

Kwel en wegzijging langs de grote rivieren

Een nieuwe modelmatige aanpak

C.C. van Heerwaarden
P. Droogers
R. Loeve

Waterschap
Rivierenland



WAGENINGEN UNIVERSITEIT
WAGENINGEN UR



Kwel en wegzijging langs de grote rivieren

Een nieuwe modelmatige aanpak

Wageningen, september 2005

C.C. van Heerwaarden

P. Droogers

R. Loeve

FutureWater

Generaal Foulkesweg 28

6703 BS Wageningen

tel: 0317 460050

email: info@futurewater.nl

web: www.futurewater.nl

Inhoudsopgave

INHOUDSOPGAVE	3
1 INLEIDING	7
1.1 Kwel en wegzijging	7
1.2 Klimaatverandering	7
1.3 Onderzoek	7
1.3.1 Algemeen	7
1.3.2 Verkenning	8
1.3.3 Modelopzet	9
1.3.4 Simulaties	9
1.3.5 Conclusies	10
1.4 Leeswijzer	10
2 STUDIEGEBIED	11
2.1 Locatie	11
2.2 Hydrologie en klimaat	11
2.3 Hydrogeologie	12
3 THEORIE EN METHODEN	15
3.1 Algemeen	15
3.2 Kwel en wegzijging van en naar een rivier	15
3.3 Tweedimensionaal grondwatermodel	17
3.3.1 Algemeen	17
3.3.2 Opzet model	17
3.3.3 Gevoeligheidsanalyse	18
3.3.4 Kwelfactor	18
3.4 Regionaal model	19
3.4.1 Regionaal model op basis van SWAP	19
3.4.2 Opzet SWAP-kolom	21
3.4.3 Gevoeligheidsanalyse SWAP-kolom	21
3.4.4 Ontwikkeld model	22
3.4.5 Simulaties MWO17	25
3.4.6 Simulaties gehele polder	25
3.5 Verificatie modelresultaten	26
3.5.1 Waterbalans 2002	26
3.5.2 Grondwatermodel Witteveen en Bos	26
3.5.3 Vergelijken evapotranspiratie	26
3.6 Klimaatverandering	28
3.6.1 Gevolgen van kwel en wegzijging	28
3.6.2 Klimaatscenario's	28
3.6.3 Veranderende neerslag en verdamping	29
3.6.4 Veranderende afvoeren	29
3.6.5 Schade	30
3.6.6 Simulaties	30
4 RESULTATEN EN DISCUSSIE	31
4.1 Tweedimensionaal grondwatermodel	31
4.1.1 Standaardsituatie	31
4.1.2 Gevoeligheidsanalyse	31
4.1.3 Kwelfactor	32

4.2	Gevoeligheidsanalyse SWAP	33
4.3	Regionaal model	35
4.3.1	Simulatie diverse jaren voor peilgebied MWO17	35
4.3.2	Simulaties diverse jaren voor gehele polder	37
4.4	Validatie modelresultaten	39
4.4.1	Vergelijking grondwatermodel Witteveen en Bos	39
4.4.2	Vergelijking evapotranspiratie model en SEBAL	41
4.5	Klimaatverandering	42
4.5.1	Verandering van kwel- en wegzijgingsfluxen	42
4.5.2	Het jaar 2003 in detail	44
4.5.3	Ruimtelijk beeld van klimaatverandering	46
4.5.4	Schade	46
5	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	49
5.1	Conclusies	49
5.1.1	Model	49
5.1.2	Studiegebied	50
5.2	Aanbevelingen voor verder onderzoek	51
5.2.1	Verbeteringen werking regionaal model	51
5.2.2	Controle modelresultaten	51
5.2.3	Nieuwe simulaties	52
6	REFERENTIES	53
6.1	Literatuur	53
6.2	Internet	54
	BIJLAGE I	55

Tabellen

Tabel 3.1. Waterbalans voor 2002 volgens Ketelaar (2005)	26
Tabel 3.2. Gebaseerd op Scenario's voor droogtestudie Nederland (ICIS, 2003)	28
Tabel 4.1. Totale hoeveelheid netto kwel in peilgebied MWO17 voor vier jaren.	35
Tabel 4.2. Totale hoeveelheid netto kwel in de gehele Quarles van Ufford polder voor vier jaren. De drainage is de drainage van de peilgebieden, dus de balans van neerslag verdamping en wegzijging.	37
Tabel 4.3. Gemiddelde kwel per jaar in diverse scenario's. Zie Tabel 3.2 voor klimaatscenario's.	43
Tabel 4.4. Statistische grootheden van afvoeren ten gevolge van kwel en wegzijging per dag in diverse klimaatscenario's gebaseerd op een simulatie van 1993 – 2004.	43
Tabel 4.5. Relatieve gewasopbrengst in procenten in diverse scenario's doorgerekend voor de reeks van 2003 met kwel en wegzijging in- en uitgeschakeld.	47

Figuren

Figuur 1.1. Ligging van polder Quarles van Ufford in Nederland. De polder is met groen aangegeven.	8
Figuur 1.2. Schematische weergave onderzoek.	9
Figuur 2.1. Peilgebieden in de polder Quarles van Ufford. MWO17 is rood gekleurd. De geologische doorsnede in Figuur 2.4 is langs de gestreepte lijn gemaakt.	11
Figuur 2.2. Karakteristieke weergave uiterwaarden Waal (links) en Maas (rechts). De foto's zijn genomen vanaf de winterdijk. De locatie van de rivier is met een rode pijl aangegeven.	12
Figuur 2.3. Zandbanen in Quarles van Ufford.	13
Figuur 2.4. Aanwezigheid kleilagen in de ondergrond van Polder Quarles van Ufford. Doorsnede is door de as van het gebied, van west naar oost (zie Figuur 2.1). Gegevens zijn gebaseerd op REGISII.	13
Figuur 3.1. Schematische weergave kwel van rivier naar polder.	15
Figuur 3.2. Schematische weergave hoogwatersituatie. Blauw is de rivier, zwart is de dijk, wit is de atmosfeer boven de polder, bruin is de deklaag en geel is het watervoerende pakket. De cellen met een X gemarkeerd hebben een vaste stijghoogte aan de bovenkant van de cel. De horizontale rijen getallen geven de breedte van de cel aan, de verticale rijen geven de diepte.	18
Figuur 3.3. Schematische weergave van het model SWAP. Engelstalig origineel afkomstig uit de SWAP-handleiding (Kroes en Van Dam, 2003).	20
Figuur 3.4. Schematische weergave modelopzet. Letters geven datasets aan, getallen geven processen in het model aan.	22
Figuur 3.5. Schematische weergave van rivierhoogtecorrectie.	24
Figuur 3.6. Schematisch overzicht van het SEBAL algoritme (Bastiaanssen et al., 1998).	27
Figuur 4.1. Gevoeligheid kwel voor verandering van stijghoogteverschil en verandering van de breedte van de uiterwaarden in een hoogwatersituatie.	31
Figuur 4.2. Gevoeligheid kwel voor verandering van doorlaatvermogen aquifer en de doorlatendheid van de deklaag.	32
Figuur 4.3. Vergelijking kwelfactoren afkomstig uit model en uit de analytische oplossing.	32
Figuur 4.4. Gevoeligheidsanalyse kwel en wegzijging voor diverse parameters in MWO17 in 2004.	33
Figuur 4.5. Gevoeligheid grondwaterstand voor diverse parameters in MWO17 in 2004.	34
Figuur 4.6. Rivierstand Waal, grondwaterstand en verschil tussen rivierstand en grondwaterstand voor MWO17 in 1995 en 2002. Het peilverschil tussen rivier en grondwater is een maat voor de kwel.	36
Figuur 4.7. Rivierstand Waal, grondwaterstand en verschil tussen rivierstand en grondwaterstand voor MWO17 in 2003 en 2004. Het peilverschil tussen rivier en grondwater is een maat voor de kwel.	36
Figuur 4.8. Ruimtelijke verdeling kwel voor vier verschillende jaren.	37
Figuur 4.9. Kwel en wegzijging gedurende twee extreme dagen: in 1995 bij piekafvoeren in Maas en Waal en in 2003 tijdens het begin van een extreem droge zomer.	38
Figuur 4.10. Kwel per kwartaal in 2003.	39
Figuur 4.11. Kwel en infiltratie in de zomer van 1996 volgens het grondwatermodel van Witteveen en Bos (2005).	40
Figuur 4.12. Kwel en infiltratie in de zomer van 1996 volgens het SWAP-model.	40
Figuur 4.13. Evapotranspiratie in 2003 berekend door het model en door SEBAL en de correlatie hiertussen.	41

Figuur 4.14. Totaal verdampingstekort voor 1 juli - 31 augustus 2003 berekend met het model en met SEBAL en de verschillen tussen de twee.	42
Figuur 4.15. Diverse statistische grootheden voor kwel en wegzijging onder verschillende scenario's gebaseerd op een simulatie van 1993 – 2004. + is met getransformeerde rivierafvoeren die bij dat scenario horen, - is met rivierafvoeren uit het heden.	44
Figuur 4.16. Grondwaterstanden, de hoogte van de Waal en kwel en wegzijging in 2003, voor de werkelijkheid, voor het hoge scenario en het droge scenario.	45
Figuur 4.17. Ruimtelijke weergave van de verandering van de gemiddelde kwel op jaarbasis onder invloed van drie klimaatscenario's. Ter vergelijking ook een weergave van de gemiddelde kwel per jaar voor de gehele polder.	46
Figuur 4.18. Cumulatieve relatieve opbrengst simulatie met kwel en wegzijging ingeschakeld minus cumulatieve relatieve opbrengst simulatie met kwel en wegzijging uitgeschakeld. Dus verandering relatieve opbrengst ten gevolge van kwel.	47
Figuur B.1. Alle peilgebieden, in- en uitlaten van oppervlaktewater en relevante namen.	55

1 Inleiding

1.1 *Kwel en wegzijging*

Kwel en wegzijging van en naar rivieren zijn vaak de sluitposten bij het maken van een waterbalans, omdat deze posten niet eenvoudig te berekenen zijn (Ketelaar, 2005). Toch zijn ze essentieel voor het waterbeheer voor een gebied dat begrensd wordt door rivieren. In tijden van hoge waterstanden in de rivieren kan kwel voor grote wateroverlast zorgen, terwijl in droge tijden met lage rivierafvoeren juist wegzijging voor problemen in het waterbeheer kan zorgen: water dat toch al schaars is in deze tijden wordt weggevoerd naar de rivier. Het is mogelijk dat deze kwel en wegzijging schade veroorzaken aan landbouw en natuur. Het is dus van groot belang voor het waterbeheer om een goed beeld te krijgen van de hoeveelheid kwel en wegzijging van en naar de grote rivieren en de schade die daarmee gepaard gaat. Voor het waterbeheer van de 21^e eeuw is het bovendien van groot belang te weten hoe kwel en wegzijging veranderen onder klimaatveranderingen.

1.2 *Klimaatverandering*

Het waterbeheer van de 21^e eeuw krijgt te maken met klimaatveranderingen. De aarde warmt op, waardoor de hydrologische cyclus zal versnellen (IPCC, 2001). Dit betekent dat er meer neerslag per periode zal vallen en dat er meer verdamping zal plaatsvinden. Behalve dat de neerslag toeneemt, zal de wijze waarop deze valt ook veranderen. Opwarming van de aarde zal meer convectieve neerslag tot gevolg hebben. Dit houdt in dat hevige plaatselijke buien frequenter zullen vallen (Können, 2001). Het is ook mogelijk dat onder klimaatverandering er meer droge periodes voorkomen (Beersma et al., 2004).

Door veranderingen van de neerslaghoeveelheid en het neerslagkarakter, zullen de patronen in de rivierafvoeren van de Rijn en de Maas ook wijzigen (Beersma et al., 2004). Afvoerpieken komen vaker voor en zullen in grootte toenemen en er zullen vaker perioden voorkomen met een lage rivierafvoer. Het grondwatersysteem kan hierdoor veranderingen ondervinden, met name door een toename van kwel in perioden met hoge rivierafvoeren en een toename van wegzijging in perioden van lage afvoeren.

Gebieden die gelegen zijn langs rivieren hebben dus een dubbel probleem met deze klimaatveranderingen. Rivierpieken vinden vaak plaats in tijden dat het veel regent. Als de neerslaghoeveelheid toeneemt onder klimaatverandering en de rivierafvoeren toenemen, dan krijgt een gebied langs de rivier zowel via neerslag als via kwel meer water te verwerken.

Lage rivierafvoeren komen overwegend voor in droge periodes. Als de rivierafvoeren nog lager worden en de droogte groter, dan hebben de gebieden onder invloed van de rivier extra watertekorten door meer wegzijging en door meer neerslagtekort.

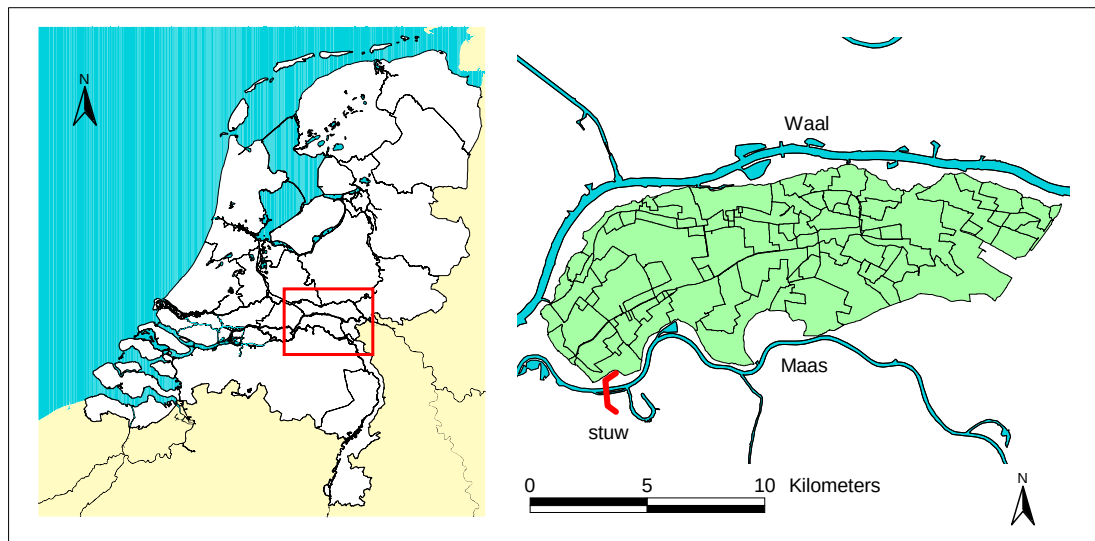
1.3 *Onderzoek*

1.3.1 *Algemeen*

Deze studie richt zich op kwel en wegzijging van en naar rivieren in het Nederlandse rivierengebied. Het hoofddoel is het ontwikkelen van een model dat op basis van meteorologische gegevens en rivierstanden kwel- en wegzijgingsfluxen kan bepalen voor zowel het heden als voor de toekomst

onder verschillende klimaatscenario's. Het te ontwikkelen model geeft ook een indicatie van de schade aan landbouw en natuur ten gevolge van alle hydrologische processen die een rol spelen in het bepalen van de verdamping, waaronder kwel en wegzijging. Studies die de invloeden van klimaatverandering op kwel en wegzijging van en naar rivieren en de gevolgen hiervan voor het lokale waterbeheer behandelen, zijn niet terug te vinden in de literatuur.

Waterschap Rivierenland bevindt zich binnen de invloeden van de Rijn en de Maas en is daarom deelnemer in deze studie. De polder Quarles van Ufford, gelegen tussen de Waal en de Maas (zie Figuur 1.1), dient in deze studie als pilotgebied en is een voorbeeld voor andere gebieden gelegen langs de grote rivieren.



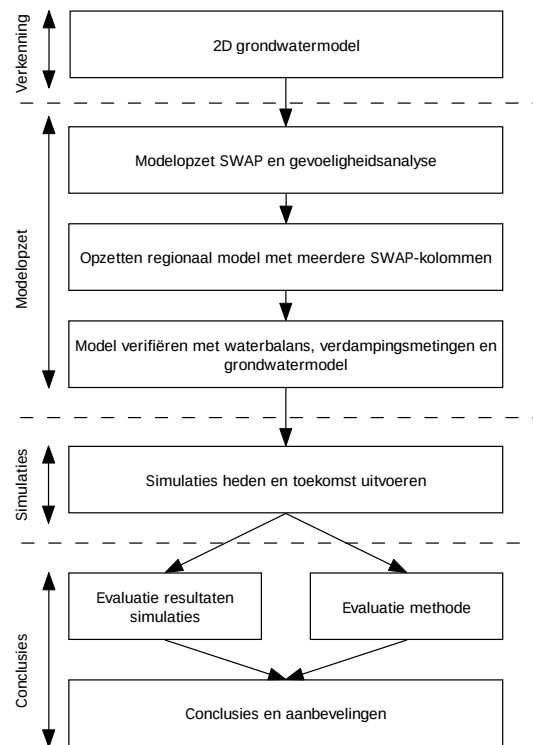
Figuur 1.1. Ligging van polder Quarles van Ufford in Nederland. De polder is met groen aangegeven.

Deze studie is onderdeel van het Besluit Subsidies Investerings Kennisinfrastuctuur (BSIK) programma. BSIK is een subsidieregeling die erop gericht is de Nederlandse samenleving meer bruikbare kennis en onderzoekscapaciteit te verschaffen in diverse thema's. Eén van deze thema's is Ruimtegebruik. Binnen dit thema is Klimaat voor Ruimte één van de projecten. Binnen het project Klimaat voor Ruimte wordt er onderzoek gedaan hoe Nederland zich dient aan te passen aan Rijnnextremen. FutureWater kijkt binnen dit onderzoek naar hoe lokale waterbeheerders te maken krijgen met veranderende Rijnnextremen, en hoe zij zich hieraan kunnen aanpassen. Het begrijpen en kunnen simuleren van de hoeveelheid kwel en wegzijging vanuit de rivieren is hier de eerste fase van.

Deze studie bestaat uit een aantal fasen (zie Figuur 1.2):

1.3.2 Verkenning

De studie begint met een verkenning van de hoeveelheid kwel en wegzijging langs een rivier met behulp van een tweedimensionaal grondwatermodel. In de eerste plaats is dit model gebruikt om een indruk te krijgen op welke afstand van de rivier de invloed van de rivierkwel nog merkbaar is en welke parameters in het grondwatersysteem de grootste gevoeligheid kennen bij het bepalen van de kwelhoeveelheid. In de tweede plaats zijn de uitkomsten van deze verkenning gebruikt om een eenvoudige methode te vinden om de kwel en wegzijging van en naar de rivier te beschrijven in het ontwikkelde model. Hierbij is ook gebruik gemaakt van een analytische oplossing om kwel onder een dijk te berekenen.



Figuur 1.2. Schematische weergave onderzoek.

1.3.3 Modelopzet

De tweede fase van de studie bestaat uit het opzetten van een model voor het gebied. Het ontwikkelde model bestaat uit een verzameling ééndimensionale verticale kolommen. Elk peilgebied (een gebied waarin het oppervlaktepeil uniform is) krijgt een kolom die de eerste vier meter vanaf het maaiveld simuleert met behulp van het onverzadigde zone-model SWAP (Van Dam, 2000). De resultaten van al deze kolommen geven samen een weergave van de hydrologische toestand van het gehele studiegebied en verschaffen nauwkeurige informatie voor elk peilgebied afzonderlijk.

In eerste instantie is er één SWAP-kolom gemaakt voor één peilgebied en is er een gevoeligheidsanalyse van deze modelopzet uitgevoerd. Met behulp van de resultaten van de gevoeligheidsanalyse zijn alle kolommen opgezet. De resultaten van het 2D-grondwatermodel en de rivierwaterstanden zijn gebruikt voor het correct opstellen van de onderrandvoorwaarden van de SWAP-modellen. Een bestaande waterbalans (Ketelaar, 2005) en de resultaten van een grondwatermodel (Witteveen & Bos, 2005) zijn gebruikt om de netto kwelhoeveelheden uit het model te verifiëren. Een derde verificatie heeft plaatsgevonden door actuele evapotranspiratie afkomstig uit satellietbeelden (berekend met SEBAL) te vergelijken met de actuele evapotranspiratie afkomstig uit het model, omdat deze gegevens sterk afhankelijk zijn van de vochttoestand van de bodem.

1.3.4 Simulaties

De derde fase van de studie bestaat uit het uitvoeren van simulaties. Met behulp van bestaande en getransformeerde rivierhoogtereeksen van de Waal en de Maas en meteorologische gegevens zijn de mogelijke kwelhoeveelheden onderzocht voor zowel het heden als de toekomst in 2050.

Behalve dat naar kwelhoeveelheden is gekeken, heeft er ook een analyse plaatsgevonden die een weergave van de schade aan landbouw en natuur geeft aan de hand van verschillen tussen actuele en potentiële verdamping.

1.3.5 Conclusies

De vierde en laatste fase van de studie bestaat uit het evalueren van de resultaten van het model en de simulaties en deze vertalen in conclusies en aanbevelingen. Belangrijk was of het model praktisch bruikbaar is, of het model betrouwbare resultaten oplevert en waar het nog verbeterd kan worden.

Er zijn conclusies getrokken over de invloed van klimaatverandering op de hoeveelheid kwel en wegzijging in de polder Quarles van Ufford.

1.4 Leeswijzer

Dit rapport waarin de studie beschreven is, kent de volgende structuur:

- In Hoofdstuk 2 staat de beschrijving van de polder Quarles van Ufford. Dit hoofdstuk bevat alle informatie over het landgebruik, de hydrologie, het klimaat en de geologie van de polder.
- In Hoofdstuk 3 zijn de methoden van deze studie te vinden. De gebruikte methodes splitsen zich een aantal hoofdonderwerpen:
 - o de theorie over kwel en wegzijging van en naar de rivier
 - o het tweedimensionale grondwatermodel
 - o het opzetten van een SWAP-kolom
 - o het opzetten van het gehele model
 - o het verifiëren van het model
 - o het uitvoeren van simulaties voor heden en toekomst (klimaatscenario's)
- Hoofdstuk 4 bevat de resultaten van de studie en een discussie hiervan. In dit hoofdstuk zijn voor dezelfde deelonderwerpen als in Hoofdstuk 3 de resultaten te vinden.
- Hoofdstuk 5 bevat de conclusies en aanbevelingen. In dit hoofdstuk staan een uitgebreide evaluatie van het model en een samenvatting van de belangrijkste conclusies van het model.

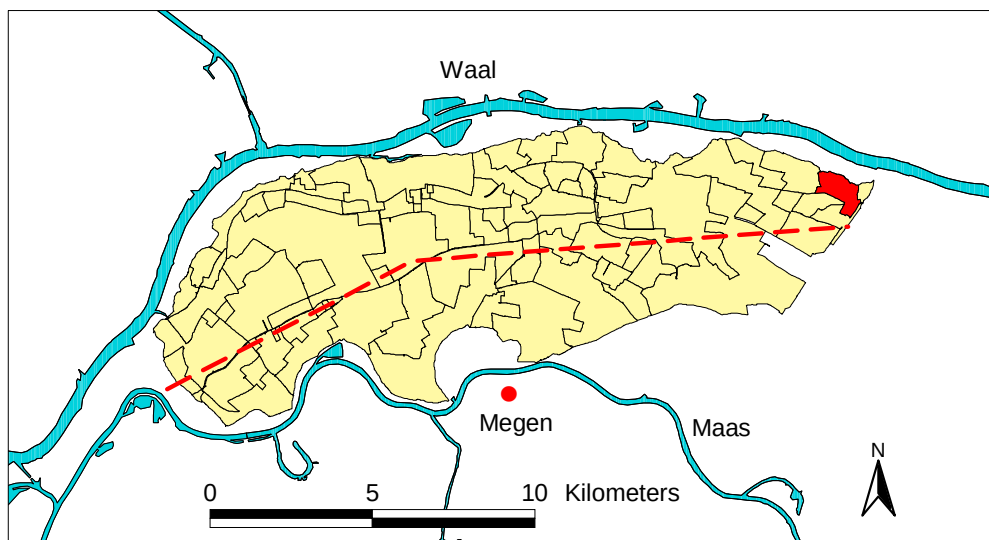
2 Studiegebied

2.1 Locatie

Het studiegebied is de polder Quarles van Ufford. Deze polder is gelegen in de Provincie Gelderland (zie Figuur 1.1). De grenzen van de polder zijn voor het grootste gedeelte de winterdijken van de Maas en de Waal. De oostelijke en zuidoostelijke kant van het gebied worden begrensd door de snelweg A50, enkele straten en de Nieuwe Wetering.

Quarles van Ufford is 117 km² groot en heeft een omtrek van 72 km, waarvan 48 km uit rivierdijk bestaat. Het meest voorkomende landgebruik is grasland. Op enkele plaatsen staan boomgaarden en vindt er akkerbouw plaats. Een klein deel van het gebied wordt bedekt door stedelijke bebouwing.

Het gebied is ingedeeld in peilgebieden (zie Bijlage I voor alle peilgebieden met naam), die elk een vast oppervlaktewaterpeil hebben gedurende de zomer en de winter. Het peilgebied MWO17 is gelegen in het noordoosten van het gebied, aan de Waal (zie Figuur 2.1). Dit peilgebied is gebruikt voor een aantal analyses. MWO17 is gekozen omdat het onder directe invloed van de Waal staat, de uiterwaarden tussen het peilgebied en de Waal een gemiddelde breedte hebben en de bodemfysische eigenschappen representatief zijn voor de meeste peilgebieden in de polder.



Figuur 2.1. Peilgebieden in de polder Quarles van Ufford. MWO17 is rood gekleurd. De geologische doorsnede in Figuur 2.4 is langs de gestreepte lijn gemaakt.

2.2 Hydrologie en klimaat

Het studiegebied ligt zowel aan de Waal en de Maas (zie Figuur 2.1). Dit betekent dat de waterstanden in beide rivieren invloed hebben op de totale hoeveelheid kwel en wegzijging. Te verwachten is dat de Waal meer invloed heeft op de kwel en de wegzijging, omdat het peil van deze rivier een vrij verloop kent, terwijl de Maas op enkele plaatsen (Grave en Lith) gestuwd is. Kenmerkend voor de Waal is dat de uiterwaarden vaak breed zijn (meer dan 500 m), terwijl de Maas overwegend dichter bij de winterdijk ligt (zie Figuur 2.2).



Figuur 2.2. Karakteristieke weergave uiterwaarden Waal (links) en Maas (rechts). De foto's zijn genomen vanaf de winterdijk. De locatie van de rivier is met een rode pijl aangegeven.

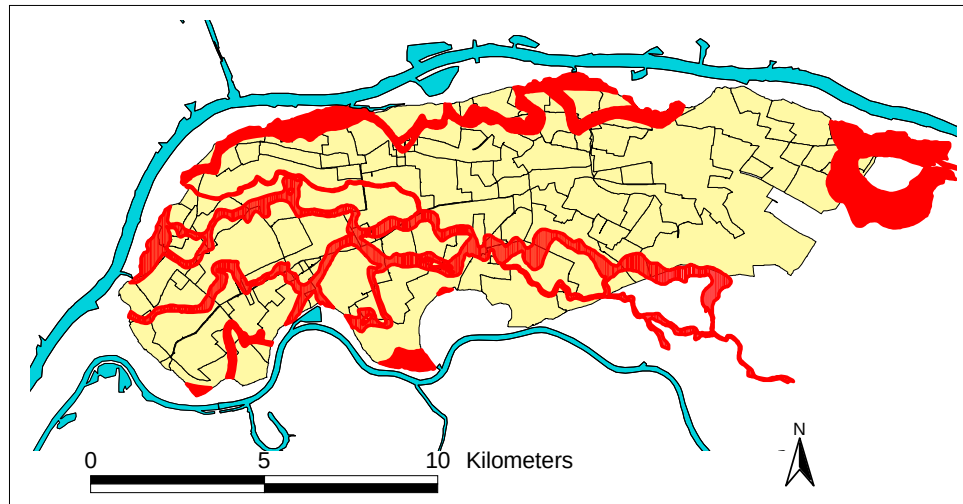
Er zijn een aantal inlaatpunten rondom het gebied (zie Bijlage I). Het water wordt uitgelaten in de Maas via het gemaal Quarles van Ufford. Dit kan gebeuren onder vrij verval als de waterstand in de Maas lager is dan in de polder of via het gemaal bij een hogere waterstand. De waterstanden in het oppervlaktewater in de polder (zie Figuur 2.1) hebben een streefpeil voor het zomerhalfjaar (april – september) en het winterhalfjaar (oktober – maart).

Station Megen, het dichtstbijzijnde neerslagstation (zie Figuur 2.1), heeft over de periode 1971 – 2000 een gemiddelde neerslag van 771 mm per jaar (Heijboer en Nellestijn, 2002).

2.3 Hydrogeologie

De polder Quarles van Ufford bevindt zich in de geologische eenheid van het rivierengebied. Karakteristiek voor de ondergrond van het rivierengebied is de aanwezigheid van een slecht doorlatende deklaag bestaande uit zavel en klei van verschillende texturen (Dufour, 1998). Deze deklaag is gemiddeld 5 m dik (Dufour, 1998; REGISII, 2005). Deze afzettingen zijn afkomstig uit het Holocene (10.000 v. Chr – heden), waarin zowel de Rijn als de Maas een meanderende rivier zijn. Kenmerkend van een meanderende rivier is dat de grove sedimenten die met de rivier worden meegevoerd in het bed van de rivier blijven liggen en dat de materialen met een fijne textuur (zavel en klei) naast de rivier worden afgezet tijdens overstromingen. De zavel wordt dan dichtbij de rivier afgezet en de zware kleien het verste weg, omdat deze vanwege hun zeer fijne textuur het laatste bezinken.

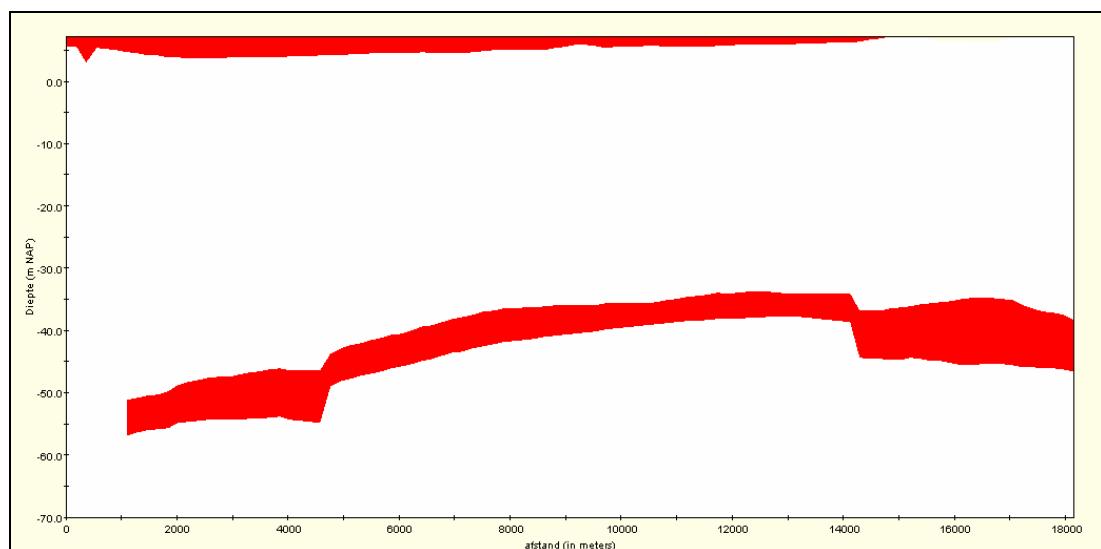
Meanderende rivieren veranderen soms hun baan. Binnen de polder liggen een aantal oude stroomruggen, die bestaan uit goeddoorlatend materiaal. Deze goeddoorlatende zandbanen kunnen een belangrijke transporteur van kwelwater zijn. In Figuur 2.3 staan de zandbanen aangegeven. Langs de Waal liggen veel goeddoorlatende zandbanen.



Figuur 2.3. Zandbanen in Quarles van Ufford.

In het laatste deel van het Pleistoceen (250.000 v Chr. – 10.000 v Chr.) vond een afwisseling van ijstijden en warmere perioden plaats die relevant zijn voor de hydrogeologie van het rivierengebied. In de koude perioden waren de Rijn en de Maas vlechtende rivieren die door hun hoge stroomsnelheid veel grove sedimenten meevoerden. Deze grove sedimenten zijn de watervoerende pakketten van tegenwoordig. In de warmere periode veranderde het riviersysteem naar meanderend en werden net als in het Holoceen, zwaardere materialen afgezet.

Een doorsnede van west naar oost door de as van het gebied (zie Figuur 2.1) laat zien dat na de deklaag die aan het maaiveld begint, de eerste relevante kleilaag op ongeveer 40 m -NAP ligt (zie Figuur 2.4). Dit betekent dat het gebied een belangrijke doorlatende laag meteen onder de deklaag heeft, die als transportmedium voor de rivierkwel en –wegzijging kan dienen. Er zijn geen aanwijzingen dat er relevante kwel optreedt van diepere watervoerende pakketten naar het eerste watervoerende pakket.



Figuur 2.4. Aanwezigheid kleilagen in de ondergrond van Polder Quarles van Ufford. Doorsnede is door de as van het gebied, van west naar oost (zie Figuur 2.1). Gegevens zijn gebaseerd op REGISII.

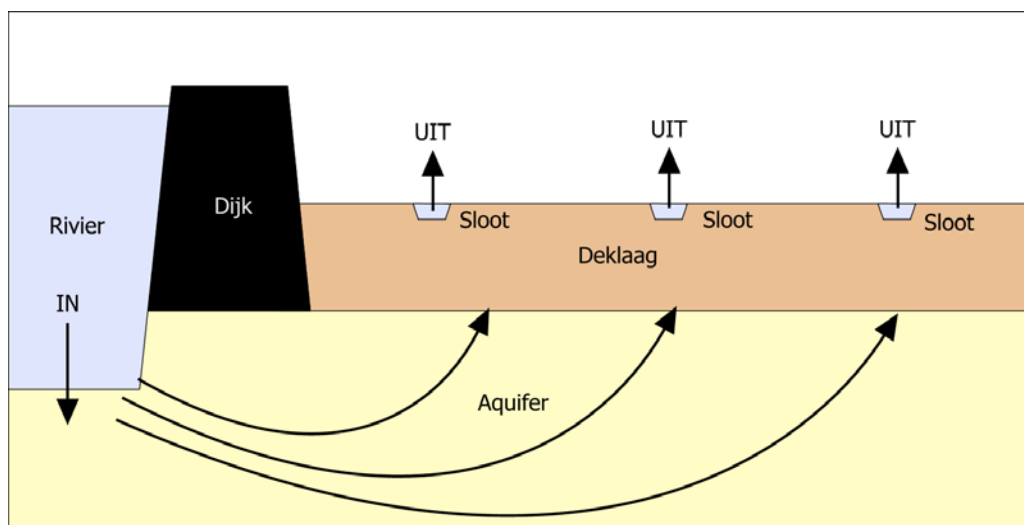
3 Theorie en methoden

3.1 Algemeen

De theorie en methoden zijn opgebouwd zoals beschreven is in de inleiding. Eerst wordt de theorie van kwel en wegzijging van en naar een rivier besproken. Kwel en wegzijging naar de rivier zijn daarna onderzocht met een tweedimensionaal grondwatermodel. Met de uitkomsten hiervan is een SWAP-kolom opgebouwd, die aan een gevoeligheidsanalyse onderworpen is. Deze analyse heeft geholpen bij het opzetten van het regionale model. Het regionale model is geverifieerd op basis van een drietal eerdere studies: een waterbalans, verdampingsgegevens uit SEBAL en een grondwatermodel. Vervolgens zijn er een aantal klimaatscenario's doorgererekend met het model.

3.2 Kwel en wegzijging van en naar een rivier

Het rivierengebied bestaat geologisch sterk vereenvoudigd uit twee lagen: een slecht doorlatende deklaag en een watervoerend pakket (zie paragraaf 2.3). De rivier snijdt zich door de deklaag tot in de aquifer. De rivierstand is dus rechtstreeks bepalend voor de druk in de aquifer. Bij een hoge rivierstand zal in het deel van de aquifer dat onder de rivier ligt de druk groter zijn dan in het deel onder de polder. Er zal dan watertransport plaatsvinden richting de polder (zie Figuur 3.1).



Figuur 3.1. Schematische weergave kwel van rivier naar polder.

Het watertransport wordt beschreven met de wet van Darcy (Formule 3.1):

$$q = -k \frac{dH}{dx} \quad (3.1)$$

Termen:

q	Fluxdichtheid	[m d ⁻¹]
k	Doorlatendheid van grond	[m d ⁻¹]
dH	Stijghoogteverschil	[m]
dx	Afstand waarover stijghoogteverschil wordt bepaald	[m]

De dijken zijn ondoorlatend verondersteld, dus de aquifer is het enige transportmedium voor het water en het water kan de aquifer alleen verlaten door via de deklaag naar het oppervlaktewatersysteem te kwellen. Volgens de veronderstelling van Dupuit is transport door een aquifer horizontaal, waardoor het systeem met behulp van de wet van Darcy kan worden beschreven in een ééndimensionale differentiaalvergelijking (zie Formule 3.2).

De oplossing (Mazure, 1936) van deze vergelijking is Formule 3.3. Door het invullen van de juiste randvoorwaarden blijft een eenvoudige exponentiële functie over (zie Formule 3.4). Deze formule kan worden omgeschreven naar een formule voor de fluxdichtheid van de kwel (zie Formule 3.5).

Formule 3.6 laat de hoeveelheid kwel zien voor de theoretische situatie met een polder van oneindige lengte. Deze formule geeft aan dat de totale hoeveelheid kwel afhankelijk is van het stijghoogteverschil, het doorlaatvermogen van de aquifer en de weerstand van de deklaag.

$$\begin{aligned}
 Q_{in} - Q_{uit} &= Q_{kwel} \\
 -kD \frac{dH}{dx} \Big|_x + kD \frac{dH}{dx} \Big|_{x+\Delta x} &= \frac{H - H_{polder}}{c} \Delta x \\
 \frac{d}{dx} \left(kD \frac{dH}{dx} \right) \Delta x &= \frac{H - H_{polder}}{c} \Delta x \\
 \frac{d^2 H}{dx^2} &= \frac{H - H_{polder}}{kDc}
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

$$H - H_{polder} = C_1 e^{-\frac{x}{\sqrt{kDc}}} + C_2 e^{\frac{x}{\sqrt{kDc}}} \tag{3.3}$$

$$\begin{aligned}
 H(0) &= H_0, \quad H(x) = H_{polder} \quad \lim_{x \rightarrow \infty} \\
 H(x) &= (H_0 - H_{polder}) \cdot e^{-\frac{x}{\sqrt{kDc}}} + H_{polder}
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

$$q_{kwel}(x) = \frac{H(x) - H_{polder}}{c} = \frac{H_0 - H_{polder}}{c} \cdot e^{-\frac{x}{\sqrt{kDc}}} \tag{3.5}$$

$$Q_{totaal} = \frac{H_0 - H_{polder}}{c} \cdot \int_0^\infty e^{-\frac{x}{\sqrt{kDc}}} dx = (H_0 - H_{polder}) \cdot \sqrt{\frac{kD}{c}} \tag{3.6}$$

Termen:

Q	Kwelflux	$[m^2 d^{-1}]$
kD	Doorlaatvermogen aquifer	$[m^2 d^{-1}]$
c	Weerstand deklaag	$[d]$
H	Stijghoogte	$[m]$
H_0	Stijghoogte in aquifer recht onder rivier	$[m]$
H_{polder}	Polderpeil	$[m]$
x	Afstand tot de dijk	$[m]$
C_1, C_2	Integratieconstanten	$[m]$
q	Fluxdichtheid kwel	$[m d^{-1}]$

3.3 Tweedimensionaal grondwatermodel

3.3.1 Algemeen

Om de gevoeligheid van de kwel- en wegzijgingshoeveelheid voor verschillende eigenschappen, waaronder de hydrogeologische opbouw, te testen is een tweedimensionaal stationair grondwatermodel opgesteld. Met dit model is ook een methode vastgesteld om de stroming tussen rivier en polder eenvoudig te bepalen, zodat deze gebruikt kan worden in het ontwikkelde model.

3.3.2 Opzet model

Het tweedimensionale grondwatermodel is een spreadsheet die de stijghoogtes van een verticale doorsnede van een gebied kan uitrekenen. Het model werkt op basis van de wet van Darcy en is gediscrètiseerd met eindige differenties. Een verticale doorsnede loodrecht op de rivier is in cellen verdeeld, waarbij elke cel een doorlatendheid krijgt voor de horizontale en verticale richting. Op de hoeken van elke cel worden de stijghoogte en de waterbalans uitgerekend.

Het studiegebied is gediscrètiseerd als in Figuur 3.2, waarbij dit een hoogwatersituatie is. De randen zijn aan elke kant gesloten. De bovenzijden van de riviercellen van de rivier krijgen een vaste stijghoogte opgelegd, evenals de bovenzijden van de poldercellen. Een cel met een vaste stijghoogte voert water aan of voert water af. De cellen in de rivier hebben een hogere stijghoogte dan de cellen daaronder, waardoor er water uitstroomt richting de aquifer. Om de waterbalans kloppend te houden, zullen deze cellen dus water aanvoeren vanuit de rivier. Het systeem is gesloten. Hierdoor zullen de cellen in de polder met een vaste stijghoogte een hoeveelheid water moeten afvoeren die exact even groot is als de hoeveelheid die bij de rivier de aquifer instroomt. De doorlatendheden van de deklaag en de aquifer zijn gemiddelde waarden voor zand (5 m d^{-1}) en zavel/lichte klei ($0,01 \text{ m d}^{-1}$) (Domenico en Schwartz, 1998).

In dit model zijn een aantal aannames gemaakt. De linkerrand van het model is een waterscheiding. Dit betekent dat er geen water zal stromen door deze rand. De rechterrand is tevens gesloten onder de veronderstelling dat deze zo ver van de rivier afligt, dat de rivier geen invloed meer heeft op de stijghoogte. Dit betekent dat aan de rechterrand over de gehele hoogte de stijghoogte gelijk hoort te zijn aan het polderpeil. Is dit niet het geval, dan zal de rechterrand van het model verder van de rivier moeten liggen. De onderrand van het model is gesloten. Mocht er in dit gebied diepe kwel plaatsvinden, dan kan de onderrand worden aangepast door er een aanvulling aan toe te voegen.

	520			2000						
m	20	500	10	50	100	150	200	500	500	500
4	X	X								
1				X	X	X	X	X	X	X
1										
1				$k = 0,01 \text{ m d}^{-1}$						
1										
1										
2										
10				$k = 5 \text{ m d}^{-1}$						
10										
18										

Figuur 3.2. Schematische weergave hoogwatersituatie. Blauw is de rivier, zwart is de dijk, wit is de atmosfeer boven de polder, bruin is de deklaag en geel is het watervoerende pakket. De cellen met een X gemarkeerd hebben een vaste stijghoogte aan de bovenkant van de cel. De horizontale rijen getallen geven de breedte van de cel aan, de verticale rijen geven de diepte.

Het model is stationair. Dit wil zeggen dat het model geen veranderingen in de tijd doorrekent, maar de stijghoogten voor een stabiele situatie bepaalt die bij een bepaald verschil tussen rivierpeil en polderpeil horen. Dit is gerechtvaardigd omdat een verhoging van een rivierpeil meteen een drukverschil op het systeem zet. Hierdoor verandert de kwel gelijk mee, omdat de elastische berging van een afgesloten aquifer zeer klein is.

3.3.3 Gevoeligheidsanalyse

Met behulp van het opgestelde grondwatermodel zijn een aantal eigenschappen getest op hun gevoeligheid:

- het stijghoogteverschil tussen de rivier en de polder
- de breedte van de uiterwaarden
- de doorlatendheid van de deklaag
- het doorlaatvermogen van het watervoerende pakket.

Deze analyse verschaft informatie over welke parameters van het systeem de grootste fouten opleveren, wanneer deze niet nauwkeurig beschikbaar zijn. De analyse van de hoogwatersituatie zal van een standaardsituatie uitgaan, waarbij de stijghoogte in de rivier op 8 m +NAP staat en de stijghoogte in de polder op 4 m +NAP. De parameters waarop de gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd zijn gekozen aan de hand van de analytische oplossing uit paragraaf 3.2. Uit deze oplossing blijkt dat de kwelhoeveelheid bepaald wordt door de stijghoogteverschillen, de eigenschappen van het watervoerende pakket en de deklaag en de afstand tot de rivier.

3.3.4 Kwelfactor

Een rechtstreekse koppeling van het grondwatermodel aan het ontwikkelde model is niet mogelijk, omdat dan voor elk gebied waarvoor gesimuleerd gaat worden een grondwatermodel moet worden

opgesteld en per tijdstap moet worden doorgerekend. Daarom heeft deze studie naar een eenvoudige methode gezocht die kwel en wegzijging van en naar de rivier voor een gebied kan bepalen.

Volgens de analytische oplossing is er een lineair verband tussen stijghoogte en kwel (zie Formule 3.7). Er is een exponentieel verband tussen de hoeveelheid kwel en wegzijging en de afstand van de rivier (zie Formule 3.8). De zojuist genoemde lineaire en exponentiële verbanden maken het mogelijk om een lineaire functie op te stellen, waarin het stijghoogteverschil vermenigvuldigd met een factor de kwel oplevert (zie Formule 3.9). Deze factor is alleen afhankelijk van de eigenschappen van de aquifer en de afstand van de rivier voor elke willekeurige plek en is dus geldig voor alle stijghoogtes (zie Formule 3.9). De factor hoeft dus slechts eenmaal per gebied berekend te worden. Er blijft nu een zeer eenvoudige formule over waar het verschil tussen de druk in de aquifer en de grondwaterstand van het willekeurige gebied kan worden ingevuld om de kwel te verkrijgen.

$$q_{\text{kwel}}(x) = \frac{H(x) - H_{\text{polder}}}{c} = \frac{H_0 - H_{\text{polder}}}{c} \cdot e^{-\frac{x}{\sqrt{kDc}}} \quad (3.7)$$

$$q_{\text{kwel}}(x) = \text{factor}(x) \cdot (H_0 - H_{\text{polder}}) \quad (3.8)$$

$$\text{factor}(x) = \frac{q_{\text{kwel}}(x)}{H_0 - H_{\text{polder}}} = \frac{1}{c} \cdot e^{-\frac{x}{\sqrt{kDc}}} \quad (3.9)$$

Termen:

Q	Kwelflux	$[\text{m}^2 \text{ d}^{-1}]$
kD	Doorlaatvermogen aquifer	$[\text{m}^2 \text{ d}^{-1}]$
c	Weerstand deklaag	$[\text{d}]$
H	Stijghoogte	$[\text{m}]$
x	Afstand tot de dijk	$[\text{m}]$
q	Fluxdichtheid kwel	$[\text{m d}^{-1}]$
$\text{factor}(x)$	Vermenigvuldigingsfactor stijghoogteverschil in m om kwel in cm d^{-1} te krijgen	$[\text{d}^{-1}]$

De theorie gaat uit van een ééndimensionaal systeem (zie paragraaf 3.2) dat het verschil tussen de druk in de aquifer en het polderpeil gebruikt om de kwel te berekenen. Voor het model dat ontwikkeld wordt in deze studie, is het echter van belang om gebruik te maken van de verschillen tussen de rivierstand en de grondwaterstand in de polder.

De rivierstanden zijn eenvoudig verkrijgbare data en de grondwaterstanden, die met SWAP berekend worden, zijn de werkelijke peilhoogtes van de polder. Met het tweedimensionale model zijn factoren vastgesteld die gebruik maken van rivierstanden in plaats van de druk in de aquifer onder de rivier. Er is gekeken in hoeverre deze verkregen factoren afwijken van de analytische oplossing.

Het grondwatermodel werkt echter ook met polderpeilen en niet met grondwaterstanden. De kwelfactor is niet afhankelijk van de het peilverschil (zie Formule 3.9), dus wanneer er met grondwaterstanden in plaats van met oppervlaktewaterpeilen gerekend wordt, dan is de berekende factor nog steeds bruikbaar in SWAP.

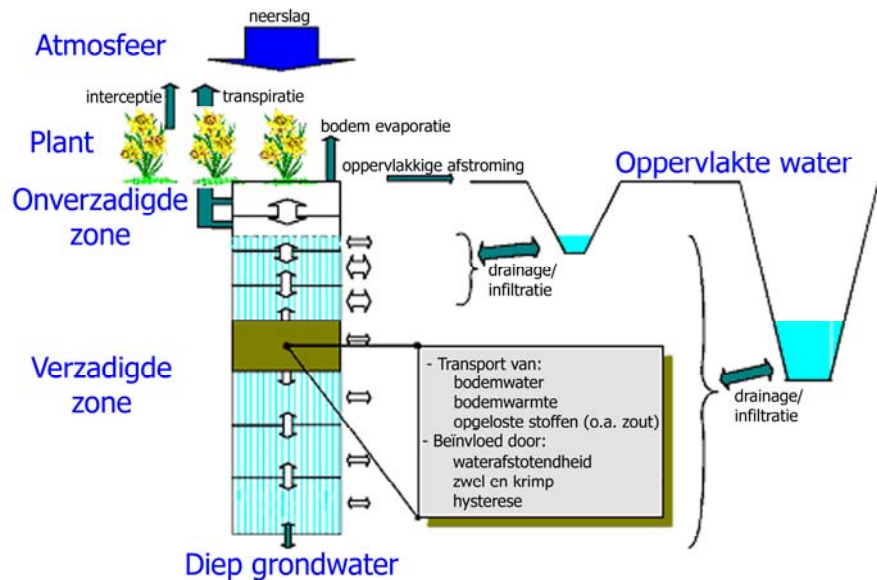
3.4 Regionaal model

3.4.1 Regionaal model op basis van SWAP

De hoeveelheid kwel of wegzijging berekend met het tweedimensionale grondwatermodel wordt bepaald aan de hand van het verschil tussen het grondwaterniveau in de polder en de waterstand in

de rivieren. Om de grondwaterstanden in de polder goed te kunnen berekenen is kennis van het drainagesysteem en de onverzadigde zone nodig.

Een model dat deze systemen kan simuleren is SWAP (Van Dam, 2000). SWAP is een ééndimensionaal model dat alleen in de verticale richting werkt. In Figuur 3.3 staat beknopt weergegeven welke processen en variabelen aanwezig zijn in SWAP.



Figuur 3.3. Schematische weergave van het model SWAP. Engelstalig origineel afkomstig uit de SWAP-handleiding (Kroes en Van Dam, 2003).

Deze studie vereist een regionaal model, terwijl SWAP slechts een verticale component heeft. Een methode om het SWAP model op te schalen naar een regionaal model is het verdelen van het gebied in zogenaamde rekenheden (Wösten et al., 1985) om voor elke eenheid een simulatie uit te voeren. Een rekeneenheid is een deel van een gebied dat dezelfde hydrologische eigenschappen kent. Deze methode gaat er vanuit dat de rekenheden onafhankelijk van elkaar zijn, ze beïnvloeden de hydrologie van de andere eenheden niet. Dit heeft het belangrijke gevolg dat de simulaties per rekeneenheid onafhankelijk van elkaar kunnen worden uitgevoerd. Achteraf kunnen de rekeneenheden worden samengevoegd om de totale afvoer of het watertekort van het gebied te bepalen. De FutureView methode (Droogers en Loeve, 2004) is gebaseerd op deze principes en zal als voorbeeld gebruikt worden bij deze studie.

Een regionaal model gebaseerd op SWAP is een goed instrument om de gevoeligheid voor klimaatverandering te analyseren. Aan de bovenkant van het model kunnen gewijzigde neerslag- en verdampingsreeksen ingevoerd worden, terwijl aan de onderrand van het model gewijzigde kwel- en wegzijgingsgegevens kunnen worden ingevoerd. SWAP berekent zowel potentiële verdamping als actuele verdamping, waardoor deze modeluitkomsten ook gebruikt kunnen worden om schade aan landbouw en natuur te berekenen. Dit is een groot voordeel van SWAP ten opzichte van een eenvoudig grondwatermodel.

Het regionale model dat voor de Quarles van Ufford polder gemaakt is, bestaat uit 78 SWAP-kolommen. Elk peilgebied zal één kolom krijgen, met één waarde voor elke eigenschap. Elk peilgebied zal dus als homogeen worden beschouwd.

3.4.2 Opzet SWAP-kolom

De SWAP-kolommen binnen het model zijn elk 4 m diep, zodat de kolommen korter zijn dan de dikte van de deklaag (zie paragraaf 2.3). Dit is van belang, want in de deklaag is de grondwaterstroming verticaal, en daaronder niet meer. Elke kolom bestaat uit twee materialen, de zogenoemde bovengrond (van maaiveld tot -50 cm) en de ondergrond -50 cm tot -400 cm.

De SWAP-kolommen kennen drie randvoorwaarden: neerslag en referentieverdamping aan de bovenkant van het model, het drainagesysteem aan de zijkanten van het model, en de kwel- en wegzijgingsfluxen aan de onderkant van het model.

De neerslag en de referentieverdamping komen uit een dagelijkse reeks van het dichtstbijzijnde meteorostation (Megen).

Het drainagesysteem bestaat uit drie delen, de primaire en de secundaire drainage via het oppervlaktewater en de buisdrainage. Voor de oppervlaktewatersystemen wordt het peil van de polder als waterhoogte ingesteld. De slootafstand en de weerstand van het drainagesysteem zijn ook van belang.

De randvoorwaarde aan de onderkant van het model is een functie die de kwel uitrekent aan de hand van de grondwaterstand en de rivierstanden. Met behulp van het tweedimensionale grondwatermodel is een relatie tussen het stijghoogteverschil tussen de polder en de rivieren en de hoeveelheid kwel vastgesteld (zie paragraaf 3.3), zodat deze informatie gebruikt kan worden om de actuele kwel te bepalen.

3.4.3 Gevoeligheidsanalyse SWAP-kolom

De gevoeligheid van bepaalde variabelen in SWAP is uitvoerig onderzocht door Kroes et al. (2000). Zij concludeerden voor grasland op kleigrond dat voor de hoeveelheid water die afgevoerd wordt via drainage de eigenschappen van de primaire drainage het belangrijkste zijn. Voor de grondwaterstanden is de doorlatendheid van de ondergrond de meest bepalende factor.

De kwel wordt berekend met behulp van de rivierstanden en de grondwaterstand in de kolom. De grondwaterstand en de kwel zullen daarom de te onderzoeken variabelen zijn.

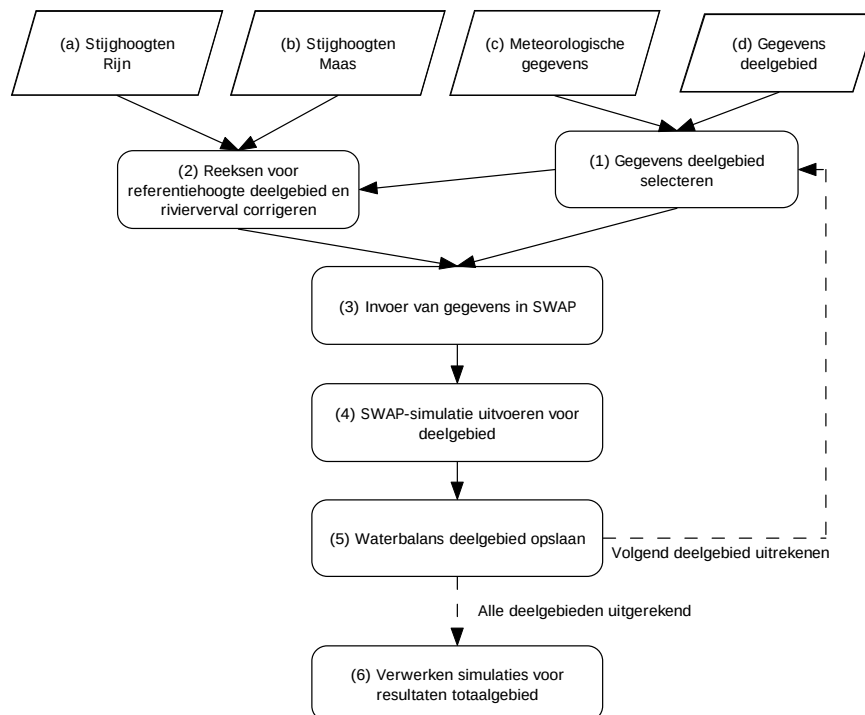
Peilgebied MWO17 gelegen langs de Waal dient als voorbeeldgebied. Er zal een standaardsimulatie uitgevoerd worden voor 2004, waarna de gevoeligheid van de uitkomsten voor een aantal parameters wordt vastgesteld. Deze zijn:

- weerstand primaire drainagesysteem
- slootafstand primaire drainagesysteem
- weerstand secundaire drainagesysteem
- slootafstand secundaire drainagesysteem
- verzadigde doorlatendheid ondergrond.

De verwachting is dat de slootafstanden weinig invloed op de kwel en wegzijging hebben, omdat in SWAP de drainageflux wordt berekend door het peilverschil tussen grondwater en oppervlaktewater te delen door de drainageweerstand. De drainageweerstand is een weerstand die afhankelijk is van de weerstand van de bodem en de slootafstanden. De slootafstand is dus een onderdeel van de drainageweerstand en wordt daarom als losstaande variabele niet gebruikt door SWAP voor de berekening van de drainageflux.

3.4.4 Ontwikkeld model

Deze studie maakt gebruik van een modelopzet die rekening houdt met de stijghoogtes van rivieren. Een soortgelijke studie is niet eerder uitgevoerd met SWAP als regionaal model en vraagt daarom om een nieuwe modelopzet om de randvoorwaarde aan de onderkant van de SWAP-kolom te bepalen.



Figuur 3.4. Schematische weergave modelopzet. Letters geven datasets aan, getallen geven processen in het model aan.

Figuur 3.4 geeft de opzet van het model. In de twee onderstaande paragrafen zullen de gegevens die het model gebruikt en de processen die het model doorloopt in detail besproken worden. Het model gebruikt een database met diverse tabellen, waarin alle invoer en uitvoer wordt opgeslagen.

3.4.4.1 Datasets

Dataset **a** en **b** zijn de rivierpeilen van de Waal en de Maas, gemeten in respectievelijk Tiel en Grave-Beneden. Deze data zijn afkomstig van WaterBase.nl.

Dataset **c** bestaat uit de meteorologische grootheden neerslag en referentieverdamping. De neerslaggegevens zijn afkomstig van station Megen en de referentieverdamping is gemeten op station Herwijnen.

Dataset **d** zijn de gegevens per deelgebied van de simulatie. Per deelgebied heeft elke variabele één waarde. Nominale gegevens, zoals landgebruik, krijgen per peilgebied de waarde die het meeste voorkomt binnen het gebied. Gegevens met een getalswaarde worden gemiddeld, tenzij anders is vermeld. De gebruikte gegevens zijn:

- Zomer- en winterpeil van het oppervlaktewater.
- Fysische eigenschappen van de bodem. Deze worden bepaald met de Staringreeks (Wösten et al., 2001), gebruikmakend van de textuurgegevens behorende tot het bodemtype van het gebied afkomstig uit de bodemkaart

- Ruimtelijke drainagegegevens uit de STONE-database (Beusen et al., 2002). Deze database bevat de drainageweerstand en de slootdichtheden voor het primaire en secundaire drainagesysteem en de aanwezigheid en de gemiddelde diepte van het buisdrainagesysteem in cellen van 250 x 250 m. Sloopdichtheden worden omgerekend naar een gemiddelde slootafstand met onderstaande formule:

$$L = \frac{250^2}{D} \quad (3.10)$$

Termen:

L	Gemiddelde slootafstand	[m]
D	Aantal meter sloot per cel	[m]

De weerstanden worden gemiddeld volgens het geometrische gemiddelde, gegeven in onderstaande formule:

$$\overline{\ln(c)} = \frac{1}{A} \int_A \ln(c) \cdot dA \quad (3.11)$$

Termen:

c	Weerstand drainagesysteem	[d]
A	Oppervlakte peilgebied	[m ²]

- Maaiveldshoogte ten opzichte van NAP. Deze hoogte is afgeleid uit het AHN (Actueel Hoogtebestand Nederland).
- Tussen de kwelintensiteit per meter stijghoogteverschil, de eigenschappen van de aquifer en de deklaag en de afstand tot de rivier bestaat een verband (zie paragraaf 4.1 voor details). De afstand tot de rivier die de gemiddelde kwel per meter stijghoogteverschil weergeeft, wordt bepaald met onderstaande formule:

$$\bar{x} = \frac{\int_A x \cdot factor(x) dA}{\int_A factor(x) dA} \quad (3.12)$$

Termen:

x	Afstand tot de rivier	[m]
$factor(x)$	Constante afhankelijk van deklaag, de aquifer en de afstand tot de rivier	[-]
A	Oppervlakte peilgebied	[m ²]

Per peilgebied worden er vier afstanden voor de locatie van de gemiddelde kwel gedefinieerd:

- afstand tot de Waal bij hoogwater (afstand tot de winterdijk)
- afstand tot de Waal bij laagwater (afstand tot het zomerbed)
- afstand tot de Maas bij hoogwater (afstand tot de winterdijk)
- afstand tot de Maas bij laagwater (afstand tot het zomerbed).

Het is hoogwater als het waterpeil in de rivier boven de hoogte van de uiterwaarden uitstijgt. Deze hoogte is per peilgebied vastgesteld met behulp van het AHN (AHN, 2005).

- Fractie zandbanen in het gebied. Dit getal geeft aan welk deel van de oppervlakte van het peilgebied bestaat uit zandbanen. Uit diverse analyses met het tweedimensionale grondwatermodel is gebleken dat de aanwezigheid van zandbanen de kwelintensiteit met een factor 10 verhoogt. De kwelfactor wordt daarom aangepast aan de fractie zandbanen:

$$factor = f \cdot 10 \cdot factor + (1 - f) \cdot factor \quad (3.13)$$

Termen:

$factor$	Kwelfactor	[-]
f	Fractie zandbanen in het peilgebied	[-]

- Landgebruik. Het landgebruik is gebaseerd op de waarden uit de LGN4 (LandGebruik Nederland) kaart. Het landgebruik heeft invloed op de verdamping.
- Correctiewaarde rivierhoogte. De reeksen met gemeten rivierhoogtes die voor alle deelgebieden gebruikt worden zijn meetwaarden van één punt (Tiel voor de Waal en Grave-Beneden voor de Maas). Om per deelgebied de werkelijke rivierhoogte te weten moeten de rivierhoogtes gecorrigeerd worden voor verval. Per gebied is de gemiddelde afstand tot Tiel en Grave-Beneden bepaald, gemeten door het midden van de rivier. Met behulp van deze afstand worden voor elk peilgebied de werkelijke rivierhoogtes berekend.

Met behulp van het gemiddelde peil in Nijmegen is voor elk peilgebied langs de Waal een correctiewaarde vastgesteld met de volgende formule:

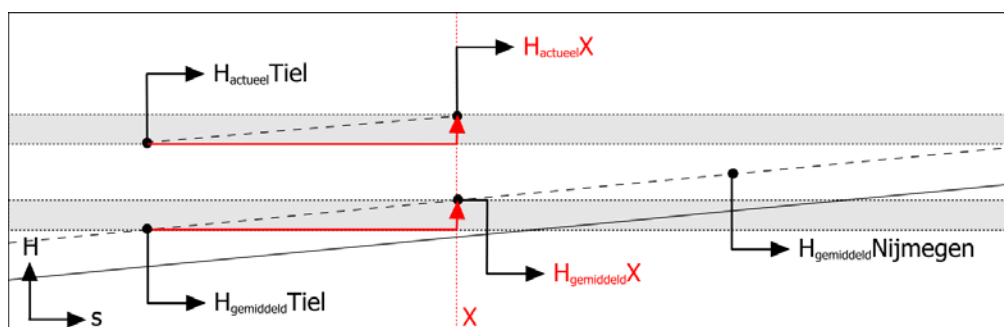
$$CorWaal = \frac{s}{S} (H_{Nijmegen} - H_{Tiel}) \quad (3.14)$$

Termen:

$CorWaal$	Correctie voor het rivierpeil van de Waal	[m]
s	Afstand vanaf Tiel in de richting van Nijmegen	[m]
S	Totale afstand tussen Nijmegen en Tiel	[m]
H_x	Rivierpeil bij gemiddelde afvoer op locatie x	[m]

Deze correctiewaarde moet worden opgeteld bij de waarden uit de meetreeks van Tiel om zo de reeks voor het peilgebied in kwestie te krijgen.

Figuur 3.5 laat zien hoe de rivierhoogtecorrectie werkt. De rivierhoogte bij gemiddelde afvoer langs peilgebied X wordt bepaald aan de hand van de rivierhoogtes bij gemiddelde afvoer van Nijmegen en Tiel. Het verschil tussen de hoogte bij gemiddelde afvoer langs peilgebied X en de hoogte bij gemiddelde afvoer in Tiel (het grijze gebied in Figuur 3.5) wordt opgeteld bij de actuele hoogte in Tiel om de actuele rivierhoogte langs peilgebied X te krijgen.



Figuur 3.5. Schematische weergave van rivierhoogtecorrectie.

Voor de Maas is een soortgelijke procedure uitgevoerd voor de hoogwatersituatie met behulp van de rivierstanden bij Lith-Boven en Grave-Beneden.

$$CorMaas = \frac{s}{S} (H_{Grave-Beneden} - H_{Lith-Boven}) \quad (3.15)$$

Termen:

<i>CorMaas</i>	Correctie voor het rivierpeil van de Maas	[m]
<i>s</i>	Afstand vanaf Grave-Beneden in de richting van Lith-Boven	[m]
<i>S</i>	Totale afstand tussen Grave-Beneden en Lith-Boven	[m]
<i>H_x</i>	Rivierpeil bij bekende hoge afvoer op locatie x	[m]

Tijdens een gemiddelde afvoer in de Maas is het peil constant en gelijk aan het stuwpeil dat bij dat deel van de Maas hoort. Daarom wordt bij deze correctie geen gebruik gemaakt van de rivierhoogte bij gemiddelde afvoer, maar van de rivierhoogte bij een bekende hoge afvoer waarbij de stuwen niet meer van invloed zijn.

3.4.4.2 Processen

Binnen het model worden een aantal processen (zie Figuur 3.4) uitgevoerd om de gewenste modelresultaten te verkrijgen:

- Proces **1** selecteert de juiste gegevens per peilgebied en de juiste meteorologische meetwaarden voor neerslag en referentieverdamping uit de database.
- Proces **2** corrigeert de rivierstanden voor verval en berekent de rivierhoogten ten opzichte van maaiveld voor het peilgebied dat gesimuleerd wordt.
- Proces **3** voegt de gegevens in de juiste invoerfiles van SWAP.
- Proces **4** voert de simulatie uit voor dat deelgebied. Er zal één jaar worden gesimuleerd om het model op te starten en daarna zal het juiste jaar gesimuleerd worden.
- Proces **5** verwerkt de output files en slaat de waterbalansen op in een tabel in de database. Hierna gaat het model terug naar proces 2 tot alle peilgebieden gesimuleerd zijn.
- Proces **6** verwerkt alle waterbalansen tot een totaalbalans voor het gehele gebied, waarin de kwel op dagbasis wordt vastgesteld.

3.4.5 Simulaties MWO17

Om een beeld van de kwel en wegzijging te krijgen zijn eerst een aantal simulaties voor peilgebied MWO17 uitgevoerd. Dit is gebeurd voor 1995, waarin de Waal extreme hoogtes bereikte en voor de drie meest recente volledige jaren: 2002, 2003 en 2004.

3.4.6 Simulaties gehele polder

Na het voltooien van de simulaties voor MWO17, is het model getest voor het gehele gebied. Om de mogelijkheden van het model te testen op drie tijdschalen zijn de volgende situaties uitgewerkt:

- De jaren 1995, 2002, 2003 en 2004 zijn doorgerekend om de resultaten op jaarbasis te vergelijken.
- Voor het extreme hoogwater op 2 februari 1995 en de extreme droogte op 18 juli 2003 zijn resultaten op dagbasis gegeven.
- Het jaar 2003 had een overgang van een winter met hoge rivierstanden, naar een zomer met extreme droogte en is daarom op kwartaalbasis gesimuleerd.

3.5 Verificatie modelresultaten

3.5.1 Waterbalans 2002

De hoeveelheid kwel die door het model berekend is, is geverifieerd aan de hand van een waterbalans (zie Formule 3.16) van de polder Quarles van Ufford waarin de kwel als restterm diende.

$$P - ET + U + Q + \Delta S = 0 \quad (3.16)$$

Termen:

P	Neerslag	[mm]
ET	Actuele evapotranspiratie	[mm]
U	Kwel/wegzijging (diepe kwel en wegzijging, laterale aan- en afvoer grondwater)	[mm]
Q	Oppervlaktewaterfluxen	[mm]
ΔS	Bergingsverandering	[mm]

Waterschap Rivierenland heeft een waterbalans gemaakt van het jaar 2002 (zie Tabel 3.1). Deze balans geeft een uitstroom die 172 mm groter is dan de instroom. Dit betekent dat er 172 mm kwel is voor de gehele polder Quarles van Ufford gedurende deze periode. Deze balans hanteert potentiële verdamping. Gemiddeld genomen is in Nederland de actuele verdamping ongeveer 15% kleiner dan de potentiële verdamping (De Bruin, 1998). De hoeveelheid verdamping zakt dan naar 388 mm, waardoor de hoeveelheid kwel uitkomt op 103 mm.

Tabel 3.1. Waterbalans voor 2002 volgens Ketelaar (2005)

Post	In (mm)	Post	Uit (mm)
Neerslag	875	Verdamping	457
Inlaat water	173	Uitlaat water	767
Lozingen water	4		
	1052		1224

De kwelterm is een relatief kleine term (9% van inkomend water) in verhouding tot neerslag (76%), gecorrigeerde verdamping (34%) en de uitlaat van water (66%). De gegevensreeksen voor de uitlaatpunten in het gebied vertonen voor de jaren 2003 en 2004 een aantal grote gaten. Hierdoor is het onmogelijk om een waterbalans te maken die nauwkeurig genoeg is om de kwel te bepalen.

3.5.2 Grondwatermodel Witteveen en Bos

In 2005 heeft adviesbureau Witteveen en Bos een grondwatermodel opgesteld waarmee een nieuw peilbesluit voor de polder is gemaakt. Tijdens deze studie is voor het zomerhalfjaar van 1996 de kwel en wegzijging uitgerekend. De resultaten hiervan zijn vergeleken met het model.

Het grondwatermodel gebruikt een nauwkeurige ruimtelijke resolutie (100 x 100 m), terwijl het ontwikkelde model een berekening per peilgebied maakt.

3.5.3 Vergelijken evapotranspiratie

Het model is ook getoetst door de actuele en potentiële evapotranspiratie te vergelijken met metingen. Dit geeft een beeld van de nauwkeurigheid van verdamping. De verdamping in droge en zeer natte periodes is sterk afhankelijk van de vochttoestand van de bodem. Kwel en wegzijging hebben nabij de rivier veel invloed op de vochttoestand waardoor een vergelijking tussen berekende en gemeten verdamping een mogelijke verificatie van het model is. Actuele verdamping wordt bepaald vanuit de potentiële verdamping, waardoor fouten in de potentiële verdamping doorwerken in de actuele

verdamping. Het model is daarom ook geverifieerd door berekende verdampingstekorten (potentiële minus actuele verdamping) te vergelijken met metingen.

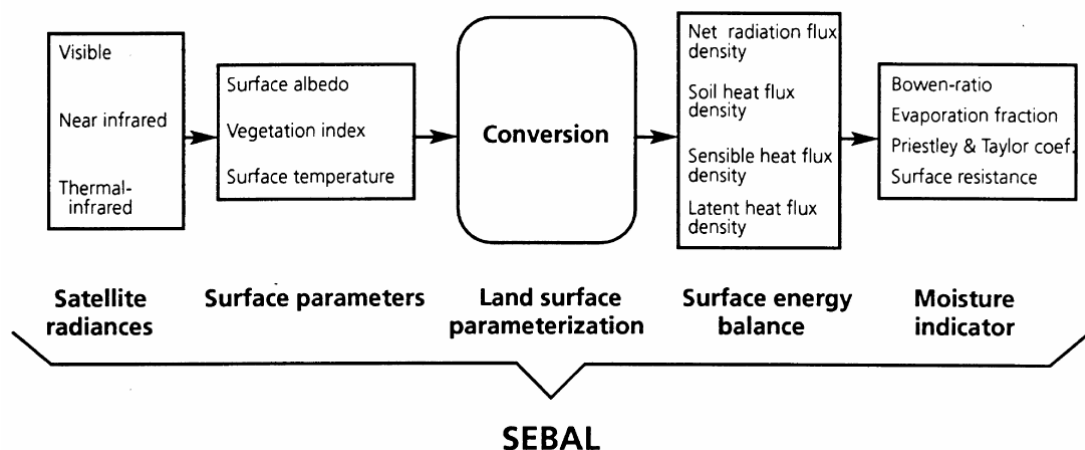
De totale evapotranspiratie is de som van transpiratie door vegetatie en verdamping van water via andere wegen. De totale evapotranspiratie is een onderdeel van de energiebalans van het landoppervlak:

$$Q^* = G_0 + H + \lambda ET \quad (3.17)$$

Termen:

Q^*	Netto straling	[W m ⁻²]
G_0	Bodemwarmteflux	[W m ⁻²]
H	Voelbare warmteflux	[W m ⁻²]
λET	Latente warmteflux	[W m ⁻²]

De latente warmteflux is de hoeveelheid energie die gebruikt wordt voor de verdamping van water. De evapotranspiratie is bepaald met de SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) methode (Bastiaanssen et al., 1998). SEBAL kan met een beperkt aantal satellietbeelden en meteorologische gegevens de energiebalans van het landoppervlak berekenen, waarin de latente warmteflux als restterm dient (Figuur 3.6).



Figuur 3.6. Schematisch overzicht van het SEBAL algoritme (Bastiaanssen et al., 1998).

SEBAL werkt volgens eenvoudige natuurkundige principes. Donkere locaties nemen meer warmte op dan lichte locaties door hun lagere albedo. Hierdoor zal de temperatuur van donkere objecten hoger zijn dan van lichte objecten, wanneer zij dezelfde energie ontvangen. Een donkere kleur kan echter ook het gevolg zijn van water. Wanneer locaties nat zijn, zal een deel van de ontvangen energie worden gebruikt om water te verdampen en worden zij kouder. De aanwezigheid van vegetatie beïnvloedt het albedo, de temperatuur en de vochtigheid van de locatie.

In het zichtbare licht is de helderheid van een locatie zichtbaar. In het nabije infrarood is de vochtigheid van een locatie goed zichtbaar, omdat water nauwelijks reflecteert in deze band (bepaald bereik van golflengtes). Ook is de activiteit van vegetatie goed zichtbaar in deze band. De thermische infraroodband geeft informatie over de temperatuur van de locatie. Aan de hand van beelden uit deze satellietbanden bepaalt SEBAL de juiste waarden van het albedo, de vegetatiedichtheid en de grondtemperatuur voor een locatie. Het voordeel van deze methode is dat er geen informatie nodig is over het landgebruik, waardoor het geen problemen geeft als binnen één pixel van een satellietbeeld

meerdere landgebruikvormen plaatsvinden. Behalve de satellietbeelden gebruikt SEBAL ook de meteorologische grootheden:

- windsnelheid
- luchtvochtigheid
- luchttemperatuur
- inkomende zonnestraling.

3.6 Klimaatverandering

3.6.1 Gevolgen van kwel en wegzijging

In een veranderend klimaat is het voor het waterbeheer essentieel om te weten hoe de hoeveelheden kwel en wegzijging veranderen. Hierdoor kan bepaald worden hoeveel water er extra aan- en afgevoerd dient te worden om de oppervlaktewaterpeilen te kunnen handhaven. Het is ook van belang te weten of deze veranderende hoeveelheden kwel en wegzijging voor extra of juist voor minder schade aan landbouw en natuur zorgen. Met het model is onderzocht hoe groot de kwel en wegzijgingsfluxen zijn en in hoeverre deze fluxen bijdragen aan schade in het heden, en in 2050 onder invloed van drie verschillende klimaatscenario's. Deze analyses zijn uitgevoerd met de originele en getransformeerde reeksen neerslag, verdamping en rivierhoogtes van 1993 – 2004. Het verloop van het jaar 2003 is in detail bekeken om de invloed van klimaatverandering op kwel door rivierpieken en wegzijging tijdens extreme droogte te begrijpen.

3.6.2 Klimaatscenario's

De bestaande reeksen van 12 jaar (1993 – 2004) gemeten neerslag, verdamping en rivierhoogtes in de Maas en de Waal zijn voor drie klimaatscenario's getransformeerd naar een reeksen die representatief zijn voor die scenario's. Deze drie scenario's zijn gebaseerd op de gegevens uit het Basisrapport bij het advies van de Commissie Waterbeheer 21e eeuw en op gegevens uit Beersma et al. (2004). Het gaat hier om het middenscenario 2050, het hoge scenario 2050 en het droge scenario voor 2050.

Tabel 3.2. Gebaseerd op Scenario's voor droogtestudie Nederland (ICIS, 2003)

	Klimaatscenario's		
	2050 Midden	2050 Hoog	2050 Droog
Temperatuur	+1 °C	+2 °C	+2,3 %
Gemiddelde neerslag	+3 %	+6 %	-4 %
Gemiddelde zomerneerslag	+1 %	+2 %	-20 %
Gemiddelde winterneerslag	+6 %	+12 %	+13 %
Neerslagintensiteit	+10 %	+20 %	-
Zomerverdamping	+4 %	+8 %	+18 %

De methoden die zijn gebruikt voor het omrekenen van neerslag, verdamping en rivierafvoeren zijn eenvoudige en grove methoden. Hiervoor is gekozen om twee redenen.

In de eerste plaats is de bandbreedte waarbinnen de klimaatveranderingen kunnen plaatsvinden dermate groot (IPCC, 2001) dat het geen zin heeft om zeer nauwkeurige berekeningen voor de nieuwe reeksen te maken. In de tweede plaats is binnen het tijdsbestek van deze studie slechts een eenvoudige methode mogelijk.

3.6.3 Veranderende neerslag en verdamping

De neerslagreeksen zijn getransformeerd worden volgens de methode van Droogers en Loeve (2005). Zij hebben een snelle methode ontwikkeld (zie Formule 3.18) om een neerslagreeks aan te passen, zodat deze voldoet aan alle eigenschappen van het gekozen klimaatscenario.

$$R_{cc} = R + R \cdot I \cdot e^{-a \left(1 - \frac{R}{R_{max}}\right)} \quad (3.18)$$

Termen:

R_{cc}	Dagelijkse neerslag onder klimaatverandering	[mm d ⁻¹]
R	Dagelijkse neerslag in huidige meetreeks	[mm d ⁻¹]
R_{max}	Maximale neerslag in een jaar	[mm d ⁻¹]
I	Toename neerslagintensiteit	[-]
a	Constante	[-]

Deze methode gaat er vanuit dat er zowel voor zomer als voor winter een aparte constante te vinden is waarbij de veranderende neerslaghoeveelheid gehaald wordt, en de toename in neerslagintensiteit gewaarborgd blijft. De constante heeft een kleine positieve waarde wanneer een toename in neerslagintensiteit samen gaat met een relatief grote toename in neerslaghoeveelheid, bijvoorbeeld in de winters. Bij deze waarde (ongeveer 1) worden een groot deel van de buien heviger. Als de constante een grotere positieve waarde krijgt, bijvoorbeeld in de zomer (ongeveer 40), dan neemt de neerslag minder toe. Alleen de hardste buien worden nu heviger.

De verdamping is vermenigvuldigd met de toename die de scenario's voorspellen.

In de gebruikte klimaatscenario's is nog geen rekening gehouden met de invloeden van hogere CO₂-concentraties op fotosynthese en verdamping. Doomen en Witte (2004) laten zien dat er een mogelijkheid bestaat dat een CO₂-toename in de atmosfeer tot grote verdampingsreductie bij planten leidt, omdat planten efficiënter in hun koolstofbehoefte kunnen voorzien bij een hogere CO₂-concentratie.

3.6.4 Veranderende afvoeren

De veranderende neerslagpatronen hebben een grote invloed op de gemiddelde afvoeren van de rivieren. Van Deursen (2002) heeft voor elk scenario berekend wat de verandering is in gemiddelde afvoer per decade in de Rijn en de Maas, wanneer de verschillende klimaatscenario's worden toegepast.

De gegevens voor de Rijn en de Maas zijn met behulp van de uitkomsten van Van Deursen omgerekend naar reeksen die representatief zijn voor de gebruikte klimaatscenario's. Dit is gebeurd door eerst een relatie tussen stijghoogte en afvoer af te leiden met behulp van de waternormalen van de meetlocaties in Tiel en Grave Beneden (Waternormalen.nl, 2005). Vervolgens zijn de verkregen debieten vermenigvuldigd met de gemiddelde decadeverandering, om vervolgens weer terug te worden berekend naar een stijghoogte.

Deze methode is slechts een grove methode om de rivierreeksen om te rekenen. Er zijn nog geen standaardmethoden beschikbaar om een rivierreeks om te zetten. Deze methode gebruikt een aantal veronderstellingen, die misschien resulteren in een onnauwkeurige schatting. Er wordt vanuit gegaan dat de veranderde gemiddelde afvoeren in Lobith en Borgharen overeenkomen met de veranderde gemiddelde afvoeren in Tiel en Grave Beneden. Dit kan verschillen door de aanwezigheid van zijrivieren en kanalen.

3.6.5 Schade

Om schade aan landbouw en natuur te kunnen definiëren is een definitie van schade noodzakelijk. Deze studie gebruikt de relatieve opbrengst als maat voor schade (zie Formule 3.19), omdat er een sterke correlatie bestaat tussen de verhouding van actuele en potentiële gewasopbrengst en de verhouding van actuele en potentiële transpiratie (Feddes et al., 1984).

$$RO = \frac{O_a}{O_p} = \frac{T_a}{T_p} \quad (3.19)$$

Termen:

RO	Relatieve opbrengst	[-]
O_a	Actuele opbrengst	[kg ha ⁻¹]
O_p	Potentiële opbrengst	[kg ha ⁻¹]
T_a	Actuele transpiratie	[mm]
T_p	Potentiële transpiratie	[mm]

3.6.6 Simulaties

Er zijn zeven simulaties uitgevoerd om de veranderingen in hoeveelheden kwel en wegzijging te onderzoeken. Per klimaatscenario zijn er twee simulaties uitgevoerd, één met alleen de meteorologische reeksen aangepast voor klimaatverandering en ongewijzigde rivierstanden en één met zowel de meteorologische gegevens als de rivierstanden aangepast.

De simulaties (en hun gebruikte afkortingen in de resultaten) om de veranderde kwelhoeveelheden te onderzoeken zijn:

- de ongewijzigde meetreeksen (Heden)
- 2050 Midden zonder gewijzigde rivieren (2050M-)
- 2050 Midden met gewijzigde rivieren (2050M+)
- 2050 Hoog zonder gewijzigde rivieren (2050H-)
- 2050 Hoog met gewijzigde rivieren (2050H+)
- 2050 Droog zonder gewijzigde rivieren (2050D-)
- 2050 Droog met gewijzigde rivieren (2050D+).

Er zijn vier simulaties uitgevoerd om de schade aan landbouw en natuur door kwel en wegzijging in een veranderend klimaat te onderzoeken en vier simulaties gebruikt van de vorige reeks simulaties:

- de ongewijzigde meetreeksen (gelijk aan Heden)
- de ongewijzigde meetreeksen met kwel en wegzijging uitgeschakeld
- 2050 Midden (gelijk aan 2050M+)
- 2050 Midden met kwel en wegzijging uitgeschakeld
- 2050 Hoog (gelijk aan 2050H+)
- 2050 Hoog met kwel en wegzijging uitgeschakeld
- 2050 Droog (gelijk aan 2050D+)
- 2050 Droog met kwel en wegzijging uitgeschakeld.

Een belangrijk detail voor alle simulaties is dat er geen rekening wordt gehouden met beregning. Berekende schades in het heden en de toekomst kunnen daarom in werkelijkheid lager uitvallen omdat watertekorten worden bestreden. De simulaties geven echter wel een beeld van de grootte van de invloed van klimaatverandering. Het water dat beschikbaar is voor beregning is beperkt en klimaatverandering heeft invloed op deze hoeveelheid.

4 Resultaten en discussie

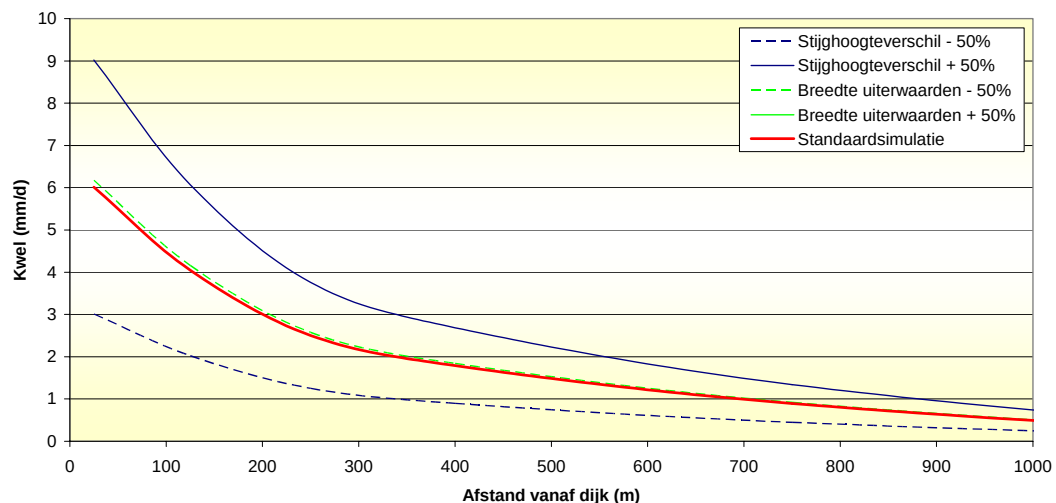
4.1 Tweedimensionaal grondwatermodel

4.1.1 Standaardsituatie

Het tweedimensionale grondwatermodel is uitgevoerd voor de situatie zoals weergegeven in Figuur 3.2. Figuur 4.1 laat zien dat de kwel dicht achter de dijk ongeveer 6 mm d^{-1} is. De modelberekeningen geven aan dat in deze situatie vanaf 1000 m vanaf de rivier de invloed van rivierkwel nauwelijks meer merkbaar is (minder dan $0,5 \text{ mm d}^{-1}$), zoals zichtbaar is in de standaardsimulatie in Figuur 4.1 en Figuur 4.2.

4.1.2 Gevoeligheidsanalyse

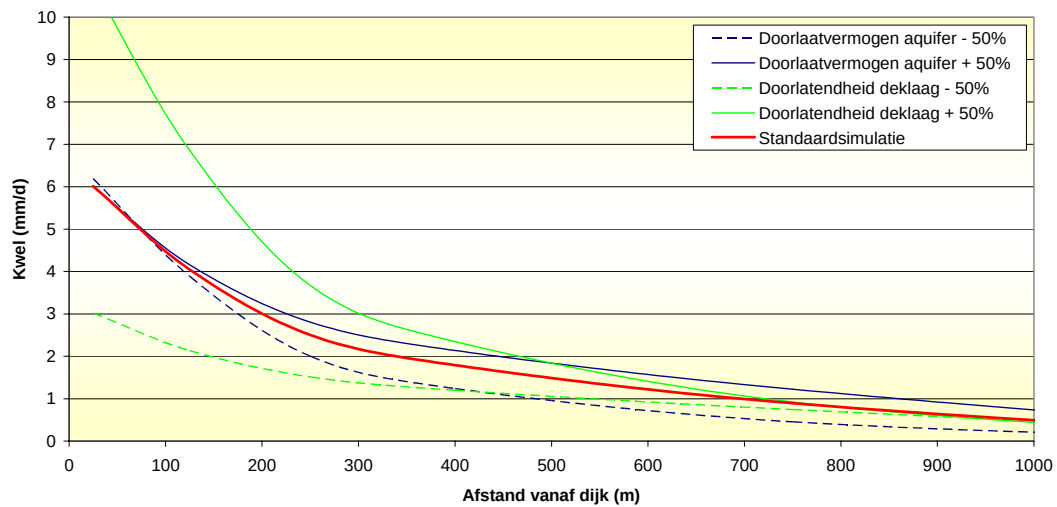
Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat de hoeveelheid kwel het meest gevoelig is voor het stijghoogteverschil en de doorlatendheid van de deklaag (zie Figuur 4.1 en Figuur 4.2). Bij een toename van het stijghoogteverschil met 50% neemt de kwel met 50% toe op alle afstanden van de dijk. Er is dus een één-op-één relatie tussen stijghoogte en kwel. De hoeveelheid kwel is ongevoelig voor de breedte van de uiterwaarden in een hoogwatersituatie. In zulke situaties maken de uiterwaarden deel uit van de rivier en zal de druk in de aquifer pas gaan afnemen dichtbij de winterdijk. In een laagwatersituatie zijn de uiterwaarden onderdeel van het land en gaat de druk in de aquifer al afnemen vanaf de rivieroever. In zulke situaties is de breedte van de uiterwaarden wel van belang.



Figuur 4.1. Gevoeligheid kwel voor verandering van stijghoogteverschil en verandering van de breedte van de uiterwaarden in een hoogwatersituatie.

De hoeveelheid kwel dicht achter de dijk is het meest gevoelig voor de doorlatendheid van de deklaag (zie Figuur 4.2), terwijl verder van de dijk het doorlaatvermogen van de aquifer het meest bepalend is. De grote gevoeligheid van de hoeveelheid kwel dicht achter de dijk voor de dikte van de deklaag is te verklaren uit het feit dat het verlagen van de weerstand op twee manieren doorwerkt. In de eerste plaats zorgt een lagere weerstand voor meer kwel totaal (zie Formule 3.6) en in de tweede plaats is het nu eenvoudiger om water kwijt te raken door de deklaag. Er zal dus relatief meer water dicht achter de dijk opkwellen en minder water verder weg.

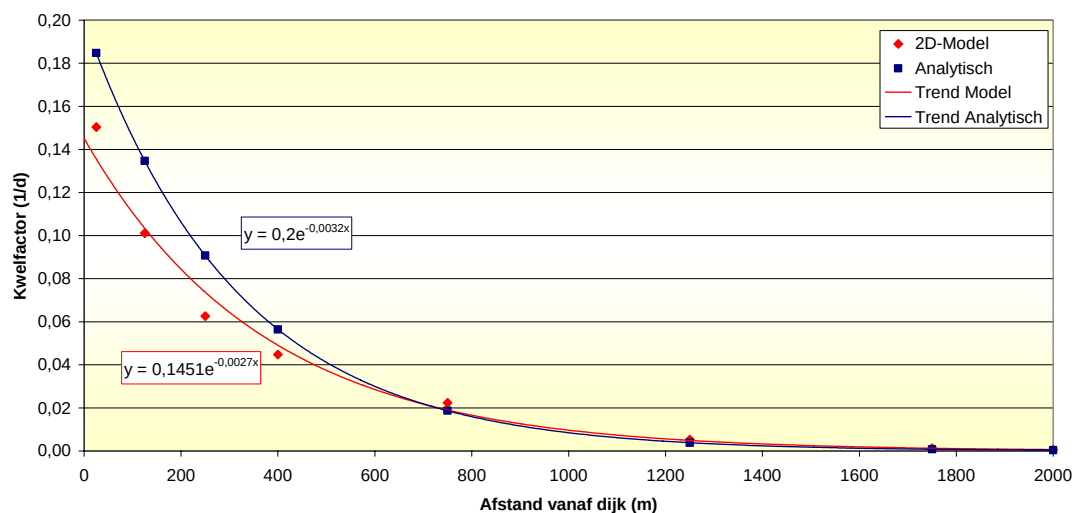
Het doorlaatvermogen van de aquifer heeft met name invloed verder van de dijk. Een groter doorlaatvermogen zorgt dat de het drukverschil zich verder kan verspreiden. Dicht achter de dijk zal de kwelhoeveelheid niet toenemen, maar verder van de dijk wel.



Figuur 4.2. Gevoeligheid kwel voor verandering van doorlaatvermogen aquifer en de doorlatendheid van de deklaag.

4.1.3 Kwelfactor

Met het grondwatermodel zijn factoren afgeleid die vermenigvuldigd met het stijghoogteverschil tussen rivier en polder de kwel opleveren. Deze factoren zijn verkregen door voor elk rekenpunt aan de bovenkant van de polder de kwelhoeveelheden berekend uit het model te delen door het hoogteverschil tussen polderpeil en rivier (zie Formule 3.8). Deze berekende factoren komen behoorlijk overeen met de kwelfactoren afkomstig uit de analytische oplossing (zie Figuur 4.3), alleen direct achter de dijk is er een verschil van ongeveer 30%.



Figuur 4.3. Vergelijking kwelfactoren afkomstig uit model en uit de analytische oplossing.

De verschillen tussen de factoren uit het grondwatermodel en de factoren uit de theoretische oplossing ontstaan door een aantal redenen. In de eerste plaats is de één dimensionale benadering niet precies

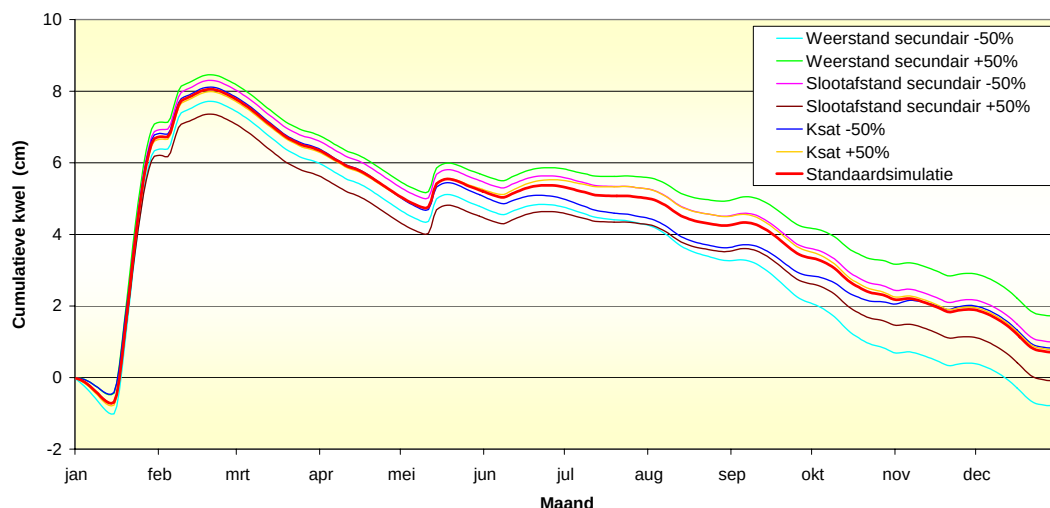
geldig exact onder de rivier. Het water stroomt hier de aquifer in, wanneer het rivierpeil hoger is dan het polderpeil. De stroming is daardoor niet volkomen horizontaal, en de stijghoogtes in de aquifer onder de rivier worden lager op grotere diepte. Hierdoor volgen de kwelfactoren niet exact de analytische oplossing. Bij kwel en wegzijging naar een rivier is er sprake van grote drukverschillen op korte afstand (enkele meters in de hoogte over honderden meters in afstand), waardoor de stroming ook niet volkomen horizontaal is, en waardoor het gebruik van de veronderstelling van Dupuit in de analytische oplossing discutabel is.

De factoren berekend met het tweedimensionale grondwatermodel zullen gebruikt worden in het model. Tijdens het berekenen van deze factoren is steeds dezelfde geohydrologische opbouw gebruikt.

4.2 Gevoeligheidsanalyse SWAP

De grondwaterstanden in een polder zijn volgens Kroes et al. (2000) gevoelig voor de eigenschappen van het drainagesysteem en de verzadigde doorlatendheid. Deze gevoeligheden zijn getest en gekwantificeerd voor peilgebied MWO17 (zie Figuur 4.5 en Figuur 4.4) met behulp van de gegevens van het jaar 2004. De grote verschillen in initiële grondwaterstanden komen door de extreme droogte uit 2003 die tot dan toe doorwerkt.

De weerstand (50.000 d) en de slootafstand (2.150 m) van de primaire drainage zijn erg groot vergeleken met de weerstand (1.350 d) en de slootafstand (195 m) van de secundaire drainage. Daarom zal bijna alle drainage via het secundaire systeem plaatsvinden, waardoor de grondwaterstand en de kwel ongevoelig zijn voor veranderingen in het primaire drainagesysteem. In gebieden waar de primaire drainage belangrijker is, zal het primaire systeem even gevoelig zijn als het secundaire systeem.



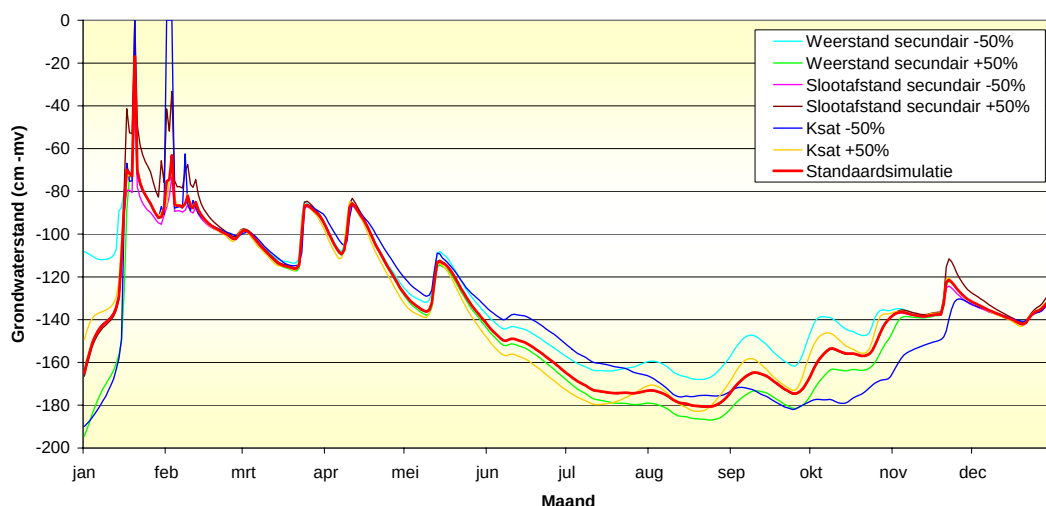
Figuur 4.4. Gevoeligheidsanalyse kwel en wegzijging voor diverse parameters in MWO17 in 2004.

Uit Figuur 4.4 blijkt dat de drainageweerstand de gevoeligste parameter is. Deze parameter heeft de grootste invloed op de cumulatieve kwel gedurende het jaar. De standaard simulatie geeft een kwelhoeveelheid van 1 cm, terwijl de simulatie met een verdubbelde drainageweerstand een hoeveelheid kwel van ongeveer 2 cm geeft en de simulatie met een gehalveerde drainageweerstand een wegzijging van 0,5 cm geeft. In Figuur 4.5 is zichtbaar dat de verschillen tussen de verschillende simulaties vooral in de zomermaanden ontstaan. In deze maanden staat het grondwater onder het

slootpeil en zorgt het drainagesysteem voor infiltratie. Wanneer het eenvoudiger wordt om water te infiltreren blijft het grondwaterpeil hoger. Dit resulteert vervolgens in een hogere wegzijging naar de rivier, die in deze maanden lager staat dan het grondwaterpeil.

Ondanks dat de theorie doet vermoeden dat de secundaire slootafstand niet van belang is, blijkt uit Figuur 4.5 dat dit wel het geval is in een situatie waarin het grondwater boven het polderpeil stijgt, zoals in januari en februari wanneer de Waal hoog staat en het veel regent. Bij een kleine slootafstand komt er minder snel water dicht bij het maaiveld, omdat de drainage sneller kan verlopen. Dit resulteert in een grote kwelhoeveelheid, omdat nu het peilverschil tussen rivier en grondwater groter is. Bij een grotere slootafstand komt er vaker water nabij het maaiveld en vermindert de kwel, omdat peilverschillen tussen grondwater en rivier kleiner worden. In een minder natte situatie (maart tot december) speelt de slootafstand een zeer beperkte rol. Toch zijn deze korte situaties van groot belang voor de kwelsom van het gehele jaar, omdat de kwelhoeveelheden zeer groot zijn bij hoge afvoeren in de rivier. Kleine verschillen in grondwaterstand kunnen dan leiden tot duidelijk zichtbare verschillen in de cumulatieve kwel gedurende het jaar (zie Figuur 4.4). De kwelvermindering die ontstaat door het vergroten van de slootafstand blijft het hele jaar zichtbaar, wanneer de standaardsimulatie vergeleken wordt met de simulatie met vergrote slootafstanden.

Deze fysische verklaring klinkt aannemelijk, maar uit de modeltheorie kan het belang van de slootafstand niet verklaard kan worden en dit dient nader onderzocht te worden.



Figuur 4.5. Gevoeligheid grondwaterstand voor diverse parameters in MWO17 in 2004.

Het gedrag van de verzadigde doorlatendheid speelt een complexere rol. Een lagere doorlatendheid zorgt bij hevige neerslag ervoor dat er eerder water op het maaiveld staat, omdat water moeilijker wordt afgevoerd. Verder heeft een lagere verzadigde doorlatendheid een algeheel vertragend effect. Dalingen van de grondwaterspiegel gaan langzamer dan bij een hogere doorlatendheid en stijgingen gaan eveneens langzamer, zoals Figuur 4.5 laat zien met de daling tussen juni en augustus en de stijging tussen september en december.

De gevoeligheidsanalyse heeft uitgewezen dat de secundaire drainageweerstand de gevoeligste parameter is. Het dus van groot belang deze nauwkeurig te bepalen. Bij zeer natte situaties is de secundaire slootafstand ook van belang, met name tijdens piekafvoeren in de rivieren. De kwel gaat dan met grote hoeveelheden, en kleine verschillen in grondwaterstand kunnen dan leiden tot duidelijk zichtbare verschillen in de cumulatieve kwel gedurende het jaar.

4.3 Regionaal model

4.3.1 Simulatie diverse jaren voor peilgebied MWO17

Het regionale model geeft grote verschillen tussen de jaren 1995, 2002, 2003 en 2004 (zie Tabel 4.1).

Tabel 4.1. Totale hoeveelheid netto kwel in peilgebied MWO17 voor vier jaren.

Jaar	Totale kwel (mm)
1995	539
2002	599
2003	81
2004	8

De vergelijking van deze vier jaren laat zien dat de kwel een zeer belangrijke post in de waterbalans is, maar dat dit alleen geldt voor jaren met hoge rivierafvoeren, zoals 1995 en 2002. De jaren 2003 en 2004 ontvangen relatief weinig kwel.

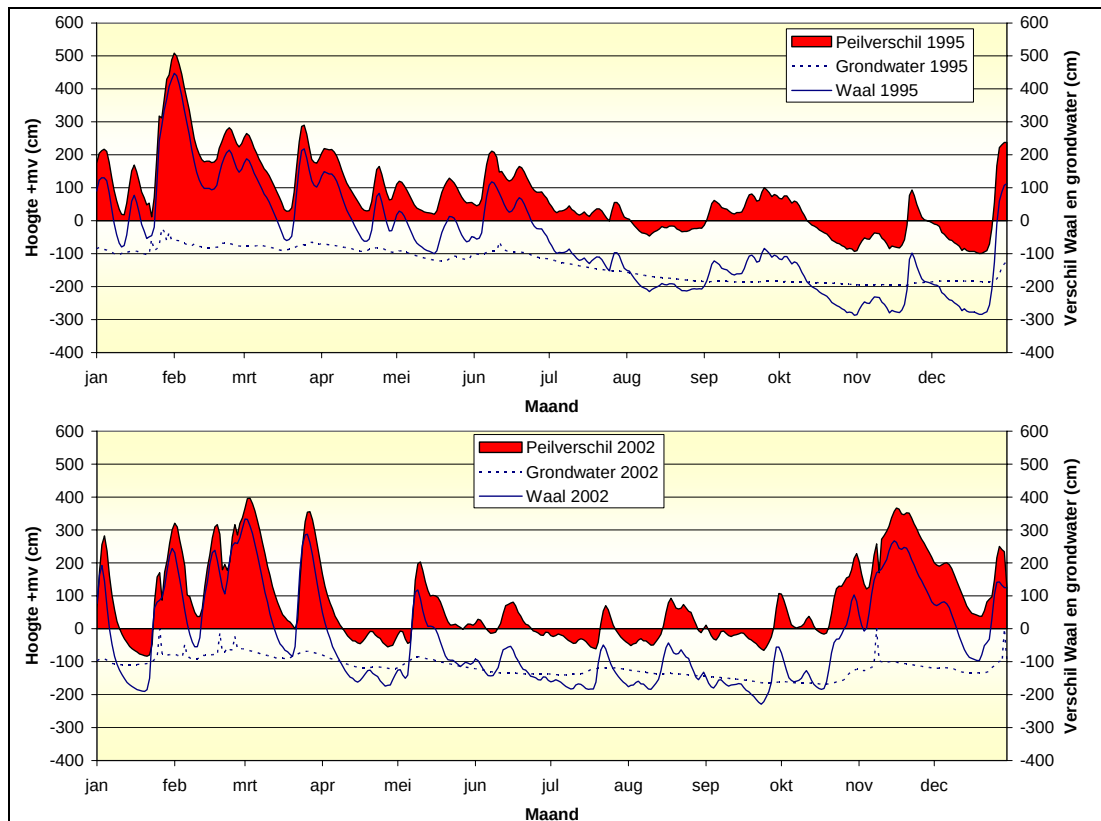
Figuur 4.6 en Figuur 4.7 laten het verloop van de kwel en de wegzijging gedurende het jaar zien voor vier verschillende jaren. In beide figuren staan de grondwaterstand en de hoogte van de Waal ten opzichte van maaiveld als een lijn. Het peilverschil tussen grondwater en rivier is een maat voor de kwel. Deze staat ingekleurd in de figuur. Boven de as is er sprake van kwel, onder de as is er sprake van wegzijging. De totale oppervlakte van deze grafiek is proportioneel met de kwel gedurende het hele jaar.

Uit de vergelijking tussen de jaargegevens (zie Tabel 4.1) en de gedetailleerde figuren (zie Figuur 4.6 en Figuur 4.7) blijkt dat de extremen in rivierafvoeren op dagbasis niet samenvallen met extremen voor kwel en wegzijging op jaarbasis:

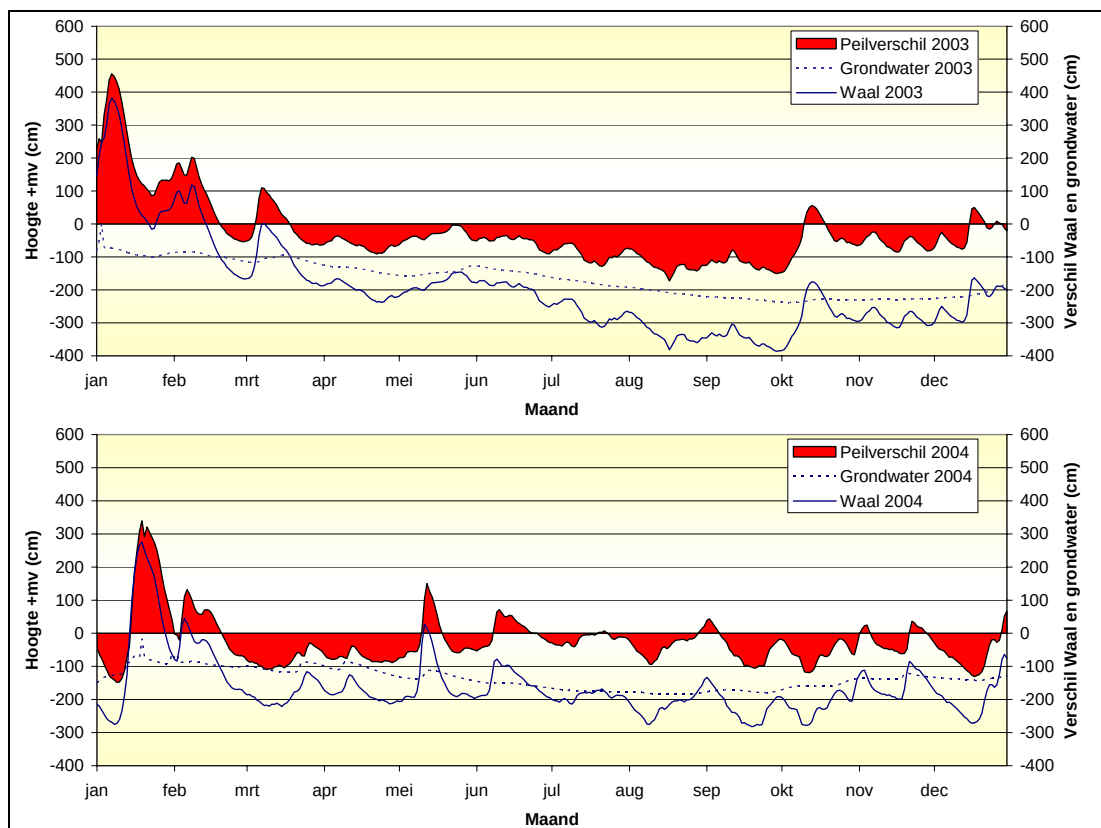
De hoogwatersituatie van 1995 (zie Figuur 4.6) kende een extreme piek begin februari, terwijl 2002 minder hoge pieken kende, maar gedurende het jaar vaker hoog stond. De hoeveelheid kwel in 2002 is zelfs hoger dan in 1995. In 1995 is er een extreme piek in februari, waarbij het water 5 m boven het maaiveld staat, maar tijdens andere piekafvoeren komt het water niet meer boven de 3 m boven maaiveld uit. In 2002 komt de Waal vijf maal boven de 3 m boven maaiveld uit. Bovendien duurt de afvoerpiek in het najaar bijzonder lang.

Voor 2003 en 2004 geldt eveneens dat het extreme jaar in rivierafvoeren en neerslag niet het extreme jaar is in kwel (zie Figuur 4.7). Het jaar 2003 kende een warme droge zomer en zeer lage rivierstanden. Door deze extreme omstandigheden stond ook de grondwaterstand laag, waardoor de hoeveelheid wegzijging gedurende het jaar niet veel verschilt met de hoeveelheid in 2004 waarin de rivier en het grondwater beide hoger stonden. In 2003 kwamen bovendien hoge afvoeren voor gedurende januari, waardoor de totale hoeveelheid kwel in 2003 groter is dan in 2004.

Zowel voor kwel als voor wegzijging is gebleken dat op basis van rivierstanden niet zomaar een uitspraak kan worden gedaan over de kwel. De lengte van de periode waarin de waterstanden hoog staan is erg bepalend en bij lage waterstanden zijn de grondwaterstanden van groot belang.



Figuur 4.6. Rivierstand Waal, grondwaterstand en verschil tussen rivierstand en grondwaterstand voor MWO17 in 1995 en 2002. Het peilverschil tussen rivier en grondwater is een maat voor de kwel.



Figuur 4.7. Rivierstand Waal, grondwaterstand en verschil tussen rivierstand en grondwaterstand voor MWO17 in 2003 en 2004. Het peilverschil tussen rivier en grondwater is een maat voor de kwel.

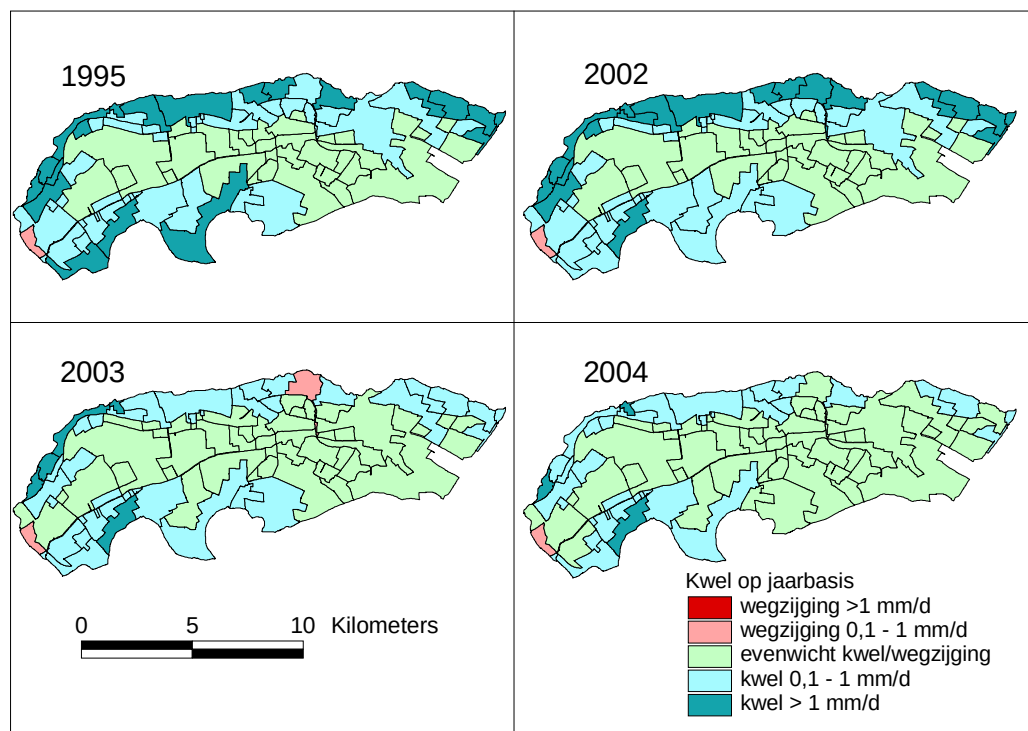
4.3.2 Simulaties diverse jaren voor gehele polder

Voor de gehele polder zijn de jaren 1995, 2002, 2003 en 2004 geëvalueerd. In Tabel 4.2 staan de netto kwelhoeveelheden voor vier jaren, berekend door het model. Voor 2002 berekende Ketelaar (2005) een hoeveelheid van 172 mm, die na correctie voor verdamping uitkomt op 103 mm. De modeluitkomst is in dezelfde orde grootte (120 mm) als de gecorrigeerde berekening van Ketelaar. Het aandeel van kwel op de totale drainage is afhankelijk van de rivierafvoeren en de neerslag en verdamping. In 1995 en 2002 komen veel hoge rivierstanden voor en is de neerslag gemiddeld. De kwel bedraagt dan 37% van de totale drainage. Dit is in 2003 ook het geval, maar hier is het aandeel van kwel te verklaren door de geringe neerslag en de grote verdamping in de hete en droge zomer van dit jaar. Het jaar 2004 heeft een gemiddelde neerslag en verdamping en geen grote rivierpieken. Het aandeel van kwel is daarom laag (10%).

Tabel 4.2. Totale hoeveelheid netto kwel in de gehele Quarles van Ufford polder voor vier jaren. De drainage is de drainage van de peilgebieden, dus de balans van neerslag verdamping en kwel en wegzijging.

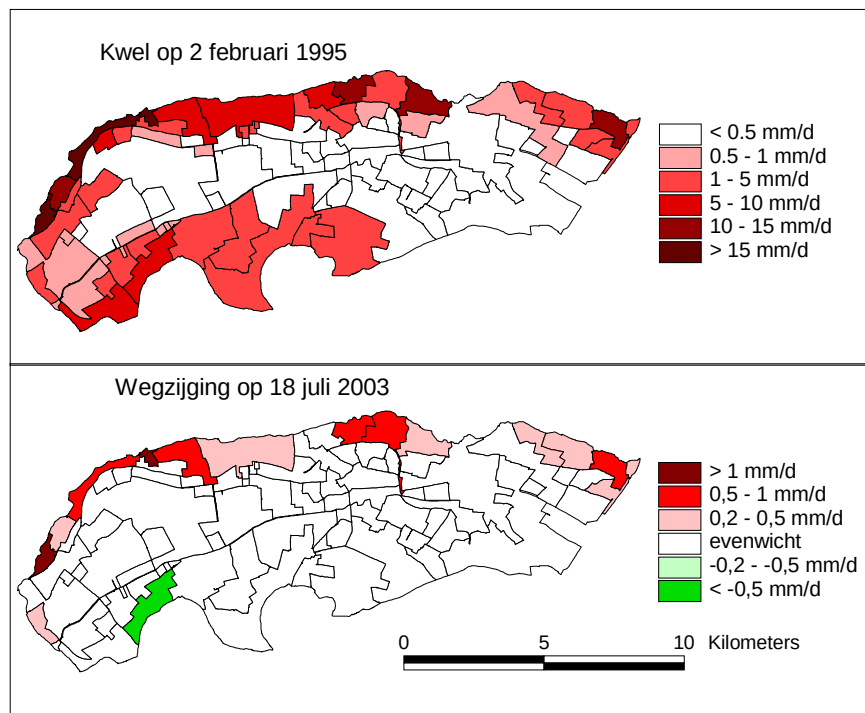
Jaar	Totale kwel (mm)	Totale drainage (mm)
1995	118	322
2002	120	328
2003	39	106
2004	25	267

De ruimtelijke verdeling van de kwel is te zien in Figuur 4.8. De hoge waterstanden gedurende 1995 en 2002 zijn direct te herkennen aan de grote kwelhoeveelheden langs de Waal. In 1995 valt op dat er ook hoge afvoeren in de Maas zijn geweest. In 2003 kwam in januari nog een afvoerpiek voor maar volgde er een droog verder verloop van het jaar, in 2004 was er slechts een geringe afvoerpiek. Hierdoor is de kwel in deze jaren aanzienlijk minder dan in 1995 en 2002.



Figuur 4.8. Ruimtelijke verdeling kwel voor vier verschillende jaren.

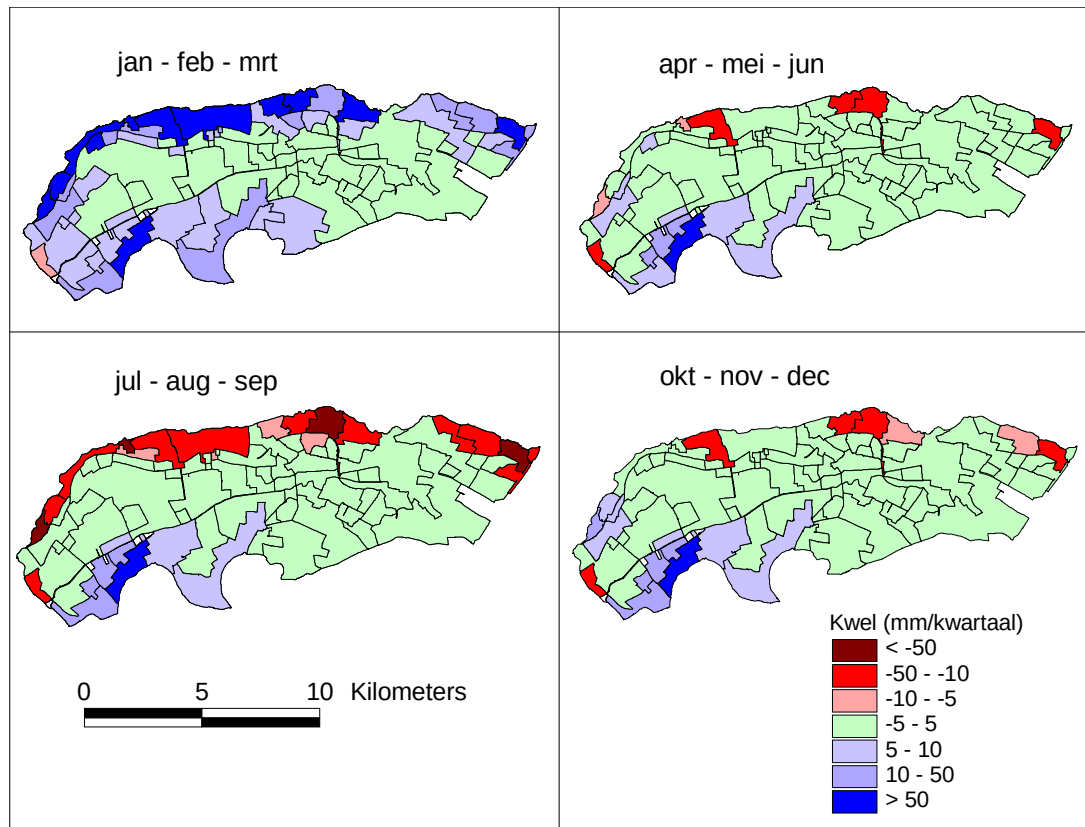
De gestuwde Maas is te herkennen in de zuidwesthoek van de polder. Voor de stuw ligt peilgebied MWW62 (zie Bijlage I) dat alle vier de jaren meer dan 1 mm d⁻¹ kwel heeft, achter de stuw ligt peilgebied MWW61 dat alle vier de jaren wegzijging heeft. Opvallend is dat in 2003 slechts één peilgebied langs de Waal een aanzienlijke netto wegzijging heeft (MWW36). Dit komt omdat de uiterwaarden langs dit peilgebied zeer smal zijn, waardoor de afstand tot de rivier in een laagwatersituatie klein is en er veel water kan wegzijgen. De aanwezigheid van zandbanen (zie Figuur 2.3) maakt de stroming nog sneller.



Figuur 4.9. Kwel en wegzijging gedurende twee extreme dagen: in 1995 bij piekafvoeren in Maas en Waal en in 2003 tijdens het begin van een extreem droge zomer.

Figuur 4.9 geeft een weergave van de kwel en wegzijging in twee extreme situaties. Het is duidelijk dat extreme kwel met een grotere intensiteit plaatsvindt dan extreme wegzijging. Dit komt door grotere peilverschillen in hoogwatersituaties (zie Figuur 4.6 en Figuur 4.7) en door het feit dat de afstand van de peilgebieden tot de rivier kleiner is tijdens hoogwater door ondergelopen uiterwaarden. Kwel met intensiteiten die groter dan 15 mm d⁻¹ zijn, kan in korte tijd (dagen) resulteren in grote wateroverlast. Problemen door wegzijging spelen op grotere tijdschaal (weken tot maanden). Tijdens droogtes zoals in de zomer van 2003, kan wegzijging er voor zorgen dat schaars water verloren gaat aan de rivier met droogteschade als gevolg.

De gebieden waar de kwel het hevigst is op 2 februari 1995 zijn de peilgebieden waarin veel zandbanen te vinden zijn en die gemiddeld het dichtste bij de rivieren liggen. De twee peilgebieden (MWW57b en MWW58b) in het noordwesten van de polder die als enige meer dan 15 mm d⁻¹ kwel ontvangen hebben beide een grote hoeveelheid zandbanen. In het peilgebied voor de stuw in de Maas, dat als enige op 18 juli 2003 nog meer dan 0,5 mm d⁻¹ kwel ontvangt, zijn ook enkele zandbanen te vinden.



Figuur 4.10. Kwel per kwartaal in 2003.

Het jaar 2003 is erg illustratief voor de verdeling van kwelhoeveelheden gedurende het jaar (zie Figuur 4.10). In januari en februari stonden de rivieren (met name de Waal) hoog. Dit is goed zichtbaar aan het feit dat in het eerste kwartaal van 2003 een groot deel van het gebied langs de Waal meer dan 50 mm kwel te verwerken kreeg. In het tweede kwartaal van 2003 begon de periode van lage rivierstanden die ondanks de eveneens lage grondwaterstanden toch voor wegzijging zorgde. In het derde kwartaal van 2003 bereikte de Waal recordstanden qua laagte en vond er langs deze rivier veel wegzijging plaats. In het laatste kwartaal stegen de rivierstanden weer en nam de wegzijging rond de Waal af.

Ook in deze figuren is de geringe dynamiek van de gestuwde Maas zichtbaar. De peilgebieden voor de stuw hebben het gehele jaar kwel, het peilgebied achter de stuw kent het gehele jaar wegzijging.

4.4 Validatie modelresultaten

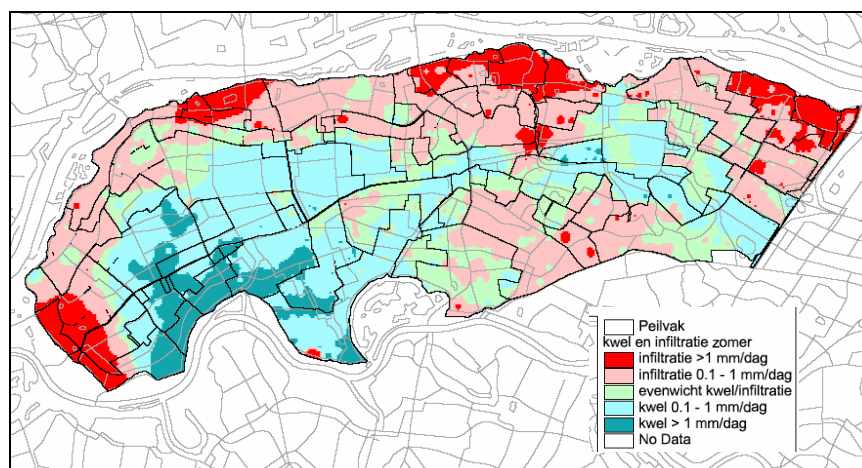
4.4.1 Vergelijking grondwatermodel Witteveen en Bos

De vergelijking met de kwel en wegzijging uit het grondwatermodel van Witteveen en Bos laat zien dat de gebieden waar kwel plaatsvindt en de gebieden waar wegzijging plaatsvindt overeenkomen met het model (Figuur 4.11 en Figuur 4.12). Langs de Maas, voor de stuw, is in beide resultaten veel kwel te zien. De locaties langs de Waal waar het grondwatermodel de grootste wegzijging berekent, zijn ook de locaties waar het model de grootste wegzijging berekent.

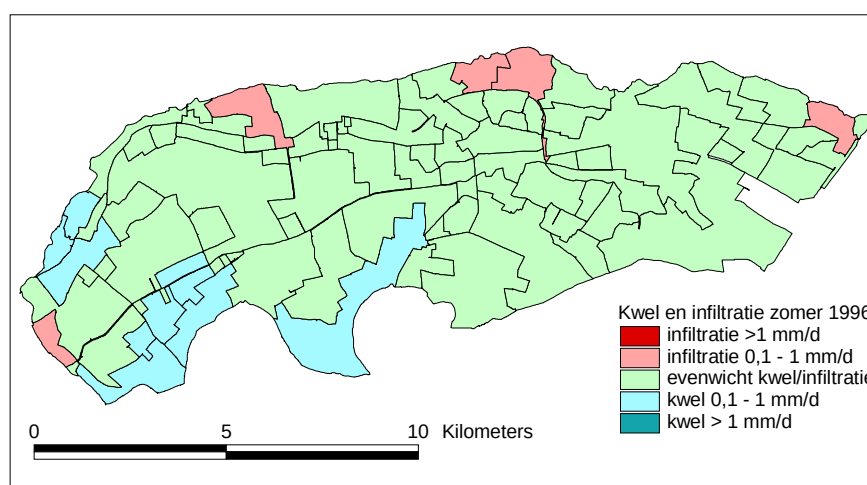
Er bestaan ook een aantal verschillen (zie Figuur 4.11 en Figuur 4.12) tussen de modellen. Opvallend is de grootte van de wegzijging die Witteveen en Bos berekent langs de Waal. De verschillen tussen

polderpeilen en rivierstanden in de polders met de meeste wegzijging zijn niet zo groot (gemiddeld 0,2 – 0,5 m) dat een wegzijging van ongeveer 200 mm voor het zomerhalfjaar kan worden verwacht. Bovendien is er een aantal peilgebieden (MWW57b, MWW58a en MWW58b) waarvoor het grondwatermodel wegzijging berekent en het ontwikkelde model kwel. Het peil van deze polders ligt gemiddeld lager dan het rivierpeil. Waarschijnlijk is de wegzijging in het grondwatermodel een combinatie van stroming van en naar de rivier en wegzijging naar lager gelegen peilgebieden. Dit verklaart ook de aanwezigheid van kwel en wegzijging in peilgebieden in het grondwatermodel die niet onder invloed van de rivieren staan. In het ontwikkelde model zijn alle peilgebieden onafhankelijk en vindt er dus geen stroming tussen peilgebieden plaats.

Een nadeel van de grondwaterstudie van Witteveen en Bos is dat de geleverde kaarten met modelresultaten gebaseerd zijn op een jaar waarin er geen hoge rivierstanden voorkwamen (1996). Bovendien gebruikt het model tweewekelijkse gemiddelde waterstanden voor rivierstanden en kan het dus geen kwel- en wegzijgingshoeveelheden op dagbasis geven. Het model berekent geen verdamping en kan daarom ook geen schade aan landbouw en natuur geven.



Figuur 4.11. Kwel en infiltratie in de zomer van 1996 volgens het grondwatermodel van Witteveen en Bos (2005).

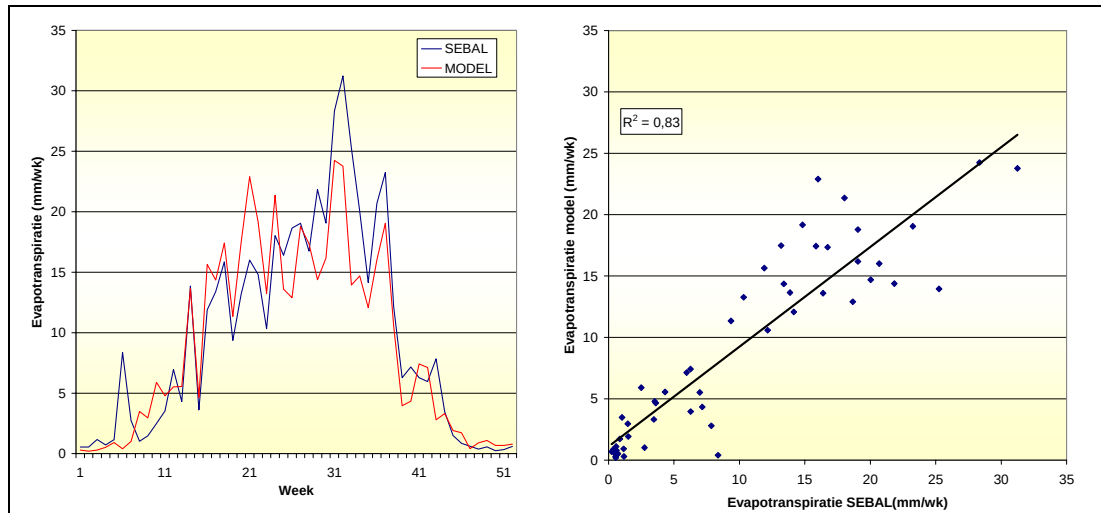


Figuur 4.12. Kwel en infiltratie in de zomer van 1996 volgens het SWAP-model.

4.4.2 Vergelijking evapotranspiratie model en SEBAL

De resultaten voor 2003 van SEBAL en het model komen goed overeen en volgen hetzelfde patroon (zie Figuur 4.13). De evapotranspiratie in het model is groter in het voorjaar en de evapotranspiratie met SEBAL is groter in de zomer. Een vergelijking met 2004 levert op dat de perioden waarin het model en SEBAL verschillen per jaar anders zijn. Er kunnen dus geen uitspraken worden gedaan dat het model in bepaalde perioden in het jaar de verdamping overschat of onderschat. Hiervoor zijn meer jaarreeksen met SEBAL-gegevens nodig.

De correlatie tussen SEBAL en het model is groot met een R^2 van 0,83. Een gelijksoortige analyse voor 2004 levert een R^2 van 0,84. De evapotranspiratie lijkt goed te worden berekend door het model.



Figuur 4.13. Evapotranspiratie in 2003 berekend door het model en door SEBAL en de correlatie hiertussen.

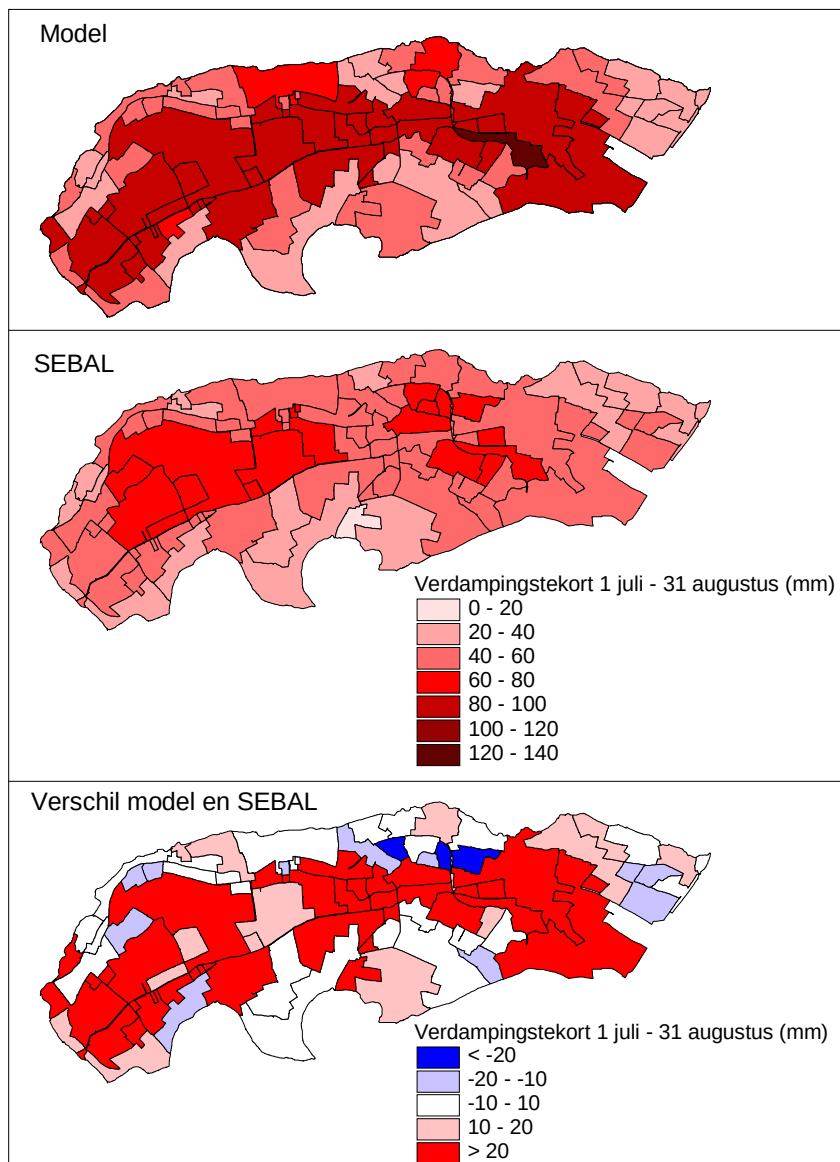
Er bestaan op peilgebiedsniveau een aantal overeenkomsten en verschillen in de verdampingstekorten (potentiële evapotranspiratie minus actuele evapotranspiratie) die zijn berekend door SEBAL en door het model (zie Figuur 4.14). Belangrijk voor deze studie is dat de verdampingstekorten rond de rivieren goed overeenkomen. Dit is een indicatie dat de droogtestress in het model goed overeenkomt met waarnemingen. Dit geeft aan dat er geen grote fouten gemaakt zijn in de berekening van de hoeveelheid wegzijging, anders zou de stress groter zijn dan in SEBAL. Opvallend is dat het model een veel groter tekort kent dan SEBAL op de oost-west as van het gebied. Hiervoor zijn een aantal verklaringen mogelijk.

De peilgebieden waar het om gaat, hebben over het algemeen een zware klei als textuur. Op deze gronden vindt snel droogteschade plaats door de geringe mogelijkheden van de grond tot capillaire nalevering. De bodemfysische grondeigenschappen, bepaald met de Staringreeks, zijn wellicht niet kloppend en de textuur van de grond behoort lichter te zijn.

Een andere optie is de afwezigheid van stroming tussen peilgebieden. De gebieden waar het model een groter verdampingstekort berekent dan SEBAL zijn de lager gelegen peilgebieden van de polder. In de werkelijkheid zouden deze peilgebieden kwel kunnen ontvangen van hoger gelegen peilgebieden. Dit is eveneens een mogelijke verklaring, waarom sommige peilgebieden, die op de rand van het hoger gelegen deel liggen, in SEBAL meer verdampingstekort hebben dan in het model.

De tweede verklaring klinkt aannemelijker omdat dit eveneens een verklaring geeft voor de gebieden waarvoor SEBAL een grotere stress geeft dan het model. Toch zijn de gebieden waar het model te

grote tekorten berekent groter dan de gebieden waar het model te kleine tekorten berekent. Dit is alleen mogelijk als er een algeheel tekort aan water is in het gebied. Een derde verklaring voor de verschillen tussen SEBAL en het model kan dan zijn dat de afstand vanaf de rivier waarop de kwel nog merkbaar is groter is dan verwacht. Dit betekent dat het doorlaatvermogen van het watervoerende pakket onderschat wordt.



Figuur 4.14. Totaal verdampingstekort voor 1 juli - 31 augustus 2003 berekend met het model en met SEBAL en de verschillen tussen de twee.

4.5 Klimaatverandering

4.5.1 Verandering van kwel- en wegzijgingsfluxen

Met het model zijn diverse klimaatscenario's doorgerekend door de reeksen meteorologische gegevens en rivierhoogtes van 1993 – 2004 te transformeren en een simulatie voor al deze jaren uit te voeren.

Tabel 4.3. Gemiddelde kwel per jaar in diverse scenario's. Zie Tabel 3.2 voor klimaatscenario's.

	Heden	2050M+	2050H+	2050D+
Kwel per jaar (mm)	61,8	62,0	70,8	55,1
Percentage van neerslagoverschot	26,4	25,7	28,3	30,5

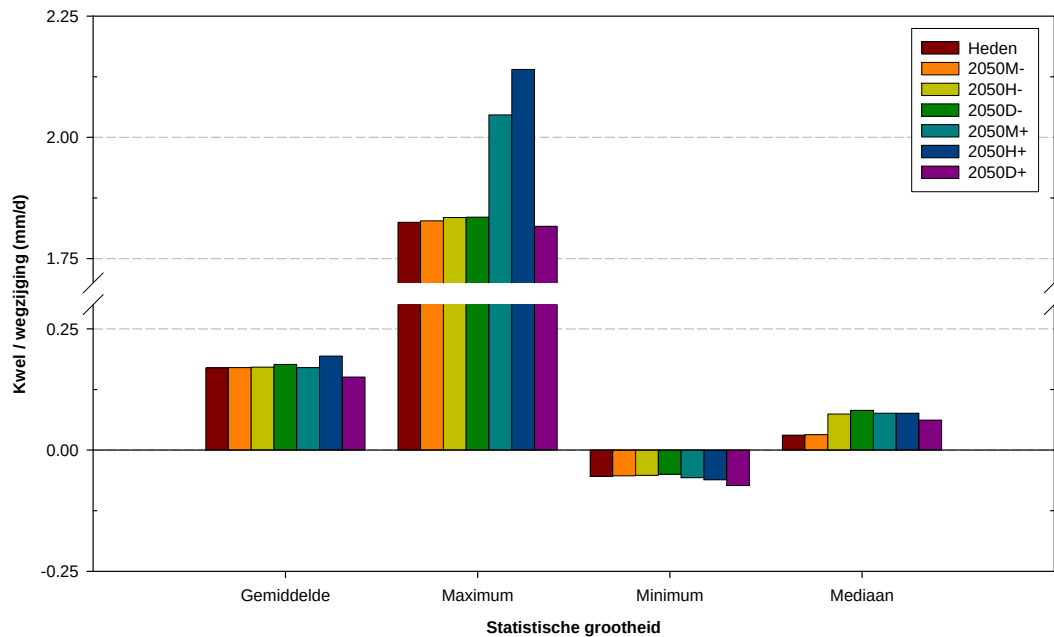
In Tabel 4.3 is te zien dat de gemiddelde kwel per jaar onder het 2050 Midden-scenario op jaarbasis nauwelijks toeneemt ($0,2 \text{ mm j}^{-1}$), terwijl in het 2050 Hoog-scenario er een toename is van 9 mm j^{-1} en in het 2050 Droog-scenario er een afname is van $6,7 \text{ mm j}^{-1}$. Opvallend is dat de verschillen in de veranderingen van de totale kwelhoeveelheden zo groot zijn tussen 2050 Midden (+0,3%) en 2050 Hoog (+14,6%). Een verdubbeling van de temperatuurstijging en de verdampingsstijging gaat samen met een kwelstijging die van $0,2 \text{ mm j}^{-1}$ naar $6,7 \text{ mm j}^{-1}$ gaat. Voor 2100 zijn er klimaatscenario's beschikbaar (WB21, 2004), waarbij de neerslagtoename en verdampingstoename nog eens verdubbelen ten opzichte van het 2050 Hoog-scenario en waarbij er dus waarschijnlijk een zeer grote toename in de kwelhoeveelheid zal plaatsvinden.

Het droge scenario laat een sterke afname zien van de hoeveelheid kwel. Dit heeft alles te maken met de sterke afname van de rivierafvoeren. Dit zorgt voor veel lagere peilen, waarbij er minder kwel of meer wegzijging voorkomt.

Tabel 4.4 en Figuur 4.15 laten de verandering van de statistische grootheden zien onder de verschillende scenario's. Ondanks dat het 2050 Midden-scenario nauwelijks een verandering in de gemiddelde hoeveelheid kwel laat zien, verandert de dynamiek wel. De maxima en minima worden extremer en ook de mediaan wordt hoger. Dit betekent dat er tijdens hoogwater meer kwel zal binnenkomen en dat tijdens laagwater er meer wegzijging zal zijn. Op een standaard dag (de mediaan) zal er meer dan twee keer zoveel kwel worden afgevoerd als in de huidige situatie. De veranderingen in het 2050 Midden-scenario zijn dus groter dan alleen het gemiddelde doet vermoeden, en de veranderingen in minimum en mediaan lijken veel op de veranderingen in het 2050-Hoog scenario.

Tabel 4.4. Statistische grootheden van afvoeren ten gevolge van kwel en wegzijging per dag in diverse klimaatscenario's gebaseerd op een simulatie van 1993 – 2004.

	Heden		2050M+		2050H+		2050D+	
	m ³	mm	m ³	mm	m ³	mm	m ³	mm
Gemiddelde	1978	0,17	1986	0,17	2267	0,19	1763	0,15
Maximum	21331	1,82	23921	2,05	25018	2,14	21237	1,82
Minimum	-635	-0,05	-666	-0,06	-716	-0,06	-856	-0,07
Mediaan	362	0,03	890	0,08	888	0,08	723	0,06



Figuur 4.15. Diverse statistische grootheden voor kwel en wegzijging onder verschillende scenario's gebaseerd op een simulatie van 1993 – 2004. + is met getransformeerde rivierafvoeren die bij dat scenario horen, - is met rivierafvoeren uit het heden.

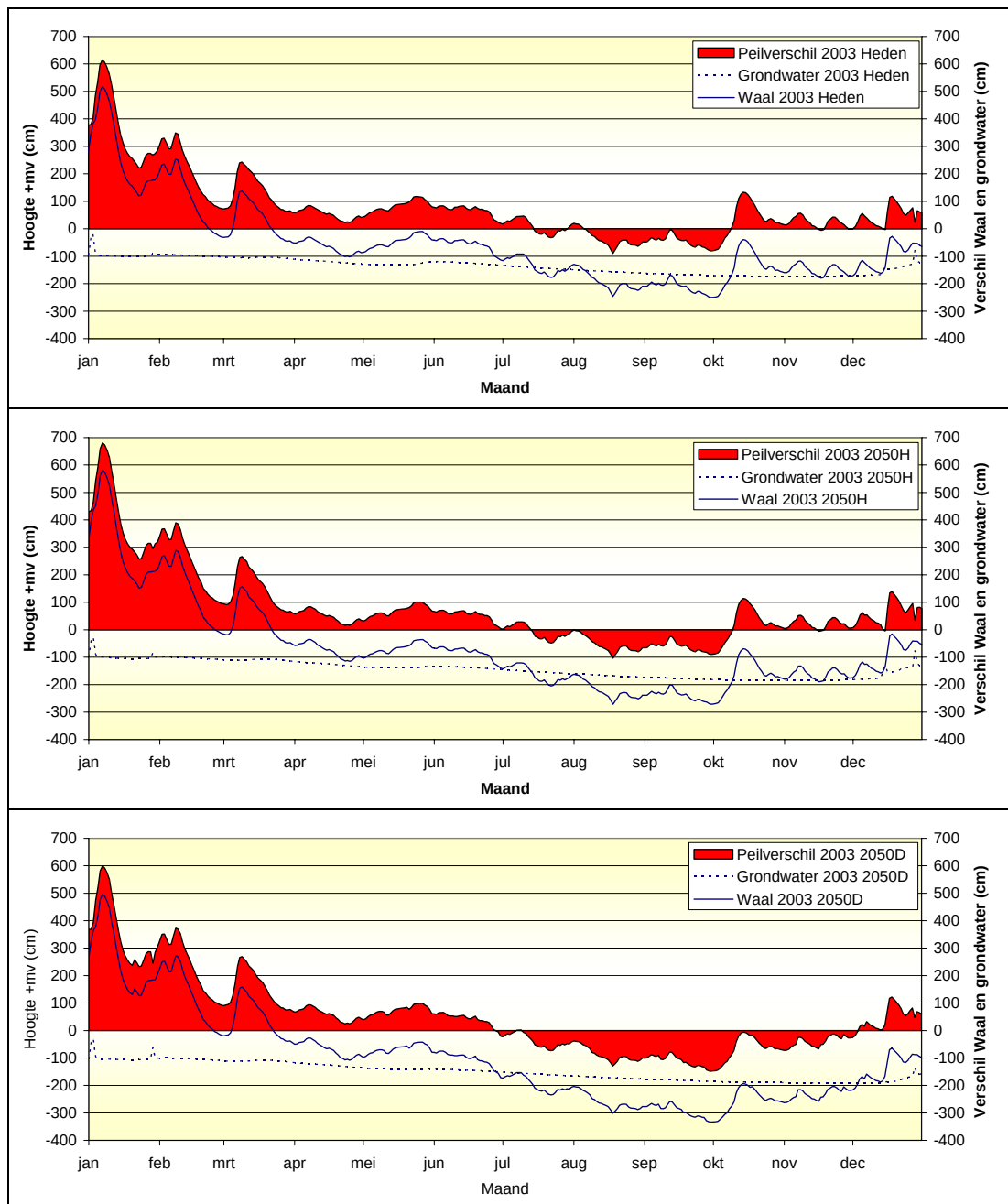
Figuur 4.15 laat zien dat de veranderde riviergegevens meer invloed hebben op de kwel- en wegzijgingsfluxen dan de meteorologische gegevens. De maxima van het 2050 Midden- en het 2050 Hoog-scenario vertonen zeer grote toenames wanneer rivierhoogtes aangepast worden aan klimaatverandering, maar vertonen maar weinig verandering met alleen veranderde meteorologische gegevens. De lagere rivierstanden in de zomer verlagen de minima, de veranderde neerslag en verdamping doen dit niet.

Tabel 4.3 laat zien dat het relatieve aandeel van kwel op de waterbalans toeneemt onder het 2050 Hoog- en het 2050 Droog-scenario. Met behulp van Tabel 4.4 en Figuur 4.15 kan dit verklaard worden. De toename van het neerslagoverschot in het 2050 Hoog-scenario gaat samen met een in verhouding veel grotere toename van de maximale hoeveelheden kwel tijdens hoog water, waardoor kwel relatief belangrijker wordt. In het 2050 Droog-scenario worden kwel en wegzijging belangrijker, omdat er minder neerslag valt en er veel meer water verdampt, dus de drainage ten gevolge van neerslagoverschot minder wordt. De hoeveelheden kwel in tijdens hoge rivierstanden worden nauwelijks minder in dit scenario dus het aandeel van kwel wordt groter in dit scenario.

4.5.2 Het jaar 2003 in detail

Het jaar 2003 is een goede illustratie van veranderende kwel en wegzijging onder verschillende klimaatscenario's. Figuur 4.16 laat zien dat er nogal wat verschillen bestaan tussen de ongewijzigde meetreeksen en de reeksen onder het 2050 Hoog- en het 2050 Droog-scenario. Afvoerpieken die in de winter plaatsvinden zullen in het hoge scenario voor meer kwel zorgen. De afvoeren in de zomer nemen af, waardoor er minder kwel of meer wegzijging plaatsvindt.

Het droge scenario geeft nauwelijks een toename van de kwel in de winter. De gevolgen van dit scenario spelen zich vooral in de zomer af. Het jaar 2003 kende oorspronkelijk een periode van wegzijging die van eind juli tot oktober duurde, maar in het droge scenario duurt deze periode tot december. De wegzijging is hier ook aanzienlijk groter dan in de oorspronkelijke gegevens.

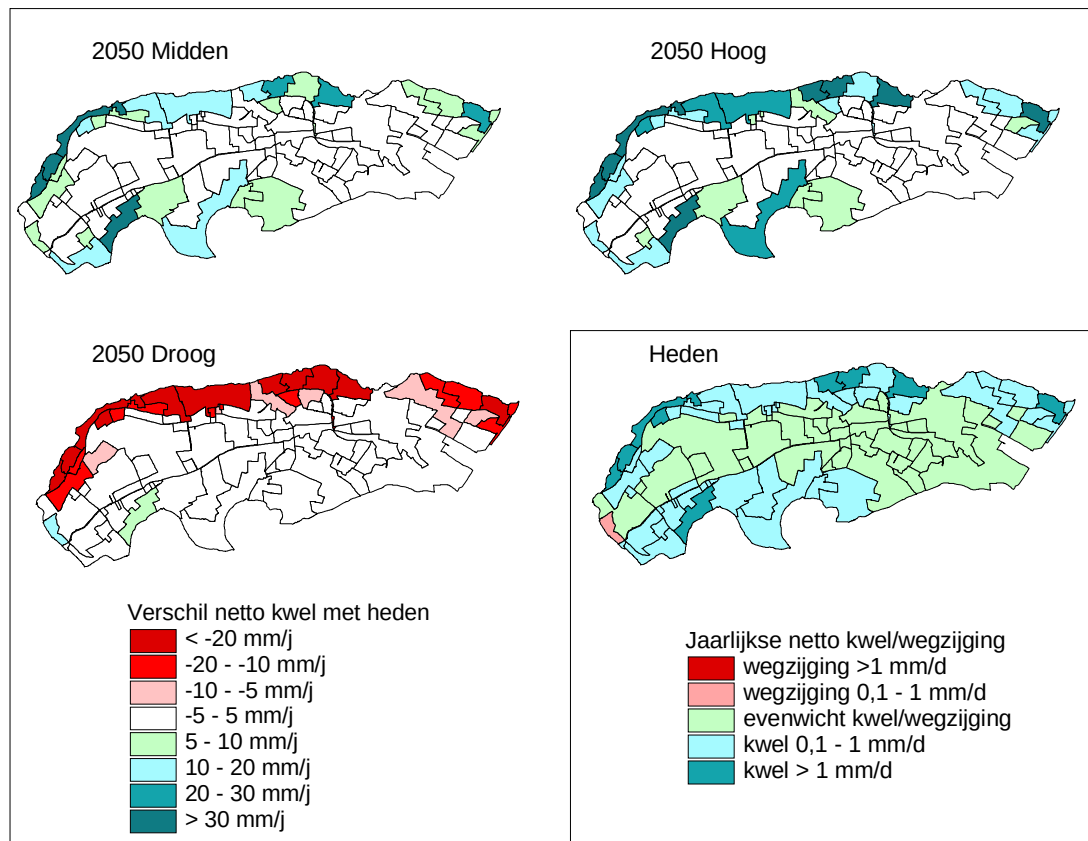


Figuur 4.16. Grondwaterstanden, de hoogte van de Waal en kwel en wegzijging in 2003, voor de werkelijkheid, voor het hoge scenario en het droge scenario.

Wanneer het hoge of het middenscenario werkelijkheid wordt, dan zijn de problemen vooral te verwachten tijdens hoogwater in de winter. De kwel zal heviger worden en er moet dus meer water afgevoerd worden. Dit is bovendien lastig om af te voeren door de hogere rivierstanden. Het droge scenario zal juist voor problemen in de zomer en het najaar zorgen, omdat de rivierafvoeren drastisch lager worden waardoor er meer wegzijging zal plaatsvinden.

4.5.3 Ruimtelijk beeld van klimaatverandering

Uit de simulaties voor het heden (zie paragraaf 4.3.2) is gebleken dat de netto kwel (gemiddeld $61,8 \text{ mm j}^{-1}$) per jaar vooral bepaald wordt door de peilgebieden langs de rivier. Figuur 4.17 laat zien dat dit inderdaad zo is. In het 2050 Midden-scenario neemt de kwel in sommige peilgebieden, zowel langs de Waal als de Maas, met meer dan 30 mm j^{-1} toe. In het 2050 Hoog-scenario zijn dezelfde effecten zichtbaar, maar dan nog heviger. Het aantal peilgebieden met meer dan 30 mm j^{-1} toename is toegenomen. Het 2050 Droog-scenario laat een heel ander beeld zien. In dit scenario spelen vooral de lage afvoeren in de zomer een rol. De effecten zijn dan alleen merkbaar langs de Waal, omdat de Maas gestuwd staat en geen lage afvoeren kent. Langs de Waal is een sterke afname van de hoeveelheid netto kwel per jaar.



Figuur 4.17. Ruimtelijke weergave van de verandering van de gemiddelde kwel op jaarbasis onder invloed van drie klimaatscenario's. Ter vergelijking ook een weergave van de gemiddelde kwel per jaar voor de gehele polder.

4.5.4 Schade

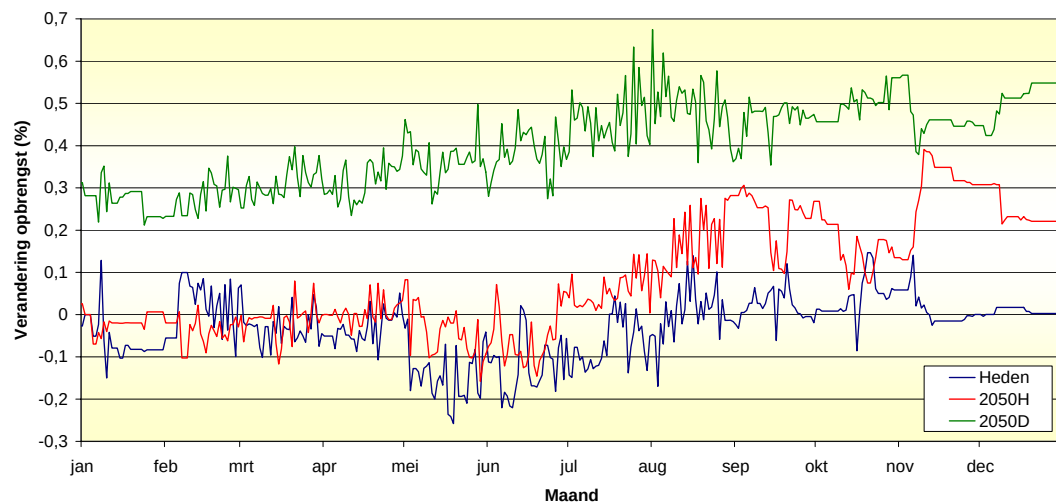
Om de invloed van kwel en wegzijging op schade aan landbouw en natuur te bepalen is voor elk scenario de schade doorgerekend met kwel en wegzijging en zonder kwel en wegzijging (de kwelflux is gedurende het hele jaar op nul gezet) voor het jaar 2003. Uit Tabel 4.5 blijkt dat in de huidige situatie de kwel geen enkele invloed heeft op de schade in 2003. Dit is het gevolg van een aantal redenen.

In de eerste plaats vinden de hoge rivierafvoeren in 2003 plaats in de winter. De verdamping is laag in de winter, waardoor de effecten van de grote kwel op de relatieve productie op jaarbasis nauwelijks merkbaar zijn.

Tabel 4.5. Relatieve gewasopbrengst in procenten in diverse scenario's doorgerekend voor de reeks van 2003 met kwel en wegzijging in- en uitgeschakeld.

Scenario	Met	Zonder	Vershil
Heden	82,2	82,2	0,0
2050 Midden	80,5	80,4	0,1
2050 Hoog	78,6	78,4	0,2
2050 Droog	61,8	61,3	0,5

In de tweede plaats zijn de verschillen tussen slootpeil en maaiveld redelijk groot (1,5 – 2 m) in de meeste peilgebieden langs de rivier. Een verhoogde grondwaterspiegel door kwel hoeft daarom geen extra schade op te leveren. Het feit dat de meeste peilgebieden bestaan uit grasland, dat ondiep wortelt, speelt hier ook mee.



Figuur 4.18. Cumulatieve relatieve opbrengst simulatie met kwel en wegzijging ingeschakeld minus cumulatieve relatieve opbrengst simulatie met kwel en wegzijging uitgeschakeld. Dus verandering relatieve opbrengst ten gevolge van kwel.

Bij de verschillende scenario's wordt de invloed van kwel en wegzijging op schade merkbaar, maar het effect is slechts zeer gering met een toename van de relatieve opbrengst van maximaal 0,5% in het 2050 Droog-scenario. Het is opvallend dat de kwel in alle scenario's zorgt voor een hogere opbrengst. De reden hiervoor is te vinden in Figuur 4.18, die laat zien hoe de invloed van kwel en wegzijging op relatieve opbrengst is geweest gedurende 2003.

In het heden en het 2050 Hoog-scenario zorgt de kwel voor lichte schade in de winter en het voorjaar. In het droge scenario zorgt deze kwel juist voor een lichte opbrengsttoename. De kwel zorgt in alle scenario's voor een extra hoeveelheid water die in de bodem wordt opgeslagen (gedurende de hele zomer blijven de grondwaterstanden enkele centimeters hoger dan in de simulaties zonder kwel en wegzijging). Als de droge zomer begint in juni, dan wordt gebruik gemaakt van dit water en loopt de relatieve productie op. Voor het heden wordt de schade dan weer goed gemaakt en in het 2050 Hoog en het 2050 Droog-scenario zorgt de waterbuffer zelfs voor een productietoename.

Op peilgebiedsniveau kunnen de relatieve opbrengstverschillen tussen het heden en de verschillende klimaatscenario's misschien wel tot grote verschillen leiden, gezien de resultaten uit paragraaf 4.5.3. Het is ook denkbaar dat voor gebieden waar het grondwater in de polders langs de rivieren hoger staat, zoals in West-Nederland, of waar bijvoorbeeld akkerbouw of fruitteelt plaatsvindt, de kwel en wegzijging wel tot aanzienlijke schade op polderniveau kunnen leiden.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

5.1.1 Model

Deze studie heeft geresulteerd in een model dat met gebiedseigenschappen, meteorologische gegevens en rivierstanden alle componenten van de waterbalans, waaronder de kwel en wegzijging, kan uitrekenen. Het model rekent ook schade uit aan landbouw en natuur ten gevolge van droogte en wateroverlast. Het innovatieve van dit model is dat het een snelle rekenmethode gebruikt om kwel en wegzijging te bepalen en deze methode gebruikt in een bestaand onverzadigde zone model (SWAP). Hierdoor kan gedetailleerde informatie (per dag) worden verkregen zonder grote rekentijden, zoals bij een niet-stationair grondwatermodel.

Een model als dit zal daarom uitermate geschikt zijn voor het actieve waterbeheer, omdat het veel informatie verschaft en dynamisch is. Het is eenvoudig om nieuwe tijdreeksen in het model in te voegen, waardoor het model ook bruikbaar is voor het doen van scenariostudies, zoals het onderzoek naar de gevolgen van klimaatverandering.

Uit onderzoek met een tweedimensionaal grondwatermodel is gebleken dat in het studiegebied tot op ongeveer 1 km van de rivier relevante kwel en wegzijging naar de rivier plaatsvindt. De hoeveelheid kwel en wegzijging is afhankelijk van het stijghoogteverschil, de doorlatendheid van de deklaag, het doorlaatvermogen van de aquifer en de afstand van de rivier. De dikte van de deklaag is met name bepalend voor de hoeveelheid kwel en wegzijging dichtbij de rivier, terwijl het doorlaatvermogen van de aquifer bepalend is voor de kwel en wegzijging op grotere afstand van de rivier.

Met behulp van het grondwatermodel kan voor elk peilgebied een lineaire formule worden opgesteld met het stijghoogteverschil tussen polder en grondwater als variabele. Deze formule levert de kwel op, en dient als onderrandvoorwaarde voor de SWAP-simulaties. SWAP is het onverzadigde zone model waar het ontwikkelde model op gebaseerd is.

Uit de gevoeligheidsanalyse van de SWAP-kolom bleek dat de weerstand van het drainagesysteem het meest bepalend is voor de kwelhoeveelheden. Deze parameter is het gevoeligst in situaties waarbij het grondwaterpeil onder het oppervlaktewaterpeil staat. De weerstand heeft hier veel invloed op de hoeveelheid water die kan infiltreren. Als de rivier laag staat vindt er bij een lagere weerstand meer wegzijging plaats, omdat het grondwaterpeil hoger blijft door de extra infiltratie door de lagere weerstand.

De slootafstand speelt alleen een rol in natte situaties. Bij een grotere slootafstand staat het grondwaterpeil hoger in deze situaties. Rivierpieken komen vaak voor in natte situaties. Een klein verschil in grondwaterstand kan dan tot duidelijke verschillen in kwelhoeveelheden leiden.

De verzadigde doorlatendheid is vooral van invloed op de snelheid van het systeem. In een situatie waarin het grondwater zakt, gaat dit langzamer bij een lagere verzadigde doorlatendheid. Bij een stijgende grondwaterspiegel gaat de stijging eveneens langzamer.

De vergelijkingen met een waterbalans, gemeten evapotranspiratie (SEBAL) en het grondwatermodel gemaakt door Witteveen en Bos bevestigen dat de werking van het model goed is. Zij laten belangrijke overeenkomsten zien in de berekende hoeveelheden kwel en wegzijging, evapotranspiratie en verdampingstekorten.

Ze laten ook een aantal verschillen zien met het ontwikkelde model. Het grondwatermodel berekende grotere kwel- en wegzijgingsfluxen door het gehele gebied en SEBAL berekende minder verdampingstekort in de middenas van het gebied. De meest aannemelijke reden voor deze verschillen is de afwezigheid van stroming tussen de peilgebieden in het model. Elk peilgebied is een onafhankelijke kolom, en watert rechtstreeks af op het oppervlaktewatersysteem. De stroming tussen peilgebieden zou kunnen plaatsvinden in de peilgebieden gelegen op de oost-west as van het gebied, omdat ze een lager peil hebben dan de peilgebieden ten noorden en ten zuiden van deze peilgebieden. Deze gebieden liggen overwegend buiten invloed van de rivier, zodat het ontbreken van stroming nauwelijks invloed heeft op de berekende kwelhoeveelheid.

5.1.2 Studiegebied

Kwel en wegzijging zijn dynamische processen met grote verschillen tussen verschillende jaren. Jaren met hoge rivierafvoeren, zoals 1995 en 2002, hebben veel netto kwel (meer dan 100 mm), terwijl jaren zonder veel hoge afvoeren, zoals 2003 en 2004, weinig netto kwel hebben (minder dan 40 mm).

De gebieden rondom de Waal zijn het meest gevoelig voor kwel en wegzijging, omdat de Waal een vrij verloop kent, in tegenstelling tot de Maas die gestuwd is. Tijdens pieken in de Waal vindt er veel kwel plaats door de grote peilverschillen tussen rivier en polder. Wegzijging gaat minder hevig dan kwel, omdat de peilverschillen aanzienlijk minder groot zijn (tot 5 m tijdens hoog water en -1,5 m tijdens laag water) en de afstand van een peilgebied tot de rivier groter is tijdens laag water. Tijdens hoogwater komen er kwelfluxen voor van meer dan 15 mm d⁻¹, terwijl de grootste waarden tijdens laagwater tussen de 1 á 2 mm d⁻¹ zitten. In de kwelhoeveelheden van de peilgebieden langs de Maas is de stuw bij Lith goed zichtbaar. Direct stroomopwaarts van de stuw vindt het gehele jaar kwel plaats, terwijl stroomafwaarts het gehele jaar wegzijging plaatsvindt.

Het jaar 2003 is een uitstekend voorbeeld van een jaar dat laat zien dat een totale kwelhoeveelheid gedurende het jaar slechts beperkte informatie geeft. In het eerste kwartaal van het jaar vindt er veel kwel plaats, maar in het derde kwartaal vindt er veel wegzijging plaats, die de kwel uit het eerste deel van het jaar grotendeels compenseert.

Klimaatveranderingen kunnen grote invloed hebben op de kwel en wegzijging gedurende het jaar. Onder het 2050 Midden- en het 2050 Hoog-scenario nemen vooral de pieken toe. Dit kan leiden tot problemen met de drainage van de polders tijdens piekafvoeren. Het 2050 Droog-scenario leidt tot andere problemen. De rivierafvoeren nemen in dit scenario tijdens de zomer en het najaar dermate veel af dat dit kan leiden tot grote wegzijging in deze tijden van het jaar. In combinatie met de verlaagde neerslag en de grotere verdamping kan de wegzijging voor watertekorten gaan zorgen.

Uit de resultaten blijkt dat kwel nauwelijks natschade aan landbouw en natuur veroorzaakt. Deze invloed wordt groter tijdens klimaatverandering, maar blijft gering voor het studiegebied. Dit komt door het relatief diepe grondwater in de peilgebieden langs de rivier en het ondiep wortelende gras dat erop groeit. Opvallend is wel dat de relatieve schade aan landbouw en natuur afneemt door de aanwezigheid van kwel. Kwel zorgt voor een kleine buffer tegen droogte.

Door de verschillende invloeden die de klimaatscenario's hebben is het lastig om te anticiperen. Zowel met droogte als wateroverlast moet rekening worden gehouden en dit maakt het geheel complex.

5.2 Aanbevelingen voor verder onderzoek

5.2.1 Verbeteringen werking regionaal model

Binnen het regionale model zijn een aantal aannames gemaakt. De gevolgen van sommige aannames zijn nuttig om te onderzoeken in verder onderzoek:

- De implementatie van zandbanen. Is het verhogen van de kwelfactor met een factor die afhangt van de gebiedsbedekking zandbanen een goede methode om de effecten van zandbanen op kwel te berekenen? Eventueel moeten alle hydraulische eigenschappen van de kolom aangepast worden. Een studie naar het precieze effect van zandbanen op de hoeveelheden kwel en wegzijging kan erg nuttig zijn.
- De berekening van wegzijging in een laagwatersituatie. De kwel en wegzijging worden nu berekend aan de hand van de afstand tot de rivier, terwijl een deel van deze wegzijging ook al naar de uiterwaarden kan gaan, die een lager peil hebben dan de polder in een laagwatersituatie. De afstand tot de rivier die in het model gebruikt wordt, is in dat geval te groot.
- De afwezigheid van stroming tussen diverse peilgebieden. Binnen het model wordt uitgegaan van onafhankelijke peilgebieden. Dit heeft tot gevolg dat elk peilgebied rechtstreeks afwatert. Het is echter goed mogelijk dat een deel van het water via het grondwater een peilgebied verlaat en naar een peilgebied met een lager peil stroomt.
- De afwezigheid van diepe kwel. Binnen dit model is geen rekening gehouden met de aanvoer van kwel uit diepe watervoerende pakketten. Er zijn geen aanwijzingen dat deze kwel aanwezig is, maar dit kan wellicht nader onderzocht worden.
- De gekozen doorlatendheden en diktes van de deklaag en de aquifer. Bij een gebrek aan goede geologische informatie over het studiegebied, is uitgegaan van een eenvoudige opzet van deklaag en aquifer. De gevoeligheid van de kwel en wegzijging voor de eigenschappen van de deklaag en de aquifer is bekend, dus gedetailleerdere informatie kan tot nauwkeurigere resultaten leiden.

5.2.2 Controle modelresultaten

Het is lastig gebleken de berekende hoeveelheid kwel te toetsen aan de werkelijkheid. De kwel is een relatief kleine post in de waterbalans en vereist daarom zeer nauwkeurige metingen van de overige termen. Een aantal manieren om dit voor het gehele gebied te verbeteren zijn:

- Nauwkeurige en ononderbroken debietmetingen uitvoeren in alle in- en uitlaten van het oppervlaktewater in het gebied.
- SEBAL blijven gebruiken voor het monitoren van actuele verdamping en bodemvocht.
- Gebruik maken van neerslagradar om neerslagmetingen zo nauwkeurig mogelijk bij te houden.
- Grondwaterstanden bijhouden om het model aan te toetsen.
- Simulaties uitvoeren met gemeten oppervlaktewaterpeilen in plaats van vaste peilen voor zomer en winter.

Het monitoren van één peilgebied kan ook helpen bij het testen van het model. Voor een klein gebied is het wellicht mogelijk om de in- en uitlaat via het oppervlaktewater exact te monitoren. In combinatie met metingen aan bodemvocht, (grond)waterstanden, neerslag en verdamping, kan de hoeveelheid kwel redelijk precies bepaald worden.

5.2.3 Nieuwe simulaties

Deze studie heeft zich slechts gericht op een kleine polder en enkele scenario's. Tijdens het uitwerken van deze studie zijn veel vragen met betrekking tot kwel en wegzijging rond de grote rivieren beantwoord, maar de studie heeft ook vragen opgeroepen. Vragen die verder onderzoek verdienen zijn:

- Wat zijn de ruimtelijke gevolgen van klimaatverandering? In deze studie is slechts een beperkte klimaatstudie gedaan, waarbij alleen gekeken is naar de resultaten voor de gehele polder. Voor sommige peilgebieden kunnen de gevolgen heviger zijn dan voor het gehele gebied, terwijl andere peilgebieden juist geen enkele invloed van klimaatveranderingen ondervinden.
- Hoe belangrijk zijn kwel en wegzijging in de scenario's van 2100? Er lijkt een niet lineaire reactie van rivierafvoeren op klimaatverandering te zijn. Nog grotere temperatuur-, neerslag- en verdampingsstijgingen dan in de 2050-scenario's kunnen voor een grote verandering in kwel en wegzijging zorgen. Schade kan dan wel relevant worden.
- Wat zijn de resultaten voor een ander studiegebied? De polder Quarles van Ufford heeft nog relatief goed ontwaterde peilgebieden langs de rivieren. In West-Nederland, dat een slechtere ontwatering heeft, kunnen de uitkomsten van de studie anders zijn. Kwel en wegzijging kunnen in deze gebieden wellicht wel tot schade aan landbouw en natuur leiden.
- Worden de resultaten beter als er betere methoden voor handen zijn om neerslag-, verdampings- en rivierafvoerreeksen te transformeren voor een bepaald klimaatscenario? In deze studie zijn eenvoudige grove methodes gebruikt om reeksen te transformeren naar de klimaatscenario's voor 2050. Betere methodes leiden misschien tot betere resultaten, maar dit is niet zeker, omdat de onzekerheid van klimaatverandering ook een belangrijke rol speelt.
- Wat zijn de gevolgen als CO₂-toename in de atmosfeer voor kwel en wegzijging? Als de gewassen inderdaad efficiënter worden en de verdamping sterk afneemt, dan kan dit gevolgen hebben voor de hoeveelheid kwel en wegzijging en de schade aan landbouw en natuur ten gevolge van kwel en wegzijging.

6 Referenties

6.1 Literatuur

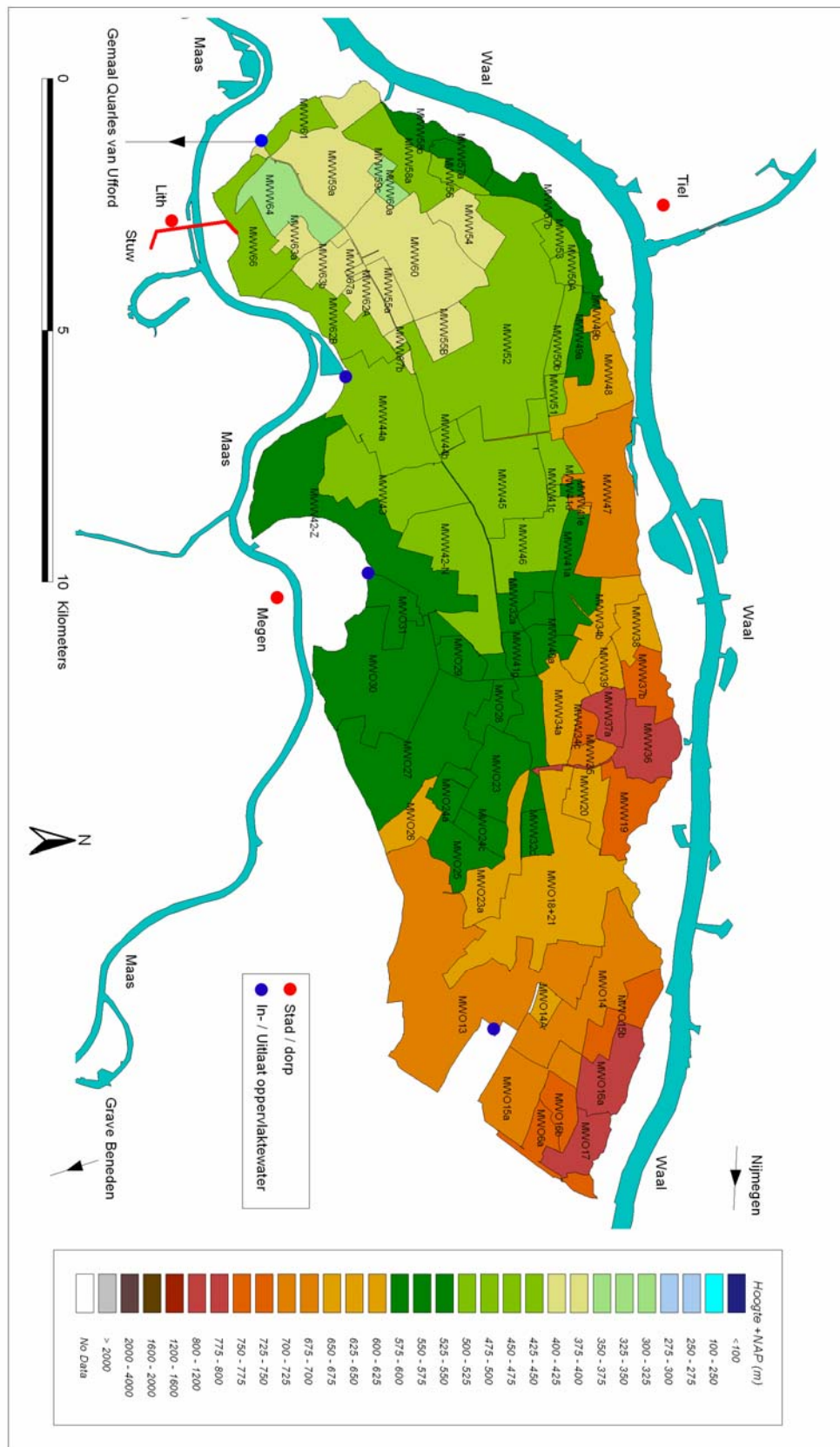
- Bastiaanssen, W.G.M., M. Menenti, R.A. Feddes and A.A.M. Holtslag, 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation. *Journal of Hydrology* 212-213, 198-212.
- Beersma, Jules J., T. Adri Buishand en Hendrik Buitenveld, 2004. Droog, droger, droogst. KNMI publicatie 199-II, De Bilt, Nederland.
- Beusen, A.H.W., P. Boers, J.J.M. van Grinsven, O. Oenema & R. Rötter, 2002. De status van het rekeninstrumentarium STONE versie 2.0., Alterra, Wageningen.
- de Bruin, H.A.R., 1998. Micrometeorologie, Wageningen UR, Wageningen.
- van Dam, J.C., 2000. Field-scale water flow and solute transport. SWAP model concepts, parameter estimation, and case studies. PhD-thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, 167 p., English and Dutch summaries.
- van Deursen, W., 2002. Klimaatveranderingen in de stroomgebieden van Rijn en Maas. Carhago Consultancy.
- Domenico en Schwartz, 1998. Physical and Chemical Hydrogeology. Second Edition, John Wiley & Sons.
- Doomen, A. en J.P.M. Witte, 2004. Invloed van CO₂ -toename op verdamping en groei van planten; Een literatuuronderzoek voor de Droogtestudie Nederland. Kiwa-rapport.
- Droogers, P. en R. Loeve, 2004. Regionale analyse van mogelijkheden tot vasthouden van water in het beheersgebied van Waterschap Zuiderzeeland. Rapport FutureWater, Wageningen, Nederland..
- Droogers, P. en R. Loeve, 2005. Postieve en negatieve effecten van drainage: Een analyse in het kader van het "Eindadvies Berging en Afvoer" voor Wetterskip Fryslân. Rapport FutureWater, Wageningen, Nederland.
- Dufour, F., 1998. Grondwater in Nederland. Onzichtbaar water waarop wij lopen. Geologie van Nederland, deel3. NITG-TNO, Delft.
- Feddes, R.A., J.G. Wesseling en R. Wiebing, 1984. Simulation of transpiration and yield of potatoes with the SWACRO model. 9th Triennial conference of the European Association of Potato Research (EAPR), Interlaken.
- Heijboer, D. en J. Nellestijn (Samenst.), 2002. Klimaatatlas van Nederland; de normaalperiode 1971-2000, Elmar, Rijswijk.
- ICIS, 2003. Scenario's voor de droogtestudie Nederland. 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 [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.
- Ketelaar, H., 2005. Waterbalans Quarles van Ufford. Waterschap Rivierenland, Tiel, Nederland.

- Können, G.P., 2001. Climate Scenarios for impact studies in The Netherlands. KNMI, De Bilt, Nederland.
- Kroes, J.G., J.G. Wesseling and J.C. van Dam, 2000. Integrated modelling of the soil-water-atmosphere-plant system using the model SWAP 2.0 and overview of theory and an application. Hydrological processes 14, 1993-2000.
- Kroes, J.G. and J.C. van Dam (eds), 2003. Reference Manual SWAP version 3.0.3. Wageningen, Alterra, Green World Research. Alterra-report 773. Reference Manual SWAP version 3.0.3.
- Mazure, J.P., 1936. Kwel- en chloorbezwaar in de Wieringermeer. Geo-hydrologische gesteldheid van de Wieringermeer. Rapporten en Mededeelingen betreffende de Zuiderzeewerken No. 5:67-131. Algemeene Landsdrukkerij, 's-Gravenhage.
- WB21, 2004. Brochure Basisrapport bij het advies van de Commissie Waterbeheer 21e eeuw, Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij.
- Witteveen en Bos, 2005. Peilbesluiten bemalingsgebied Quarles van Ufford. Deventer, Nederland.
- Wösten, J.H.M., J. Bouma and G.H. Stoffelsen, 1985. Use of soil survey data for regional soil water simulation models. Soil Sci. Soc. Am. J. 49:1238-1244.
- Wösten, J.H.M., G.J. Veerman, W.J.M. de Groot en J. Stolte, 2001. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks. Vernieuwde uitgave 2001. Wageningen. Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte. Alterra Rapport 153.

6.2 Internet

- AHN, 2005. AHN: Actueel Hoogtebestand Nederland. www.ahn.nl
- REGIS II, 2005. NITG-TNO, 2005. REGIS II, REgionaal Geohydrologisch Informatie Systeem. www.nitg.tno.nl
- Waterbase.nl, 2005. Ministerie van Verkeer en Waterstaat. www.waterbase.nl
- Waternormalen.nl, 2005. Ministerie van Verkeer en Waterstaat. www.waternormalen.nl

Bijlage I



Figuur B.1. Alle peilgebieden, in- en uitlaten van oppervlaktewater en relevante namen.