsoverschot). De tabel TJ12 laat zien dat vanaf de elfde tot en met de achttiende dag meer boezemwater wordt geloosd dan in BasisSim. Desondanks is in die periode de boezembelasting nog steeds groter dan de nu verhoogde boezemafvoer, zie de onderstaande figuur J.13. Hierdoor neemt vanaf de elfde dag het bergingsoverschot steeds meer toe en bijna lineair, zie figuur J.12. Op de zeventiende dag wordt dan het grootste bergingsoverschot van de gehele simulatieperiode bereikt (vanaf de achttiende dag overtreft de boezemafvoer voor het eerst weer de boezemtoevoer), met een grootte van $667 \text{ m}^3/\text{s}/\text{etmaal}$. Dit komt overeen met een gemiddelde peilstijging boven het streefpeil van $+0.38 \text{ m}$.



Figuur J.13: Het Friese boezemstelsel – Boezembelasting en boezemafvoer in SimPlus

Op de zeventiende dag was in BasisSim het bergingsoverschot: 1151 m³/s/etmaal, het verschil met SimPlus bedraagt dus: 484 m³/s/etmaal, hetgeen overeenkomt met een gemiddeld peilverschil van: +0.28 m. Op de zeventiende dag ligt het boezempeil in SimPlus dus gemiddeld bijna 30 cm lager dan in BasisSim.

Nu is de vraag of de hogere afvoervolumes, welke hebben gezorgd voor lagere bergingsoverschotten, voldoende zijn geweest om overschrijding van de maximumpeilen in het gehele boezemstelsel te voorkomen.

Uit de waterstandsgrafieken van de 38 meetpunten blijkt dat in het Noordwesten, het Noordoosten en het Centraaloosten van de provincie, gedurende de negentiendaagse simulatieperiode, geen peiloverschrijdingen plaatsvinden; in de andere gebiedsdelen, het Zuiden en het Centraalwesten, daarentegen wel.

Op de vijftiende dag overschrijdt het boezempeil voor het eerst in de simulatie het lokaal geldend maximum in vijf karakteristieke gebieden, zie bijlage BJ.07, twee gebieden in het Zuidwesten en twee gebieden in het Zuidoosten gelegen nabij het Woudagemaal, plus een gebied in het Centraalwesten. Dit laatste gebied is ook in BasisSim betrokken bij de allereerste peiloverschrijdingen die optreden, zie bijlage BH.03: de twaalfde dag. In SimPlus treden de eerste peiloverschrijdingen dus drie dagen later op dan in BasisSim.

Op de vijftiende dag bedraagt het bergingsoverschot in SimPlus: 497 m³/s/etmaal, op de veertiende dag: 411 m³/s/etmaal. De in een eerdere paragraaf, bij BasisSim, genoemde constatering dat, bij een bergingsoverschot dat (ruim) groter is dan 400 m³/s/etmaal, maximumpeilen voor het eerst worden overschreden, klopt dus ook voor SimPlus.

Op de zestiende dag wordt het 'peiloverschrijdingsgebied' verder uitgebreid met vijf nieuwe gebieden, dus tot een totaal van tien, zie bijlage BJ.07. Opvallend is dat dit vergrootte overschrijdingsgebied grote gelijkenis vertoont met het overschrijdingsgebied op de dertiende dag in BasisSim, zie bijlage BH.03. Het verschil hierin is dat in SimPlus (een gedeelte van) het Noordwestelijke gebied niet bij de peiloverschrijdingen is betrokken, terwijl dat in BasisSim wel het geval is. Daarnaast valt op dat de bergingsoverschotten van beide dagen sterk overeenkomen: resp. 569 m³/s/etmaal (dag 16) en 550 m³/s/etmaal (dag 13).

Dus zowel in BasisSim als in SimPlus beginnen de peiloverschrijdingen in het Zuidelijke en Westelijke gebied (in SimPlus op een later tijdstip); in SimPlus blijft het vervolgens daarbij, in BasisSim worden na verloop van tijd in vrijwel het gehele boezemstelsel de maximumpeilen overschreden.

In de onderstaande tabel TJ14 is per gebied het bereik gegeven waarbinnen het peilverschil halverwege de 18^{de} dag varieert, voor de verschillende meetpunten in dat gebied. Tevens is het gemiddelde binnen het bereik gegeven.

Peilverschil (SimPlus vs. BasisSim) - Halverwege Dag 18					
	Bereik	Gem.		Bereik	Gem.
NoordWest	[-0,44 m tot -0,32 m] ¹⁾	-0,39 m	NoordOost	[-0,32 m tot -0,29 m] ²⁾	-0,30 m
CentraalWest	[-0,30 m tot -0,28 m]	-0,29 m	CentraalOost	[-0,32 m tot -0,28 m]	-0,29 m
ZuidWest	[-0,30 m tot -0,26 m]	-0,27 m	ZuidOost	[-0,27 m tot -0,22 m]	-0,24 m
¹⁾ Afwijkend in dit bereik, één meetpunt: -0,75 m			²⁾ Afwijkend in dit bereik, één meetpunt: -0,23 m		

Tabel TJ14: Het bereik van peilverschillen per gebied – halverwege dag 18

In de tabel TJ14 is te zien dat in het Noordwesten het opgebouwde peilverschil het grootst is en in het Zuidoosten het kleinst. De peilverschillen in het Noordoosten, het Centraaloosten, het Centraalwesten en het Zuidwesten liggen daar tussenin en onderling dicht bij elkaar. Omdat het Noordwesten gedurende de simulatieperiode het grootste aandeel heeft in de extra afvoer van boezemwater, zijn de peilverschillen aldaar het grootst. Daarnaast blijkt te gelden dat een grotere afstand tot het Noordwestelijke afvoerpunt een kleiner peilverschil geeft, zie tabel TJ14: Zuidwest en Zuidoost.

De in het boezemstelsel opgetreden peilverlagingen, als gevolg van een vergrootte afvoer van boezemwater, zijn voor een groot gedeelte van het boezemsysteem voldoende geweest, in de zin dat geen peiloverschrijdingen plaatsvonden, anders dan in BasisSim; voor tien karakteristieke gebieden in het Westen en Zuiden van de provincie geldt dit dus niet: de vergrootte afvoer heeft wel invloed gehad, maar voor deze gebieden in onvoldoende mate.

Hoofdstuk 10

Conclusies en Aanbevelingen

10.1 Evaluatie maatregelen en conclusies

De toename in de totale afvoer van overtollig boezemwater in SimulatiePlus komt voor het grootste deel op rekening van het gemaal Harlingen. Overschrijdingen van maximumpeilen worden voorkomen in het gehele boezemstelsel, behalve in delen van het Centraal- en Zuidwesten. De extra ingezette maalcapaciteit is dus voor de meeste locaties in het systeem voldoende groot.

Het gemaal Harlingen beïnvloedt zoals verwacht in negatieve zin de afvoer via de Tsjerk Hiddessluizen; het afvoervolume via de sluizen was overigens toch al relatief gering (in BasisSimulatie); de vermindering van de afvoer door spuien wordt meer dan evenredig gecompenseerd met het uitmalen van het boezemwater.

De gemalen in het Zuidwesten zijn ook met de gewijzigde afvoermogelijkheden in het Noordwesten en het Noordoosten van het boezemstelsel, en met de peilveranderingen die dat teweegbrengt, in staat continu uit te malen met de maximale capaciteit.

Het kan zijn dat de getroffen maatregelen het Centraal- en Zuidwesten niet goed kunnen ‘bereiken’, gezien de peiloverschrijdingen die toch nog optreden. Verdere vergroting van de maalcapaciteit van het gemaal Harlingen en van het gemaal Lauwersoog zou wel eens weinig effect in dit zuidelijk gebied kunnen hebben. Waarschijnlijk is dit gedeelte van de boezem meer gebaat bij lokaal ingepaste maatregelen (bijv. vergroting van het afvoerend vermogen, naar het IJsselmeer).

Het blijkt dat het gemaal Lauwersoog de totale afvoer in het Noordoosten niet laat toenemen; afwisselend zijn het gemaal en de sluizen van Dokkumer Nieuwe Zijlen geactiveerd. Het in werking gestelde gemaal is namelijk van invloed op het verval over de sluizen.

Wel laat SimulatiePlus zien dat het gemaal Lauwersoog de afvoer via Dokkumer Nieuwe Zijlen kan vervangen: Op de vijftiende dag bijvoorbeeld zijn de sluizen van Dokkumer Nieuwe Zijlen de gehele dag gesloten en het gemaal Lauwersoog de gehele dag ingeschakeld: er wordt dan evenveel boezemwater afgevoerd als in BasisSimulatie met de sluizen. Bij een structureel stijgend Lauwersmeerpeil, vanwege hogere streefpeilen, kan een vermindering van de afvoer via de D.N.Z.-sluizen worden ‘opgevangen’ door de uitmaling van boezemwater via Lauwersoog. Op den duur is het wellicht noodzakelijk dat het gemaal de sluizen in zijn geheel ‘vervangt’.

In SimulatiePlus heeft het gemaal Harlingen dus de grootste invloed op de boezempeilen. Het gemaal Lauwersoog kan in de Noordoostelijke afvoer een grotere rol gaan spelen naarmate het peilbeheer van het Lauwersmeer ongunstiger wordt voor de Friese boezem.

Uit BasisSimulatie en SimulatiePlus volgt dat bij, ten eerste een extreme en langdurige neerslagbelasting, ten tweede de keuze het instrument van de maalbeperingen niet te hanteren, ten derde een peilbeheer op het Lauwersmeer volgens het huidige beleid en ten vierde het voorkomen van hoge buitenwaterstanden, het noodzakelijk is de afvoercapaciteit van het boezemsysteem te vergroten om overschrijdingen van maximaal toelaatbare peilen te voorkomen; dit geldt hier voor het richtjaar 2030. Een vergroting van de afvoercapaciteit in het Noordwesten kan voor een groot gedeelte van het boezemstelsel afdoende zijn. Door plaatsing van extra afvoermogelijkheden in het Noordoosten welke onafhankelijk van het Lauwersmeer werken, kan de afvoer aldaar blijvend gegarandeerd worden. Het Zuidwesten dient eveneens de capaciteit uit te breiden.

10.2 Aanbevelingen

- Simulaties uitvoeren als BasisSimulatie maar dan met alternatieve belastingen en randvoorwaarden; bijv. een getijdenreeks (Waddenzee) van relatief lage waterstanden, een extreme neerslagreeks met een ander kenmerkend patroon.
Op die manier kan de relatieve invloed van een randvoorwaarde of een belastingsparameter op het boezemsysteem achterhaald worden.
- Het effect nagaan van de plaatsing van extra afvoercapaciteit in het Zuidwesten.
- SimulatiePlus uitvoeren met een ander peilbeheer op het Lauwersmeer (bijv. een hoger streefpeil). Dit om te zien welk effect dit heeft op de spuicapaciteit van Dokkumer Nieuwe Zijlen en Zoutkamp en om na te gaan welke rol het gemaal Lauwersoog in die situatie gaat spelen.
- De invloed onderzoeken van de tijdstapgrootte op de resultaten van een simulatie (hier is een tijdstap van 5 minuten aangehouden).
- Een zelfde simulatie uitvoeren als BasisSimulatie met een identiek boezemmodel, maar met de mogelijkheid maalbeperkingen in te stellen.
- Meerdere simulaties uitvoeren die identiek zijn aan SimulatiePlus, maar met gewijzigde maalcapaciteiten van de gemalen Lauwersoog en Harlingen, om zo preciezer het extra benodigde maalvermogen vast te stellen.
- Nagaan of de geformuleerde maatregelen universeel voldoen, dus aanvullende simulaties uitvoeren met alternatieve boezembelastingen en randvoorwaarden.
- Een simulatie uitvoeren als SimulatiePlus maar met de aansluiting van het laterale kanaal op het boezemsysteem op een andere locatie (niet nabij de sluizen van Dokkumer Nieuwe Zijlen)
- Het is zinvol er op te wijzen dat, in aansluiting op de voorgestelde maatregelen, de boezemkaden juist moeten worden beheerd en op hoogte dienen te zijn.
- Het uitvoeren van een gevoeligheidsanalyse met betrekking tot de grootheden die het functioneren van het boezemsysteem bepalen.
- Validatie van het model: toetsing van het model aan in de praktijk gemeten waarden.