

Positieve en negatieve effecten van drainage:

Een analyse in het kader van het
“Eindadvies Berging en Afvoer”
voor Wetterskip Fryslân

Opdrachtgever: Wetterskip Fryslân



Positieve en negatieve effecten van drainage

Een analyse in het kader van het “Eindadvies Berging en Afvoer” voor Wetterskip Fryslân

Opdrachtgever: Wetterskip Fryslân
Uitvoerder: FutureWater

Begeleider: B. Hulsman (Wetterskip Fryslân)

Auteurs: P. Droogers (FutureWater)
 R. Loeve (FutureWater)



Voorwoord

Als gevolg van ontwikkelingen in de landbouw en klimaatverandering is het te verwachten dat er wijzigingen zullen optreden in de hoeveelheid en intensiteit van buisdrainage. Het is niet duidelijk hoe deze wijzigingen zullen doorwerken voor wat betreft afvoeren van landbouwgebieden op de Friese boezem. Dit rapport geeft de resultaten weer van een studie waar deze invloed is gekwantificeerd met behulp van de FutureView methodologie. Tevens heeft een expert groep de invloed van buisdrainage ontwikkelingen op een aantal neventerreinen geanalyseerd.

Deze studie is uitgevoerd met hulp van een aantal mensen van het Wetterskip Fryslân en de Provincie Fryslân. De expert groep, bestaande uit dhr. Buyse, mevr. Steenbruggen, dhr. Van Buren, dhr. Claassen, dhr. Veeningen, mevr. Krol, mevr. Bijleveld, dhr. Smit, dhr. De Vries en dhr. Bootsma, worden allen bedankt voor hun inzet. Mevrouw Steenbruggen van de Provincie Fryslân heeft waardevolle suggesties gegeven voor het verwerken en presenteren van de resultaten. Tenslotte willen we dhr. Hulsman bedanken voor de prettige en waardevolle samenwerking waardoor deze studie met succes kon worden afgerond en de resultaten zullen leiden tot een bijdrage aan het beheer en beleid van het water in Fryslân.



dr. ing. Peter Droogers
ir. Ronald Loeve
juni 2005

FutureWater
Generaal Foulkesweg 28
6703 BS Wageningen
tel: 0317 460050
email: info@futurewater.nl
web: www.futurewater.nl

Inhoudsopgave

1	INTRODUCTIE	9
2	METHODE	11
2.1	FutureView methode	11
2.2	Representatieve watersystemen	12
2.3	STONE gegevens	13
2.3.1	Buisdrainage	14
2.3.2	Kwel	15
2.3.3	Slootdichtheid	16
2.3.4	Drainageweerstand	17
2.3.5	Interactie met oppervlaktewater	19
2.4	Overige gegevens	20
2.4.1	Gemiddelde drooglegging	20
2.4.2	Meteorologische gegevens	20
2.4.3	Bodem	21
2.4.4	Landgebruik	21
3	ANALYSES PER WATERSYSTEEM	23
3.1	Algemeen	23
3.2	Klailan	24
3.2.1	Afvoeren	24
3.2.2	Grondwaterstanden	25
3.2.3	Gewasverdamping reductie	25
3.3	De Linde	30
3.3.1	Afvoeren	30
3.3.2	Grondwaterstanden	30
3.3.3	Gewasverdamping reductie	30
3.4	Noardbroek	35
3.4.1	Afvoeren	35
3.4.2	Grondwaterstanden	35
3.4.3	Gewasverdamping reductie	35
3.5	Petsloot	40
3.5.1	Afvoeren	40
3.5.2	Grondwaterstanden	40
3.5.3	Gewasverdamping reductie	40
3.6	Zwarte Haan	45
3.6.1	Afvoeren	45
3.6.2	Grondwaterstanden	45
3.6.3	Gewasverdamping reductie	45
3.7	Conclusies deelgebieden	50
4	INVLOED OP FRIESE BOEZEM	53
4.1	Representativiteit deelgebieden	53
4.2	Veranderingen in afvoeren	55
5	INVLOED KLIMAATVERANDERING	59
5.1	Klimaatscenario's	59
5.2	Resultaten	60
5.2.1	Klailan	60
5.2.2	De Linde	61

5.2.3	Noardbroek	62
5.2.4	Petsloot	63
5.2.5	Zwarte Haan	64
5.2.6	Invloed op de Friese boezem	65
6	INVLOED DRAINAGE OP REPRESENTATIEVE PERCELEN	69
7	WORKSHOP EXPERTS	73
7.1	Invloed van drainage op landbouw	73
7.2	Invloed van drainage op maaiveld dalend	74
7.3	Invloed van drainage op wateraanvoer (behoefte)	74
7.4	Invloed van drainage op uit- en afspoeling van nutriënten	75
7.5	Invloed van drainage op omgeving	75
7.6	Afsluiting	76
8	CONCLUSIES	77
9	REFERENTIES	81
	BIJLAGE: AFKORTINGEN	83
	BIJLAGE: INVOERGEGEVENS	85
	Samenvatting belangrijkste model invoer gegevens	85
	Samenvatting belangrijkste modelinvoer scenario: Referentie	86
	Samenvatting belangrijkste modelinvoer scenario: Herstel	87
	Samenvatting belangrijkste modelinvoer scenario: Toekomst	87

Tabellen

Tabel 1. Aanwezigheid van buisdrainage in de vijf representatieve watersystemen weergegeven als percentage van de oppervlakte.....	14
Tabel 2. Kwelintensiteiten voor de vijf watersystemen. Negatieve waarden betekenen wegzijging.	16
Tabel 3. Gemiddelde slootafstanden voor de vijf watersystemen voor de drie drainagesystemen onderscheiden in STONE.	16
Tabel 4. De vijf drainagesystemen zoals gebruikt in de modelanalyse.	17
Tabel 5. Gemiddelde drainageweerstand voor de vijf watersystemen voor de drie drainagesystemen onderscheiden in STONE.	18
Tabel 6. Drooglegging voor de vijf watersystemen.	20
Tabel 7. Dominante bodemtype in de vijf watersystemen. De bodemeenheden verwijzen naar de bodemfysische kenmerken.	21
Tabel 8. Landgebruik voor de vijf watersystemen volgens de PiriReis.	22
Tabel 9. Samenvatting van de huidige en de toekomstige drainage situatie in de vijf deelgebieden (Vos et al., 2005).	23
Tabel 10. Overschrijdingskansen voor afvoer Klailan. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (1975-2004) dat de afvoer groter is dan 7, 10, 15 en 20 mm d ⁻¹ voor de drie scenario's voor Klailan.	28
Tabel 11. Analyse grondwaterstanden Klailan. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (1975-2004) dat de grondwaterstand extreem hoog of laag is voor de drie scenario's.....	29
Tabel 12. Invloed van drainage op het verschil tussen actuele en potentiële verdamping voor de drie scenario's voor Klailan.....	29
Tabel 13. Overschrijdingskansen voor afvoer De Linde. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (1975-2004) dat de afvoer groter is dan 7, 10, 15 en 20 mm d ⁻¹ voor de drie scenario's voor De Linde.....	33
Tabel 14. Analyse grondwaterstanden De Linde. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (1975-2004) dat de grondwaterstand extreem hoog of laag is voor de drie scenario's.....	34
Tabel 15. Invloed van drainage op het verschil tussen actuele en potentiële verdamping voor de drie scenario's voor De Linde.	34
Tabel 16. Overschrijdingskansen voor afvoer Noardbroek. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (1975-2004) dat de afvoer groter is dan 7, 10, 15 en 20 mm d ⁻¹ voor de drie scenario's voor Noardbroek.	38
Tabel 17. Analyse grondwaterstanden Noardbroek. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (1975-2004) dat de grondwaterstand extreem hoog of laag is voor de drie scenario's.	39
Tabel 18. Invloed van drainage op het verschil tussen actuele en potentiële verdamping voor de drie scenario's voor Noardbroek.	39
Tabel 19. Overschrijdingskansen voor afvoer. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (1975-2004) dat de afvoer groter is dan 7, 10, 15 en 20 mm d ⁻¹ voor de drie scenario's voor Petsloot.	43
Tabel 20. Analyse grondwaterstanden Petsloot. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (1975-2004) dat de grondwaterstand extreem hoog of laag is voor de drie scenario's.....	44
Tabel 21. Invloed van drainage op het verschil tussen actuele en potentiële verdamping voor de drie scenario's voor Petsloot.....	44
Tabel 22. Overschrijdingskansen voor afvoer Zwarte Haan. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (1975-2004) dat de afvoer groter is dan 7, 10, 15 en 20 mm d ⁻¹ voor de drie scenario's voor Zwarte Haan.....	48
Tabel 23. Analyse grondwaterstanden Zwarte Haan. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (1975-2004) dat de grondwaterstand extreem hoog of laag is voor de drie scenario's.	49
Tabel 24. Invloed van drainage op het verschil tussen actuele en potentiële verdamping voor de drie scenario's voor Zwarte Haan.	49
Tabel 25. Samenvatting van de invloed van veranderingen in drainage op de vijf deelgebieden. Weergegeven is het verschil tussen Referentie en Toekomst.....	51
Tabel 26. Kruistabel van de landgebruikskaart en de bodemkaart.	53
Tabel 27. Vertaaltabel van de vijf watersystemen naar de invloed op de Friese boezem.	53
Tabel 28. Overschrijdingskansen voor afvoeren op de Fries boezem. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (1975-2004) dat de afvoer groter is dan 7, 10, 15 en 20 mm d ⁻¹	58
Tabel 29. Overschrijdingskansen voor afvoer Klailan. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (2035-2064) dat de afvoer groter is dan 10, 15 en 20 mm d ⁻¹ voor de drie scenario's voor Klailan.....	60
Tabel 30. Analyse grondwaterstanden Klailan. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (2035-2064) dat de grondwaterstand extreem hoog of laag is voor de drie scenario's.....	61
Tabel 31. Invloed van drainage op het verschil tussen actuele en potentiële verdamping voor de drie scenario's voor Klailan.....	61
Tabel 32. Overschrijdingskansen voor afvoer De Linde. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (2035-2064) dat de afvoer groter is dan 10, 15 en 20 mm d ⁻¹ voor de drie scenario's voor De Linde.	61
Tabel 33. Analyse grondwaterstanden De Linde. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (2035-2064) dat de grondwaterstand extreem hoog of laag is voor de drie scenario's.....	62
Tabel 34. Invloed van drainage op het verschil tussen actuele en potentiële verdamping voor de drie scenario's voor De Linde.	62

Tabel 35. Overschrijdingskansen voor afvoer Noardbroek. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (2035-2064) dat de afvoer groter is dan 10, 15 en 20 mm d ⁻¹ voor de drie scenario's voor Noardbroek.	62
Tabel 36. Analyse grondwaterstanden Noardbroek. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (2035-2064) dat de grondwaterstand extreem hoog of laag is voor de drie scenario's.	63
Tabel 37. Invloed van drainage op het verschil tussen actuele en potentiële verdamping voor de drie scenario's voor Noardbroek.	63
Tabel 38. Overschrijdingskansen voor afvoer. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (2035-2064) dat de afvoer groter is dan 10, 15 en 20 mm d ⁻¹ voor de drie scenario's voor Petsloot.	63
Tabel 39. Analyse grondwaterstanden Petsloot. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (2035-2064) dat de grondwaterstand extreem hoog of laag is voor de drie scenario's.	64
Tabel 40. Invloed van drainage op het verschil tussen actuele en potentiële verdamping voor de drie scenario's voor Petsloot.	64
Tabel 41. Overschrijdingskansen voor afvoer Zwarte Haan. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (2035-2064) dat de afvoer groter is dan 10, 15 en 20 mm d ⁻¹ voor de drie scenario's voor Zwarte Haan.	64
Tabel 42. Analyse grondwaterstanden Zwarte Haan. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (2035-2064) dat de grondwaterstand extreem hoog of laag is voor de drie scenario's.	65
Tabel 43. Invloed van drainage op het verschil tussen actuele en potentiële verdamping voor de drie scenario's voor Zwarte Haan.	65
Tabel 44. Overschrijdingskansen voor afvoeren op de Friese boezem. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (2035-2064) dat de afvoer groter is dan 10, 15 en 20 mm d ⁻¹	68

Figuren

Figuur 1. Schematische weergave van het SWAP model (Van Dam et al., 1997).	11
Figuur 2. Overzichtskarta representatieve watersystemen (Vos et al., 2005).	13
Figuur 3. Aanwezigheid van buisdrainage in Fryslân (in blauw) volgens de STONE database.	15
Figuur 4. Kwelintensiteit volgens de STONE database.	15
Figuur 5. Sloodichtheden in m per gridcel van 250 x 250 m volgens de STONE database.	17
Figuur 6. Drainageweerstand in dagen voor de drie drainagesystemen volgens de STONE database.	18
Figuur 7. Interactie van het bodemwater met het openwatersysteem in SWAP.	18
Figuur 8. Jaarlijkse neerslag station Leeuwarden.	21
Figuur 9. Afvoeren voor Klailan voor de drie scenario's (1998 boven, 2003 onder).	26
Figuur 10. Afvoeren voor Klailan voor de drie scenario's voor september 1998 na 50 mm neerslag.	27
Figuur 11. Verschillen in afvoer referentie en toekomst voor Klailan. Positief is meer afvoer, negatief is minder afvoer (30 jaar).	27
Figuur 12. Verschillen in afvoer referentie en toekomst voor Klailan. Positief is meer afvoer, negatief is minder afvoer (1998 boven, 2003 onder).	28
Figuur 13. Grondwaterstanden voor Klailan voor de drie scenario's.	29
Figuur 14. Afvoeren voor De Linde voor de drie scenario's voor een nat jaar (1998, boven) en een droog jaar (2003, onder).	31
Figuur 15. Afvoeren voor De Linde voor de drie scenario's voor oktober 1998.	31
Figuur 16. Verschillen in afvoer referentie en toekomst voor De Linde. Positief is meer afvoer, negatief is minder afvoer (30 jaar).	32
Figuur 17. Verschillen in afvoer referentie en toekomst voor De Linde. Positief is meer afvoer, negatief is minder afvoer (1998 boven, 2003 onder).	32
Figuur 18. Grondwaterstanden voor De Linde voor de drie scenario's.	33
Figuur 19. Afvoeren voor Noardbroek voor de drie scenario's voor een nat jaar (1998, boven) en een droog jaar (2003, onder).	36
Figuur 20. Afvoeren voor Noardbroek voor de drie scenario's voor september 1998 na 50 mm neerslag.	36
Figuur 21. Verschillen in afvoer referentie en toekomst voor Noardbroek. Positief is meer afvoer, negatief is minder afvoer (30 jaar).	37
Figuur 22. Verschillen in afvoer referentie en toekomst voor Noardbroek. Positief is meer afvoer, negatief is minder afvoer (1998 boven, 2003 onder).	37
Figuur 23. Grondwaterstanden voor Noardbroek voor de drie scenario's voor een nat jaar (1998, boven) en een droog jaar (2003, onder).	38
Figuur 24. Afvoeren voor Petsloot voor de drie scenario's voor een nat jaar (1998, boven) en een droog jaar (2003, onder).	41
Figuur 25. Afvoeren voor Petsloot voor de drie scenario's voor september 1998 na 50 mm neerslag.	41
Figuur 26. Verschillen in afvoer voor de scenario's referentie en herstel voor Petsloot. Positief is meer afvoer, negatief is minder afvoer (30 jaar).	42
Figuur 27. Verschillen in afvoer voor de scenario's referentie en herstel voor Petsloot. Positief is meer afvoer, negatief is minder afvoer (1998 boven, 2003 onder).	42
Figuur 28. Grondwaterstanden voor Petsloot voor de drie scenario's voor een nat jaar (1998, boven) en een droog jaar (2003, onder).	43
Figuur 29. Afvoeren voor Zwarte Haan voor de drie scenario's voor een nat jaar (1998, boven) en een droog jaar (2003, onder).	46
Figuur 30. Afvoeren voor Zwarte Haan voor de drie scenario's voor september 1998 na 50 mm neerslag.	46
Figuur 31. Verschillen in afvoer referentie en toekomst voor Zwarte Haan. Positief is meer afvoer, negatief is minder afvoer (30 jaar).	47
Figuur 32. Verschillen in afvoer referentie en toekomst voor Zwarte Haan. Positief is meer afvoer, negatief is minder afvoer (1998 boven, 2003 onder).	47
Figuur 33. Grondwaterstanden voor Zwarte Haan voor de drie scenario's voor een nat jaar (1998, boven) en een droog jaar (2003, onder).	48
Figuur 34. Gegeneraliseerde bodemkaart gebaseerd op de Stiboka bodemkaart. Gearceerde gebieden zijn afgekoppeld van de Friese boezem.	54
Figuur 35. Gegeneraliseerd landgebruikskaart gebaseerd op de PeiriReis database. Gearceerde gebieden zijn afgekoppeld van de Friese boezem.	54
Figuur 36. Afvoeren op de Friese boezem voor de drie scenario's voor een nat jaar (1998, boven) en een droog jaar (2003, onder).	56
Figuur 37. Afvoeren op de Friese boezem voor de drie scenario's voor september 1998 na 50 mm neerslag.	56
Figuur 38. Verschillen in afvoer referentie en toekomst op de Friese boezem. Positief is meer afvoer, negatief is minder afvoer (30 jaar).	57
Figuur 39. Verschillen in afvoer referentie en toekomst op de Friese boezem. Positief is meer afvoer, negatief is minder afvoer (1998 boven, 2003 onder).	58
Figuur 40. Afvoeren op de Friese boezem voor de drie scenario's voor een nat jaar (1998 boven) en een droog jaar (2003 onder).	66

Figuur 41. Afvoeren op de Friese boezem voor de drie scenario's voor "september 1998", na 50 mm neerslag.	67
Figuur 42. Verschillen in afvoer referentie en Klimaatverandering op de Friese boezem. Positief is meer afvoer, negatief is minder afvoer (30 jaar: 2035-2064). Noot: jaren zijn + klimaatverandering.	67
Figuur 43. Verschillen in afvoer referentie en klimaatverandering op de Friese boezem. Positief is meer afvoer, negatief is minder afvoer (1998 boven, 2003 onder).	68
Figuur 44. Voorbeeld van de verschillen in grondwaterstanden in de 16 representatieve percelen voor het droge jaar 2003.	70
Figuur 45. Gemiddelde grondwaterstand, GLG en GHG over de periode 1975-2004 met en zonder klimaatverandering voor de 16 representatieve percelen.	71

1 Introductie

In het kader van het "Eindadvies Berging en Afvoer" hebben Wetterskip Fryslân en de Provincie Fryslân de behoefte uitgesproken om meer duidelijkheid te krijgen over de invloed van drainage op afvoeren en een aantal neventerreinen. Het rapport "Berging en Afvoer" (Klopstra en De Graaf, 2001) geeft een eerste aanzet hiervoor:

"Aangezien de landbouwschade in het jaar 2100 met 150% toeneemt (en dus 2.5 maal zo groot wordt als nu het geval is), is het denkbaar dat de grondgebruikers de ontwatering wel zullen gaan verbeteren. Dit zal resulteren in een verhoogde aanvoer naar het Friese oppervlaktewatersysteem, waardoor de effectiviteit van maatregelen in de afwatering kan toenemen. Aanbevolen wordt dan ook om de effecten van een verbetering van de ontwatering en de gevolgen daarvan voor de berging en afvoer van water in Fryslân nader te onderzoeken."

Op dat moment was niet duidelijk welke positieve en/of negatieve effecten een verandering van de drainage tot gevolg heeft voor de berging en afvoer van de Friese boezem. Om dit beeld scherp te krijgen heeft Wetterskip Fryslân besloten een onderzoek te laten uitvoeren in samenwerking met de Provincie Fryslân. Realisatiefase A van het project is inmiddels afgerond en had als onderzoeksvragen:

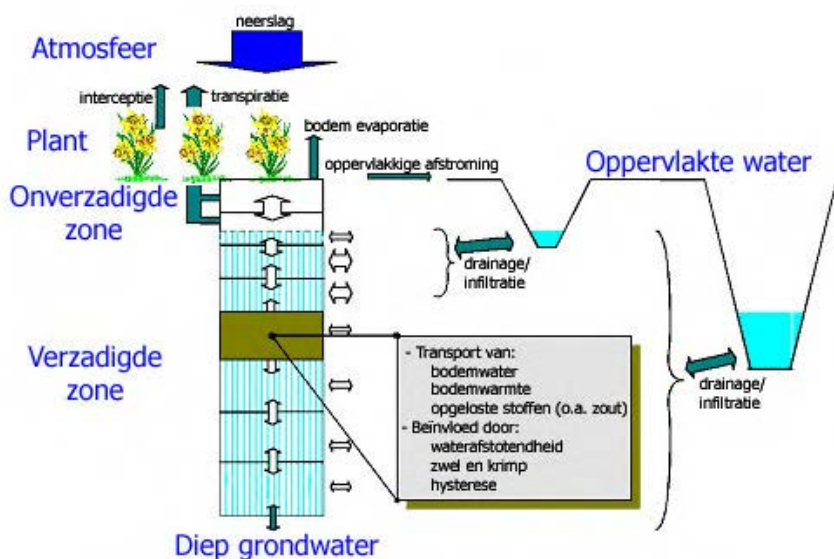
- Wat is de huidige drainagesituatie in Fryslân;
- Wat zijn de mogelijke ontwikkelingen op het gebied van drainage in Fryslân.

Resultaten van dit onderzoek zijn inmiddels gepubliceerd (Vos et al., 2005) en vormen voor deze studie de uitgangspunten om positieve en negatieve effecten van drainage te kwantificeren. Een samenvatting van de belangrijkste conclusies en aanbevelingen uit deze eerste fase zullen in dit rapport worden weergegeven en vormen de basis voor deze studie.

Deze studie maakt gebruik van het FutureView instrumentarium, wat gebaseerd is op het SWAP (Soil, Water, Atmosphere and Plant) model, voor het kwantificeren van de invloed van drainageontwikkelingen op de afvoer, het grondwaterstandverloop, Gewasverdamping reductie. Een aantal neventerreinen zullen worden meegenomen door gebruik te maken van expertise aanwezig bij Wetterskip Fryslân en de Provincie Fryslân.

2 Methode

Drainage wordt in de hydrologische woordenlijst (Hooghart, 1986) gedefinieerd als "de afvoer van water over en door de grond en via het waterlopenstelsel". Deze zeer ruime definitie heeft dus betrekking op zowel ontwatering en afwatering¹ en maakt geen onderscheid tussen natuurlijke drainage en de drainage door drainagebuizen. In deze studie zal het begrip drainage beperkter gebruikt worden en heeft alleen betrekking op de afvoer van bodemwater via drainagebuizen.



Figuur 1. Schematische weergave van het SWAP model (Van Dam et al., 1997).

2.1 FutureView methode

De FutureView methode is volledig gebaseerd op het SWAP (Soil, Water, Atmosphere and Plant) model met een actieve koppeling naar een database. FutureView maakt gebruik van rekeneenheden, waarbij een rekeneenheid is gedefinieerd als een homogeen gebied voor wat betreft streefpeil, hoogte, drooglegging, grondgebruik, bodem, drainageweerstand etc. Elke rekeneenheid vormt zo één SWAP kolom.

Het SWAP model simuleert transport van water, opgeloste stoffen en warmte in de onverzadigde en verzadigde zone. SWAP is ontwikkeld door Wageningen Universiteit en Alterra-Groene Ruimte. De eerste versie van het SWAP model werd al in 1978 ontwikkeld (Feddes et al., 1978) en sindsdien is het model veelvuldig toegepast en zijn diverse verbeteringen aangebracht. Figuur 1 laat schematisch de werking van het SWAP model zien voor wat betreft de processen in bodem—water—atmosfeer; een uitgebreidere beschrijving kan gevonden worden in Kroes en Van Dam (2003).

¹ Afwatering heeft betrekking op het afvoeren van water via het stelsel van openwatersystemen. Ontwatering heeft betrekking op het afvoeren van water vanuit de bodem naar het openwatersysteem.

In het verleden werd voor drainagesystemen vaak gebruik gemaakt van zogenaamde steady-state methoden, waarbij met behulp van een aantal aannames en vereenvoudigingen een redelijke schatting van de gewenste drainage kon worden bepaald. De drainage vergelijkingen van onder andere Hooghoudt (1940) en Ernst (1956) worden wereldwijd toegepast.

Het nadeel van een steady-state aanpak is de vele vereenvoudigingen en vooral het ontbreken van enige dynamiek in de tijd. Met een model kan deze dynamiek uitstekend gesimuleerd worden en kunnen bovendien andere interacties, zoals met de vegetatie, worden meegenomen.

Het basis concept van ontwatering in het SWAP model berust, evenals bij de interactie van het diepe grondwater met het freatisch grondwater, op de verschillen in stijghoogten en een bepaalde weerstand:

$$q_{\text{drain}} = \frac{\phi_{\text{gwl}} - \phi_{\text{drain}}}{R_{\text{drain}}}$$

met q_{drain} : de flux vanuit de bodem naar de drain (cm d⁻¹)
 ϕ_{gwl} : de diepte van de grondwaterspiegel (cm)
 ϕ_{drain} : de stijghoogte in de drain (cm)
 R_{drain} : de drainageweerstand (d).

De modelaanpak voor de ontwatering en aftwatering is uitgebreider dan hier beschreven. Zo wordt de drainageweerstand gesplitst in een weerstand vanuit de bodem naar het drainagesysteem (buis, greppel of sloot) en de intree weerstand van het drainagesysteem zelf. Uiteraard is de afstand tussen de verschillende drains een andere belangrijke factor die de totale drainage dynamiek bepaalt. Voor een volledige beschrijving van de representatie van de drainage in het SWAP model wordt verwezen naar Kroes en Van Dam (2003).

De FutureView methode is in het verleden toegepast om soortgelijke vraagstukken zoals deze te analyseren. Voor Waterschap Hunze en Aa's is gekeken wat de aanvoerbehoefte nu is en wat de aanvoerbehoefte in 2050 onder klimaatverandering zal zijn. Voor Waterschap Zuiderzeeland is gekeken hoe kwel en wegzijging processen ruimtelijk en in de tijd verlopen in de Noordoostpolder. Mogelijkheden voor het vasthouden van water zijn voor Flevoland geanalyseerd, om zodoende de trits vasthouden—bergen—afvoeren te implementeren.

Een verdere beschrijving van het SWAP model kan worden gevonden in diverse andere rapporten, publicaties en websites (<http://www.swap.alterra.nl>).

2.2 Representatieve watersystemen

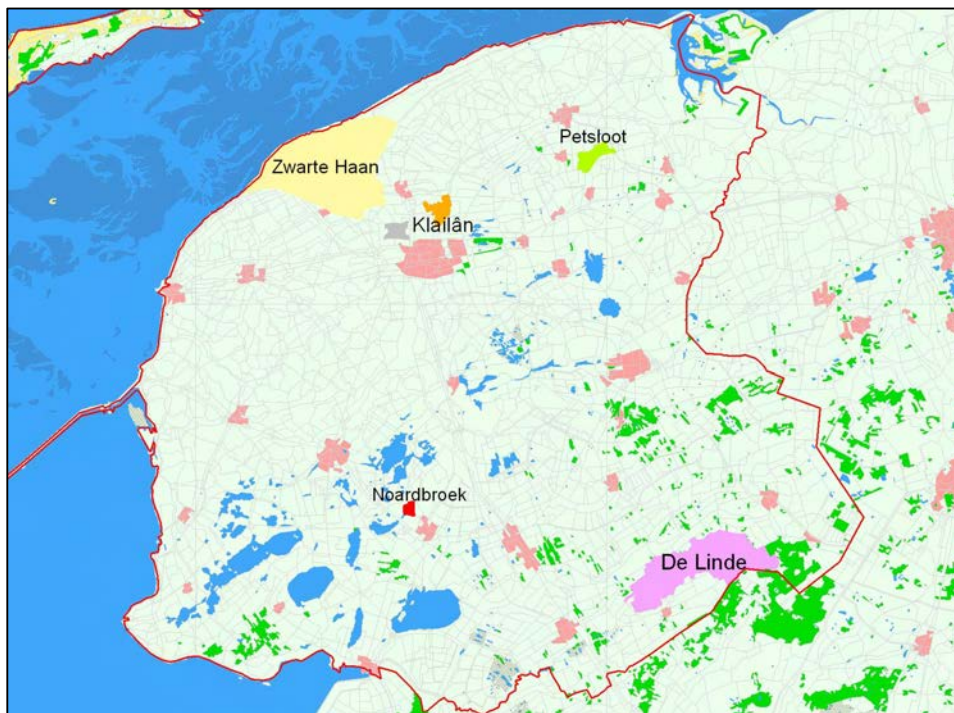
In Fase A van dit project (Vos et al., 2005) is voor vijf deelgebieden onderzocht:

- Wat de huidige drainagesituatie is in Fryslân, en
- Wat de mogelijke toekomstige ontwikkelingen zijn op het gebied van drainage in Fryslân

Deze vijf deelgebieden, hier watersystemen genoemd, zijn representatief voor andere gebieden in het beheersgebied van Wetterskip Fryslân en zijn daarom geschikt om tot uitspraken te komen voor het gehele beheersgebied.

Een uitgebreide beschrijving van de vijf deelgebieden is te vinden in de rapportage van Fase A. In dit rapport wordt volstaan met het geven van een overzicht van de belangrijkste resultaten en conclusies zoals te zien in Tabel 9.

Voor de vijf representatieve watersystemen zijn gedetailleerde analyses gemaakt met behulp van de FutureView methode.



Figuur 2. Overzichtskaart representatieve watersystemen (Vos et al., 2005).

2.3 STONE gegevens

Voor de ontwateringsgegevens is de STONE-database gebruikt. Deze STONE-database is tot stand gekomen met behulp van het SWAP model, dat de kern vormt van de gebruikte FutureView methode, en sluit dus naadloos aan bij deze studie.

Het model STONE (Samen Te Ontwikkelen Nutriënten Emissiemodel) is gezamenlijk ontwikkeld door de instituten RIVM, RIZA en Alterra om beleidsvragen van de Ministeries van VROM, V&W en LNV ten aanzien van het mestbeleid te kunnen beantwoorden. STONE is geschikt om op landelijke schaal de uitspoeling van nitraat naar het grondwater en de uit- en afspoeling van stikstof en fosfor naar het

oppervlaktewater te berekenen voor verschillende bemestingsalternatieven. Tevens kan een schatting worden gemaakt van de fosfaatverzadigingsgraad van de bodem.

De hydrologische aspecten van STONE zijn samengesteld op basis van het SWAP model en worden toegepast in een aantal andere modellen zoals het bemestingsmodel CLEAN van het RIVM, het depositiemodel OPS van het RIVM, het uitspoelingsmodel ANIMO van Alterra en de ruimtelijke schematisatie van het RIZA. Deze ruimtelijke schematisatie voor STONE is gemaakt ten behoeve van de berekeningen voor de WaterSysteemVerkenningen (Kroon et al., 2001).

De belangrijkste gegevens uit STONE zijn:

- Buisdrainage;
- Kwel;
- Slootdichtheid;
- Drainageweerstand.

2.3.1 Buisdrainage

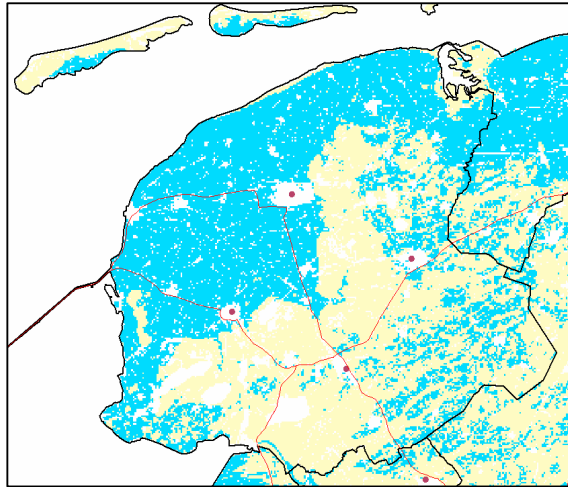
De aanwezigheid van buisdrainage is, evenals alle andere data in STONE, weergegeven per grid van 250 bij 250 meter. In Figuur 3 is te zien dat de meeste gebieden in het noorden en westen, op de zwaardere gronden, buisdrainage hebben.

Voor de vijf representatieve watersystemen is de oppervlakte buisdrainage weergegeven in Tabel 1. De kolom met *inventarisatie* is afkomstig uit de eerste fase van deze drainagestudie en is beschreven door Vos et al. (2005). Voor de meeste gebieden komen de STONE en de *inventarisatie* resultaten goed overeen. Alleen voor het gebied Kailan is er een grote afwijking.

De gemiddelde diepte van de aanwezige buisdrainage is ook beschikbaar uit de STONE database. Voor alle gebieden in het noorden en westen is de gemiddelde diepte 110 cm, en voor de overige gebieden waar drainage aanwezig is 80 cm. Vertaald naar de vijf representatieve watersystemen betekent dit dat voor Klailan en Zwart Haan 110 cm en voor De Linde, Noordbroek en Petsloot 80 cm.

Tabel 1. Aanwezigheid van buisdrainage in de vijf representatieve watersystemen weergegeven als percentage van de oppervlakte.

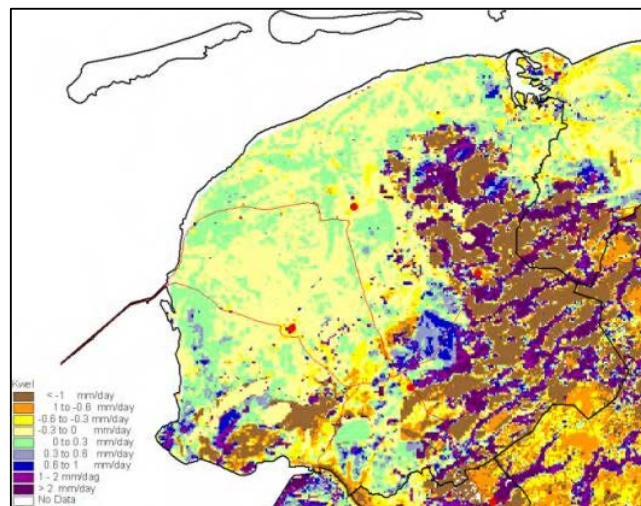
Watersysteem	STONE (%)	Inventarisatie (%)
Klailan	100	
akkerbouw		n.v.t.
gras		30-40
De Linde	37	
akkerbouw		50-70
gras		35-50
Noordbroek	0	
akkerbouw		n.v.t.
gras		15-20
Petsloot	52	
akkerbouw		85-95
gras		0
Zwarte Haan	100	
akkerbouw		85-90
gras		50



Figuur 3. Aanwezigheid van buisdrainage in Fryslân (in blauw) volgens de STONE database.

2.3.2 Kwel

Kwelintensiteiten volgens de STONE database zijn te zien in Figuur 4. In vier van de vijf watersystemen vindt er gemiddeld een lichte wegzijging plaats (Tabel 2). Het watersysteem Petsloot heeft een kwel van ongeveer 240 mm per jaar. Deze waarde lijkt aan de hoge kant te liggen. Deze waarde komt rechtstreeks uit de STONE database en aangezien er geen betere gegevens voorhanden waren is besloten hier toch verder mee te rekenen. Met het interpreteren van de resultaten is het van belang om dit in ogenschouw te nemen.



Figuur 4. Kwelintensiteit volgens de STONE database.

Tabel 2. Kwelintensiteiten voor de vijf watersystemen. Negatieve waarden betekenen wegzijging.

Watersysteem	Kwel (mm d ⁻¹)
Klailan	-0.01
Linde	-0.18
Noardbroek	-0.06
Petsloot	0.66
Zwarte Haan	-0.01

2.3.3 Slootdichtheid

De slootdichtheid speelt een belangrijke rol in het ontwateringsproces. Met behulp van het landelijke TOP10-vector databestand zijn voor drie verschillende drainagesystemen slootdichtheden bepaald. Deze gegevens zijn opgenomen in de STONE dataset als het aantal meters per gridcel van 250 meter. Voor praktische toepassingen en ook voor FutureView wordt echter de gemiddelde slootafstand toegepast. Om de slootdichtheid om te rekenen naar de gemiddelde slootafstand kan de volgende formule gebruikt worden:

$$\text{slootafstand} = \frac{\text{grid}}{\left[\frac{\text{slootdichtheid}}{\text{grid}} \right]}$$

Met een gridgrootte van 250 meter zoals gebruikt in STONE, kan deze formule dus geschreven worden als:

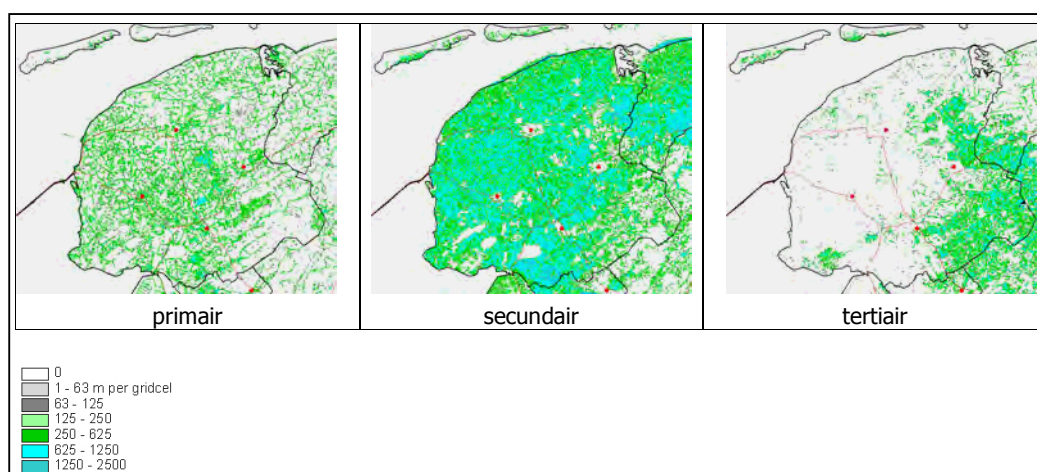
$$\text{slootafstand} = 62500 / \text{slootdichtheid}$$

Voor de het primaire, secundaire en tertiaire systeem is gebruik gemaakt van deze omrekening van de STONE database.

De slootdichtheden zijn weergegeven in Figuur 5 voor de drie drainagesystemen. Het secundaire systeem (waterlopen smaller dan 3 meter) is het dominante systeem voor de ontwatering en afwatering in het gebied. In het oostelijke gedeelte van Fryslân zijn vooral de kleine waterlopen en grotere greppels van belang. Voor de vijf representatieve watersystemen komt dit ook tot uitdrukking (Tabel 3).

Tabel 3. Gemiddelde slootafstanden voor de vijf watersystemen voor de drie drainagesystemen onderscheiden in STONE.

Watersysteem	Primair (m)	Secundair (m)	Tertiair (m)
Klailan	750	90	n.v.t
Linde	2240	310	170
Noardbroek	250	150	840
Petsloot	1010	100	840
Zwarte Haan	780	130	3750



Figuur 5. Slootdichtheden in m per gridcel van 250 x 250 m volgens de STONE database.

2.3.4 Drainageweerstanden

De weerstanden voor de drie grotere drainagesystemen zoals onderscheiden in STONE (Tabel 4) zijn weergegeven in Figuur 6. Voor de vijf representatieve watersystemen zijn de waarden weergegeven in Tabel 5.

Voor de berekeningen in SWAP zijn naast deze drie grotere drainagesystemen twee andere systemen onderscheiden: buisdrainage en maaiveldsdrainage (zie Tabel 4). Voor elk drainagesysteem zijn drainageweerstanden en ontwateringsbases onderscheiden. Voor het primaire, secundaire en tertiaire systeem zijn deze gebaseerd op de methode zolas beschreven door De Lange (Kroon et al., 2001). Voor de buisdrainage is een weerstand van 100 dagen als standaard genomen.

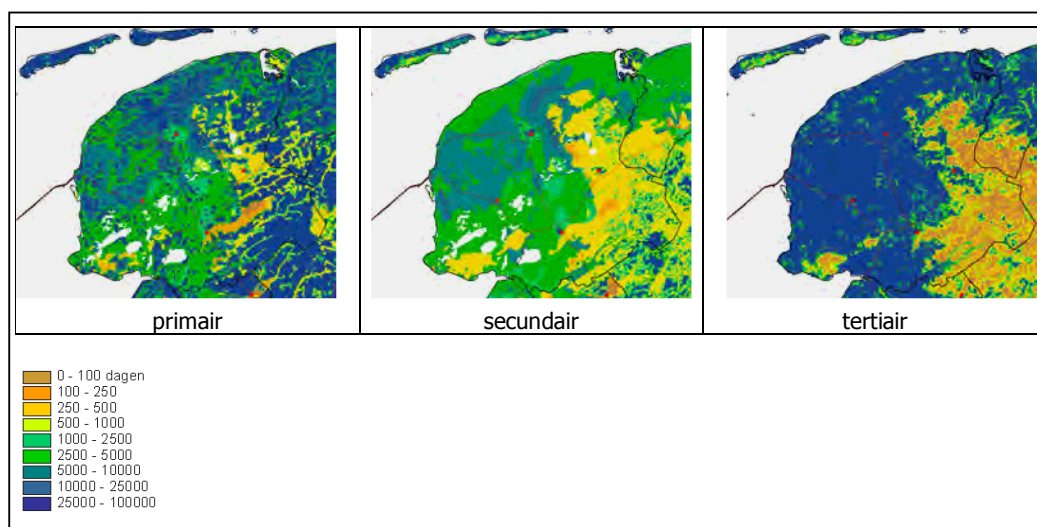
Bij hoge grondwaterstanden gaat het maaiveld als drainagemiddel fungeren. Daarom wordt voor de berekeningen met SWAP een 5^e drainagemiddel onderscheiden: de maaiveldsdrainage. Bij een grondwaterstand van 20 cm onder maaiveld draagt al een redelijk deel van het maaiveld bij aan deze vorm van drainage. De weerstand bij deze diepte is relatief laag en naar schatting 30 dagen. Voor de ontwateringsbasis is een diepte van 20 cm onder maaiveld gekozen (Kroon et al., 2001).

Tabel 4. De vijf drainagesystemen zoals gebruikt in de modelanalyse.

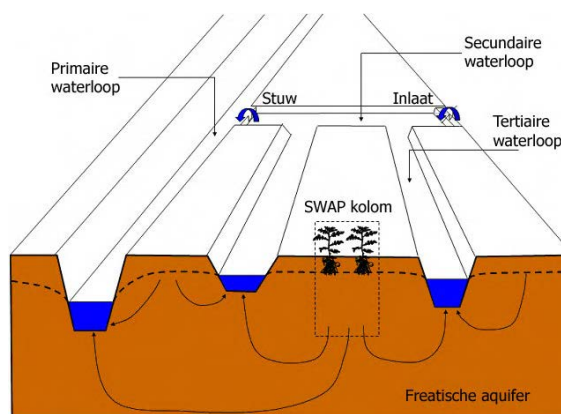
Drainagesysteem	Betekenis
Primair	Waterlopen 3 - 6 meter en waterlopen breder dan 6 meter
Secundair	Waterlopen smaller dan 3 meter
Tertiair	Grepels en droogvallende waterlopen
Buisdrainage	Buisdrainagesysteem
Maaiveldsdrainage	Oppervlakte drainage

Tabel 5. Gemiddelde drainageweerstand in dagen voor de vijf watersystemen voor de drie drainagesystemen onderscheiden in STONE.

Watersysteem	Primair (d)	Secundair (d)	Tertiair (d)
Klailan	17600	8700	44600
Linde	5700	900	200
Noordbroek	3500	3600	4900
Petsloot	1000	600	900
Zwarte Haan	10800	4700	17700



Figuur 6. Drainageweerstand in dagen voor de drie drainagesystemen volgens de STONE database.



Figuur 7. Interactie van het bodemwater met het openwatersysteem in SWAP.

2.3.5 Interactie met oppervlaktewater

De interactie met het oppervlaktewater wordt in SWAP gerepresenteerd met behulp van drie verschillende ontwateringssystemen. SWAP simuleert niet de volledige hydro-dynamisch stroming in het oppervlaktewater zelf, maar gaat ervan uit dat in een deelgebied het openwaterpeil constant is. Afvoer uit een deelgebied wordt wel dynamisch doorgerekend, waarbij gebruik gemaakt wordt van de afvoer via een stuw, waarbij de stuw ook representatief kan zijn voor een gemaal of een ander afwateringskunstwerk.

Afvoeren over stuwen worden in de praktijk berekend met de volgende formule voor rechthoekige lange overlaten (Vereniging voor Landinrichting, 2000):

$$Q = 1,7 \cdot m \cdot b \cdot h^{\frac{3}{2}}$$

waarin

Q	: debiet ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
m	: stuw coëfficiënt, vaak als 1.1 genomen (-)
b	: stuwkruinbreedte (m)
h	: overstorthoogte (m)

In SWAP wordt gebruikt gemaakt van:

$$Q = \alpha \cdot h^{\beta}$$

waarin

α	: stuw coëfficiënt ($\text{m}^{3-\beta} \text{s}^{-1}$)
β	: stuw exponent (-)

De conversie van de standaard stuw formule naar de gebruikte formule in SWAP kan eenvoudig worden afgeleid:

$$\alpha = 1,7 \cdot m \cdot b$$

$$\beta = \frac{3}{2}$$

Indien exacte gegevens van een stuw ontbreken, of indien een ander kunstwerk voor afwatering wordt gebruikt, wordt vaak een representatieve stuw gebruikt (Droogers et al., 2004). Hierbij is het van belang om de maximale overstorthoogte (h) bij een bepaalde maatgevende afvoer (Q) vast te stellen.

Indien bijvoorbeeld wordt uitgegaan van een maatgevende afvoer van $1,5 \text{ l s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ (13 mm d^{-1}) en dat de maximale overstorthoogte van 20 cm bij halve maatgevende afvoer wordt bereikt ($0,75 \text{ l s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$) kan de volgende standaard stuwformule worden toegepast.

$$Q = 1,7 \cdot m \cdot b \cdot h^{\frac{3}{2}}$$

$$0,00075 = 1,7 \cdot 1,1 \cdot b \cdot 0,20^{\frac{3}{2}}$$

$$b = \frac{0,00075}{1,7 \cdot 1,1 \cdot 0,20^{\frac{3}{2}}}$$

Bovenstaande is per hectare, dus integreren over de oppervlakte geeft:

$$b = 0,0045 \cdot Opp$$

waarbij:

Q	is afvoer ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$)
m	is stuw coëfficiënt (-)

b is stuwbreedte (m)

h is overstorthoogte (m)

Opp is oppervlakte (ha)

Dit betekent dat een peilgebied van 100 ha een stuwbreedte van 0,45 m zou moeten hebben om aan de gestelde afwateringsnorm en maximale overstorthoogte van 20 cm te voldoen.

In de SWAP stuwformule luidt de oppervlakte afhankelijke stuwconstante:

$$\alpha = 1,7 \cdot 1,1 \cdot 0,0045 \cdot Opp = 0,0084 \cdot Opp$$

2.4 Overige gegevens

2.4.1 Gemiddelde drooglegging

De drooglegging van de vijf gebieden is weergegeven in Tabel 6. Als eerste is gekeken wat de drooglegging is zoals bepaald uit het verschil tussen maaiveld en zomerpeil. Hiervoor is het AHN gebruikt en het zomerpeil zoals aangeleverd door het Wetterskip. Uit een eerdere SOBEK studie zijn ook droogleggingswaarden opgenomen in Tabel 6. Ten slotte is op grond van deze twee gegevens en met behulp van lokale expertise een drooglegging gedefinieerd per deelgebied waar in deze studie vanuit is gegaan.

Tabel 6. Drooglegging voor de vijf watersystemen.

Watersysteem	Maaiveld (m NAP)	Zomerpeil (m NAP)	Winterpeil (m NAP)	Drooglegging ¹ (m)	Drooglegging ² (m)	Drooglegging ³ (m)
Klailan	-0.26	-1.46	-1.46	1.20	-	1.20
Linde	4.38	2.77	2.70	1.60	0.90	0.90
Noardbroek	-0.80	-1.69	-1.69	0.89	0.90-1.00	0.95
Petsloot	0.37	-0.88	-1.01	1.25	-	1.25
Zwarte Haan	0.69	-0.55	-0.57	1.24	1.50	1.50

¹= berekend uit het verschil tussen maaiveld en zomerpeil

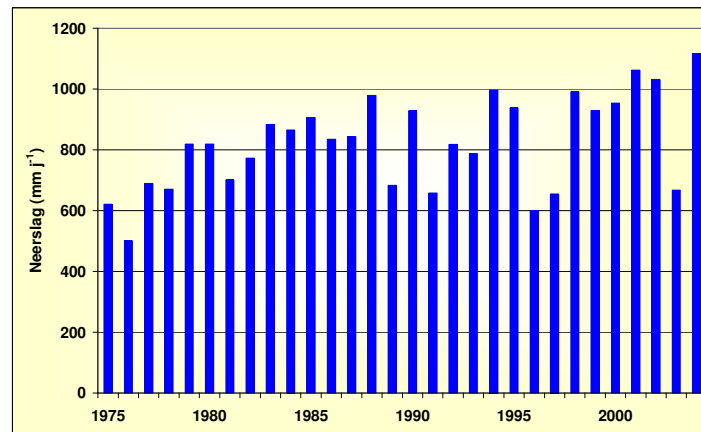
²= volgens het HKV 2001 rapport

³= aangehouden voor deze studie

2.4.2 Meteorologische gegevens

Neerslag- en verdampingsgegevens van het KNMI voor het station Leeuwarden zijn gebruikt. Een periode van 30 jaar (1975-2004) is toegepast in het model. De volledige 30 jaar is doorgerekend, dit verschilt dus van de aanpak van de zogenaamde "stochasten methode" waar slechts een aantal kortdurende neerslaggebeurtenissen worden doorgerekend.

Hoewel in de praktijk de neerslag ruimtelijk kan verschillen is er hier toch voor gekozen om alleen de gegevens van het meteorologische station Leeuwarden te gebruiken voor alle gebieden. De invloed van drainage op afvoeren is de kern van de studie en als zodanig is het belangrijk om de resultaten onafhankelijk te maken van toevalligheden in de ruimtelijke spreiding van neerslag.



Figuur 8. Jaarlijkse neerslag station Leeuwarden.

2.4.3 Bodem

Aan de hand van de STIBOKA bodemkaart zijn de dominante bodemtype onderscheiden. Deze kwalitatieve bodemindeling is omgezet naar de zogenaamde bodemfysische parameters die nodig zijn voor de berekeningen (Tabel 7). Deze bodemfysische eigenschappen zijn gebaseerd op de zogenaamde Staringreeks zoals gepubliceerd door Wösten et al. (2001).

Tabel 7. Dominante bodemtype in de vijf watersystemen. De bodemeenheden verwijzen naar de bodemfysische kenmerken.

Watersysteem	Bodemtype	Bodem-eenheden
Klailan	Klei	B11 – O12
Linde	Zand (60%)	B3 – O3
Linde	Veen (40%)	B17 – O17
Noardbroek	Veen	B17 – O17
Petsloot	Zand	B3 – O3
Zwarte Haan	Klei	B11 – O12

2.4.4 Landgebruik

Aan de hand van de PiriReis kaart is een globale landgebruikskaart samengesteld met daarop grasland en akkerbouw aangegeven. PiriReis is een jaarlijkse digitale gewassenkaart in vectorformaat die voor heel Nederland weergeeft welk gewas op elk perceel voorkomt. Uit deze kaart is vervolgens per watersysteem bepaald wat het grondgebruik is (Tabel 8). Gezien de geringe oppervlakte akkerbouw in het watersysteem Klailan is ervan uitgegaan dat dit gebied volledig uit grasland bestaat.

Tabel 8. Landgebruik voor de vijf watersystemen volgens de PiriReis.

Watersysteem	Akkerbouw (%)	Grasland (%)
Klailan	3	97
Linde	23	77
Noardbroek	0	100
Petsloot	9	91
Zwarte Haan	66	34

3 Analyses per watersysteem

3.1 Algemeen

In dit hoofdstuk zullen de gedetailleerde analyses gemaakt met behulp van de FutureView methode worden gepresenteerd. De analyses zijn uitgevoerd voor de vijf representatieve watersystemen zoals in paragraaf 2.2 beschreven.

In de rapportage van Fase A van dit project (Vos et al., 2005) is voor deze vijf deelgebieden de huidige en toekomstige verwachtingen voor wat betreft drainage beschreven. In dit rapport wordt volstaan met het geven van een overzicht van de belangrijkste resultaten en conclusies zoals te zien in Tabel 9.

Tabel 9. Samenvatting van de huidige en de toekomstige drainage situatie in de vijf deelgebieden (Vos et al., 2005).

Deel gebied	Bodem type	Land-gebruik	Huidige drainage situatie:			Toekomstige verwachte situatie ¹			
			Opp. ² %	afstand m	diepte m - MV	Opp. %	Afstand m	diepte m - MV	Opmerking
Zwarte Haan	Zeeklei	Akkerbouw	85 – 95	14 – 18	1,20 – 1,50	Toename tot 95%	7 – 9 à 10	Gelijk	Vervanging huidige drainage
	Zeeklei	Grasland	Hoge delen wel lage delen niet	12 – 18	0,90 – 1,20	Lage delen 10 – 15 %. enige toename tot ca. 25%	10 – 15	Gelijk	Vervanging huidige drainage
Klailan	Zeeklei	Akkerbouw	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
	Zeeklei	Grasland	30 – 40	8 – 16	0,90 – 1,20	Gelijk tot geringe toename tot 50%	Gelijk	Gelijk	Vervanging huidige drainage
Petsloot	Zand	Akkerbouw	90	7 – 14	1,00 – 1,20	Gelijk	Gelijk	Gelijk	Vervanging huidige drainage
	Zand	Grasland	0	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	
De Linde	Zand	Akkerbouw	50 -70	7 – 14	1,00 – 1,10	Toename tot 80%	7- 14	Gelijk	Vergroting, intensivering gedraineerde gronden drainage wordt geëxtensiveerd
	Veen	Grasland	35 – 50	10 – 15	0,80 – 1,10	Afname van 10%	10 – 15	Gelijk	
Noordbroek	Klei op veen	Akkerbouw	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	
	Klei op veen	Grasland	15-20	8 – 12	0,80 – 1,10	Toename tot max. 50%	8 – 12	Gelijk	Intensivering gedraineerde gronden

¹ Toekomstige verwachte situatie sterk afhankelijk van conjunctuur.

² Oppervlakte drainage als percentage van totaal areaal landbouw.

3.2 Klailan

Voor het gebied Klailan is ervan uitgegaan dat alleen grasland aanwezig is en dat de gedraineerde oppervlakte 35% bedraagt (Tabel 9). Overige gegevens zijn uit de diverse databases gehaald en de belangrijkste hiervan staan beschreven in de bijlagen.

Voor wat betreft de toekomstige verwachtingen zijn er twee scenario's doorgerekend. Ten eerste is er gekeken wat het effect zou zijn indien de huidige drainagesystemen volledig hersteld worden. Uit de eerste fase van de studie is gebleken dat ongeveer 40% van het huidige drainagesysteem goed functioneert. Het eerste scenario voor de toekomst gaat ervan uit dat het bestaande drainagesysteem volledig wordt opgeknapt en dus voor 100% gaat functioneren. Dit is in het model geïmplementeerd door te veronderstellen dat herstel per perceel plaatsvindt. Met ander woorden: een perceel als geheel heeft een volledig functionerend systeem (wel drainage) of een niet functionerend systeem (geen drainage).

Het tweede scenario voor de toekomst gaat ervan uit dat in plaats van 35% gedraineerde oppervlakte dit wordt verhoogd naar 50%. Dit is gebaseerd op verwachtingen zoals deze uit de eerste fase van deze studie zijn gekomen (Tabel 9).

Samenvattend zijn er drie scenario's doorgerekend voor een periode van 30 jaar (1975 tot en met 2004):

- Referentie: 30-40% drainage, waarvan 40% functioneel;
- Herstel: 30-40% drainage;
- Toekomst: Toename drainage tot 50%.

De belangrijkste resultaten zullen hier worden toegelicht, waarbij de nadruk gelegd zal worden op een extreem nat jaar (1998) en een extreem droog jaar (2003). Gezien de doelstelling van deze studie zal vooral gekeken worden wat de invloed van drainageveranderingen is op de afvoer. Daarnaast zal ook gekeken worden naar de invloed van drainage op grondwaterstanden.

3.2.1 Afvoeren

De afvoercurven voor Klailan voor de drie scenario's zijn te zien in Figuur 9. Uit deze Figuur blijkt dat de invloed van uitbreiding van het drainagesysteem relatief klein is. Het verschil tussen Referentie, Herstel en Toekomst is nauwelijks te zien in de afvoercurven.

In Figuur 10 is daarom voor de maand september 1998 in detail geplot wat de verschillen zijn voor de drie scenario's. Het blijkt dat de totale hoeveelheid afvoer nauwelijks veranderd, maar dat er een kleine verschuiving optreedt in het tijdstip van de afvoerpiek. Op 15 september viel er ruim 25 mm neerslag en op 17 september viel nogmaals 25 mm. De eerste bui zorgde ervoor dat de bodem nat werd, waardoor de tweede bui relatief snel tot afvoer kwam. Voor het scenario *Toekomst* is de bodem droger en komt de afvoer dus later in vergelijking met *Referentie*. Deze zogenaamde uitgestelde afvoer komt op een later tijdstip wel tot afvoer, waardoor vervolgens de afvoer voor *Toekomst* wat hoger is dan voor *Referentie*.

In Figuur 11 en Figuur 12 is voor de 30 jarige periode en voor de twee extremen jaren (1998 en 2003) het verschil in afvoer tussen de scenario's *Referentie* en de te verwachten *Toekomst* geplot. Het patroon zoals te zien was voor de situatie van september 1998 is ook hier zichtbaar: eerst een wat lagere afvoer, gevolgd door een wat hogere afvoer. De piekafvoeren als geheel, die vaak direct na een bui voorkomen, worden hierdoor afgevlakt.

Om de piekafvoeren voor de drie scenario's te kwantificeren, zijn overschrijdingskansen voor de 30 jaar die gesimuleerd is bepaald. In Tabel 10 is te zien dat het aantal extreme piekafvoeren (meer dan 20 mm d⁻¹) niet veranderd. Het aantal afvoeren > 10 mm d⁻¹ neemt iets toe, maar het aantal afvoeren > 15 mm d⁻¹ neemt weer wat af.

Van belang is nog dat de werkelijk afvoeren van een gebied vaak een maalcapaciteit hebben van 1,33 tot 1,67 l s⁻¹ ha⁻¹, wat overeenkomt met 11,5 tot 14,5 mm d⁻¹. In deze studie gaat het er echter om wat de werkelijk benodigde afvoercapaciteit is en hoe deze in de toekomst zal toenemen en is met deze beperking daarom geen rekening gehouden.

Concluderend kan gesteld worden dat de verwachte uitbreiding in drainage voor Kailan een klein effect op de afvoer zal hebben, en dat de verandering vooral tot uiting komt in een kleine verschuiving van de afvoerpieken.

3.2.2 Grondwaterstanden

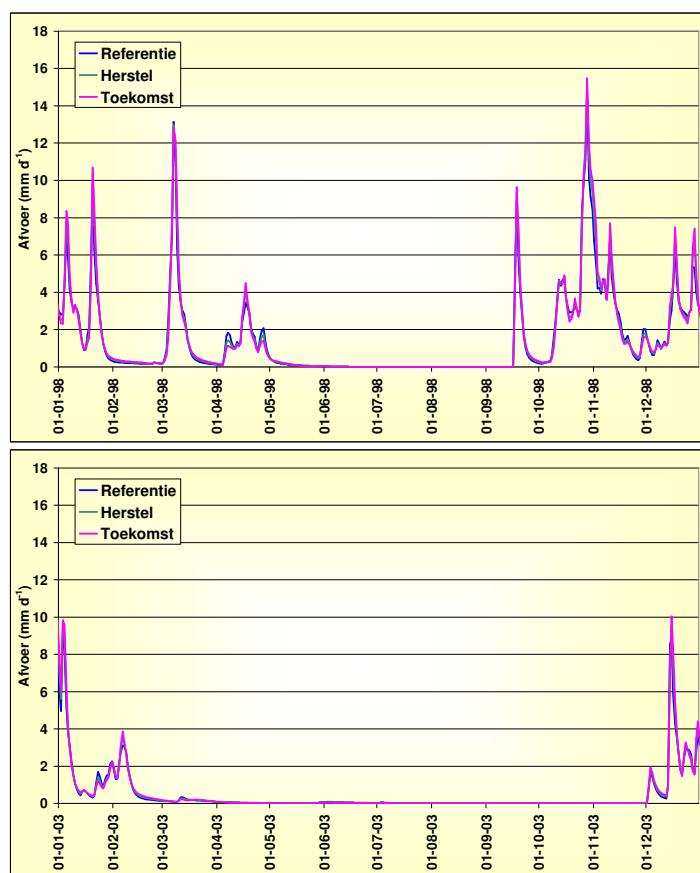
De invloed van veranderingen in het drainagesysteem, voor Kailan dus een uitbreiding, op grondwaterstanden is ook geanalyseerd. Met behulp van dezelfde modelopzet als voor het bepalen van de afvoeren wordt integraal de grondwaterstand berekend. Figuur 13 laat voor het natte jaar 1998 en het droge jaar 2003 zien wat de invloed op grondwaterstanden is. Duidelijk is dat de lagere grondwaterstanden minder worden beïnvloed door een intensivering van de drainage dan de hogere grondwaterstanden.

In Tabel 11 zijn overschrijdingskansen te zien voor extreem natte en extreem droge omstandigheden. De grenzen zoals aangegeven in deze Tabel zijn enigszins willekeurig gekozen, maar uit de resultaten kunnen ook andere grenzen gekozen worden. Het is duidelijk dat er een forse vermindering van het aantal natte dagen optreedt, terwijl de hoeveelheid dagen met lage grondwaterstanden slechts gedeeltelijk toeneemt. Deze resultaten zijn gemiddelden voor het gehele gebied en uiteraard zullen er aanzienlijke verschillen optreden tussen de wel en de niet gedraineerde percelen in een gebied. Dit is in Hoofdstuk 7 verder uitgewerkt.

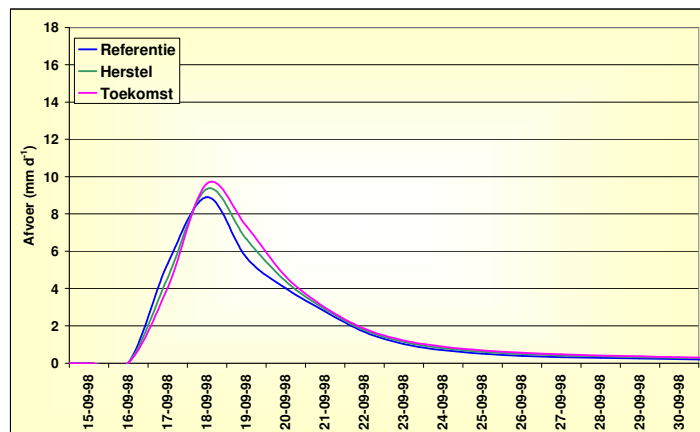
3.2.3 Gewasverdamping reductie

Veranderingen in de landbouwkundige productie als gevolg van veranderingen in de landbouwkundige situatie hangen van een veelheid van factoren af. De belangrijkste zijn droog- en natschade, bewerkbaarheid, bereidbaarheid, stikstofmineralisatie en warmtehuishouding. Er bestaan geen kwantitatieve methoden die al deze facetten meenemen. Het SWAP model gebruikt in deze studie geeft aan hoe de grondwaterstand verloopt en wat dus de invloed is op de bewerkbaarheid en bereidbaarheid. In de voorgaande paragraaf is dit behandeld.

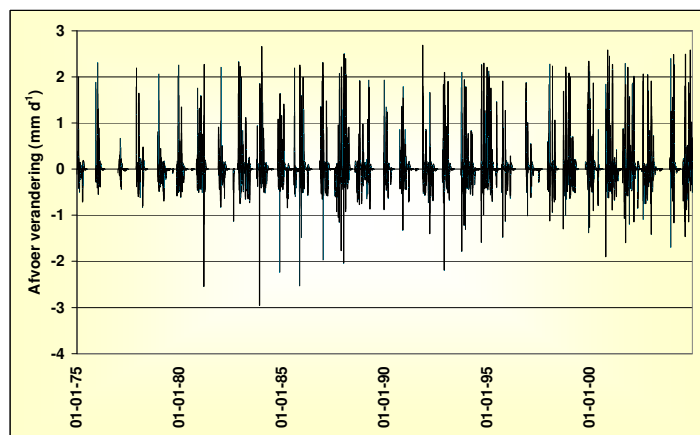
De veranderingen voor wat betreft de wateraanvoerbehoefte als gevolg van de veranderingen in de drainagesituatie zijn ook te kwantificeren met het SWAP model. Het verschil tussen de potentiële en de actuele verdamping is hier gebruikt om te zien wat deze invloed is. Uit Tabel 12 blijkt dat het gemiddelde vochttekort amper wordt beïnvloed door de veranderingen in drainage. Dit valt te verklaren uit het feit dat de lagere grondwaterstanden amper worden beïnvloed door drainage. Het aantal jaren waarop het vochttekort $>75 \text{ mm j}^{-1}$ is, loopt terug bij uitbreiding van het drainagesysteem. Dit kan verklaard worden doordat het berekende vochttekort ook kan ontstaan door te natte omstandigheden. Infiltratie via drainagebuizen kan in de praktijk ook zorgen dat watertekorten minder worden, maar dit is in de huidige studie niet meegenomen in deze studie. De resultaten in Tabel 12 zijn wederom gemiddelden voor het gehele gebied en uiteraard zullen er aanzienlijke verschillen optreden tussen de wel en de niet gedraineerde percelen in een gebied. Dit is in Hoofdstuk 7 verder uitgewerkt.



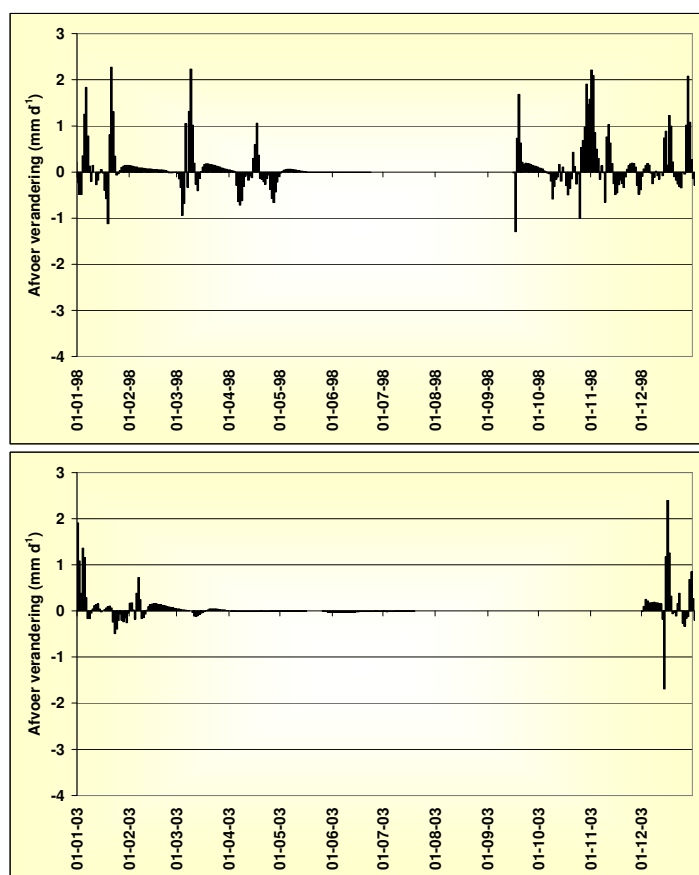
Figuur 9. Afvoeren voor Klailan voor de drie scenario's (1998 boven, 2003 onder).



Figuur 10. Afvoeren voor Klailan voor de drie scenario's voor september 1998 na 50 mm neerslag.



Figuur 11. Verschillen in afvoer referentie en toekomst voor Klailan. Positief is meer afvoer, negatief is minder afvoer (30 jaar).

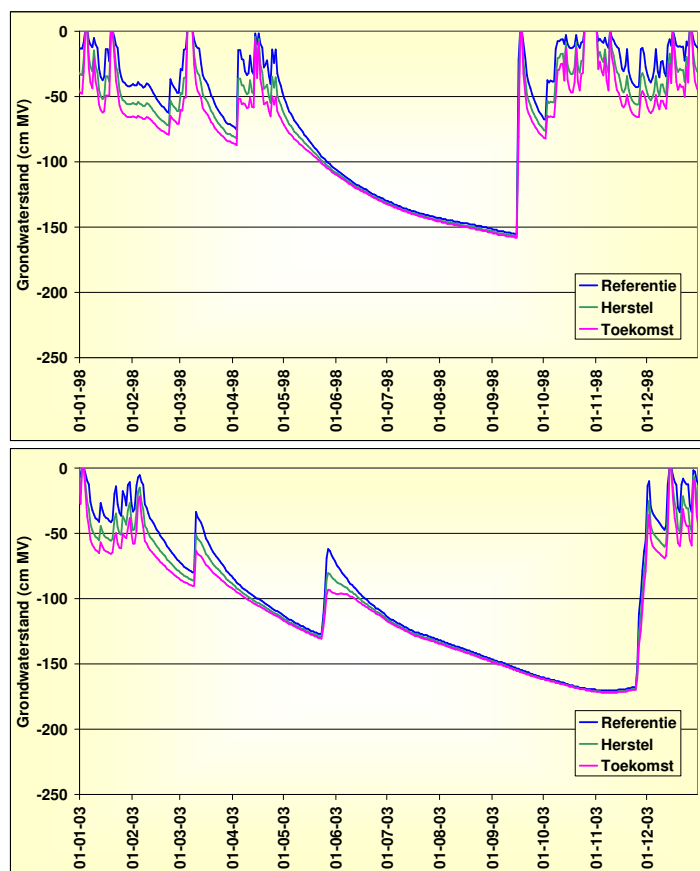


Figuur 12. Verschillen in afvoer referentie en toekomst voor Klailan. Positief is meer afvoer, negatief is minder afvoer (1998 boven, 2003 onder).

Tabel 10. Overschrijdingskansen voor afvoer Klailan. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (1975-2004) dat de afvoer groter is dan 7, 10, 15 en 20 mm d⁻¹ voor de drie scenario's voor Klailan.

afvoer (mm d ⁻¹)	Referentie (d)	Herstel (d)	Toekomst (d)	Verandering ¹ (%)
7	172	233	276	60
10	71	75	84	18
15	13	13	12	-8
20	3	3	3	0

¹Verandering heeft betrekking op het verschil tussen "Referentie" en "Toekomst".



Figuur 13. Grondwaterstanden voor Klailan voor de drie scenario's.

Tabel 11. Analyse grondwaterstanden Klailan. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (1975-2004) dat de grondwaterstand extreem hoog of laag is voor de drie scenario's.

	Referentie (d)	Herstel (d)	Toekomst (d)	Verandering ⁴ (%)
nat ¹	984	452	377	-62
droog ²	1586	1656	1692	+7
extreem droog ³	53	56	56	+6

¹ nat is grondwaterstand ondieper dan 10 cm

² droog is grondwaterstand dieper dan 150 cm

³ extreem droog is grondwaterstand dieper dan 200 cm

⁴Verandering heeft betrekking op het verschil tussen "Referentie" en "Toekomst".

Tabel 12. Invloed van drainage op het verschil tussen actuele en potentiële verdamping voor de drie scenario's voor Klailan.

	Referentie	Herstel	Toekomst	Verandering ¹ (%)
Gemiddeld vochttekort (mm j ⁻¹)	92	89	88	-4
Jaren met >75 mm vochttekort	20	16	16	-20

¹Verandering heeft betrekking op het verschil tussen "Referentie" en "Toekomst".

3.3 De Linde

Dezelfde analyses als beschreven onder watersysteem Kailan (paragraaf 3.2) zijn uitgevoerd voor watersysteem De Linde. De beschrijving hier zal daarom beperkt zijn en zich alleen richten op de specifieke resultaten voor watersysteem De Linde.

Uit de eerste fase van de studie zijn de volgende scenario's afgeleid voor De Linde (zie Tabel 9):

Akkerbouw:

- Referentie: 50-70% drainage, waarvan 40% functioneel;
- Herstel: 50-70% drainage;
- Toekomst: Toename drainage tot 80%.

Grasland:

- Referentie: 35-50% drainage, waarvan 40% functioneel;
- Herstel: 35-50% drainage;
- Toekomst: Afname drainage van 10% tot 33%.

3.3.1 Afvoeren

De verschillen in het afvoerproces voor de drie scenario's is zeer klein. Uit Figuur 14 blijkt duidelijk dat de verschillen nauwelijks zichtbaar zijn en zelfs met een detail grafiek (Figuur 15) van oktober 1998 blijken de verschillen minimaal. Ook Tabel 13 laat zien dat geen verschillen zijn in overschrijdingskansen. Figuur 16 en Figuur 17 laten het verschil in afvoeren zien tussen de scenario's *Referentie* en *Toekomst* en ook hieruit blijkt dat de verschillen beperkt blijven tot maximaal 1 mm en voor de meeste jaren tot 0,5 mm.

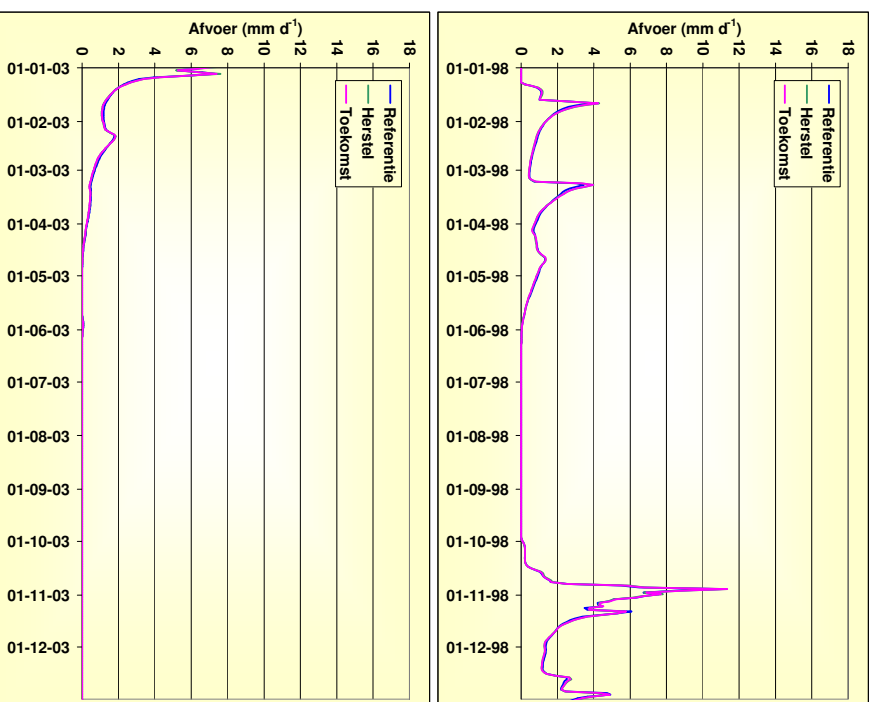
Uiteraard zijn deze kleine verschillen te verklaren uit het feit dat de verwachtingen voor De Linde voor de toekomst voor akkerbouw en voor grasland nogal verschillen. Voor akkerbouw valt een kleine toename van drainage te verwachten, terwijl voor grasland een afname valt te verwachten.

3.3.2 Grondwaterstanden

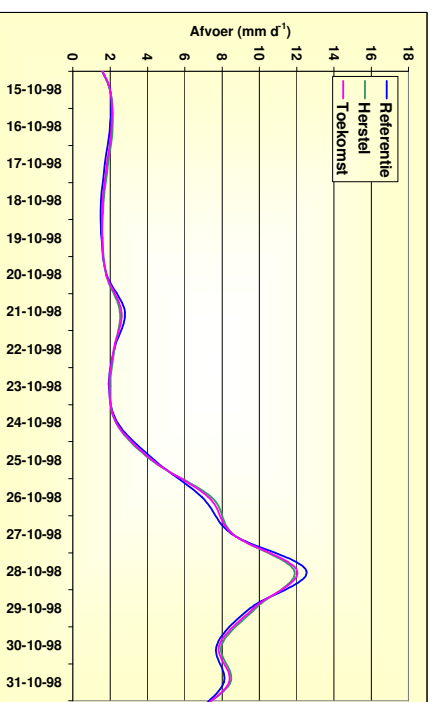
Gezien het feit dat er zowel een toename van drainage valt te verwachten (akkerbouw) als een afname (grasland) verandert er voor de gemiddelde grondwaterstand voor De Linde ook weinig (Figuur 18 en Tabel 14). Gedurende een droog jaar kunnen grondwaterstanden ver uitzakken tot wel twee meter beneden maaiveld.

3.3.3 Gewasverdamping reductie

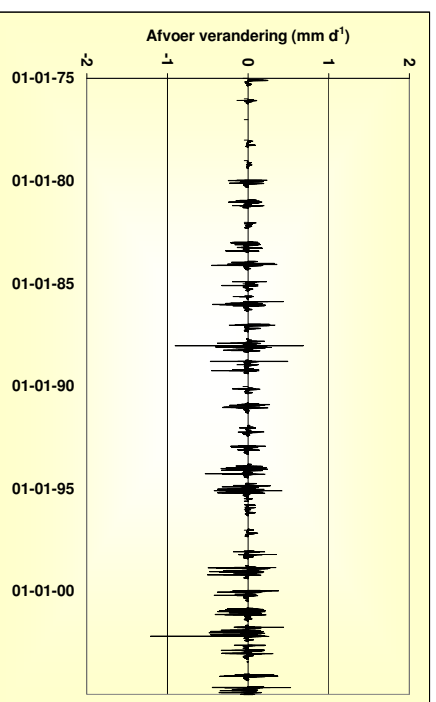
Het gemiddeld vochttekort, uitgedrukt als het verschil tussen de actuele en de potentiële verdamping, verandert ook nauwelijks voor het gebied als geheel en bedraagt circa 160 mm per jaar.



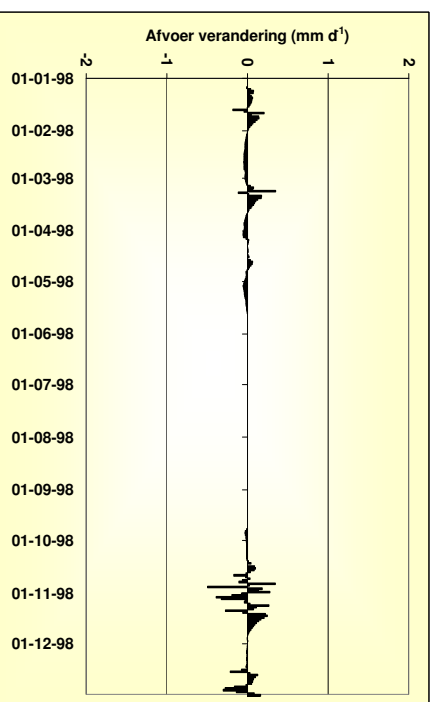
Figuur 14. Afvoeren voor De Linde voor de drie scenario's voor een nat jaar (1998, boven) en een droog jaar (2003, onder).



Figuur 15. Afvoeren voor De Linde voor de drie scenario's voor oktober 1998.



Figuur 16. Verschillen in afvoer referentie en toekomst voor De Linde. Positief is meer afvoer, negatief is minder afvoer (30 jaar).

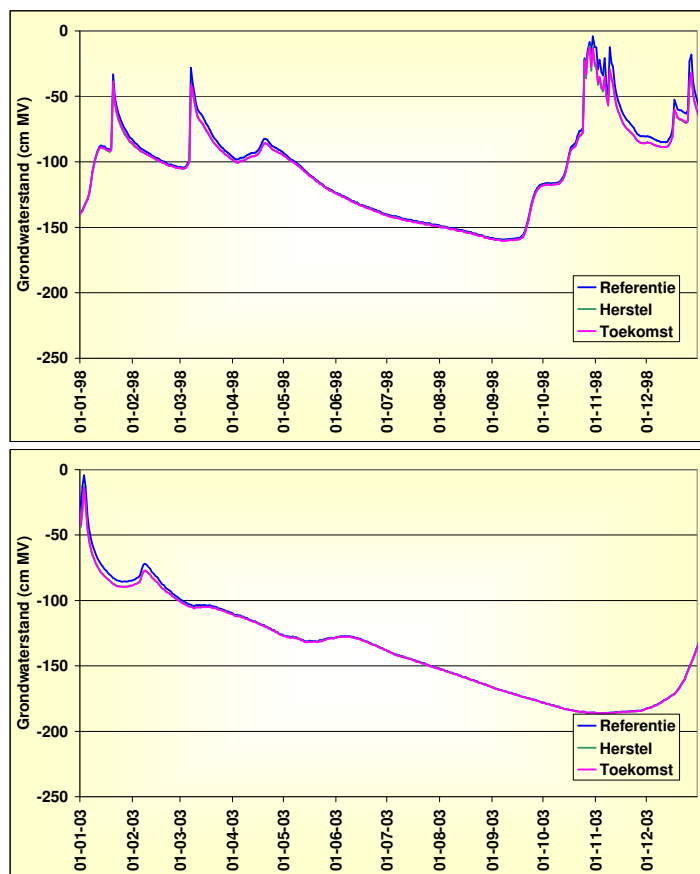


Figuur 17. Verschillen in afvoer referentie en toekomst voor De Linde. Positief is meer afvoer, negatief is minder afvoer (1998 boven, 2003 onder).

Tabel 13. Overschrijdingskansen voor afvoer De Linde. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (1975-2004) dat de afvoer groter is dan 7, 10, 15 en 20 mm d⁻¹ voor de drie scenario's voor De Linde.

afvoer (mm d ⁻¹)	Referentie (d)	Herstel (d)	Toekomst (d)	Verandering ¹ (%)
7	54	64	57	6
10	12	12	12	0
15	2	2	2	0
20	0	0	0	0

¹Verandering heeft betrekking op het verschil tussen "Referentie" en "Toekomst".



Figuur 18. Grondwaterstanden voor De Linde voor de drie scenario's.

Tabel 14. Analyse grondwaterstanden De Linde. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (1975-2004) dat de grondwaterstand extreem hoog of laag is voor de drie scenario's.

	Referentie (d)	Herstel (d)	Toekomst (d)	Verandering ⁴ (%)
nat ¹	178	59	55	-69
droog ²	2276	2334	2331	+2
extreem droog ³	95	96	95	0

¹ nat is grondwaterstand ondieper dan 10 cm

² droog is grondwaterstand dieper dan 150 cm

³ extreem droog is grondwaterstand ondieper dan 200 cm

⁴Verandering heeft betrekking op het verschil tussen "Referentie" en "Toekomst".

Tabel 15. Invloed van drainage op het verschil tussen actuele en potentiële verdamping voor de drie scenario's voor De Linde.

	Referentie	Herstel	Toekomst	Verandering ¹ (%)
Gemiddeld vochttekort (mm j^{-1})	163	164	164	0
Jaren met >75 mm vochttekort	4	4	4	0

¹Verandering heeft betrekking op het verschil tussen "Referentie" en "Toekomst".

3.4 Noordbroek

Het gebied Noordbroek wordt verondersteld volledig uit grasland te bestaan. De te verwachten veranderingen in het gebied voor wat betreft drainage zijn een uitbreiding met ruim een verdubbeling van het oppervlak dat gedraineerd is (zie ook Tabel 9):

- Referentie: 15-20% drainage, waarvan 40% functioneel;
- Herstel: 15-20% drainage;
- Toekomst: Toename drainage tot 50%.

3.4.1 Afvoeren

De afvoercurven voor het watersysteem Noordbroek voor de drie scenario's zijn te zien in Figuur 19 en in detail voor september 1998 in Figuur 20.

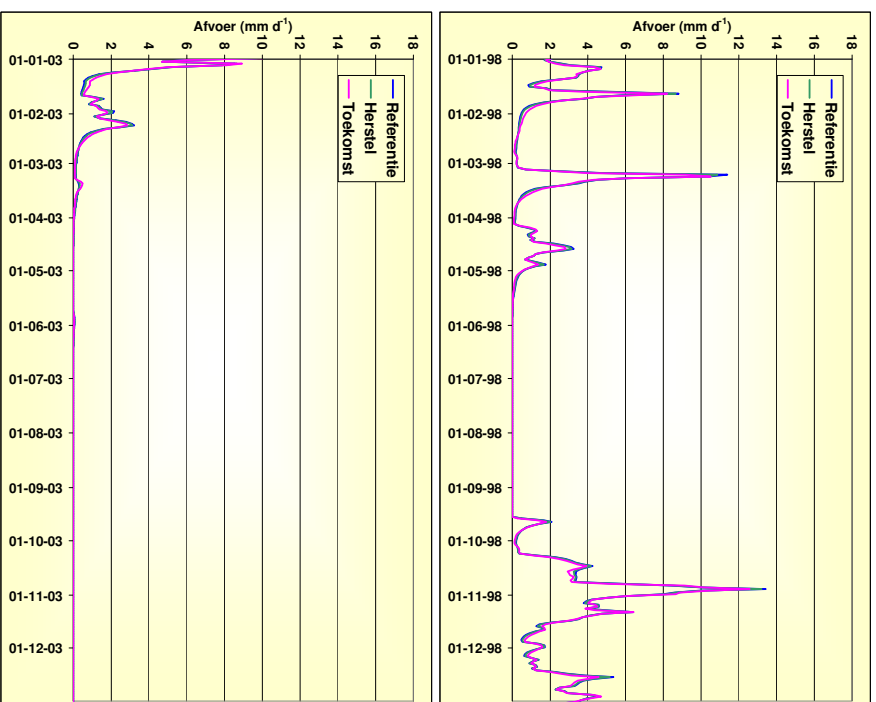
Verschillen in afvoerpatronen kunnen tot maximaal 5 mm d⁻¹ bedragen (Figuur 21), maar de kansen op piekafvoeren lijken klein (Tabel 16). De verschillen in deze tabel voor de > 20 mm en > 15 mm lijken procentueel groot, maar heeft vooral te maken met het net verschuiven van één bui van de ene klasse naar de andere.

3.4.2 Grondwaterstanden

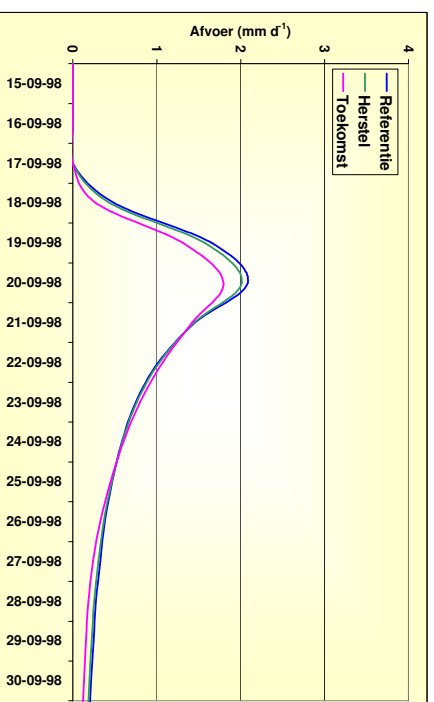
Grondwaterstanden laten een drogere situatie zien onder het scenario *toekomst* als gevolg van de intensievere drainage. Met name extreem natte situaties worden voorkomen (Figuur 23) en de frequentie van natte dagen neemt fors af (Tabel 17).

3.4.3 Gewasverdamping reductie

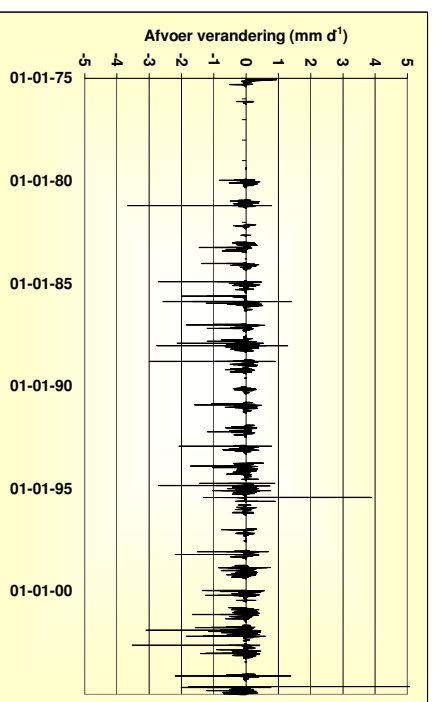
Het gemiddelde vochttekort neemt in de toekomst af (Tabel 18), maar hierbij moet rekening gehouden worden dat dit vochttekort de hoeveelheid water is die een plant minder opneemt dan optimaal. Sub-optimale omstandigheden kunnen echter ook optreden als er wateroverlast is en dit is voor Noordbroek onder het scenario *Referentie* (huidige situatie) het geval.



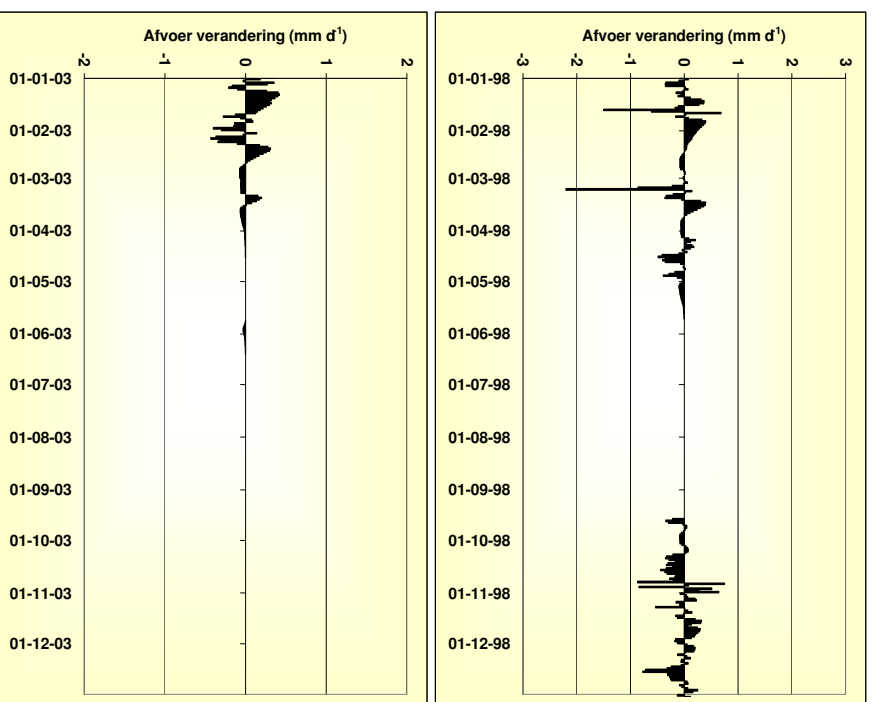
Figuur 19. Afvoeren voor Noardbroek voor de scenario's voor een nat jaar (1998, boven) en een droog jaar (2003, onder).



Figuur 20. Afvoeren voor Noardbroek voor de scenario's voor september 1998 na 50 mm neerslag.



Figuur 21. Verschillen in afvoer referentie en toekomst voor Noardbroek. Positief is meer afvoer, negatief is minder afvoer (30 jaar).

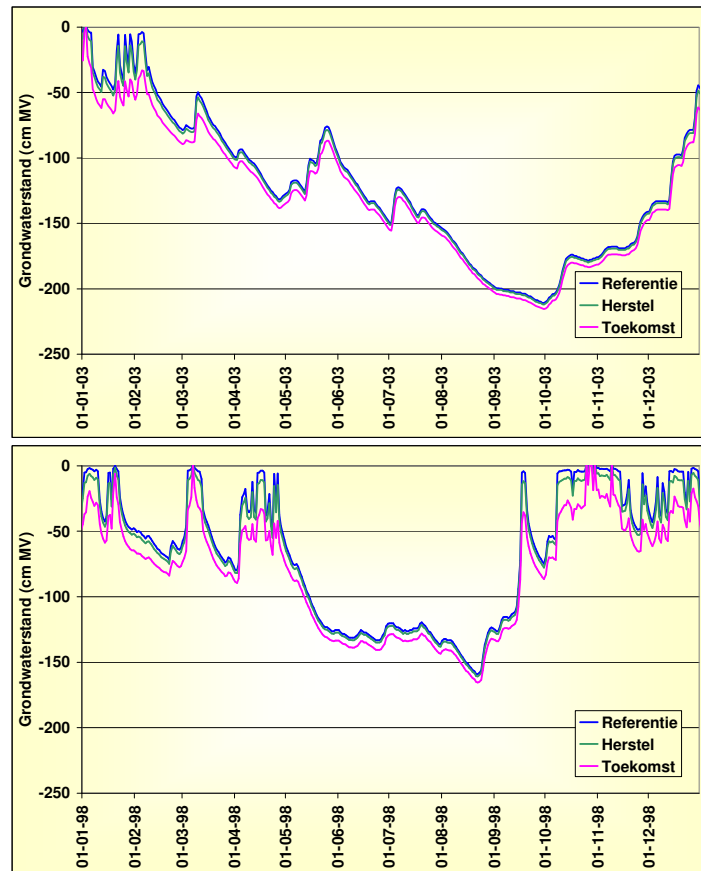


Figuur 22. Verschillen in afvoer referentie en toekomst voor Noardbroek. Positief is meer afvoer, negatief is minder afvoer (1998 boven, 2003 onder).

Tabel 16. Overschrijdingskansen voor afvoer Noardbroek. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (1975-2004) dat de afvoer groter is dan 7, 10, 15 en 20 mm d⁻¹ voor de drie scenario's voor Noardbroek.

afvoer (mm d ⁻¹)	Referentie (d)	Herstel (d)	Toekomst (d)	Verandering ¹ (%)
7	102	101	100	-2
10	47	49	45	-4
15	6	6	5	-17
20	1	1	2	+100

¹Verandering heeft betrekking op het verschil tussen "Referentie" en "Toekomst".



Figuur 23. Grondwaterstanden voor Noardbroek voor de drie scenario's voor een nat jaar (1998, boven) en een droog jaar (2003, onder).

Tabel 17. Analyse grondwaterstanden Noardbroek. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (1975-2004) dat de grondwaterstand extreem hoog of laag is voor de drie scenario's.

	Referentie (d)	Herstel (d)	Toekomst (d)	Verandering ⁴ (%)
nat ¹	1342	575	86	-94
droog ²	3056	3143	3390	+11
extreem droog ³	1207	1245	1369	+13

¹ nat is grondwaterstand ondieper dan 10 cm

² droog is grondwaterstand dieper dan 150 cm

³ extreem droog is grondwaterstand ondieper dan 200 cm

⁴Verandering heeft betrekking op het verschil tussen "Referentie" en "Toekomst".

Tabel 18. Invloed van drainage op het verschil tussen actuele en potentiële verdamping voor de drie scenario's voor Noardbroek.

	Referentie	Herstel	Toekomst	Verandering ¹ (%)
Gemiddeld vochttekort (mm j ⁻¹)	19	18	14	-27
Jaren met >75 mm vochttekort	0	0	0	0

¹Verandering heeft betrekking op het verschil tussen "Referentie" en "Toekomst".

3.5 *Petsloot*

Uit de fase A van de drainage studie is gebleken dat er geen wezenlijke veranderingen zijn te verwachten in de toekomst voor Petsloot (zie ook Tabel 9). Het scenario *Toekomst* is daarom gelijk aan het scenario *Herstel*. Samenvattend zijn de volgende scenario's gedefinieerd voor Petsloot:

Akkerbouw:

- Referentie: 85-95% drainage, waarvan 40% functioneel;
- Herstel: 85-95% drainage;
- Toekomst: Geen wijzigingen: gelijk aan herstel.

Grasland:

- Referentie: 0% drainage;
- Herstel: 0% drainage;
- Toekomst: Geen wijzigingen: gelijk aan herstel.

3.5.1 Afvoeren

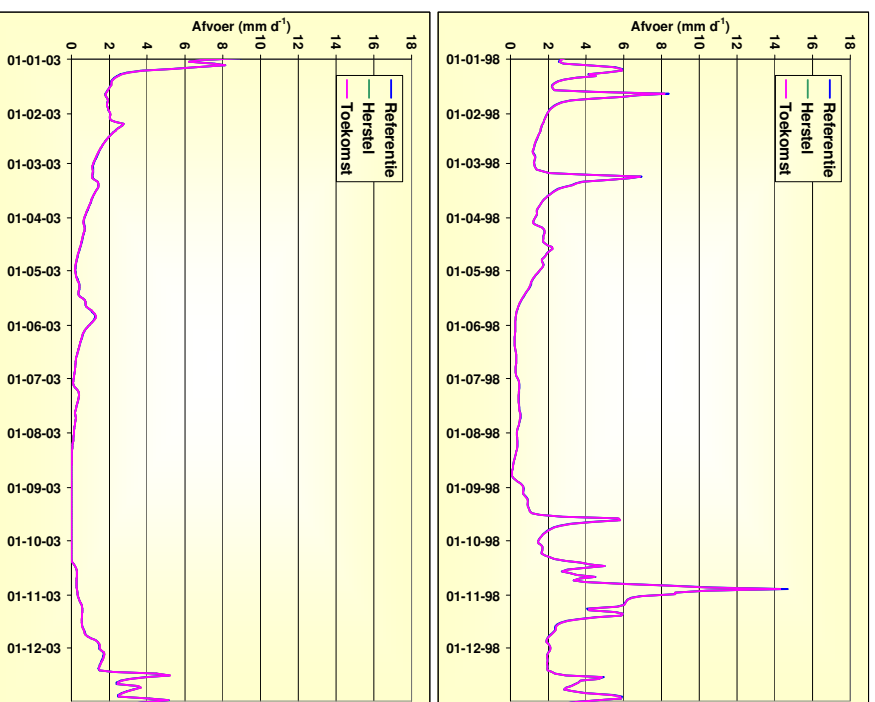
De afvoercurven voor het watersysteem Petsloot voor de drie scenario's zijn te zien in Figuur 24 en Figuur 25. Aangezien het scenario *Toekomst* aangeeft dat er geen veranderingen te verwachten zijn, is alleen gekeken naar het verschil tussen het scenario *Referentie* en *Herstel*. Figuur 26 en Figuur 27 en Tabel 19 laten duidelijk zien dat er geen grote veranderingen zijn te verwachten in afvoeren en frequenties in piekafvoeren.

3.5.2 Grondwaterstanden

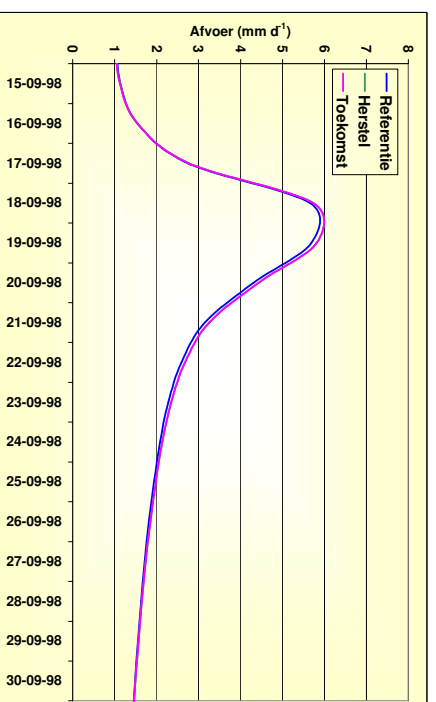
Ook voor wat de grondwaterstanden zijn geen grote veranderingen te verwachten (Figuur 28 en Tabel 20).

3.5.3 Gewasverdamping reductie

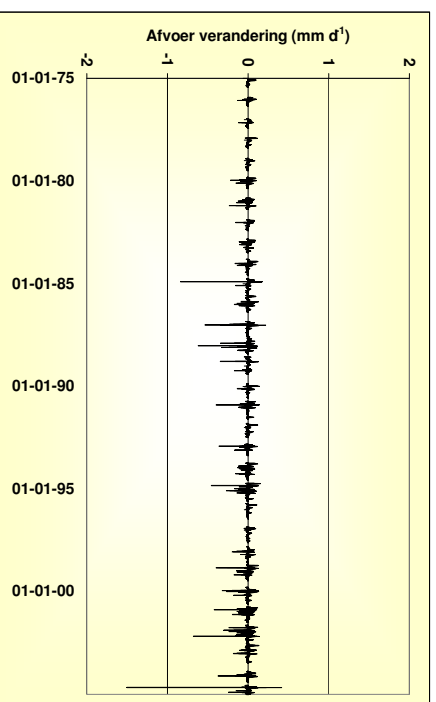
Vochttekorten en jaren met een vochttekort groter dan 75 mm zal niet veranderen onder het scenario *Herstel* (Tabel 21).



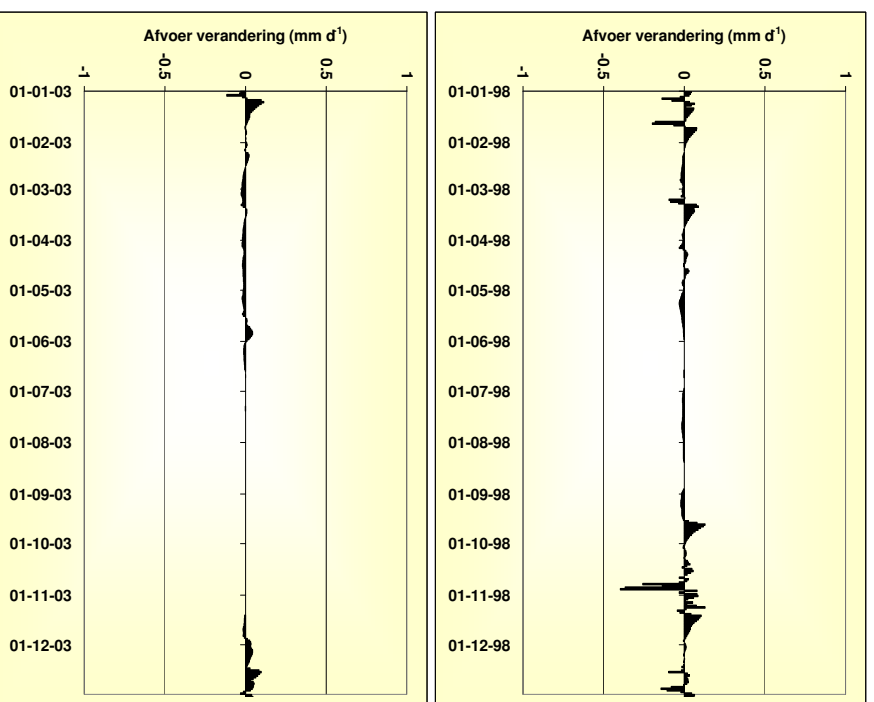
Figuur 24. Afvoeren voor Petsibot voor de drie scenario's voor een nat jaar (1998, boven) en een droog jaar (2003, onder).



Figuur 25. Afvoeren voor Petsibot voor de drie scenario's voor september 1998 na 50 mm neerslag.



Figuur 26. Verschillen in afvoer voor de scenario's referentie en herstel voor Petsloot. Positief is meer afvoer, negatief is minder afvoer (30 jaar).

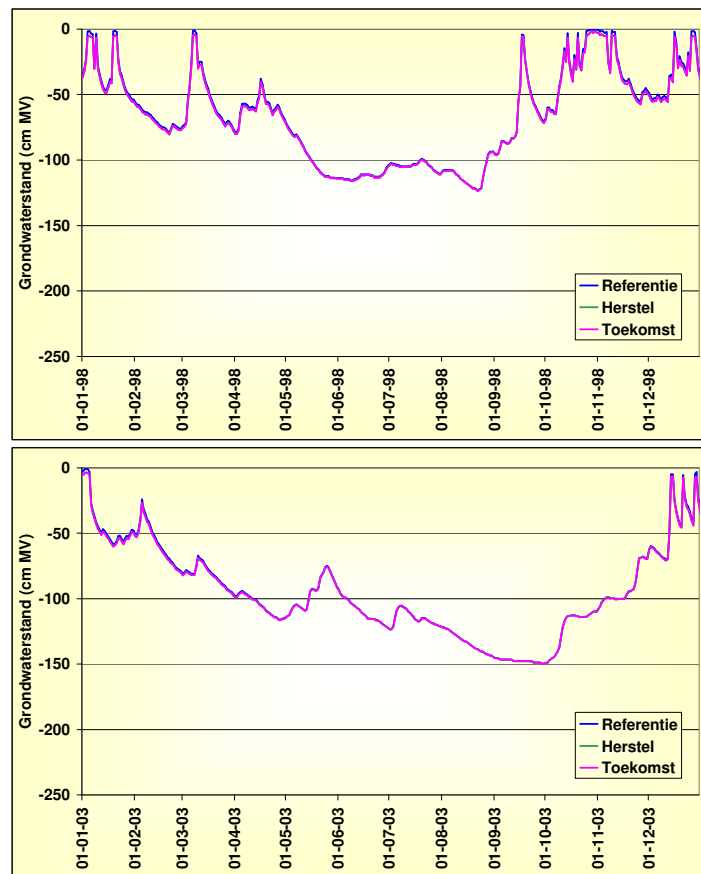


Figuur 27. Verschillen in afvoer voor de scenario's referentie en herstel voor Petsloot. Positief is meer afvoer, negatief is minder afvoer (1998 boven, 2003 onder).

Tabel 19. Overschrijdingskansen voor afvoer. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (1975-2004) dat de afvoer groter is dan 7, 10, 15 en 20 mm d⁻¹ voor de drie scenario's voor Petsloot.

afvoer (mm d ⁻¹)	Referentie (d)	Herstel (d)	Toekomst (d)	Verandering ¹ (%)
7	100	100	100	0
10	33	32	32	-3
15	4	4	4	0
20	2	2	2	0

¹Verandering heeft betrekking op het verschil tussen "Referentie" en "Herstel".



Figuur 28. Grondwaterstanden voor Petsloot voor de drie scenario's voor een nat jaar (1998, boven) en een droog jaar (2003, onder).

Tabel 20. Analyse grondwaterstanden Petsloot. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (1975-2004) dat de grondwaterstand extreem hoog of laag is voor de drie scenario's.

	Referentie (d)	Herstel (d)	Toekomst (d)	Verandering ⁴ (%)
nat ¹	559	549	549	-2
droog ²	527	534	534	+1
extreem droog ³	0	0	0	0

¹ nat is grondwaterstand ondieper dan 10 cm

² droog is grondwaterstand dieper dan 150 cm

³ extreem droog is grondwaterstand ondieper dan 200 cm

⁴Verandering heeft betrekking op het verschil tussen "Referentie" en "Toekomst".

Tabel 21. Invloed van drainage op het verschil tussen actuele en potentiële verdamping voor de drie scenario's voor Petsloot.

	Referentie	Herstel	Toekomst	Verandering ¹ (%)
Gemiddeld vochttekort (mm j ⁻¹)	8	8	8	2
Jaren met >75 mm vochttekort	0	0	0	0

¹Verandering heeft betrekking op het verschil tussen "Referentie" en "Toekomst".

3.6 Zwarte Haan

Voor het laatste representatieve watersysteem, Zwarte Haan, zijn in de eerste fase van de studie verwachte veranderingen voor akkerbouw en voor grasland gedefinieerd (zie Tabel 9). Er valt een toename van de gedraineerde oppervlakte te verwachten, maar ook een intensivering van de gedraineerde percelen. Voor grasland is aangegeven dat de lage delen volledig gedraineerd zijn en de hoge delen niet (Tabel 9). In de toekomst zullen deze hoge delen ook gedeeltelijk gedraineerd worden, wat neerkomt op een toename tot 75% gedraineerd voor het grasland gebied.

Samenvattend zijn de volgende scenario's afgeleid voor Zwarte Haan:

Akkerbouw:

- Referentie: 85-90% drainage, waarvan 40% functioneel;
- Herstel: 85-90% drainage;
- Toekomst: Drainafstand 8 m, toename tot 95% van oppervlakte.

Grasland:

- Referentie: 50% drainage, waarvan 40% functioneel;
- Herstel: 50% drainage;
- Toekomst: Drainafstand 12,5 m, toename tot 75% van oppervlakte.

3.6.1 Afvoeren

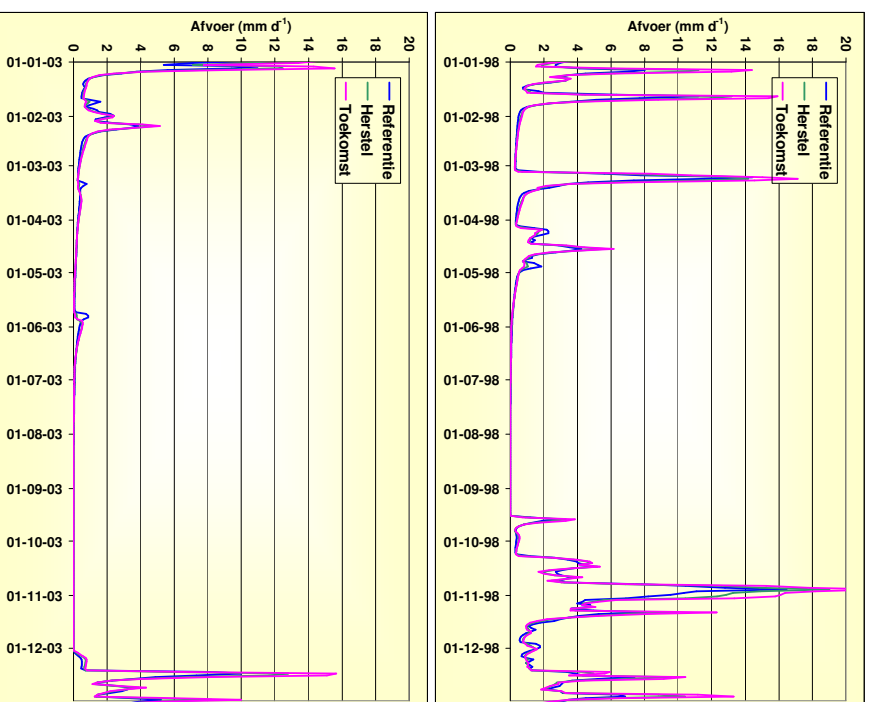
Voor de toekomstige situatie is er een duidelijke verandering in afvoeren te verwachten (Figuur 31 en Figuur 32). Door de intensivering van de drainage situatie in Zwarte Haan zal over het algemeen de afvoerpiek iets later komen (Figuur 29 en Figuur 30), maar wel intensiever zijn (Tabel 22). Figuur 30 laat duidelijk zien dat voor een hevige bui de afvoer iets later op gang komt, maar daarna meer afvoer zal komen dan in de *Referentie* situatie.

3.6.2 Grondwaterstanden

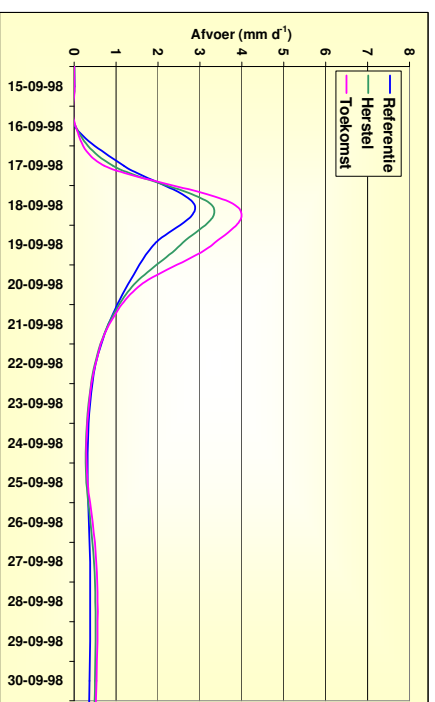
De invloed van de intensivering van de drainage heeft ook behoorlijke gevolgen voor de grondwaterstanden in het gebied. De laagste grondwaterstanden blijven ongeveer gelijk, maar vooral na hevige neerslag zal de grondwaterstand sneller gedaald zijn dan in de *Referentie* situatie (Figuur 33). Uit Tabel 23 blijkt bovendien dat natte omstandigheden minder vaak voorkomen, maar dat tegelijk droge omstandigheden vaker zullen optreden bij de te verwachten intensivering van de drainage.

3.6.3 Gewasverdamping reductie

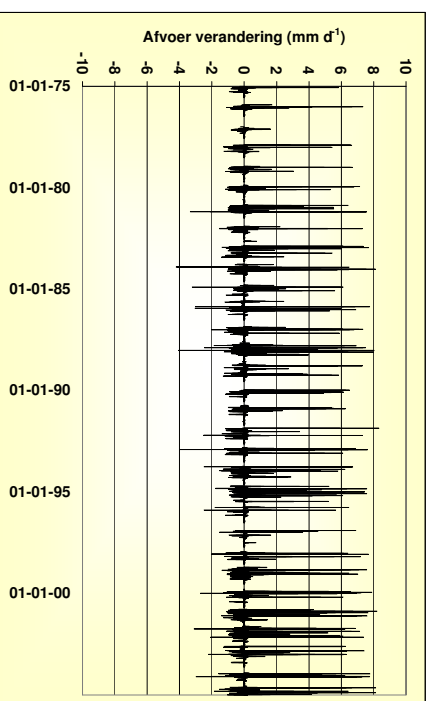
Het gemiddelde vochttekort zal iets afnemen, maar wederom kan dit ook komen doordat de plant minder last heeft van extreem natte omstandigheden (Tabel 24).



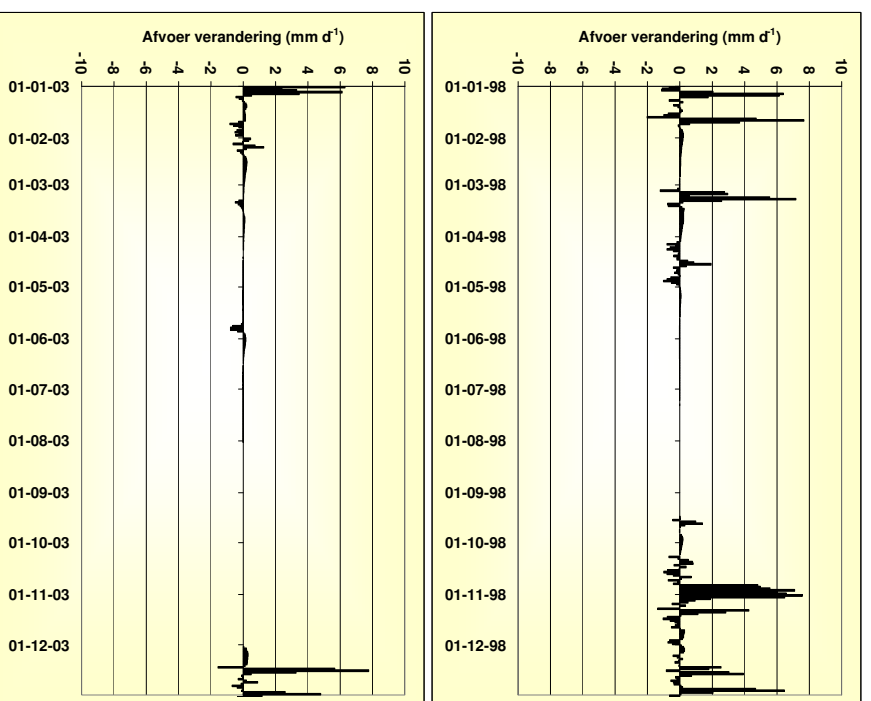
Figuur 29. Afvoeren voor Zwarte Haan voor de drie scenario's voor een nat jaar (1998, boven) en een droog jaar (2003, onder).



Figuur 30. Afvoeren voor Zwarte Haan voor de drie scenario's voor september 1998 na 50 mm neerslag.



Figuur 31. Verschillen in afvoer referentie en toekomst voor Zwarte Haan. Positief is meer afvoer, negatief is minder afvoer (30 jaar).

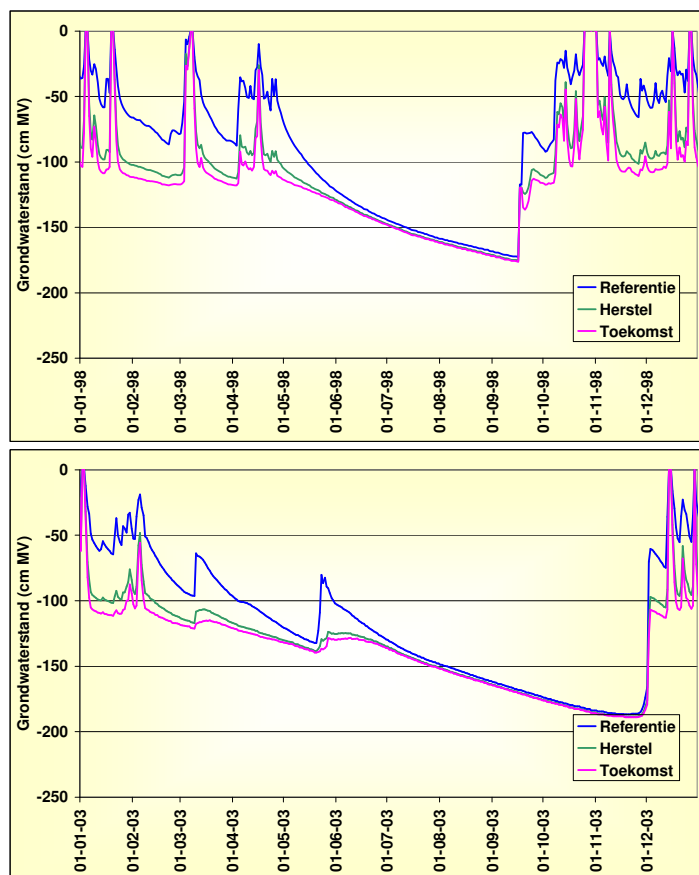


Figuur 32. Verschillen in afvoer referentie en toekomst voor Zwarte Haan. Positief is meer afvoer, negatief is minder afvoer (1998 boven, 2003 onder).

Tabel 22. Overschrijdingskansen voor afvoer Zwarte Haan. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (1975-2004) dat de afvoer groter is dan 7, 10, 15 en 20 mm d⁻¹ voor de drie scenario's voor Zwarte Haan.

afvoer (mm d ⁻¹)	Referentie (d)	Herstel (d)	Toekomst (d)	Verandering ¹ (%)
7	243	352	420	73
10	87	214	288	+231
15	14	25	109	+679
20	3	5	10	+233

¹Verandering heeft betrekking op het verschil tussen "Referentie" en "Toekomst".



Figuur 33. Grondwaterstanden voor Zwarte Haan voor de drie scenario's voor een nat jaar (1998, boven) en een droog jaar (2003, onder).

Tabel 23. Analyse grondwaterstanden Zwarte Haan. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (1975-2004) dat de grondwaterstand extreem hoog of laag is voor de drie scenario's.

	Referentie (d)	Herstel (d)	Toekomst (d)	Verandering ⁴ (%)
nat ¹	321	290	280	-13
droog ²	2541	2782	2872	+13
extreem droog ³	100	135	150	+50

¹ nat is grondwaterstand ondieper dan 10 cm

² droog is grondwaterstand dieper dan 150 cm

³ extreem droog is grondwaterstand ondieper dan 200 cm

⁴Verandering heeft betrekking op het verschil tussen "Referentie" en "Toekomst".

Tabel 24. Invloed van drainage op het verschil tussen actuele en potentiële verdamping voor de drie scenario's voor Zwarte Haan.

	Referentie	Herstel	Toekomst	Verandering ¹ (%)
Gemiddeld vochttekort (mm j ⁻¹)	110	109	108	-2
Jaren met >75 mm vochttekort	21	20	20	-5

¹Verandering heeft betrekking op het verschil tussen "Referentie" en "Toekomst".

3.7 Conclusies deelgebieden

Uit de voorgaande paragrafen blijkt duidelijk dat er geen eenduidige conclusie kan worden getrokken wat de invloed is van drainageontwikkelingen op afvoeren, grondwaterstanden, Gewasverdamping reductie. Een veelheid van factoren bepaald dit, waarbij een onderscheid gemaakt moet worden tussen de eigenschappen van een gebied (landgebruik, bodem, drainageweerstand, drooglegging) en de verwachtingen voor de toekomst voor wat betreft drainage. Het mag duidelijk zijn dat dit laatste punt vooral bepalend is voor het verschil tussen de huidige situatie en de toekomst.

In Tabel 25 zijn de belangrijkste kerngetallen, zoals in detail beschreven in de voorgaande paragrafen nogmaals weergegeven. Als eerste is het duidelijk dat kleine wijzigingen in de drainagesystemen ook weinig invloed hebben op de hydrologisch processen. Zoals eerder aangegeven is er voor alle gebieden wel vanuit gegaan dat de op dit moment aanwezige drainagesystemen volledig functioneren en niet voor de 40% zoals in de huidige situatie. Dit verklaart ook de verandering in natschade voor Petsloot.

De invloed van veranderingen in het drainagesysteem op de afvoer is nogal verschillend. Voor Klailan en Noardbroek nemen de piekafvoeren wat af, maar voor Zwarte Haan en Klailan (de kleigebieden) nemen ze juist toe. Deze verschillen komen door de combinatie van de vele niet-lineaire processen, maar kan globaal als volgt worden verklaard. Een kleine uitbreiding van de drainagecapaciteit zorgt ervoor dat de bodem droger wordt, waardoor piekafvoeren kunnen worden opgevangen. Een hogere draindichtheid zorgt er echter voor dat de bodem in principe wel droger is en dus ook meer water kan vasthouden, maar zorgt dat er toch snelle afvoer via het drainagesysteem tot stand komt. Simpelweg: een klein hoeveelheid drainage zorgt voor een grotere buffercapaciteit in de bodem wat de drainage vertraagd; veel drainage vergroot ook de buffercapaciteit maar maakt het systeem ook "hydrologisch sneller" en vergroot piekafvoeren.

Wat echter essentieel is om in beschouwing te nemen is de vertraagde afvoer. Uit de voorgaande paragrafen is duidelijk gebleken dat niet zozeer de pieken verminderen, maar dat er vooral een verschuiving plaatsvindt. In het volgende hoofdstuk wordt uitgebreid geanalyseerd wat voor invloed dit heeft voor de Friese boezem.

Natschade wordt in alle gevallen verminderd. Dat dit slechts in beperkte mate opgaat voor Zwarte Haan komt doordat de natschade, uitgedrukt als het aantal dagen met een grondwaterstand hoger dan 10 cm, al relatief laag was.

Tabel 25. Samenvatting van de invloed van veranderingen in drainage op de vijf deelgebieden. Weergegeven is het verschil tussen Referentie en Toekomst

	Klailan	De Linde	Noardbroek	Petsloot	Zwarte Haan
Drainage Oppervlak	35 → 50 %	60% → 80% 43% → 33%	18% → 50%	90% → 90%	85% → 95% 50% → 75%
Drain afstand	gelijk	gelijk	gelijk	gelijk	halvering
Dagen met piekafvoer (> 15 mm d ⁻¹)	-8%	0%	-17%	0%	+679%
Dagen met grondwaterstand ondieper dan 10 cm	-62%	-69%	-94%	-2%	-13%
Dagen met grondwaterstand dieper dan 200 cm	+6%	0%	+13%	0%	+50%
Verandering verschil actuele en potentiële verdamping	-4%	0%	-27%	0%	-2%
Jaren met > 75 mm vochttekort	-20%	0%	0%	0%	-5%

4 Invloed op Friese boezem

4.1 Representativiteit deelgebieden

De vijf watersystemen die in het voorgaande hoofdstuk zijn geanalyseerd met behulp van FutureView zijn representatief voor andere gebieden in het beheersgebied van het Wetterskip Fryslân. De invloed van veranderingen in drainagesystemen in de vijf watersystemen kan daarom gebruikt worden om de vertaalslag te maken naar het gehele beheersgebied. Deze vertaalslag is gemaakt door de Stiboka bodemkaart te generaliseren tot een viertal hoofdbodemklasse (Figuur 34). Voor de landgebruikskaart is dezelfde analyse gedaan, waarbij gebruik is gemaakt van de database zoals aangeleverd door Wetterskip Fryslân (Figuur 35).

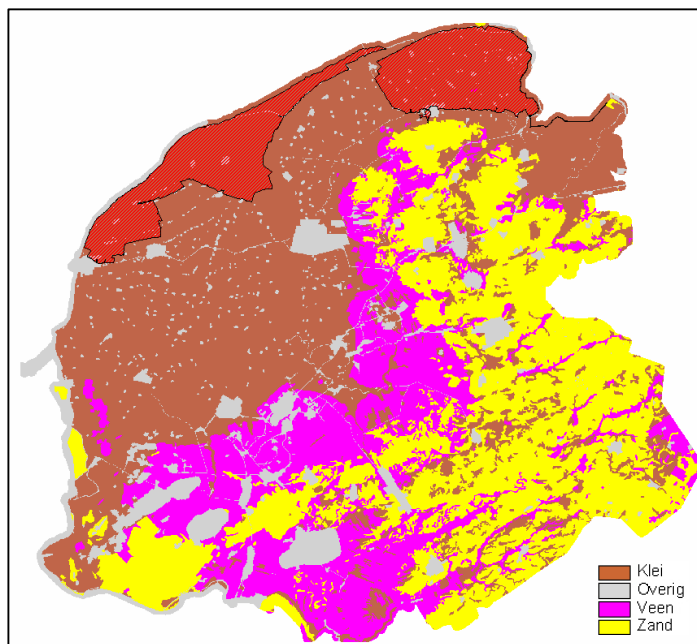
Deze twee kaarten, bodemkaart en landgebruikskaart, zijn over elkaar heen gelegd wat resulteert in de oppervlakte landgebruik per bodemtype (Tabel 26). Voor een aantal gebieden geeft de Stiboka bodemkaart geen uitsluitsel over de hoofdbodemgroep, aangezien dit geassocieerde eenheden zijn. Deze oppervlakte is relatief klein en is verdeeld over de andere drie bodemgroepen. De vertaalslag van de vijf watersystemen naar deze kruistabel is vervolgens te zien in Tabel 27. De oppervlakte akkerbouw op veen is hierbij verondersteld niet voor te komen.

Tabel 26. Kruistabel van de landgebruikskaart en de bodemkaart.

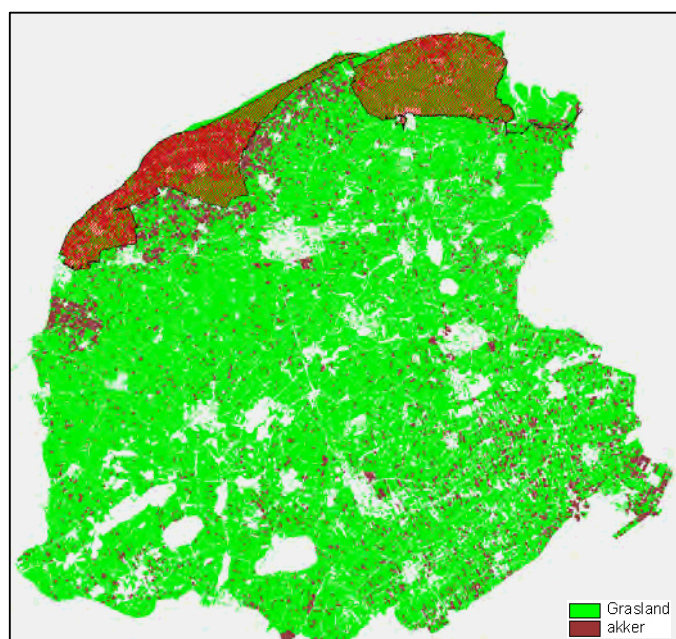
	Overig (ha)	Zand (ha)	Klei (ha)	Veen (ha)	Totaal (ha)
Grasland	5806	61517	108579	54809	230710
Akker	333	8592	20950	2940	32816
Totaal	6139	70109	129529	57749	263526
Grasland	2%	23%	41%	21%	88%
Akker	0%	3%	8%	1%	12%
Totaal	2%	27%	49%	22%	100%

Tabel 27. Vertaaltabel van de vijf watersystemen naar de invloed op de Friese boezem.

	Zand	Klei	Veen
Grasland	Petsloot	Klailan Zwarte Haan	Linde Noardbroek
Akker	Petsloot Linde	Zwarte Haan	n.v.t.



Figuur 34. Gegeneraliseerde bodemkaart gebaseerd op de Stiboka bodemkaart. Gearceerde gebieden zijn afgekoppeld van de Friese boezem.



Figuur 35. Gegeneraliseerd landgebruikskaart gebaseerd op de PeiriReis database. Gearceerde gebieden zijn afgekoppeld van de Friese boezem.

4.2 Veranderingen in afvoeren

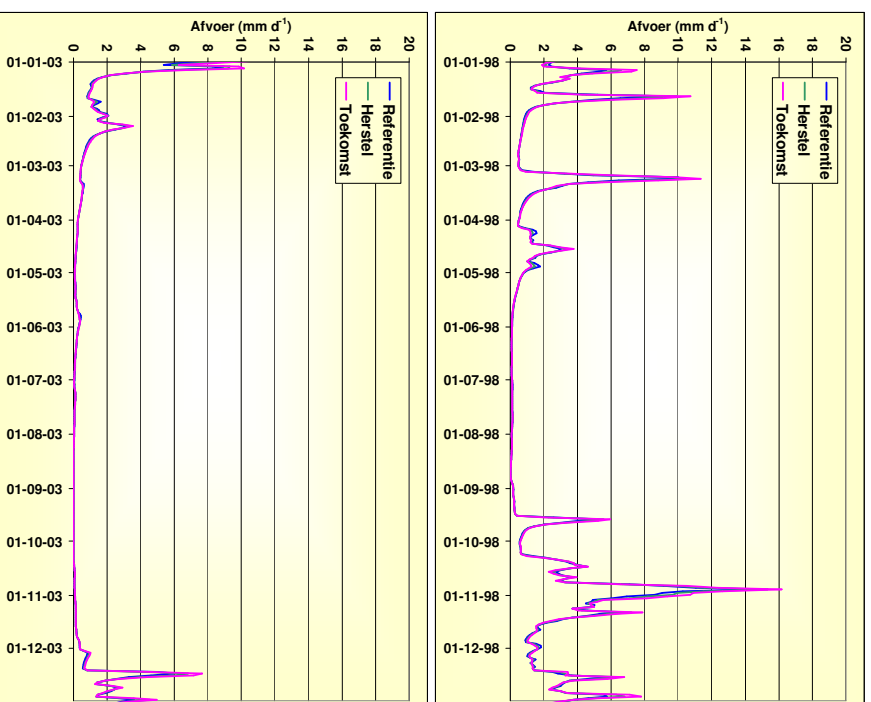
Uitgaande van de representativiteit van de vijf watersystemen en de gewogen oppervlakte van elk watersysteem kan dus bepaald worden wat de invloed is op de Friese boezem. Uit Figuur 36 is moeilijk waar te nemen wat het verschil is tussen de drie scenario's, maar de pieken lijken wel iets hoger. Figuur 37 laat in detail zien wat de gevolgen zijn voor een bui in september 1998. Het patroon wat al eerder te zien was voor de representatieve watersystemen is hier ook duidelijk: de afvoer komt iets later op gang, maar daarna zal meer water tot afvoer komen dan in de *Referentie* situatie.

In termen van overschrijdingskansen zijn er meer afvoerpieken van groter dan 7, 10 en 15 mm d⁻¹ te verwachten in de toekomst (Tabel 28). Hierbij moet weer rekening gehouden worden dat het om de werkelijk benodigde afvoercapaciteit is en hoe deze in de toekomst zal toenemen. Er is dus geen rekening gehouden met beperkingen van de maalcapaciteit die vaak tussen de 1,33 en 1,67 l s⁻¹ ha⁻¹, (11,5 tot 14,5 mm d⁻¹) bedraagt.

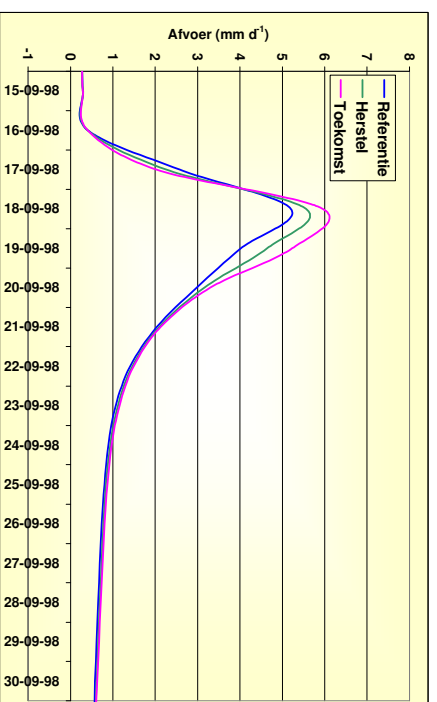
Figuur 38 en Figuur 39 laten zien dat de verschillen in de huidige afvoer in vergelijking met de toekomst maximaal 2 mm zullen zijn, met wederom het patroon dat de eerste afvoer na een bui iets zal afnemen en daarna de afvoer iets hoger zal zijn. Dit algemene patroon is weer te verklaren doordat de bodem met meer drainage iets droger zal zijn en daardoor in eerste instantie meer water kan vasthouden. Nadat de bodem echter nat is, zal het intensievere drainagesysteem echter zorgen voor een versnelde afvoer van het overtollige water.

De gemaalcapaciteit van de boezem is 7 mm d⁻¹. Elke mm die extra op de boezem wordt geloosd geeft een theoretische verhoging van 1,7 cm op het peil van de boezem (uitgaande van de afwaterende oppervlak van 260.000 ha en een boezemwater oppervlak van 15.060 ha). Uiteraard is deze 1,7 cm een gemiddelde en varieert afhankelijk van een aantal factoren zoals wind, plaats van lozing en afstand tot gemaal. Uit Tabel 28 blijkt dat de 7 mm d⁻¹ in de referentie situatie 129 keer per 30 jaar voorkomt en dat dit in de toekomst zal toenemen tot 240 keer per 30 jaar. Afvoeren van 10 en 15 mm geven een boezempeilverhoging van 17 cm en 26 cm en komen frequenter voor. De 15 mm komt in de referentie situatie ongeveer eenmaal in de 7,5 jaar voor en zal in de toekomst toenemen tot eenmaal in de 3 jaar.

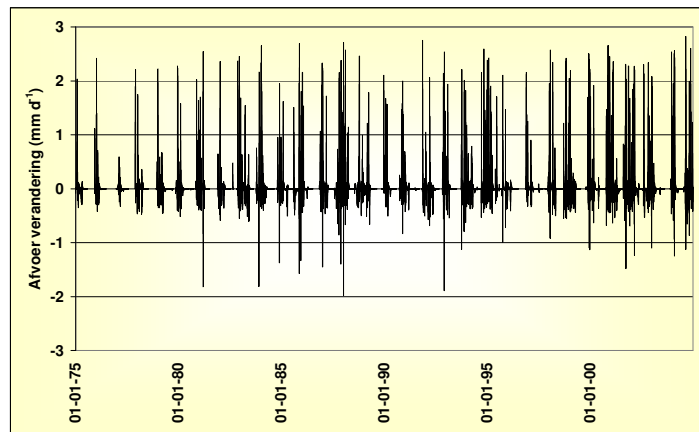
Deze te verwachten veranderingen de toekomst als gevolg van drainageontwikkelingen komen dus vooral door de invloed van de kleigebieden in het beheersgebied, zoals te zien was voor Zwarte Haan en Klailan.



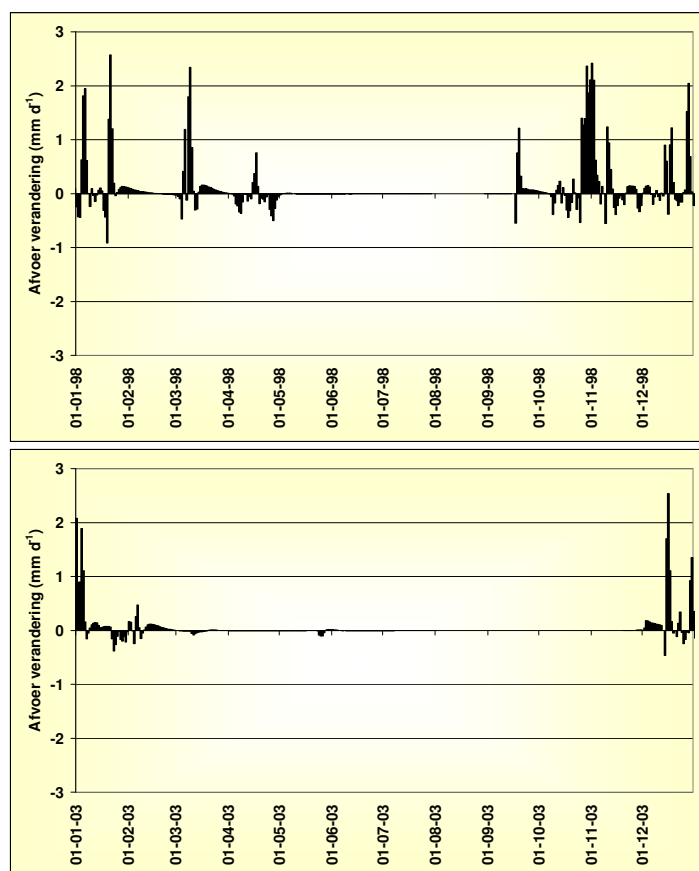
Figuur 36. Afvoeren op de Friese boezem voor de drie scenario's voor een nat jaar (1998, boven) en een droog jaar (2003, onder).



Figuur 37. Afvoeren op de Friese boezem voor de drie scenario's voor september 1998 na 50 mm neerslag.



Figuur 38. Verschillen in afvoer referentie en toekomst op de Friese boezem. Positief is meer afvoer, negatief is minder afvoer (30 jaar).



Figuur 39. Verschillen in afvoer referentie en toekomst op de Friese boezem. Positief is meer afvoer, negatief is minder afvoer (1998 boven, 2003 onder).

Tabel 28. Overschrijdingskansen voor afvoeren op de Fries boezem. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (1975-2004) dat de afvoer groter is dan 7, 10, 15 en 20 mm d⁻¹.

afvoer (mm d ⁻¹)	Referentie (d)	Herstel (d)	Toekomst (d)	Verandering ¹ (%)
7	129	182	240	+86
10	46	53	72	+57
15	4	5	9	+125
20	3	3	3	0

¹Verandering heeft betrekking op het verschil tussen "Referentie" en "Toekomst".

5 Invloed klimaatverandering

De voorgaande hoofdstukken zijn gebaseerd op het klimaat van de afgelopen 30 jaar. Aangezien de resultaten ook specifiek voor een droog (2003) en een nat (1998) jaar zijn gepresenteerd is, ongeacht hoe klimaatverandering zich zal ontwikkelen, al trends in effecten te zien. In dit hoofdstuk zullen de analyses zoals beschreven nogmaals worden uitgevoerd, maar dan met de te verwachte klimaatveranderingen zoals gepresenteerd in het WB21.

5.1 *Klimaatscenario's*

Om de invloed van klimaatverandering te bepalen moet een schatting van de klimatologisch omstandigheden gemaakt worden voor de toekomst. Het is duidelijk dat er geen éénduidige schatting voor het toekomstig klimaat. De belangrijkste componenten van het klimaatsysteem (de atmosfeer, de oceanen, ijsmassa en biosfeer) vertonen niet-lineair gedrag. Kleine veranderingen kunnen grote gevolgen hebben. Voor het toekomstig klimaat is onbekend hoe snel het klimaat verandert en wat de precieze regionale gevolgen hiervan zijn (ICIS, 2002).

Het is echter wel duidelijk dat in de zomer sprake zal zijn van extremere droogte en in de winter kunnen meer extreem natte periodes worden verwacht. Het KNMI heeft schattingen gemaakt van toekomstige klimaatveranderingen in Nederland, die weer gebaseerd zijn op schattingen van het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2001). De hoogste en laagste schattingen van de toekomstige temperatuurstijging in 2050 liggen tussen de 0,5 - 2°C. De range voor neerslag in 2050 varieert tussen -10% en + 2% in de zomer en -10% en + 12% in de winter. De bandbreedte van verdamping varieert tussen 2 - 8% in het jaar 2050 (ICIS, 2002).

In het NBW is afgesproken om voor de wateroverlast uit te gaan van het zogenaamde middenscenario, maar concrete afspraken voor de wateropgave droogte staan niet in het NBW. In deze studie gaan we daarom ook uit van het middenscenario 2050 (de centrale schatting) wat neerkomt op (WB21 Basisrapport):

- +3% neerslag per jaar
- +1% neerslag zomer
- +6% neerslag winter
- +10% neerslagintensiteit buien
- +4% zomerverdamping

Het is duidelijk dat niet simpelweg aan al deze voorwaarden kan worden voldaan, door bijvoorbeeld alle buien met 10% te verhogen of door alle neerslag met 3% te verhogen. Er zijn nog geen standaard methoden beschikbaar en daarom is hier gekozen voor een methode waarbij voldaan wordt aan de randvoorwaarden zoals gesteld in het WB21:

$$R_{cc} = R + R \cdot 10\% \cdot e^{\left[-a \left(1 - \frac{R}{R_{\max}}\right)\right]}$$

met: R = dagelijkse neerslag (mm d⁻¹)

R_{cc} = neerslag onder klimaatverandering (mm d⁻¹)

$$R_{max} = \text{maximale neerslag in een jaar (mm d}^{-1}\text{)}$$

$$a = \text{constante}$$

Deze aanpak zorgt ervoor dat bij een juiste keuze van de factor a een nieuwe reeks kan worden gegenereerd die voldoet aan het middenscenario. Indien voor a een waarde van 0 wordt gekozen neemt alle neerslag met 10% toe. Hierdoor wordt dus de totale zomer- en winterneerslag ook 10% hoger, wat niet klopt met het WB21 scenario. Een grote waarde van a zorgt ervoor dat de extreme buien met 10% worden verhoogd en de andere buien met minder dan 10%. Voor het zomer- en het winterhalfjaar moeten verschillende waarden voor de factor a worden genomen. Na enig rekenwerk blijkt dat voor de zomer een factor van 40 moet worden gekozen, waardoor de extremen buien met 10% worden verhoogd en de minder extremen buien bijna niet toenemen. Voor de winter is een factor van ongeveer 1 geschikt, wat resulteert in een toename van 10% voor de extreemste buien, maar de minder extremen buien ook nog behoorlijk toenemen.

5.2 Resultaten

De effecten van het scenario klimaatverandering (Δ Klimaat) is voor elk representatief watersysteem berekend. Hiermee zouden dezelfde figuren en tabellen als in hoofdstuk 3 kunnen worden gegenereerd. Voor de representatieve watersystemen is gekozen om alleen de tabellen met overschrijdingskansen te presenteren, echter voor de effecten op de Friese boezem zijn ook de figuren (analoog aan hoofdstuk 3) gepresenteerd.

In het scenario klimaatverandering zijn de effecten van klimaatverandering plus de toekomstige drainagesituatie meegenomen, omdat dit de meest waarschijnlijke situatie in de toekomst zal zijn. Het geïsoleerde effect van klimaatverandering op de afvoer, grondwaterstand en wateraanvoer is niet apart meegenomen, maar kan worden afgeleid uit het verschil tussen het scenario *Toekomst* en het scenario *Klimaatverandering*.

5.2.1 Klailan

Om de piekafvoeren te kwantificeren zijn de overschrijdingskansen voor de afvoeren over 30 jaar bepaald. Tabel 29 laat zien dat het aantal extreme afvoeren (meer dan 20 mm d⁻¹) onder het scenario klimaatverandering iets toeneemt ten opzichte van de referentie situatie. De piekafvoeren met een overschrijdingskans van >10 en >15 mm d⁻¹ nemen substantieel toe.

Tabel 29. Overschrijdingskansen voor afvoer Klailan. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (2035-2064) dat de afvoer groter is dan 10, 15 en 20 mm d⁻¹ voor de drie scenario's voor Klailan.

afvoer (mm d ⁻¹)	Referentie (d)	Toekomst (d)	Δ Klimaat (d)	Verandering ¹ (%)
10	71	84	107	+51
15	13	12	19	+46
20	3	3	4	+33

¹Verandering heeft betrekking op het verschil tussen "Referentie" en " Δ Klimaat".

De analyse van de grondwaterstanden (Tabel 30) laat zien dat extreem droge situaties vaker zullen voorkomen, echter extreem natte situaties komen minder vaak voor onder het scenario klimaatverandering.

Tabel 30. Analyse grondwaterstanden Klailan. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (2035-2064) dat de grondwaterstand extreem hoog of laag is voor de drie scenario's.

	Referentie (d)	Toekomst (d)	Δ Klimaat (d)	Verandering ⁴ (%)
nat ¹	984	377	423	-57
droog ²	1586	1692	1823	+15
extreem droog ³	53	56	58	+9

¹ nat is grondwaterstand ondieper dan 10 cm

² droog is grondwaterstand dieper dan 150 cm

³ extreem droog is grondwaterstand ondieper dan 200 cm

⁴Verandering heeft betrekking op het verschil tussen "Referentie" en " Δ Klimaat".

De invloed van klimaatverandering op de het verschil tussen actuele en potentiële verdamping wordt gepresenteerd in Tabel 31. Hieruit blijkt dat het gemiddelde vochttekort amper wordt beïnvloed door klimaatverandering en de toekomstige drainagesituatie en het aantal jaren waarop het vochttekort meer dan 75 mm d⁻¹ bedraagt, loopt zelfs iets terug. Als we Tabel 31 vergelijken met Tabel 12 zien we echter dat klimaatverandering en de toekomstige drainage situatie tegengestelde effecten hebben op de wateraanvoerbehoefte: de toekomstige drainagesituatie leidt tot een lager (gemiddeld) vochttekort, terwijl klimaatverandering deze trend voor een deel weer ongedaan maakt.

Tabel 31. Invloed van drainage op het verschil tussen actuele en potentiële verdamping voor de drie scenario's voor Klailan.

	Referentie	Toekomst	Δ Klimaat	Verandering ¹ (%)
Gemiddeld vochttekort (mm j ⁻¹)	92	88	96	+5
Jaren met >75 mm vochttekort	20	16	19	-5

¹Verandering heeft betrekking op het verschil tussen "Referentie" en " Δ Klimaat".

5.2.2 De Linde

De veranderingen in overschrijdingskansen voor de afvoer in watersysteem De Linde kunnen volledig op rekening worden geschreven van klimaatverandering. Tabel 32 laat zien dat het aantal piekafvoeren (meer dan 10 mm d⁻¹) vaker zal voorkomen door de hogere intensiteit van buien. Op de meer extreme piekafvoeren is zo goed als geen effect te verwachten door klimaatverandering.

Tabel 32. Overschrijdingskansen voor afvoer De Linde. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (2035-2064) dat de afvoer groter is dan 10, 15 en 20 mm d⁻¹ voor de drie scenario's voor De Linde.

afvoer (mm d ⁻¹)	Referentie (d)	Toekomst (d)	Δ Klimaat (d)	Verandering ¹ (%)
10	12	12	20	+67
15	2	2	1	-50
20	0	0	0	0

¹Verandering heeft betrekking op het verschil tussen "Referentie" en " Δ Klimaat".

De invloed van klimaatverandering en de toekomstige drainage situatie (Tabel 33) op het grondwater in watersysteem De Linde is bijna gelijk aan de invloed van alleen de toekomstige drainage situatie (Tabel 14), het aantal dagen met een grondwaterstand ondieper dan 10 cm (nat) neemt iets toe ten opzichte van het scenario *Toekomst*, en ook het aantal dagen met een grondwaterstand dieper dan 150 cm (droog) zal toenemen ten opzichte van de huidige situatie en het scenario *Toekomst*.

Tabel 33. Analyse grondwaterstanden De Linde. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (2035-2064) dat de grondwaterstand extreem hoog of laag is voor de drie scenario's.

	Referentie (d)	Toekomst (d)	Δ Klimaat (d)	Verandering ⁴ (%)
nat ¹	178	55	68	-62
droog ²	2276	2331	2456	+8
extreem droog ³	95	95	95	0

¹ nat is grondwaterstand ondieper dan 10 cm

² droog is grondwaterstand dieper dan 150 cm

³ extreem droog is grondwaterstand ondieper dan 200 cm

⁴Verandering heeft betrekking op het verschil tussen "Referentie" en "Δ Klimaat".

De veranderingen in de het verschil tussen actuele en potentiële verdamping van watersysteem De Linde kunnen volledig op rekening worden geschreven van klimaatverandering (Tabel 34). De procentuele stijging van het aantal jaren met meer dan 75 mm vochttekort lijkt aanzienlijk, maar effectief gaat het om één jaar extra in de 30 gesimuleerde jaren.

Tabel 34. Invloed van drainage op het verschil tussen actuele en potentiële verdamping voor de drie scenario's voor De Linde.

	Referentie	Toekomst	Δ Klimaat (d)	Verandering ¹ (%)
Gemiddeld vochttekort (mm j ⁻¹)	163	164	177	+9
Jaren met >75 mm vochttekort	4	4	5	+25

¹Verandering heeft betrekking op het verschil tussen "Referentie" en "Δ Klimaat".

5.2.3 Noardbroek

De kans op piekafvoeren (Tabel 35) in watersysteem Noardbroek zijn ook onder het scenario klimaatverandering klein. Wel blijken klimaatverandering en de toekomstige drainagesituatie een tegenovergesteld effect te hebben op het voorkomen de piekafvoeren.

Tabel 35. Overschrijdingskansen voor afvoer Noardbroek. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (2035-2064) dat de afvoer groter is dan 10, 15 en 20 mm d⁻¹ voor de drie scenario's voor Noardbroek.

afvoer (mm d ⁻¹)	Referentie (d)	Toekomst (d)	Δ Klimaat (d)	Verandering ¹ (%)
10	47	45	53	+13
15	6	5	8	+33
20	1	2	1	0

¹Verandering heeft betrekking op het verschil tussen "Referentie" en "Δ Klimaat".

De grondwaterstanden laten een drogere situatie zien onder het scenario klimaatverandering. De effecten van de toekomstige drainagesituatie en klimaatverandering op extreem droge situaties (grondwater dieper dan 2000 cm) zijn ongeveer even groot. Het voorkomen van minder extreem natte situaties komt vooral voor rekening van de intensievere drainage.

Tabel 36. Analyse grondwaterstanden Noardbroek. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (2035-2064) dat de grondwaterstand extreem hoog of laag is voor de drie scenario's.

	Referentie (d)	Toekomst (d)	Δ Klimaat (d)	Verandering ⁴ (%)
nat ¹	1342	86	103	-92
droog ²	3056	3390	3570	+17
extreem droog ³	1207	1369	1560	+29

¹ nat is grondwaterstand ondieper dan 10 cm

² droog is grondwaterstand dieper dan 150 cm

³ extreem droog is grondwaterstand ondieper dan 200 cm

⁴Verandering heeft betrekking op het verschil tussen "Referentie" en " Δ Klimaat".

Klimaatverandering heeft geen effect op de het verschil tussen actuele en potentiële verdamping in watersysteem Noardbroek (Tabel 37). De effecten komen volledig voor rekening van de toekomstige drainagesituatie. Zoals eerder beschreven wordt het vochttekort in de huidige situatie (*Referentie*) veroorzaakt door een te natte situatie.

Tabel 37. Invloed van drainage op het verschil tussen actuele en potentiële verdamping voor de drie scenario's voor Noardbroek.

	Referentie	Toekomst	Δ Klimaat	Verandering ¹ (%)
Gemiddeld vochttekort (mm j^{-1})	19	14	14	-25
Jaren met >75 mm vochttekort	0	0	0	0

¹Verandering heeft betrekking op het verschil tussen "Referentie" en " Δ Klimaat".

5.2.4 Petsloot

De veranderingen in overschrijdingskansen voor de afvoer in watersysteem Petsloot kunnen volledig op rekening worden geschreven van klimaatverandering Tabel 38.

Tabel 38. Overschrijdingskansen voor afvoer. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (2035-2064) dat de afvoer groter is dan 10, 15 en 20 mm d^{-1} voor de drie scenario's voor Petsloot.

afvoer (mm d^{-1})	Referentie (d)	Toekomst (d)	Δ Klimaat (d)	Verandering ¹ (%)
10	33	32	48	+45
15	4	4	7	+75
20	2	2	3	+50

¹Verandering heeft betrekking op het verschil tussen "Referentie" en " Δ Klimaat".

De analyse van grondwaterstanden in Petsloot (Tabel 39) laat zien dat de kans op het voorkomen van grondwaterstanden dieper dan 150 cm (droog) aanzienlijk toeneemt.

Tabel 39. Analyse grondwaterstanden Petsloot. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (2035-2064) dat de grondwaterstand extreem hoog of laag is voor de drie scenario's.

	Referentie (d)	Toekomst (d)	Δ Klimaat (d)	Verandering ⁴ (%)
nat ¹	559	549	599	+7
droog ²	527	534	679	+29
extreem droog ³	0	0	0	0

¹ nat is grondwaterstand ondieper dan 10 cm

² droog is grondwaterstand dieper dan 150 cm

³ extreem droog is grondwaterstand ondieper dan 200 cm

⁴Verandering heeft betrekking op het verschil tussen "Referentie" en " Δ Klimaat".

De invloed van klimaatverandering op de wateraanvoer in Petsloot is minimaal (Tabel 40), al lijkt de procentuele verandering voor het gemiddelde vochttekort groot het gaat hier om 2 mm j⁻¹.

Tabel 40. Invloed van drainage op het verschil tussen actuele en potentiële verdamping voor de drie scenario's voor Petsloot.

	Referentie	Toekomst	Δ Klimaat	Verandering ¹ (%)
Gemiddeld vochttekort (mm j ⁻¹)	8	8	10	+20
Jaren met >75 mm vochttekort	0	0	1	-

¹Verandering heeft betrekking op het verschil tussen "Referentie" en " Δ Klimaat".

5.2.5 Zwarte Haan

De kans op piekafvoeren onder het scenario *Klimaatverandering* neemt enorm toe ten opzichte van *Referentie* (Tabel 41). Deze verandering in de frequentie van piekafvoeren kan echter voor een groot deel worden geweten aan de verwachte toekomstige drainagesituatie (zie ook Tabel 22 voor de procentuele verandering tussen de huidige situatie en het scenario *Toekomst*). De klimaatverandering vermindert zelfs de kans op piekafvoeren. Een verklaring hiervoor is dat verdamping toeneemt, waardoor drogere omstandigheden in de zomer ontstaan en neerslag voor een groter gedeelte in de bodem kan worden vastgehouden.

Tabel 41. Overschrijdingskansen voor afvoer Zwarte Haan. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (2035-2064) dat de afvoer groter is dan 10, 15 en 20 mm d⁻¹ voor de drie scenario's voor Zwarte Haan.

afvoer (mm d ⁻¹)	Referentie (d)	Toekomst (d)	Δ Klimaat (d)	Verandering ¹ (%)
10	87	288	285	+228
15	14	109	46	+229
20	3	10	9	+200

¹Verandering heeft betrekking op het verschil tussen "Referentie" en " Δ Klimaat".

De klimaatverandering verkleint het effect van de toekomstige drainagesituatie op het voorkomen van extreme droogte (grondwaterstanden >200 cm). Echter extreem natte situaties (grondwaterstand ondieper dan 10 cm) zullen door klimaatverandering wel vaker voorkomen.

Tabel 42. Analyse grondwaterstanden Zwarte Haan. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (2035-2064) dat de grondwaterstand extreem hoog of laag is voor de drie scenario's.

	Referentie (d)	Toekomst (d)	Δ Klimaat (d)	Verandering ⁴ (%)
nat ¹	321	280	323	+1
droog ²	2541	2872	2930	+15
extreem droog ³	100	150	135	+35

¹ nat is grondwaterstand ondieper dan 10 cm

² droog is grondwaterstand dieper dan 150 cm

³ extreem droog is grondwaterstand ondieper dan 200 cm

⁴Verandering heeft betrekking op het verschil tussen "Referentie" en "Δ Klimaat".

Het gemiddelde vochttekort in het watersysteem Zwarte Haan zal iets toenemen Tabel 43, als gevolg van de extra verdamping in de toekomst.

Tabel 43. Invloed van drainage op het verschil tussen actuele en potentiële verdamping voor de drie scenario's voor Zwarte Haan.

	Referentie	Toekomst	Δ Klimaat	Verandering ¹ (%)
Gemiddeld vochttekort (mm j ⁻¹)	110	108	119	+9
Jaren met >75 mm vochttekort	21	20	21	0

¹Verandering heeft betrekking op het verschil tussen "Referentie" en "Δ Klimaat".

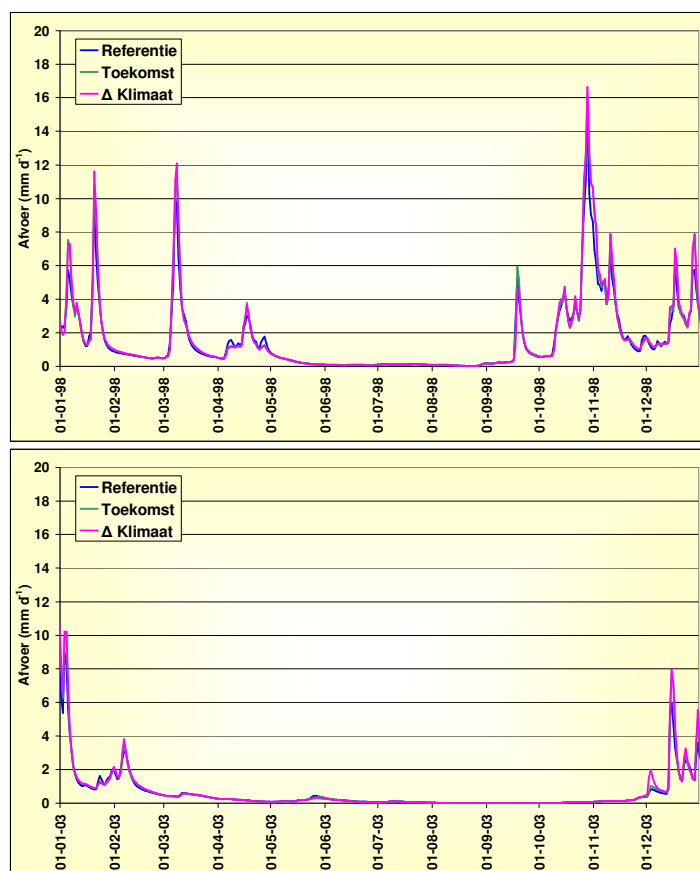
5.2.6 Invloed op de Friese boezem

Dezelfde methode en vertaaltabel (Tabel 27) is gebruikt om de resultaten van het scenario *Klimaatverandering* per representatief watersysteem te vertalen naar het effect van klimaatverandering op afvoeren naar de Friese boezem.

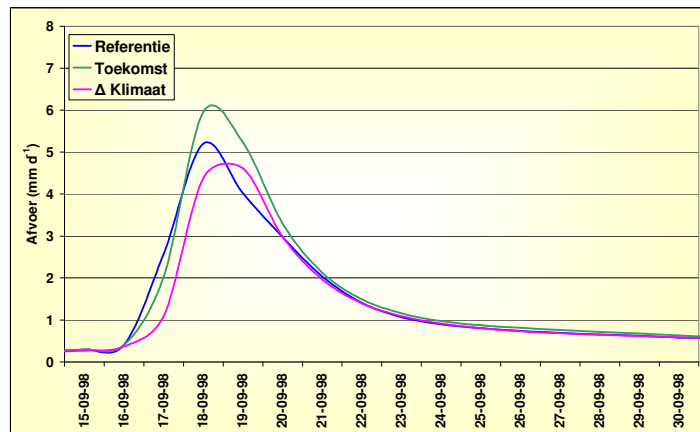
De figuren in deze paragraaf zijn analoog opgezet aan de figuren in paragraaf 4.2, echter in deze paragraaf refereren de jaartallen in de figuren naar het "jaar+klimaatverandering".

In Figuur 40 is geen groot verschil te zien tussen de scenario's *Referentie*, *Toekomst* en *Klimaatverandering*. Figuur 41 laat in detail zien wat de gevolgen zijn voor de afvoer na een intensieve bui (1998+ Δ Klimaat). De afvoerpiek onder het scenario *Klimaatverandering* komt later tot afvoer en is zelfs lager dan onder het scenario *Toekomst*. Hierbij moet worden aangetekend dat dit geldt voor deze typische bui. Tabel 44 laat de overschrijdingkansen voor afvoeren op de Friese boezem zien waaruit blijkt dat klimaatverandering vooral een verhoogde kans geeft op piekafvoeren groter dan 15 mm d⁻¹. Figuur 42 laat zien dat het verschil tussen de huidige situatie (*Referentie*) en klimaatverandering groter is dan het verschil tussen de huidige situatie en het scenario *Toekomst* (Tabel 28).

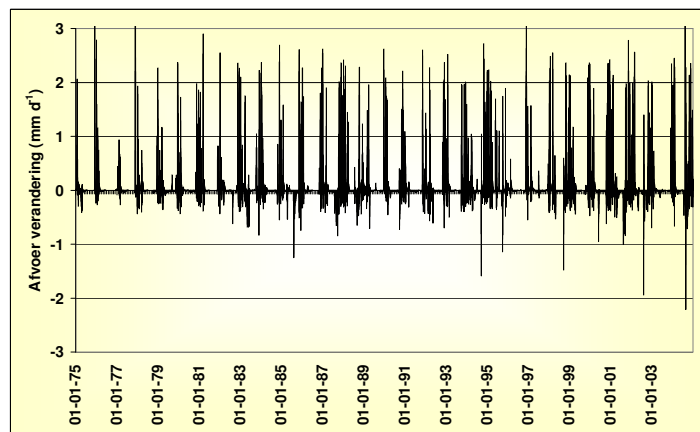
Uit het aantal dagen dat de grondwaterstand ondieper is dan 10 cm kan geconcludeerd worden in hoeverre de drainageontwikkelingen voldoende zijn om te compenseren voor de nattere omstandigheden zoals te verwachten zijn onder het klimaatscenario. Voor Klailan bijvoorbeeld (Tabel 30) is dat in de referentiesituatie 984 dagen in 30 jaar en onder het klimaatscenario 423 dagen. De drainageontwikkelingen compenseren dus ruimschoots voor klimaatverandering. Dit geldt eveneens voor De Linde en Noardbroek. Voor Petsloot neemt het aantal natte dagen met 7% toe, terwijl er voor Zwarte Haan bijna geen veranderingen zullen optreden. Samenvattend blijkt dus dat de geschetste drainageontwikkelingen ruimschoots compenseren voor de te verwachten klimaatverandering.



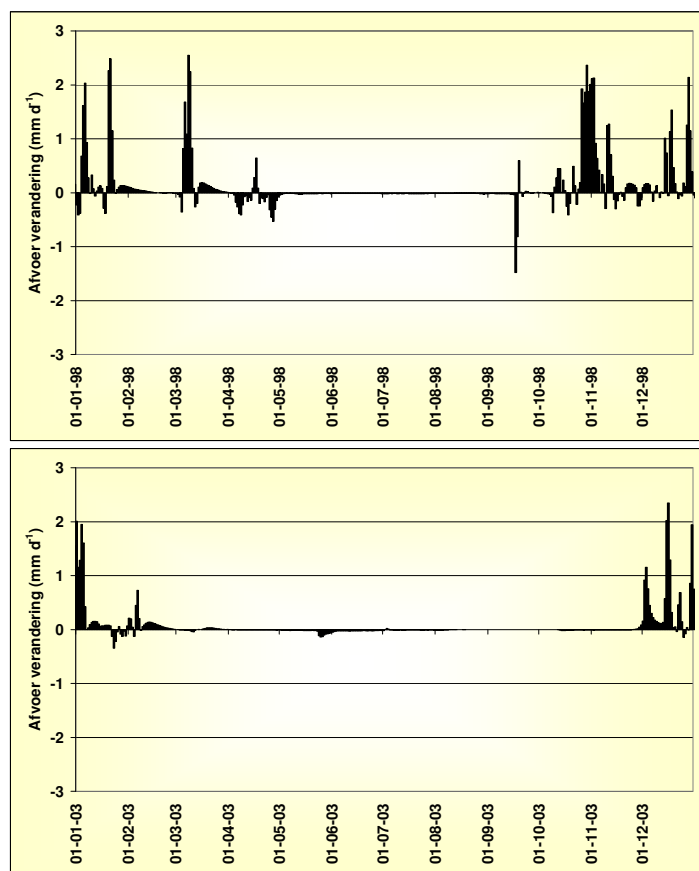
Figuur 40. Afvoeren op de Friese boezem voor de drie scenario's voor een nat jaar (1998 boven) en een droog jaar (2003 onder).



Figuur 41. Afvoeren op de Friese boezem voor de drie scenario's voor "september 1998", na 50 mm neerslag.



Figuur 42. Verschillen in afvoer referentie en Klimaatverandering op de Friese boezem. Positief is meer afvoer, negatief is minder afvoer (30 jaar: 2035-2064). Noot: jaren zijn + klimaatverandering.



Figuur 43. Verschillen in afvoer referentie en klimaatverandering op de Friese boezem. Positief is meer afvoer, negatief is minder afvoer (1998 boven, 2003 onder).

Tabel 44. Overschrijdingskansen voor afvoeren op de Friese boezem. Aangegeven is het aantal dagen in 30 jaar (2035-2064) dat de afvoer groter is dan 10, 15 en 20 mm d⁻¹.

afvoer (mm d ⁻¹)	Referentie (d)	Toekomst (d)	Δ Klimaat (d)	Verandering ¹ (%)
10	46	72	75	+63
15	4	9	13	+225
20	3	3	3	0

¹Verandering heeft betrekking op het verschil tussen "Referentie" en "Δ Klimaat".

6 Invloed drainage op representatieve percelen

In de voorgaande hoofdstukken is de ontwikkeling van drainage op afvoeren, grondwaterstanden en vochttekorten gericht geweest op realistische scenario's per watersysteem. Deze scenario's zijn gebaseerd op: (i) de fysische invloed van drainage, en (ii) de te verwachte ontwikkelingen. De eerste factor is gebaseerd op de FutureView methode, terwijl de te verwachte ontwikkelingen uit de eerste fase van de studie kwamen (Vos et al., 2005) en waarvan een samenvatting is te zien in Tabel 9.

Deze aanpak gebaseerd op watersystemen is uitermate geschikt voor het bepalen van de invloed van veranderingen in drainage op de Friese Boezem. Binnen één watersysteem kunnen er echter veranderingen zijn, waarbij de gedraineerde percelen zich anders zullen gedragen dan de niet gedraineerde percelen. Evenzo zal akkerbouw zich anders gedragen dan grasland.

In totaal zijn er 16 unieke combinaties te onderscheiden en uitgebreide gegevens over deze combinaties is weergegeven in de Bijlagen. Samenvattend zijn dit de volgende combinaties:

1. Klailan gras;
2. Linde akker;
3. Linde gras;
4. Noardbroek gras;
5. Petsloot akker;
6. Petsloot gras;
7. Zwarte Haan akker;
8. Zwarte Haan gras.

en deze acht combinaties kunnen zowel gedraineerd zijn als niet gedraineerd.

Als voorbeeld van de verschillen in hydrologische omstandigheden van deze 16 representatieve percelen is in Figuur 44 de grondwaterstand voor 2003, zoals berekend met FutureView, weergegeven. Aangezien voor alle percelen dezelfde meteorologische condities zijn opgelegd zijn de grotere patronen gelijk. Er is echter een groot verschil in dynamiek van de grondwaterstanden. Sommige representatieve percelen reageren snel op neerslag, terwijl andere slechts langzaam een response laten zien. De bedoeling van Figuur 44 is niet zozeer om de individuele representatieve percelen te analyseren, maar meer om een overzicht te laten zien van de variatie tussen deze percelen.

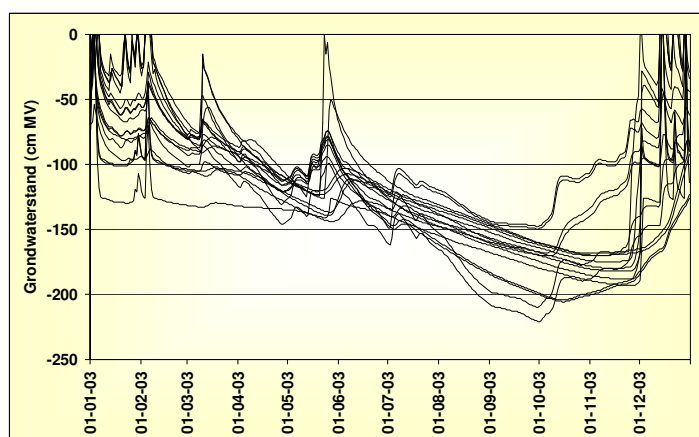
In Figuur 45 is de gemiddelde grondwaterstand, de GLG (Gemiddeld Laagste Grondwaterstand) en de GHG (Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand) weergegeven voor de representatieve percelen. De GHG en de GLG zijn berekend volgens de standaard methode (Cultuurtechnisch Vademecum). Als eerste is voor elke maand de grondwaterstand op de 14^e en de 28^e genomen. Per jaar zijn hieruit de drie laagste (en de drie hoogste) grondwaterstanden geselecteerd. Voor de 30 jaren die hier geanalyseerd zijn, zijn dus $30 \times 24 = 720$ waarden beschikbaar. Het gemiddelde van deze 720 laagste (en hoogste) waarden is gedefinieerd als de GLG (en GHG).

Figuur 45 laat duidelijk zien dat het effect van drainage voor de acht representatieve percelen weinig invloed heeft op de GLG. Het effect op de GHG is echter wel duidelijk aanwezig. Met name voor Klailan

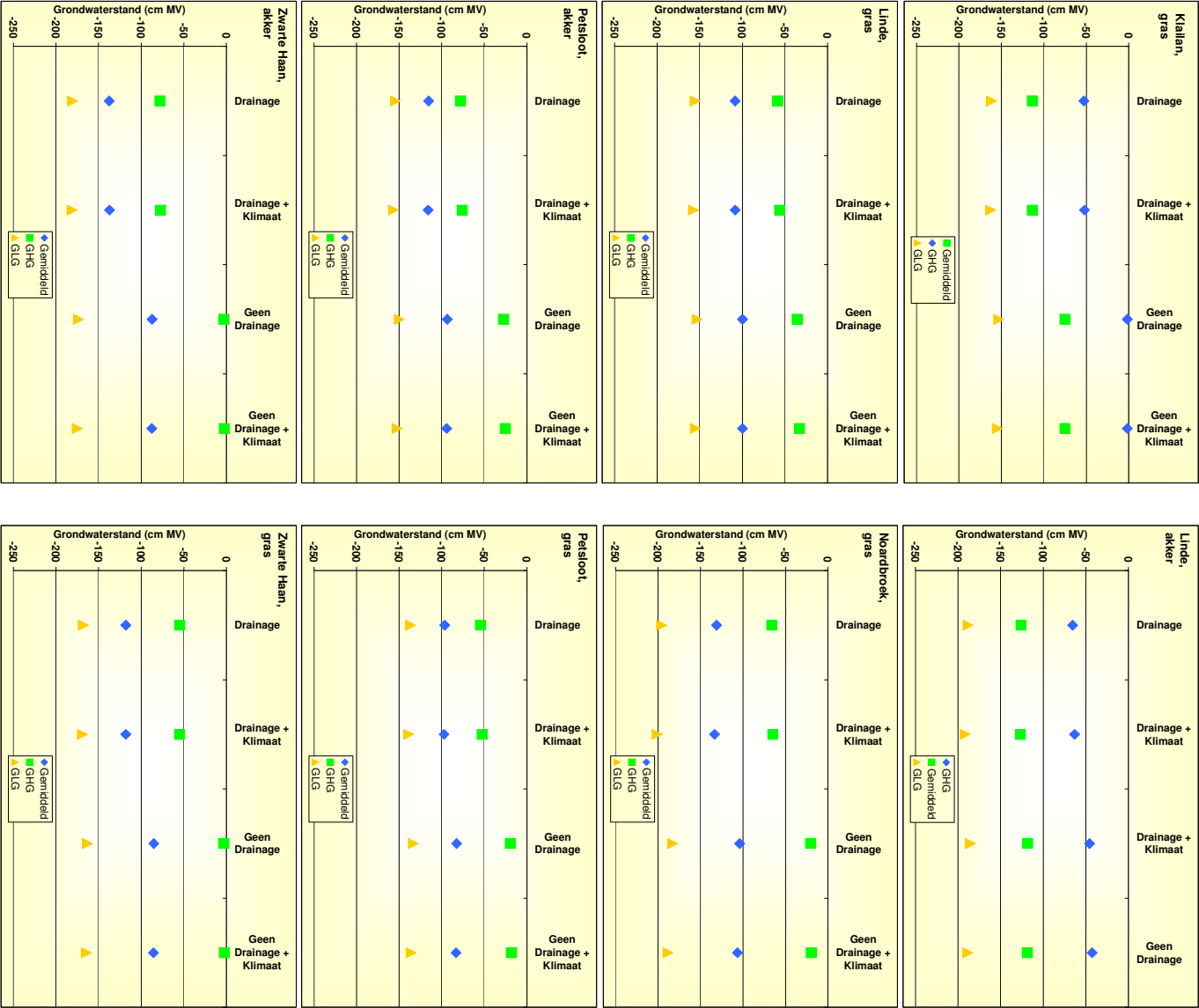
en Zwarte Haan is het effect erg groot en zorgt het aanwezig zijn van een drainage systeem voor een verlaging van de GHG met ongeveer 50 cm. Interessant is ook dat het effect van drainage voor Petsloot en vooral De Linde beperkter is en dat dit ook de gebieden zijn waar de te verwachte veranderingen in drainage klein zijn.

In aanvulling op Figuur 45 zijn per representatief perceel ook resultaten weergegeven die laten zien wat de invloed van klimaatontwikkeling op de grondwaterstanden is. Voor Noardbroek, in een veengebied, geldt voor de GHG en de beïnvloeding daarvan door drainage hetzelfde als voor zand, maar is vanwege het draagkrachtprobleem de behoefte aan drainage groter. Dit is dan ook te zien in de verwachte uitbreiding van drainage op veen.

Opvallend is dat klimaatverandering, zowel op de wel als niet gedraineerde percelen, geen of nauwelijks invloed op de GHG en GLG heeft. Het aantal natte en droge dagen verandert wel door klimaatverandering: het aantal natte dagen neemt weer toe, het aantal droge dagen stijgt verder. Dit komt door de enigszins statische definitie van de GHG en GLG die gebaseerd is op de vroeger gebruikelijke 2-weekse meetinterval. Dit laat tevens zien dat de meer dynamische aanpak, zoals hier toegepast, het voordeel heeft dat overschrijdingskansen kunnen worden verkregen.



Figuur 44. Voorbeeld van de verschillen in grondwaterstanden in de 16 representatieve percelen voor het droge jaar 2003.



Figuur 45. Gemiddelde grondwaterstand, GLG en GHG over de periode 1975-2004 met en zonder klimaatverandering voor de 16 representatieve percelen.

7 Workshop experts

De invloed van drainageontwikkelingen op een aantal deelaspecten zijn moeilijk precies te kwantificeren en daarom was op 12 mei 2005 een workshop georganiseerd. In totaal waren 12 mensen aanwezig van zowel Wetterskip Fryslân als de Provincie Fryslân. De discussies hadden betrekking op de invloed van drainageontwikkelingen op de volgende vijf aspecten:

- de landbouw;
- maaiveldaling;
- wateraanvoer (behoefte);
- uit- en afspoeling van nutriënten;
- beïnvloeding omgeving waaronder met name natuur, als gevolg van kwel en wegzijging.

Voor elk van deze vijf aspecten waren een aantal discussiepunten opgesteld en werd de mening en reactie van de experts gevraagd.

7.1 Invloed van drainage op landbouw

De belangrijkste discussiepunten die van te voren waren opgesteld voor dit onderdeel waren:

- Hoe veranderen droogteschade en natschade onder invloed van drainage en hoe verhouden deze zich tot elkaar?
- Is de schade te kwantificeren?
- Zijn er andere effecten voor de landbouw dan droogte- en natschade?

Over het algemeen was er een duidelijke consensus tussen de experts dat de effecten van drainage op de landbouw positief zijn. Met name het verbeteren van de berijdbaarheid en bewerkbaarheid vormen vaak een belangrijker overweging dan het directe effect op de gewassen.

De volgende belangrijke conclusies en resultaten kwamen uit de discussies naar voren:

- Voor wat betreft buisdrainage is de invloed op natschade in het algemeen belangrijker dan droogteschade.
- Bij intensivering van de drainage zal de droogteschade nauwelijks veranderen, maar de natschade zal wel kleiner worden.
- Intensivering van drainage zorgt voor een sneller opwarming van de bouwvoor, waardoor het groeiseizoen wordt verlengd. Bovendien kan het land eerder betreden worden, wat ook een verlenging van het groeiseizoen tot gevolg heeft.
- De positieve effecten van drainage gelden niet voor extreem natte omstandigheden. Alles is dan volledig verzadigd en sloten overvol, zodat drainage ook niet helpt.
- HELP tabellen kunnen gebruikt worden, maar zijn wel heel erg gebaseerd op gemiddelden. Het nieuwe Alterra WaterPas instrument is nog niet volledig operationeel.
- De Friese bodem is niet doorlatend genoeg om het drainagesysteem voor infiltratie te gebruiken.

7.2 *Invloed van drainage op maaiveldddaling*

De belangrijkste discussiepunten die van te voren waren opgesteld voor dit onderdeel waren:

- Welke processen zijn (waar) belangrijk (oxidatie, krimp, klink)?
- Hoe verhoudt de maaiveldddaling beïnvloed door drainage zich tot de maaiveldddaling door andere processen (peilbeheer, diepe delfstoffenwinning)?

De algemene conclusie die uit de discussie naar voren kwam was dat de invloed van drainage op maaiveldddaling beperkt was in vergelijking met andere oorzaken zoals delfstoffenwinning. Ook kwam duidelijk uit de discussies naar voren dat alleen veengronden gevoelig zijn voor maaiveldddaling als gevolg van drainage intensivering.

Puntsgewijs kwamen de volgende zaken aan de orde:

- Uit experimenten bleek dat een peilverhoging van 10 tot 20 cm leidde tot een vermindering van veenoxidatie met 30%. Het tegenovergestelde zal naar alle waarschijnlijkheid ook gelden.
- Nieuwe drainage aanleggen in grasland gaat altijd gepaard met ploegen en zaaien. Hierdoor vindt er plotseling een bodemdaling plaats van 10 cm.
- Gas- en zoutwinning zijn een veel grotere oorzaak van bodemdaling dan drainage.
- Afgelopen 50 jaar was de bodemdaling in veengebieden gemiddeld 1 cm per jaar.
- Door een intensivering van drainage zal er ook een andere teelt kunnen plaatsvinden (bijvoorbeeld van gras naar maïs). Hierdoor wordt er vaker geploegd en zal de bodemdaling dus versnellen.
- Peilbeheer zal waarschijnlijk een dominantere rol spelen dan drainage.

7.3 *Invloed van drainage op wateraanvoer (behoefte)*

De belangrijkste discussiepunten die van te voren waren opgesteld voor dit onderdeel waren:

- Hoe groot is de huidige wateraanvoer(behoefte)?
- Zijn er gebieden in het beheersgebied van Wetterskip Fryslân waar drainagesystemen mede dienst doen voor infiltratie?
- Zou er bij de uitbreiding van drainage veel veranderen aan de wateraanvoer(behoefte)?

Over het algemeen was de verwachting dat drainage intensivering gepaard gaat met een algemene intensivering van landbouw wat de wateraanvoerbehoefte zal vergroten. Ook zorgt meer drainage voor een "sneller hydrologisch systeem" waardoor de wateraanvoerbehoefte ook zal vergroten.

Enkele punten die naar voren kwamen:

- Tot nu toe is de wateraanvoercapaciteit altijd voldoende geweest. In 1976 en 2003 was de capaciteit echter kritiek, maar nog net voldoende.
- Eventuele extra wateraanvoerbehoefte hangt vooral af de beregeningscapaciteit in het gebied.
- Aangezien de lengte van het groeiseizoen zal toenemen bij meer drainage zal de verdamping ook toenemen en daardoor de wateraanvoerbehoefte.
- Wateraanvoer via het drainagesysteem is in Friesland niet mogelijk vanwege de ondoorlatende gronden.
- Tot nu toe is niet duidelijk wat de echte wateraanvoerbehoefte is.

7.4 *Invloed van drainage op uit- en afspoeling van nutriënten*

De belangrijkste discussiepunten die van te voren waren opgesteld voor dit onderdeel waren:

- Vormt uitspoeling van nutriënten momenteel een groot probleem?
- Is deze uitspoeling gebiedsgebonden?
- Welke processen spelen een belangrijke rol bij de uit- en afspoeling (bv. oppervlakkige afvoer, lucht- en warmtehuishouding)?
- In welke mate verandert bij uitbreiding van drainage de uit- en afspoeling van nutriënten?

De invloed van drainage op de uit- en afspoeling van nutriënten is een uitermate complexe materie bleek uit de discussie. In sommige omstandigheden zal extra drainage meer uit- en afspoeling veroorzaken, in andere gevallen juist weer minder. Er bestond veel onzekerheid over wat precies de effecten zullen zijn. Uit de discussies kwam wel duidelijk naar voren dat de rol van greppels essentieel is en zullen zorgen voor een versterkte afspoeling van nutriënten.

Belangrijke aandachtspunten die naar voren kwamen:

- Het is belangrijk om onderscheid te maken tussen zandgronden en kleigronden. De laatste houden nutriënten veel beter vast dan de eerste.
- De verhouding tussen afvoer vanuit greppels en vanuit drainage is essentieel in verband met uitspoeling.
- Extra drainage zal voor natte omstandigheden waarschijnlijk een vermindering van nutriënten uitspoeling betekenen. In gemiddelde omstandigheden zal er waarschijnlijk meer uitspoeling plaatsvinden.
- Krimpscheuren zullen zich met veel drainage sneller ontwikkelen, wat de kans op snelle uitspoeling doet toenemen.
- Meer drainage zal intensievere plantengroei betekenen, daardoor meer opnamen van nutriënten en dus verminderde uit- en afspoeling.

7.5 *Invloed van drainage op omgeving*

In dit onderdeel lag de nadruk vooral op de invloed van drainage op kwel en wegzijging en de invloed hiervan op (omliggende) natuur. De belangrijkste discussiepunten die van te voren waren opgesteld voor dit onderdeel waren:

- Zijn er nu gevoelige gebieden waar de omgeving (negatief of positief) wordt beïnvloed door drainagesystemen?
- Is een uitbreiding van drainage te verwachten in de omgeving van gevoelige gebieden?
- Welke factoren spelen een rol bij de beïnvloeding?
- Vormt het uitgebreide openwatersysteem in Fryslân een mogelijke buffer tegen de effecten van drainageontwikkelingen?
- Zal klimaatverandering (meer neerslag in winter) kunnen leiden tot een te natte natuur?

De invloed van drainage op natuur is de som van de voorgaande vier punten die bediscussieerd waren. In het algemeen zal intensievere drainage negatief voor de natuur uitpakken.

Nog een paar punten die uit de discussie betreffende de invloed van drainage op natuur naar voren kwamen:

- Het is duidelijk dat intensievere drainage zal zorgen voor een kleinere aanvoer naar het aquifersysteem. Hierdoor zal de stijghoogte afnemen en zullen natuurgebieden droger worden.
- Als gevolg hiervan valt er een lagere GHG te verwachten wat een negatief effect op flora en fauna (weidevogels) zal hebben.
- Neerslag is nog steeds te zuur om als goed alternatief voor verminderde aanvoer uit aquifers te dienen.

7.6 Afsluiting

Een aantal belangrijke punten werden tijdens de afsluiting van de workshop nog genoemd:

- Verzilting is nog een onderbelicht item en het is niet duidelijk in welke mate verzilting een rol speelt in de discussie over drainage.
- De invloed van het bebouwde gebied is niet duidelijk. Met name het effect van afkoppeling
- Het is nu nog te vroeg om een beslissing te nemen over mogelijke regulering.
- Wat is het effect van eventuele maalstops in verband met vasthouden van water.

8 Conclusies

De methode die in deze studie is toegepast is gebaseerd op het simuleren van vijf watersystemen die representatief zijn voor het beheersgebied van Wetterskip Fryslân. Uit de studie bleek duidelijk dat de vijf deelsystemen verschillend reageren op ontwikkelingen in drainage:

- Klailan (gras op klei)
 - Oppervlakte gedraineerd van 35 naar 50%
 - Afvoerpieken¹ van 13 naar 12 dagen in 30 jaar (-8%)
 - Natte dagen van 984 naar 377 (-62%)
 - Droge dagen van 1586 naar 1692 (+7%)
- De Linde (akker op zand en gras op veen)
 - Oppervlakte gedraineerd van 60 naar 80% (akkerbouw) en van 43 naar 33% (grasland)
 - Afvoerpieken gelijk 2 dagen in 30 jaar (0%)
 - Natte dagen van 178 naar 55 (-69%)
 - Droge dagen van 2276 naar 2331 (+2%)
- Noardbroek (gras op veen)
 - Oppervlakte gedraineerd van 18 naar 50%
 - Afvoerpieken van 6 naar 5 dagen in 30 jaar (-17%)
 - Natte dagen van 1342 naar 86 (-94%)
 - Droge dagen van 3056 naar 3143 (+11%)
- Petsloot (gras en akker op zand)
 - Oppervlakte gedraineerd gelijk 90%
 - Afvoerpieken gelijk 4 in 30 jaar (0%)
 - Natte dagen van 559 naar 549 (-2%)
 - Droge dagen van 527 naar 534 (+1%)
- Zwarte Haan (gras en akker op klei)
 - Oppervlakte gedraineerd van 85 naar 95% (akkerbouw) en van 50 naar 75% (grasland) en kleinere drainafstanden
 - Afvoerpieken van 14 naar 109 dagen in 30 jaar (+679%)
 - Natte dagen van 321 naar 280 (-13%)
 - Droge dagen van 2541 naar 2872 (+13%)

Het aantal natte dagen neemt dus voor alle deelsystemen af en het aantal droge dagen neemt toe. Piekafvoeren nemen voor de meeste deelsystemen iets af, behalve voor Zwarte Haan waar het aantal afvoerpieken flink toe neemt. Dit komt doordat het gebied in de toekomst zeer intensief gedraineerd zal zijn, met de aanwezigheid van buisdrainage op de meeste percelen (akkerbouw 95%, grasland 75%) en dus neerslag versneld tot afvoer zal komen.

De invloed op de Friese boezem is bepaald aan de hand van deze vijf deelsystemen en hun representativiteit voor het gehele beheersgebied van het Wetterskip Fryslân. Het blijkt dat de meest extreme afvoeren ($> 20 \text{ mm d}^{-1}$) niet zullen gaan toenemen, maar dat het aantal afvoeren $> 15 \text{ mm d}^{-1}$ wel zal toenemen van 4 naar 9 dagen in 30 jaar. Een koppeling van het Friese boezemmodel met

¹ Gedefinieerd als $> 15 \text{ mm d}^{-1}$

de resultaten van de vijf representatieve gebieden zou een meer gedetailleerde analyse mogelijk maken.

In deze studie is ervan uitgegaan dat de afvoer van polders geen beperkingen hebben terwijl in werkelijkheid afvoeren van polders op de boezem vaak een maalcapaciteit hebben van 1,33 tot 1,67 l s⁻¹ ha⁻¹, wat overeenkomt met 11,5 tot 14,5 mm d⁻¹. In deze studie is daar geen rekening mee gehouden, omdat het ging om wat de werkelijk benodigde afvoercapaciteit is en hoe deze in de toekomst zal toenemen.

Klimaatverandering is tevens geanalyseerd als apart scenario, waarbij het WB21 middenscenario voor 2050 is genomen als uitgangspunt. Het bleek dat de meest extreme afvoeren (> 20 mm d⁻¹) niet veranderen onder klimaatverandering, maar dat de afvoeren van > 10 en > 15 mm d⁻¹ wel zullen toenemen. Afvoeren > 15 mm d⁻¹ komen voor het referentie scenario 4 dagen per 30 jaar voor; bij het scenario toekomst (zonder klimaatverandering) 9 dagen en bij het scenario klimaatverandering (waar drainageontwikkelingen ook in zitten) 13 dagen per 30 jaar.

Er is ook gekeken of de drainageontwikkelingen voldoende zijn om te compenseren voor de nattere omstandigheden zoals te verwachten zijn door klimaatverandering. Het aantal dagen dat de grondwaterstand ondieper is dan 10 cm is vergeleken voor de referentiesituatie en het klimaatscenario. Voor Klailan, De Linde en Noardbroek neemt het aantal natte dagen fors af, voor Petsloot neemt dit enigszins toe, terwijl er voor Zwarte Haan bijna geen veranderingen zullen optreden. Samenvattend blijkt dus dat de geschetste drainageontwikkelingen in het algemeen ruimschoots compenseren voor de effecten van klimaatverandering.

De vijf deelsystemen bestaan uit zogenoemde representatieve percelen die elk uniek zijn in landgebruik, bodem en drainage. Het blijkt dat de invloed van drainage op de GLG weinig invloed heeft, maar dat drainage vooral de GHG verlaagd. Ook blijkt dat de afzonderlijke percelen zich totaal verschillend gedragen als gevolg van factoren zoals drooglegging, bodem, landgebruik etc. De invloed van klimaatverandering op de GLG en GHG van de representatieve percelen blijkt klein te zijn. Het totaal aantal natte en droge dagen neemt echter wel toe onder klimaatverandering.

Voor wat betreft de methodologische aanpak die hier gevolgd is kunnen een aantal conclusies worden getrokken. Als eerste is naar voren gekomen dat het analyseren van 30 jaar essentieel is, aangezien de voorgeschiedenis van een extreme neerslaggebeurtenis bepalend is voor het afvoerproces. Ook is het met resultaten van deze 30 jaar mogelijk om overschrijdingskansen te bepalen en GLGs en GHGs te berekenen. Het gebruik van FutureView, met SWAP als belangrijkste rekenmodule, is voor bodem-water-drainage studies uitermate geschikt. Hier staat tegenover dat de hydrodynamica zwakker is, wat gezien de vraagstelling van deze studie geen belemmering is gebleken.

Uit de workshop met experts zijn de volgende belangrijkste conclusies naar voren gekomen betreffende de invloed van te verwachte ontwikkelingen in buisdrainage:

- Voor wat betreft de **landbouw** is natschade belangrijker dan droogteschade. Vaak zijn berijdbaarheid en bewerkbaarheid belangrijker dan de directe invloed op de plant.
- **Maaiveldafval** is vooral een probleem voor veengronden, maar andere factoren (gas- en zoutwinning, peilbeheer, gewaskeuze) zijn dominantier dan drainageontwikkelingen.

- **Wateriaanvoer**(behoefte) zal weinig veranderen onder drainageontwikkelingen. De Friese bodem is minder geschikt voor infiltratie en drainage zal vooral natte omstandigheden beïnvloeden in plaats van droge.
- **Uitspoeling van nutriënten** is een zeer complex proces. De uitspoeling als gevolg van oppervlakkige afvoer en greppelafvoer is waarschijnlijk veel belangrijker dan uitspoeling door buisdrainage.
- **Kwetsbare gebieden** zullen mogelijke wat verdrogen doordat de stijghoogten in aquifers zullen afnemen door wat lagere percolatie als gevolg van een intensivering van de drainage.

Afsluitend kan geconcludeerd worden dat de invloed van drainageontwikkelingen twee componenten bevat: (i) welke ontwikkelingen zijn er te verwachten en (ii) hoe werken deze ontwikkelingen door vanuit een hydrologisch perspectief. De eerste vraag was beantwoord in een eerdere studie en de conclusies hiervan zijn meegenomen in de hydrologische analyses gedurende deze studie. Concluderend kan gezegd worden dat de te verwachte drainageontwikkelingen een zekere invloed hebben op de afvoeren op de Friese boezem. Uit de analyses van de representatieve gebieden blijkt dat het vooral de kleigebieden zijn die de belasting op de Friese boezem zullen verhogen. Een deel van deze kleigebieden is echter afgekoppeld van de Friese boezem. Voor deze kleigebieden zelf zal dus zonder uitbreiding van de gemaalcapaciteit een vergroting van de bergingsbehoefte ontstaan. Verdere analyses zijn gewenst om deze bergingsbehoefte te kwantificeren. In het algemeen zal wel gevolgd moeten worden of de geschetste ontwikkelingen voor wat betreft de uitbreiding en de intensiteit van buisdrainage inderdaad kloppen en is het belangrijk om de nieuwste inzichten op het gebied van klimaatverandering te blijven bijhouden.

9 Referenties

- Droogers, P. en W. Immerzeel. 2005. Regionale analyse droogte: Een analyse van huidige wateraanvoer en wateropgave 2050. FutureWater rapport in opdracht van Waterschap Hunze en Aa's, Wageningen, Nederland.
- Droogers, P. J. van Dam, J. Hoozevee, R. Loeve. 2004. Adaptation strategies to climate change to sustain food security. *In* J. Aerts and P. Droogers (Eds). Climate change in contrasting river basins: Adaptation strategies for water, food, and environment. CABI Books, Londen.p. 49-74.
- Droogers, P., R. Loeve, B. van den Hurk. 2004. De (on)zekerheid van klimaatverandering. H2O Tijdschrift voor watervoorziening en waterbeheer.
- Bersselaar, van den D., M. Jaarsma, R. Loeve, P. Droogers. 2004. Mogelijkheden tot vasthouden van water in Flevoland. H2O Tijdschrift voor watervoorziening en waterbeheer.
- Ernst, L.F. 1956 Calculation of the steady flow of groundwater in vertical cross sections. *Neth. J.Agr. Sci.* 4: 126-131.
- Feddes R.A., P.J. Kowalik, H. Zarandy. 1978. Simulation of field water use and crop yield. *Simulation Monographs*. Pudoc. Wageningen, Nederland.
- Hooghart, J.C (red). 1986. Verklarende hydrologische woordenlijst. Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO, 's Gravenhage, Nederland. ISBN: 9067430870.
- Hooghoudt, S.B. 1940. Algemene beschouwing van het probleem van de detailontwatering en de infiltratie door middel van parallel lopende drains, greppels, sloten, en kanalen. *Versl. Lanbouwk. Onderz.* 46(14). Algemene Landsdrukkerij, s'-Gravenhage, Nederland. 193 pp
- ICIS, 2002. Scenario's voor de droogtestudie Nederland. Memo International Centre for Integrative Studies.
- IPCC. 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 pp.
- Kroes, J.G. en J.C. van Dam. 2003. Reference Manual SWAP version 3.0.3. Alterra, Green World Research. Alterra-report 773. Wageningen, Nederland.
- Klopstra, D., en B. de Graaf. 2001. Berging en afvoer van water in Fryslân, Hoofrapport. HKV PR416.20.
- Kroon, T., P.A. Finke, I. Peereboom, en A.H.W. Beusen. 2001. Redesign STONE. De nieuwe schematisatie voor STONE: de ruimtelijke indeling en de toekenning van hydrologische en bodemchemische parameters. RIZA rapport 2001.017, Lelystad, Nederland.
- Vos, S.F., S.A. Kroes, en Kooistra. 2005. Drainage in Fryslân: inventarisatie van de drainagesituatie in Fryslân van nu en in de toekomst. Rapport Ingenieursbureau Oranjewoud, projectnummer 0152953 in opdracht van en Wetterskip Fryslân. Leeuwarden, Nederland.
- Van Dam, J.C., J. Huygen, J.G. Wesseling, R.A. Feddes, P. Kabat, P.E.V. VanWalsum, P. Groenendijk, and C.A. van Diepen, 1997. Theory of SWAP version 2.0. Wageningen Agricultural University and DLO Winand Staring Centre. Technical Document 45.

Vereniging voor Landinrichting. 2000. Cultuurtechnisch Vademecum: handboek voor inrichting en beheer van het landelijk gebied, Elsevier bedrijfsinformatie bv, Doetinchem, Nederland. ISBN 9054390891.

Wosten, J.H.M., G.J. Veerman, W.J.M. de Groor en J. Stoke. 2001. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks. Vernieuwde uitgave 2001. Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte. Alterra-rapport 153. Wageningen, Nederland.

Bijlage: afkortingen

AHN	Actueel Hoogtebestand Nederland
ANIMO	Agricultural Nutrient Model (Alterra model)
CLEAN	Crops, Livestock and Emissions from Agriculture in the Netherlands (RIVM model)
GLG	Gemiddeld Laagste Grondwaterstand
GHG	Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KNMI	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut
LNV	Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit
NAP	Nieuw Amsterdams Peil
NBW	Nationaal Bestuursakkoord Water
OPS	Operational Priority Substances model (RIVM model)
RIZA	Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling
RIVM	Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu
SWAP	Soil, Water, Atmosphere and Plant model
VROM	Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer
V&W	Ministerie van Verkeer en Waterstaat
WB21	WaterBeheer 21 ^{ste} Eeuw

Bijlage: invoergegevens

Samenvatting belangrijkste model invoer gegevens

ID	NAAM	ELEV	KWEL	TOPSOIL	SUBSOIL	ZOMERP	WINTERP	BUIS_D
1	KlailanG	1.20	-0.00129	B11	O12	-1.46	-1.46	-105
2	KlailanG	1.20	-0.00129	B11	O12	-1.46	-1.46	-105
3	LindeA	1.20	-0.01791	B3	O3	2.77	2.70	-105
4	LindeA	1.20	-0.01791	B3	O3	2.77	2.70	-105
5	LindeG	1.20	-0.01791	B17	O17	2.77	2.70	-95
6	LindeG	1.20	-0.01791	B17	O17	2.77	2.70	-95
7	NoardbroekG	0.95	-0.00609	B10	O18	-1.69	-1.69	-95
8	NoardbroekG	0.95	-0.00609	B10	O18	-1.69	-1.69	-95
9	PetslootA	1.25	0.06577	B3	O3	-0.88	-1.01	-110
10	PetslootA	1.25	0.06577	B3	O3	-0.88	-1.01	-110
11	PetslootG	1.25	0.06577	B3	O3	-0.88	-1.01	-80
12	PetslootG	1.25	0.06577	B3	O3	-0.88	-1.01	-80
13	ZwarteHaanA	1.25	-0.00077	B11	O12	-0.55	-0.57	-135
14	ZwarteHaanA	1.25	-0.00077	B11	O12	-0.55	-0.57	-135
15	ZwarteHaanG	1.25	-0.00077	B11	O12	-0.55	-0.57	-105
16	ZwarteHaanG	1.25	-0.00077	B11	O12	-0.55	-0.57	-105

ID	NAAM	SLOOT1	SLOOT2	SLOOT3	SLOOT4	SLOOT5
1	KlailanG	750	90	1000	12.0	100
2	KlailanG	750	90	1000	n.v.t.	100
3	LindeA	1000	310	170	10.5	100
4	LindeA	1000	310	170	n.v.t.	100
5	LindeG	1000	310	170	12.5	100
6	LindeG	1000	310	170	n.v.t.	100
7	NoardbroekG	250	150	840	10.0	100
8	NoardbroekG	250	150	840	n.v.t.	100
9	PetslootA	1000	100	840	10.5	100
10	PetslootA	1000	100	840	n.v.t.	100
11	PetslootG	1000	100	840	10.5	100
12	PetslootG	1000	100	840	n.v.t.	100
13	ZwarteHaanA	780	130	1000	16.0	100
14	ZwarteHaanA	780	130	1000	n.v.t.	100
15	ZwarteHaanG	780	130	1000	15.0	100
16	ZwarteHaanG	780	130	1000	n.v.t.	100

ID	NAAM	DRAIN1	DRAIN2	DRAIN3	DRAIN4	DRAIN5
1	KlailanG	17600	8700	44600	100	30
2	KlailanG	17600	8700	44600	n.v.t.	30
3	LindeA	5700	900	200	100	30
4	LindeA	5700	900	200	n.v.t.	30
5	LindeG	5700	900	200	100	30
6	LindeG	5700	900	200	n.v.t.	30
7	NoardbroekG	3500	3600	4900	100	30
8	NoardbroekG	3500	3600	4900	n.v.t.	30
9	PetslootA	1000	600	900	100	30
10	PetslootA	1000	600	900	n.v.t.	30
11	PetslootG	1000	600	900	100	30
12	PetslootG	1000	600	900	n.v.t.	30
13	ZwarteHaanA	10800	4700	17700	100	30
14	ZwarteHaanA	10800	4700	17700	n.v.t.	30
15	ZwarteHaanG	10800	4700	17700	100	30
16	ZwarteHaanG	10800	4700	17700	n.v.t.	30

Samenvatting belangrijkste modelinvoer scenario: Referentie

DRAINS	ID	NAAM	AREATOT	CROP	DRAIN	AREA	CROP
Drains	1	KlailanG	285	1.00	0.14	40	GRAS
NoDrains	2	KlailanG	285	1.00	0.86	245	GRAS
Drains	3	LindeA	4449	0.23	0.24	246	AKKER
NoDrains	4	LindeA	4449	0.23	0.76	778	AKKER
Drains	5	LindeG	4449	0.77	0.17	582	GRAS
NoDrains	6	LindeG	4449	0.77	0.83	2843	GRAS
Drains	7	NoardbroekG	89	1.00	0.07	6	GRAS
NoDrains	8	NoardbroekG	89	1.00	0.93	83	GRAS
Drains	9	PetslootA	383	0.09	0.36	12	AKKER
NoDrains	10	PetslootA	383	0.09	0.64	22	AKKER
Drains	11	PetslootG	383	0.91	0.00	0	GRAS
NoDrains	12	PetslootG	383	0.91	1.00	349	GRAS
Drains	13	ZwarteHaanA	8185	0.66	0.35	1891	AKKER
NoDrains	14	ZwarteHaanA	8185	0.66	0.65	3511	AKKER
Drains	15	ZwarteHaanG	8185	0.34	0.20	557	GRAS
NoDrains	16	ZwarteHaanG	8185	0.34	0.80	2226	GRAS

Samenvatting belangrijkste modelinvoer scenario: Herstel

DRAINS	ID	NAAM	AREATOT	CROP	DRAIN	AREA	CROP
Drains	1	KlailanG	285	1.00	0.35	100	GRAS
NoDrains	2	KlailanG	285	1.00	0.65	185	GRAS
Drains	3	LindeA	4449	0.23	0.60	614	AKKER
NoDrains	4	LindeA	4449	0.23	0.40	409	AKKER
Drains	5	LindeG	4449	0.77	0.43	1456	GRAS
NoDrains	6	LindeG	4449	0.77	0.58	1970	GRAS
Drains	7	NoardbroekG	89	1.00	0.18	16	GRAS
NoDrains	8	NoardbroekG	89	1.00	0.83	73	GRAS
Drains	9	PetslootA	383	0.09	0.90	31	AKKER
NoDrains	10	PetslootA	383	0.09	0.10	3	AKKER
Drains	11	PetslootG	383	0.91	0.00	0	GRAS
NoDrains	12	PetslootG	383	0.91	1.00	349	GRAS
Drains	13	ZwarteHaanA	8185	0.66	0.88	4727	AKKER
NoDrains	14	ZwarteHaanA	8185	0.66	0.13	675	AKKER
Drains	15	ZwarteHaanG	8185	0.34	0.50	1391	GRAS
NoDrains	16	ZwarteHaanG	8185	0.34	0.50	1391	GRAS

Samenvatting belangrijkste modelinvoer scenario: Toekomst

DRAINS	ID	NAAM	AREATOT	CROP	DRAIN	AREA	CROP
Drains	1	KlailanG	285	1.00	0.50	143	GRAS
NoDrains	2	KlailanG	285	1.00	0.50	143	GRAS
Drains	3	LindeA	4449	0.23	0.80	819	AKKER
NoDrains	4	LindeA	4449	0.23	0.20	205	AKKER
Drains	5	LindeG	4449	0.77	0.33	1113	GRAS
NoDrains	6	LindeG	4449	0.77	0.68	2312	GRAS
Drains	7	NoardbroekG	89	1.00	0.50	45	GRAS
NoDrains	8	NoardbroekG	89	1.00	0.50	45	GRAS
Drains	9	PetslootA	383	0.09	0.90	31	AKKER
NoDrains	10	PetslootA	383	0.09	0.10	3	AKKER
Drains	11	PetslootG	383	0.91	0.00	0	GRAS
NoDrains	12	PetslootG	383	0.91	1.00	349	GRAS
Drains	13	ZwarteHaanA	8185	0.66	0.95	5132	AKKER
NoDrains	14	ZwarteHaanA	8185	0.66	0.05	270	AKKER
Drains	15	ZwarteHaanG	8185	0.34	0.75	2087	GRAS
NoDrains	16	ZwarteHaanG	8185	0.34	0.25	696	GRAS