

MetaSWAP_V7_2_0

Rapportage van activiteiten ten behoeve van certificering met Status A

P.E.V. van Walsum
A.A. Veldhuizen

werkdocumenten



wot

Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu



WAGENINGENUR
For quality of life

MetaSWAP_V7_2_0

De reeks 'Werkdocumenten' bevat tussenresultaten van het onderzoek van de uitvoerende instellingen voor de unit Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu (WOT Natuur & Milieu). De reeks is een intern communicatiemedium en wordt niet buiten de context van de WOT Natuur & Milieu verspreid. De inhoud van dit document is vooral bedoeld als referentiemateriaal voor collega-onderzoekers die onderzoek uitvoeren in opdracht van de WOT Natuur & Milieu. Zodra eindresultaten zijn bereikt, worden deze ook buiten deze reeks gepubliceerd.

Dit werkdocument is gemaakt conform het Kwaliteitshandboek van de WOT Natuur & Milieu.

MetaSWAP_V7_2_0

Rapportage van activiteiten ten
behoefte van certificering met Status A

P.E.V. van Walsum

A.A. Veldhuizen

Werkdocument 276

Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu

Wageningen, december 2011

Referaat

Walsum, P.E.V. van & A.A. Veldhuizen, 2011. *MetaSWAP_V7_2_0; Rapportage van activiteiten ten behoeve van certificering met Status A*. Wageningen, Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, WOt-werkdocument 276. 116 blz. 12 fig.; 36 tab.; 10 ref.; 4 bijl.

Veel vragen over het waterbeheer betreffen situaties en processen die worden beïnvloed door hydrologische terugkoppelingen op regionale en zelfs nationale schaal. MetaSWAP is bedoeld voor het vervangen van SWAP bij het grootschalig doorrekenen van bodem-plant-atmosfeerkolommen die gekoppeld zijn aan geïntegreerde gebiedsmodellen van grond- en oppervlaktewater. MetaSWAP is een 'meta'-model van SWAP. Het meta-concept is gebaseerd op een vereenvoudigde oplossing van de niet-lineaire partiële differentiaalvergelijking om bodemfysische processen te beschrijven, de zogenaamde Richards-vergelijking. Deze vergelijking wordt vervangen door twee 'gewone' differentiaalvergelijkingen, één voor de procesbeschrijving, en één voor de waterbalans. Om het informatieverlies dat bij die vereenvoudiging optreedt te compenseren, is het nodig om MetaSWAP te kalibreren en te valideren op SWAP. Dit document beschrijft hoe dat gedaan wordt, en tevens hoe de kwaliteit van het model is geborgd volgens de zogenaamde 'Status A' standaard van de WOT Natuur & Milieu.

Trefwoorden: metamodel, Richards-vergelijking, grondwater, kalibratie, validatie

©2011 **Alterra Wageningen UR**

Postbus 47, 6700 AA Wageningen

Tel: (0317) 48 07 00; fax: (0317) 41 90 00; e-mail: info.alterra@wur.nl

De reeks WOt-werkdocumenten is een uitgave van de unit Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, onderdeel van Wageningen UR. Dit werkdocument is verkrijgbaar bij het secretariaat. **Het document is ook te downloaden via www.wotnatuurenmilieu.wur.nl.**

Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, Postbus 47, 6700 AA Wageningen

Tel: (0317) 48 54 71; Fax: (0317) 41 90 00; e-mail: info.wnm@wur.nl; Internet: www.wotnatuurenmilieu.wur.nl

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden veeleenvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever. De uitgever aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Inhoud

Samenvatting	7
1 Inleiding	13
2 Theorie	15
2.1 De theoretische onderbouwing van het model (A1)	15
2.2 Het doel waarvoor het model is ontworpen (A2)	17
2.3 Het toepassingsgebied van het model (A3, A10)	18
2.4 Representatie van de werkelijkheid in het model (A4)	19
3 Technische documentatie	21
3.1 Overzicht (A5, A6)	21
3.2 Modelparameters (A7)	21
3.3 Beschrijving invoer en uitvoer (A8, A9)	22
4 Gebruikersdocumentatie	23
4.1 Overzicht (A11-A15)	23
4.2 Hardware restricties (A12)	23
5 Verificatie en testen software	25
5.1 Inleiding (A19)	25
5.2 Basale tests van programmacode (A18)	26
5.3 Waterbalanstests (A18, A20)	26
5.4 Processimulatie voor stationaire situaties (A18, A20, A27)	27
5.4.1 Situaties met capillaire opstijging	27
5.4.2 Situaties met percolatie	31
5.5 Berekening (A18, A20)	34
5.6 Schaalfactoren bodemfysica (A18, A20)	36
5.7 Conclusies verificatietests	37
6 Kalibratie	39
6.1 Inleiding (A22)	39
6.2 Kalibratie dikte van capillair beïnvloede laag (A23, A27)	42
6.3 Kalibratie van de gereduceerde Boesten-parameter (A23, A27)	47
7 Validatie	51
7.1 Inleiding (A24-A26)	51
7.2 Ontwateringsdiepte: grondwaterstand (A24)	52
7.3 Het droge jaar 2003: verdamping en grondwaterstand (A24, A27)	54
7.4 Het droge jaar 2003: bovengrondse afvoer en tijdstap (A24, A27)	62
7.5 Het natte jaar 1966: grondwaterstand (A24)	64
7.6 Het natte jaar 1966: drainageafvoer en tijdstap (A24, A27)	67
7.7 Het natte jaar 1966: bovengrondse afvoer en tijdstap (A24, A27)	76
7.8 Stapgrootte dynamische wortelzonedikte (A24)	79
7.9 Validatie van versie V7.2.0 (A24)	81
7.10 Conclusies validatietests (A25, A26)	85
8 Gevoeligheidsanalyse	87
8.1 Inleiding (A28)	87

8.2 Ruimtelijke en verticale discretisatie (A28)	87
8.3 Tijddiscretisatie (A28)	89
8.3.1 Tijdstap voor langzame processen	90
8.3.2 Tijdstap voor snelle processen	90
8.4 Boesten-parameter (A28)	90
Literatuur	91
Bijlage 1 Gewasfactoren en interceptiecapaciteit	93
Bijlage 2 FORCHECK-controle van programmacode	103
Bijlage 3 Versiebeheer van programmacode	105
Bijlage 4 Artikel in Proceedings Modflow and More 2006	107

Samenvatting

Achtergrond

Veel vragen over het waterbeheer betreffen situaties en processen die worden beïnvloed door hydrologische terugkoppelingen op regionale schaal. Het beantwoorden daarvan vereist modellen die op een regionale schaal de hydrologische processen en verbanden beschrijven. Vragen over waterverdeling spelen zich vaak op een nog grotere schaal af, zoals in de Nederlandse delta. Daar wordt op nationale schaal aan gerekend.

De modelcode MetaSWAP is ontwikkeld om SWAP te vervangen bij het grootschalig doorrekenen van bodem-plant-atmosfeerkolommen die gekoppeld zijn aan geïntegreerde gebiedsmodellen van grondwater- en oppervlaktewater. Het vervangen van SWAP heeft de volgende redenen:

- het reduceren van de rekestijd;
- het beheersbaar maken van de gegevensstromen.

MetaSWAP is een 'metamodel' van SWAP. Het meta-concept is gebaseerd op een vereenvoudigde oplossing van de niet-lineaire partiële differentiaalvergelijking voor het beschrijven van bodemfysische processen, de zogenaamde Richards-vergelijking. Deze vergelijking wordt vervangen door twee 'gewone' differentiaalvergelijkingen, één voor de procesbeschrijving, en één voor de waterbalans. Om het informatieverlies dat bij die vereenvoudiging optreedt te compenseren, is het nodig om MetaSWAP te kalibreren en te valideren op SWAP.

MetaSWAP moet zeker niet worden gezien als een totale vervanging van SWAP. Ten eerste is SWAP altijd nodig voor de kalibratie en toetsing van MetaSWAP. Ten tweede kan het gebruik van MetaSWAP een stap zijn in een analyse van 'grof naar fijn', waarbij de eerste verkenning van de gebiedsprocessen met MetaSWAP gebeurt. Door de reken-efficiëntie is het veel beter mogelijk om met MetaSWAP grootschalige gevoeligheidsanalyses van de bodemfysische parameters uit voeren dan met SWAP. In een vervolgstap kan SWAP worden ingezet om de gebiedsprocessen meer gedetailleerd te modelleren.

Onderzoeksvragen

MetaSWAP wordt reeds op grote schaal ingezet bij verkenningen met het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium. Het is reeds uitgebreid beschreven in publicaties en Alterra-rapporten. Maar met name het opzetten van het model vanuit de bodemfysische basisparameters was tot voor kort niet goed geformaliseerd en gedocumenteerd. Er waren reeds tests beschikbaar, maar die waren niet systematisch genoeg opgezet, niet gemakkelijk reproduceerbaar, en niet toegankelijk gemaakt voor derden. Om in deze situatie verbetering te brengen is een project doorlopen ten behoeve van certificering met 'Status A'. Daar is dit rapport zowel het verslag als een deel van het resultaat van. Overige 'producten' zijn documenten die bij deze certificering horen, namelijk de verbeterde versie van de Alterra-rapporten 913.1/2/3 (Van Walsum 2011a,b; Van Walsum *et al.*, 2011) een document met meta-informatie over het model, documenten die onderdeel uitmaken van het beheer van de code, en ten slotte de openbaar toegankelijke rekenresultaten van de hier beschreven tests (zie: <ftp://ftp.wur.nl/SIMGRO>). Om de bruikbaarheid van het model naar de toekomst toe veilig te stellen is een beheers- en exploitatieplan opgesteld

Overzicht aanpak

De kwaliteit van een modelcode hangt af van:

- de technische correctheid van de omzetting van de wiskundige vergelijkingen naar programmacode;
- het valide zijn van de gebruikte conceptualisering.

Het controleren van het eerste aspect wordt hier aangeduid als 'verificatie en testen software'. Het tweede aspect wordt aangeduid als 'kalibratie en validatie'. Bij een geslaagde validatie wordt het concept als valide beschouwd.

Verificatie en testen software

Gebruik is gemaakt een zogenaamde *code checker* die de programma naloop op programmeerfouten die niet door een *compiler* worden gedetecteerd.

Bij iedere tijdstap wordt per bodem-plant-atmosfeerkolom een waterbalans opgesteld. De maximale fout wordt uitgevoerd naar het scherm. De fout blijkt $3 \cdot 10^{-5}$ m/d te bedragen, wat gezien wordt als acceptabel. Tevens wordt een waterbalans van het totale systeem van bodem-grond-oppervlaktewater opgesteld. Met die balans wordt onder meer gecontroleerd of de volgende zaken goed zijn geprogrammeerd:

- de ruimtelijke dimensie;
- de overdracht van gegevens tussen deelmodellen.

Verificaties van het rekenhart van MetaSWAP zijn gedaan aan de hand van *stationaire* berekeningen, waarbij de bovenrandvoorwaarde constant werd gehouden. De test met constante potentiële transpiratie van 0.003 m/d gaf aan dat er in MetaSWAP geen structurele fouten worden gemaakt in de berekening van de verdampingsreductie als gevolg van vochttekort en in de berekening van de capillaire opstijging: de gemiddelde afwijking van MetaSWAP ten opzichte van SWAP bedraagt -0.8%. Het maximale verschil (van bodemeenheden die meer dan 1% van het areaal in NL vertegenwoordigen) bedraagt 6%; dat verschil wordt toegeschreven aan numerieke ruis als gevolg van tabelinterpolaties.

De verificatietest met constante neerslag van 0.015 m/d liet een 100% overeenkomst zien tussen MetaSWAP en SWAP bij gronden met een goede doorlatendheid, zand- en leemgronden. Bij veen- en kleigronden hadden beide modellen enige moeite om een stabiele berekening van de grondwaterstand te produceren. Maar aan die problemen wordt geen zwaar belang gehecht, omdat het situaties betreft met een zeer klein verzadigingstekort (<2 mm). De 'grondwaterstand' is dan zeer gevoelig voor kleine veranderingen in het totale vochtgehalte van de kolom, en derhalve geen geschikte indicator voor de hydrologische toestand van het systeem.

MetaSWAP heeft opties voor zowel berekening uit grondwater als uit oppervlaktewater. Het correct functioneren van de berekeningsoptie is gedaan aan de hand van berekening uit oppervlaktewater, omdat de code daarvan meer omvat dan die van grondwaterberekening. De test liet zien dat het model correct omgaat met de toegestane beregeningsperiode, de drukhoogte van het bodemvocht voor het beginnen van een beregeningsgift, de opgegeven cycluslengte, en de beschikbare capaciteit.

Uit de doorgevoerde tests zijn geen bedenkingen naar voren gekomen voor de omzetting van de wiskundige vergelijkingen naar programmacode.

Kalibratie en validatie

Het interceptieconcept van MetaSWAP is gekalibreerd aan de hand van beschikbare data uit de literatuur, zoals gerapporteerd in Bijlage 1. De beschikbare data zijn echter zeer beperkt en globaal van karakter. Een validatie van het interceptieconcept is daardoor niet mogelijk. Dat geldt eigenlijk ook voor de gewasfactoren. De gebruikte factoren dateren van veldproeven van meer dan 30 jaar oud. Het is de vraag of die waarden nog wel gelden voor de gewasvariëteiten die momenteel in zwang zijn. Het feit dat de gebruikte concepten en parameters van de plant-atmosfeerinteracties niet voldoende zijn gevalideerd, is op zich niet relevant voor het al of voldoen van MetaSWAP als metamodel van SWAP. Maar uiteraard is het wel zaak om dit zwakke punt van de modelvalidatie niet uit het oog te verliezen.

In dit geval gaat het niet om kalibratie op meetgegevens zoals gewoonlijk, maar om een kalibratie en validatie op resultaten van SWAP. Het gaat daarbij om het toetsing van het 'meta'-concept voor de vereenvoudigde simulatie van het bodemvocht met behulp van een *quasi steady-state* oplossing van de 'straight' Richards-vergelijking. De validatie van MetaSWAP is uitgevoerd binnen de beperkingen die voortvloeien uit de huidige ontwikkelfase van MetaSWAP.

Het meta-concept vereist de kalibratie van de volgende parameters:

- de dikte van de capillair beïnvloede aggregatielaag;
- de parameter van de Boesten-methode voor de berekening van kalegrondverdamping.

Beide kalibraties zijn met de volgende methode uitgevoerd:

- een gevoeligheidsanalyse van MetaSWAP, voor het bereik van de parameter;
- een kalibratie met behulp van een 'doelfunctie', waarbij de afwijking ten opzichte van SWAP-resultaten wordt geminimaliseerd.

Bij de uitgevoerde validaties is getoetst of het modelconcept adequaat is voor het modelleren van situaties die op twee manieren afwijken van de kalibratie:

- andere parameters van de MetaSWAP-kolom;
- andere weersomstandigheden.

Wat betreft de parameters is getoetst voor afwijkende waarden van:

- ontwateringsdiepte en drainageweerstand;
- in de tijd veranderende bodembedekkingsgraad;
- in de tijd veranderende wortelzonedikte;
- andere rekentijdstap;
- andere stapgrootte wortelzonedikte in de database.

De tests zijn uitgevoerd voor verschillende weersomstandigheden:

- extreem droog jaar dat niet voorkomt in de kalibratiereeks (2003);
- extreem nat jaar dat niet voorkomt in de kalibratiereeks (1966).

Al naar gelang het doel van een test is de evaluatie gedaan in termen van:

- kalegrondverdamping (tests bij 100% kale grond);
- totale actuele evapotranspiratie;
- de RMSE (*Root Mean Squared Error*) van de grondwaterstands simulatie;
- de totale bovengrondse afvoer;
- de hoogst optredende drainageafvoer.

Bij een minder diepe ontwatering (1.5 m) wijken de totale verdamping minder af van SWAP dan bij de diepe ontwatering (5 m) waarop is gekalibreerd. Het gewogen

gemiddelde van de absolute afwijking is voor een wortelzonedikte van 0.30 m beneden 0.5% en voor een wortelzonedikte van 1.0 m beneden 1.0 %. Dat de afwijkingen kleiner zijn voor een minder diepe ontwatering is een te verwachten resultaat, omdat de minder diepe grondwaterstand het verschil tussen actuele en potentiële transpiratie verkleint.

In de tests die als essentieel worden beschouwd voor het certificeren van nieuwe versies wordt een dynamische bodembedekkingsgraad en wortelzonedikte gecombineerd met de simulaties voor de extreme meteorologische jaren.

De 'essentiële' test voor het zeer droge jaar 2003 leverde op dat de maximale afwijking van de gesimuleerde evapotranspiratie slechts enkele procenten afwijkt van SWAP, althans wanneer gekeken wordt naar situaties die significant in het NHI (Nationaal Hydrologisch Instrumentarium, www.nhi.nu) voorkomen.

Bij de essentiële test voor het zeer natte jaar 1966 is vooral het dynamische gedrag van de grondwaterstand relevant. Deze test leverde op dat de gesimuleerde grondwaterstanden ten opzichte van SWAP een *RMSE* van maximaal 0.15 m hebben, wanneer gekeken wordt naar de eenheden die in het de NHI-schematisering voorkomen. Of deze simulatie nauwkeurig genoeg is hangt af van de beoogde toepassing van de resultaten.

Uit de tests komt naar voren dat voor simulaties met als doel afvoerstatistieken af te leiden het nodig is om een tijdstap van 0.5d of kleiner te gebruiken. Indien daaraan wordt voldaan, dan blijkt de naar oppervlaktefractie (van het NHI) gewogen maximale afvoer voor 1966 door MetaSWAP slechts 5% af te wijken van de door SWAP berekende waarde.

Uit de tests met bovengrondse afvoer bleek dat, ondanks het zeer eenvoudige infiltratie concept van MetaSWAP, er een redelijke mate van overeenstemming is met de resultaten van SWAP. Maar gezien de gevoeligheid van andere processen voor deze waterbalanstern (piekafvoer, fosfaatafspoeling) dient toch de nodige terughoudendheid te worden betracht bij het toepassen van MetaSWAP in situaties waar bovengrondse afvoer een cruciale rol speelt. Dat geldt met name situaties met extreme regenval op een uitgedroogde grond. Situaties met bovengrondse afvoer als gevolg van een verzadigde bodem worden daarentegen wel goed gesimuleerd.

Afgezien van de conceptuele beperkingen voor infiltratie en bovengrondse afvoer van een niet-verzadigde grond, komen uit bovengenoemde tests geen zwaarwegende tekortkomingen naar voren wat betreft het meta-concept voor de 'straight' Richards-vergelijking. In situaties waar geen speciale bodemfysische processen een rol spelen is MetaSWAP derhalve geschikt als vervanger van SWAP. Het geringe verlies aan 'nauwkeurigheid' moet men zien in relatie tot de onzekerheid van de bodemfysische parameters. De huidige bodemfysische parameterisering van de Nederlandse bodem bestaat uit een schematisering in slechts 21 eenheden. De fouten die daarmee worden gemaakt zijn veel groter dan die als gevolg van de vereenvoudigde simulatie met het meta-concept.

Aangezien het meta-concept zich vooralsnog heeft beperkt tot 'straight Richards', zijn de volgende speciale proceskenmerken niet gemodelleerd:

- hysteresis;
- preferente stroming (zandgronden);
- bypass flow (kleigronden);
- speciale processen die een rol spelen bij infiltratie.

Voor het NHI zijn bovengenoemde processen zeker relevant. Dat ze tot dusver niet in MetaSWAP zijn opgenomen is niet het gevolg van een generieke beperking van het concept maar van de specifieke ontwikkelfase waarin het model zich nu bevindt.

Gevoeligheidsanalyse

Kennis van de modelgevoeligheid voor de invoergegevens is belangrijk voor het correct toepassen van een model. Die kennis is ook nodig voor het efficiënt inzetten van de beschikbare tijd en middelen bij het uitvoeren van een modelstudie. Hier wordt als ingang genomen de ruimte- en tijddiscretisatie, omdat die in MetaSWAP deels anders is opgezet dan in SWAP. Voor de gevoeligheidsanalyse van parameters die de SVAT-kolom beschrijven wordt verwezen naar SWAP.

In de voorbereidingsfase van het MetaSWAP model wordt gebruik gemaakt van een discretisatie in compartimenten, net als in SWAP. Uit de gevoeligheidsanalyse voor de compartimentdikte is gebleken dat een dikte van 0.050 m een goed compromis is tussen rekennauwkeurigheid en efficiëntie.

Het MetaSWAP concept maakt gebruik van een indeling in aggregatielagen. De tweede laag wordt een speciale rol toebedeeld bij het simuleren van het niet-stationaire deel van de capillaire opstijging. Zoals verwacht blijkt het model gevoelig te zijn voor deze laagdikte. Het is daarom van belang om deze waarde te kalibreren op SWAP. Het bleek echter ook dat bij halvering van het vochtbergend vermogen van een bodem er nog steeds een zeer redelijke overeenstemming is tussen MetaSWAP en SWAP. Er is dus geen nieuwe kalibratie van de tweede laag nodig als er wordt gesleuteld aan het vochtbergend vermogen.

Uit de gevoeligheidsanalyse voor de tijdstap van langzame processen is gebleken dat voor de correcte simulatie van ontwateringsafvoer en oppervlakkige afstroming een tijdstap van niet meer dan 0.5 d gebruikt moet worden (bij gebruik van dagwaarden voor de neerslag).

Een verlaging van de zogenaamde Boesten-parameter met 20% bleek een verlaging van de kalegrondverdamping met 10% te geven.

1 Inleiding

Dit document is het hoofdverslag van werkzaamheden voor de certificering van 'MetaSWAP_V7_2_0' met 'Status A'. Behalve dit verslag maken de volgende documenten onderdeel uit van de certificering:

- About_SIMGRO_and_MetaSWAP_V7_2_0.pdf
- Alterra Report 913_1_V7_2_0.pdf, *Theory and implementation*
- Alterra Report 913_2_V7_2_0.pdf, *User's Guide*
- Alterra Report 913_3_V7_2_0.pdf, *Input and output reference manual*
- Change proposal_XXX.doc, format voor een veranderingsinitiatief
- Implementation_proposal_XXX.doc, format voor veranderingsvoorstel
- Test_report_XXX.doc, format voor test rapport
- SIMGRO_beheersplan 2011.pdf
- Release_Notes_SIMGRO_V7_2_0, lijst van veranderingen bij versies.

Dat in de naamgeving van documenten gerefereerd wordt aan 'SIMGRO' komt doordat MetaSWAP een *in-house* model is van het model raamwerk SIMGRO. Het beheer en onderhoud van de software van raamwerk en modellen vindt plaats als een geïntegreerd geheel.

De bij de certificering horende documenten en bestanden zijn te vinden op:

<ftp://ftp.wur.nl/SIMGRO>

Bij het verwijzen naar deze locatie wordt de afkorting `../` gebruikt.

De hoofdstukindeling volgt over het algemeen de rubrieken die voorkomen in het WOt-standaardformaat dat gebruikt wordt voor een projectvoorstel voor de certificering. Er is in dit document van de rubriekindeling afgeweken indien deze de verhaallijn teveel in de weg stond. De codes van de relevante rubrieken staan tussen haakjes vermeld in de kop van een paragraaf.

2 Theorie

2.1 De theoretische onderbouwing van het model (A1)

MetaSWAP is een modelcode voor de simulatie van processen in een SVAT-kolom, waarbij SVAT staat voor *Soil Vegetation Atmosphere Transfer*. Het model simuleert de processen vanaf de grondwaterspiegel tot en met de plant-atmosfeerinteracties. Het is een zogenaamd 'metamodel' van SWAP (Kroes *et al.*, 2009). MetaSWAP wordt als *in-house* model meegeleverd bij het model raamwerk SIMGRO. Dat raamwerk gebruikt een gebiedsschematisering waarbij de onverzadigde zone wordt voorgesteld als een verzameling kolommen die zijn gekoppeld aan het grondwater en aan het oppervlaktewater. Het overzicht van de koppelingen wordt gegeven in §1 van Alterra Report 913.1 (*Theory and implementation*). Dezelfde informatie komt deels terug in §1 van Alterra Report 913.2 (*User's guide*), maar dan meer direct toegespitst op de geboden modelopties.

De theoretische onderbouwing van MetaSWAP (versie V7.2.0) wordt gegeven in twee aparte hoofdstukken van Alterra Report 913.1:

- §2 over de simulatie van 'plant-atmosfeerinteracties';
- §3 over de simulatie van het bodemwater, inclusief de koppeling aan het grondwater.

De simulatie van het bodemwater is ook beschreven in Van Walsum en Groenendijk (2006, zie Bijlage 4). Dit betreft een korte beschrijving van het numerieke rekenschema en de koppeling aan MODFLOW. De wetenschappelijke onderbouwing is gegeven in Van Walsum en Groenendijk (2008). In een recent artikel over SIMGRO (Van Walsum & Veldhuizen, 2011) wordt aangetoond dat de koppeling MODFLOW-MetaSWAP een rekenschema heeft dat de nauwkeurigheid van een iteratieve koppeling benadert. Daarvoor hoeft per tijdstap slechts één keer de koppelcyclus te worden doorlopen. Dat maakt de koppeling zeer efficiënt. In het onderstaande wordt met name stilgestaan bij de relatie met het 'moedermodel' SWAP. Voor een gedetailleerde beschrijving wordt verwezen naar het genoemde rapport.

De modellering van de plant-atmosfeerinteracties komt overeen met de modellering in SWAP (Kroes *et al.*, 2009), behalve wat betreft de interceptieverdamping. In SWAP wordt de interceptieverdamping gesimuleerd met methodes die zijn gebaseerd op de aanname dat het interceptiewater van een bepaalde dag ook op diezelfde dag altijd *geheel* verdampt. Deze methodes lenen zich redelijk voor gebieden met kortstondige neerslag, maar zijn niet geschikt voor het type 'advectioneel' neerslag dat in Nederland vooral in de winter voorkomt. In een onderlinge werkgroep SWAP-MetaSWAP is reeds afgesproken om gebruik te maken van een methode waarbij een gesloten balans wordt gesimuleerd van het interceptiereservoir, en waarbij niet op voorhand wordt aangenomen dat het reservoir weer geheel leeg wordt aan het einde van een dag. Deze aan de literatuur ontleende methode is (enigszins aangepast) beschreven in Alterra Report 913.1, maar ontbreekt nog in het SWAP-model en in de documentatie daarvan. Derhalve was een vergelijking tussen de gesimuleerde interceptieverdamping van MetaSWAP en SWAP niet zinvol. Wel wordt in een aparte bijlage (Bijlage 1) de in MetaSWAP gebruikte parameterisering toegelicht en getoetst aan beschikbare kennis over de orde van grootte van de gesimuleerde interceptieverdamping.

Een ander verschil tussen SWAP en MetaSWAP betreft de rol van de vegetatiebedekking. In SWAP kan er bij 100% bedekking op geen enkele manier nog bodem- of plasverdamping plaatsvinden. Dus als een gewas helemaal onder water staat en de

plassen bijvoorbeeld 1 m diep op het maaiveld staan, dan wordt er nog steeds geen verdamping berekend in het geval dat de gewastranspiratie uitgeschakeld is als gevolg van te natte omstandigheden (zoals bijvoorbeeld bij aardappelen het geval is). In een regionaal model zou deze rekenwijze ertoe leiden dat er een sterke 'positieve' terugkoppeling op vernatting aanwezig is, die niet realistisch is: als het eenmaal nat is, dan wordt het nog natter als gevolg van de wegvallende transpiratie. Die terugval wordt bij een dergelijke rekenwijze op geen enkele manier gecompenseerd door toenemende bodem- of plasverdamping. Om de vergelijking tussen MetaSWAP en SWAP niet te laten afwijken als gevolg van de SWAP rekenwijze, is voor de certificering het MetaSWAP-model aangepast aan de methode van SWAP. De aanpassing is gedaan in de speciale versie V7.1.4c. Vervolgens zijn de validaties opnieuw uitgevoerd, maar dan met de nieuwste versie van MetaSWAP, versie V7.2.0. Verschillen ten opzichte van versie 7.1.4 zijn beschreven in de Release Notes. Verschillen tussen rekenuitkomsten van versie V7.1.4c en V7.2.0 zijn vervolgens verklaard.

Voor de bodemverdamping wordt dezelfde methode gebruikt als in SWAP, de zogenaamde Boesten-methode (Boesten en Stroosnijder, 1986). Deze methode is ooit bedacht omdat de bodemverdamping en het vocht- en damptransport net onder het maaiveld zeer moeilijk te modelleren zijn. De methode bevat een parameter die op basis van kalibratie is bepaald. Een standaardwaarde wordt gebruikt voor alle bodemtypen. De oorspronkelijke rekenmethode staat helemaal los van de bodemvocht-simulatie in SWAP en MetaSWAP. Echter, in SWAP wordt een verdere reductie van de actuele verdamping toegepast indien de doorlatendheid van de toplaag zeer gering wordt. Omdat dit effect niet in MetaSWAP direct kan worden gesimuleerd is het nodig om een extra kalibratieslag te maken, waarbij de Boesten-parameter wordt verlaagd ten opzicht van de standaardwaarde die in SWAP wordt gebruikt.

Het conceptuele model van de bodemwatersimulatie in MetaSWAP wordt beschreven in §3.3 van Alterra Report 913.1. Zowel SWAP als MetaSWAP hebben als basis een oplossingschema voor de Richards-vergelijking, te weten een niet-lineaire partiële differentiaalvergelijking voor drukhoogte, vochtgehalte en fluxen. Het essentiële verschil met SWAP is dat in MetaSWAP de partiële differentiaalvergelijking van Richards niet in één enkel rekenschema opgelost, maar in twee deelstappen.

Voor MetaSWAP wordt de Richards-vergelijking eerst in *stationaire* vorm opgelost, als een 'gewone' differentiaalvergelijking. Dat wordt gedaan voor een groot aantal boven- en onderrandvoorwaarden: de neerslag/verdamping wordt gevarieerd aan de bovenrand, de grondwaterstand aan de onderrand. De resultaten worden opgeslagen in een database die tijdens een run door MetaSWAP wordt geconsulteerd en gebruikt bij het oplossen van een 'gewone' differentiaalvergelijking voor de verandering van het watergehalte in de tijd. Dit type model wordt ook wel *quasi steady-state* genoemd, omdat het stationaire profielen gebruikt voor dynamische simulaties.

Een splitsing van de partiële differentiaalvergelijking in twee gewone vergelijkingen is onmogelijk zonder het doen van speciale aannamen: het is namelijk onmogelijk om van de ene *steady state* naar de andere te gaan zonder dat er een verschil is tussen fluxen aan de boven- en aan de onderkant van de verticale kolom. De manier waarop dit probleem wordt opgelost kan men zien als een vorm van heuristieken. Daarbij wordt een indeling in lagen gebruikt die een aggregatie zijn van de SWAP-compartimenten. Voor iedere laag kan het model een ander stationair profiel kiezen; de profielsegmenten hoeven niet op elkaar hoeven aan te sluiten. Op een verfijndere schaal is dat ook in SWAP het geval tussen de compartimenten.

Laag 1 van MetaSWAP is de wortelzone, laag 2 is een laag waarvan wordt aangenomen dat de drukhoogte altijd wordt 'meegetrokken' door de wortelzone. Dit wordt ook wel de

niet-stationaire capillaire zone genoemd. In deze laag treden opwaartse gerichte fluxen op die niet afhankelijk zijn van de diepte van de grondwaterstand. Het is nodig om de dikte van 'laag 2' te ijken op het SWAP-model. De aanname in MetaSWAP voor laag 2 maakt het mogelijk om ook niet-stationaire effecten in de capillaire opstijging te simuleren, waarbij waarden worden berekend die groter zijn dan de opstijging vanuit het grondwater in een puur stationaire situatie. Dit is een essentieel onderscheid met het model MUST (De Laat, 1980), waarvan de capillaire opstijging nooit groter kon worden dan die van een stationair profiel. In tegenstelling tot MUST is MetaSWAP wél in staat om de waterbalans van hangwaterprofielen met diepe grondwaterstanden adequaat te modelleren.

2.2 Het doel waarvoor het model is ontworpen (A2)

Veel vragen over het waterbeheer betreffen situaties en processen die beïnvloed worden door hydrologische terugkoppelingen op regionale schaal. Het beantwoorden daarvan vereist modellen die op een regionale schaal de hydrologische verbanden beschrijven. Vragen ten aanzien van waterverdeling spelen zich vaak op een nog grotere schaal af, zoals in de Nederlandse delta. Daar wordt op nationale schaal aan gerekend.

Het doel van MetaSWAP is het vervangen van SWAP bij het grootschalig doorrekenen van bodem-plant-atmosfeerkolommen die gekoppeld zijn aan geïntegreerde gebiedsmodellen van grondwater- en oppervlaktewater. Het vervangen van SWAP heeft de volgende redenen:

- het reduceren van de rekentijd;
- het beheersbaar maken van de gegevensstromen.

De Richards-vergelijking die in SWAP niet-stationair wordt opgelost, is zeer niet-lineair en daardoor rekenintensief. Een directe koppeling aan een grondwatermodel vergroot dit probleem nog verder als gevolg van de *curse of dimensionality*: het exponentieel toenemen van de rekenlast bij het toenemen van het aantal op te lossen vergelijkingen. Het alternatief is een iteratieve koppeling, waarbij de SWAP-simulaties worden uitgezet op een rekengrid. Hierdoor wordt de rekentijd geen onoverkomelijk probleem meer, maar zijn er wel aanzienlijke kosten. De rekenkosten van MetaSWAP zijn circa 25X lager, nog zonder rekening te hebben gehouden met de meerdere iteratierondes die het gebruik van SWAP kan vereisen. De wiskundige vorm van MetaSWAP maakt het namelijk mogelijk om een efficiënte koppeling met een grondwatermodel tot stand te brengen. Daarbij wordt voorkomen dat het hele model opnieuw moet worden doorgerekend bij iedere iteratieslag. Indien rekening wordt gehouden met 2-4 iteratierondes met SWAP, dan zijn de rekenkosten van MetaSWAP 50-100X lager. Indien het SWAP wordt geïmplementeerd met een kleinere compartimentdikte en kleinere tijdstap (zie §5.4 en §7.7) dan zullen de rekenkosten van SWAP stijgen.

Een iteratieve koppeling tussen SWAP en een grondwatermodel heeft vraagt een zeer omvangrijke datalogistiek, waarvan nog niet in de praktijk is gedemonstreerd dat het te beheersen is voor meer dan 10.000 kolommen, laat staan voor de 500.000 van het NHI.

MetaSWAP moet zeker niet worden gezien als een totale vervanging van SWAP. Ten eerste is SWAP altijd nodig voor de kalibratie en toetsing van MetaSWAP. Ten tweede kan het gebruik van MetaSWAP een stap zijn in een analyse van 'grof naar fijn', waarbij de eerste verkenning van de gebiedsprocessen met MetaSWAP gebeurt. Door de reken-efficiëntie is het veel beter mogelijk om met MetaSWAP grootschalige gevoeligheidsanalyses van de bodemfysische parameters uit voeren dan met SWAP. In een vervolgstap kan SWAP worden ingezet om de gebiedsprocessen meer gedetailleerd te modelleren.

2.3 Het toepassingsgebied van het model (A3, A10)

De ruimtelijke schematisering van de onverzadigde zone is in de vorm van verticale bodem-plant-atmosfeerkolommen die alleen uitwisseling met elkaar hebben via het grondwater en/of oppervlaktewater. Wat betreft de onverzadigde zone wordt een dergelijke schematisering toepasbaar geacht voor eenheden van minimaal 5x5 m². Een dergelijke fijne indeling kan toch zinvol zijn als de informatie over bodemfysische parameters op een veel grovere schaal beschikbaar is. In Nederland bevindt zich op 85% van het areaal de grondwaterstand binnen 2 m van het maaiveld. Kleine maaiveldhoogteverschillen kunnen dan significante gevolgen hebben voor de capillaire opstijging tijdens droge zomers.

Het is mogelijk om meerdere MetaSWAP-kolommen te koppelen aan een enkele grondwatercel, de $N:1$ koppeling. Dit kan een zeer geschikte werkwijze zijn voor het in model brengen van de genoemde maaiveldhoogteverschillen zonder het grondwatermodel te belasten met dezelfde mate van verfijning van het rekengrid. Ook is het mogelijk om met zogenaamde *tiles* te werken: meerdere aan dezelfde grondwatercel gekoppelde kolommen zijn representatief voor verschillende oppervlaktefracties, zoals kale grond, verhard oppervlak, oppervlaktewater, enz.

In een nabewerkingsstap is het mogelijk om de MetaSWAP-uitkomsten in verticale richting te disaggregeren, waarbij vocht- en fluxprofielen worden aangemaakt voor gebruik als invoer van waterkwaliteitsmodellen die ook gekoppeld zijn aan SWAP (bijvoorbeeld ANIMO, TRANSOL, SMART-SUMO).

Het model werkt met twee geneste tijdcycli:

- een snelle cyclus voor de plant-atmosfeerinteracties en voor de interacties met het oppervlaktewater;
- een langzame cyclus voor de onverzadigde zone en voor de koppeling met het grondwater.

De tijdstappen van de langzame cyclus en van het grondwater model moeten aan elkaar gelijk zijn.

Wat betreft het temporele schaalniveau is er een wijdverbreid misverstand dat een *quasi steady-state* methode alleen met intervallen van 10 dagen of langer kan worden toegepast, omdat anders 'aan de aanname van de *steady state* niet zou zijn voldaan'. Dit is echter een onjuist zienswijze. Om te beginnen is er na 10 dagen vrijwel nooit een *steady state* ingetreden. Belangrijker is dat de methode weliswaar gebruik maakt van *steady state* profielen als 'bouwstenen', maar ook niet meer dan dat. De juistheid van de operationalisering van deze bouwstenen in een dynamisch model kan niet sluitend wetenschappelijk worden onderbouwd, maar het kan wel *getoetst* worden. Die toetsing is gericht op de tijdsresolutie waar het model voor bedoeld is:

- grondwaterstanden per dageinde;
- waterbalansen gesommeerd over een dag.

Binnen de boven aangegeven ruimte- en tijdsresolutie en de in §2.4 beschreven representatie van de werkelijkheid, is het model geschikt voor het onderzoeken van de volgende thema's in relatie tot de regionale waterhuishouding:

- de invloed van het landgebruik op de grondwatervoeding en op de afvoer naar het oppervlaktewater; het landgebruik kan gedetailleerd worden beschreven met parameters die per dag van het jaar kunnen veranderen, zoals de bodembedekking, de interceptiecapaciteit, en de gewasfactor;
- de invloed van het regionale watersysteem en van het waterbeheer (berekening uit grond/oppervlaktewater, wateraanvoer, peilbeheer) op de ecohydrologische kenmer-

ken van een standplaats, in de vorm van bijvoorbeeld de relatieve transpiratie (actuele transpiratie gedeeld door de potentiële waarde); in combinatie met het stoftransport model TRANSOL is het in principe mogelijk om ook de zogenaamde kwel naar de wortelzone te simuleren; deze vorm van kwel is van belang bij de ecohydrologische evaluatie van beekdalgronden.

De simulaties van processen vinden plaats binnen de beperkingen die zijn beschreven de volgende paragraaf. Deze beperkingen hebben uiteraard gevolgen voor het toepassingsgebied van het model. In de context van het Nederlandse waterbeheer betreft dat (in de huidige ontwikkelfase van het model) vooral:

- het niet modelleren van de vries-dooi-processen; dat legt enige beperkingen op bij het berekenen van afvoerkenmerken, vooral de extremen aan de bovenkant van de verdeling;
- het niet modelleren van het infiltratieproces in de vorm van een indringend vochtfront;
- het niet kunnen simuleren van *bypass flow* naar het grondwater in waterkwaliteitsprocessen van scheurende kleigronden.

Voor de beschrijving van een toepassing van het MetaSWAP-model wordt verwezen naar de site van het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium: <http://www.nhi.nu>.

2.4 Representatie van de werkelijkheid in het model (A4)

Bij de gebruikte representatie van de werkelijkheid wordt in MetaSWAP vooralsnog een *straight* Richards schematisering van de waterstroming gebruikt, net als in SWAP. Daarbij wordt echter voorbijgegaan aan de volgende processen:

- hellingprocessen zoals die voorkomen in sterk hellende gebieden;
- laterale afstroming als gevolg van een ondiepe slechtdoorlatende laag; schijngrondwaterspiegels kunnen overigens wel in het profiel worden gesimuleerd;
- hysteresis en preferente stroming;
- de processen die specifiek zijn voor scheurende kleigronden (krimp van de bodemmatrix, *bypass flow*);
- de speciale processen die actief kunnen zijn bij infiltratie in een droge grond; er wordt in het model alleen vanuit gegaan dat een infiltratiebeperking kan ontstaan door de verzadigde doorlatendheid of door een extra beperking als gevolg van verharding;
- omzetting van water in sneeuw en ijs; overigens wordt voor deze omzetting in SWAP geen energiebalans (van de latente warmte) bijgehouden, en is derhalve slechts beperkt bruikbaar.

Het feit dat deze processen vooralsnog niet kunnen worden gemodelleerd ligt overigens niet aan generieke beperkingen van de rekenwijze van MetaSWAP, maar heeft te maken met de ontwikkelfase waarin de modelcode zich nu bevindt.

De aannames die zijn gedaan om vanuit de volledige oplossing van de Richards vergelijking naar de meta-oplossing te komen worden globaal aangegeven onder A.1. Voor een gedetailleerde beschrijving van wordt verwezen naar Alterra Report 913.1 (*Theory*) paragraaf 3.3.1, en naar Van Walsum en Groenendijk (2008).

3 Technische documentatie

3.1 Overzicht (A5, A6)

De meta-informatie over het model is als apart document beschikbaar: 'About_SIMGRO_and_MetaSWAP_V7_2_0'.

MetaSWAP bestaat uit een suite van drie afzonderlijke programma's:

- het *preprocessing* programma PreMetaSWAP, voor het maken van de bodemfysische database met de resultaten van *steady state* berekeningen voor alle bodemfysische eenheden; de *steady state* profielen van drukhoogte en vochtgehalte worden geaggregeerd naar rekenlagen van MetaSWAP;
- het *simulatieprogramma* MetaSWAP, dat de eigenlijke simulatie uitvoert; dit rekenprogramma is gecodeerd als een aantal subroutines die door het hoofdprogramma van SIMGRO worden aangeroepen; een *stand alone* versie is niet beschikbaar vanwege beheer-technische redenen; voor het doen van *stand alone* berekeningen (eventueel ook met één enkele eenheid) kan het model gerund worden gekoppeld aan een *dummy* MODFLOW model;
- het *postprocessing* programma PostMetaSWAP, voor het disaggregeren van de rekenresultaten; dit levert drukhoogte- en vochtprofielen in een mate van detail die overeenkomt met de gebruikte SWAP schematisering in de preprocessing; het is beschikbaar als *online* module gekoppeld aan MetaSWAP en ook als zelfstandig programma.

Een globaal overzicht van de werking van MetaSWAP gekoppeld aan het SIMGRO-raamwerk is weergegeven in Figuur 4 in Alterra Report 913.1 (*Theory and implementation*). De rekenstappen van MetaSWAP en de koppeling aan MODFLOW zijn op een globale wijze verder uitgewerkt in het stroomdiagram van Figuur 5. Een korte technische beschrijving van de rekenwijze van MetaSWAP en de koppeling aan MODFLOW is opgenomen in Van Walsum en Groenendijk (2006), dat als Bijlage 4 is toegevoegd aan dit document. In een recent ingediend artikel over SIMGRO (Van Walsum & Veldhuizen, 2011) wordt de koppeling verder uitgelegd.

De code van het simulatieprogramma MetaSWAP omvat 8000 regels (inclusief commentaar- en spatierregels), dat van de preprocessing 2500 regels, en dat van de postprocessing 3500 regels. De code is ruim voorzien van commentaar. Maar vooralsnog is het niveau van de documentatie onvoldoende om het model bij wijze van spreken na te kunnen laten bouwen door iemand anders dan de ontwikkelaar.

SIMGRO wordt als subroutine aangeroepen vanuit het hoofdprogramma van MODFLOW. Er wordt in samenwerking met Deltares gewerkt aan een zogenaamde componenten-versie. In die software-configuratie is er een 'regisseur'-programma die de verschillende componenten aanroept, waaronder MODFLOW en SIMGRO. SIMGRO zal dan als zelfstandig programma ('object') gaan functioneren.

3.2 Modelparameters (A7)

De modelparameters zijn beschreven in Alterra Report 913.1 (*Theory and implementation*); bij iedere modelvergelijking worden de parameters geheel verklaard. Aan het einde van ieder hoofdstuk staat ook een Data Summary. De modelparameters vallen uiteen in twee hoofdgroepen:

- generieke parameters die ontleend zijn aan algemene kennis over de Nederlandse hydrologie, zoals de bodemfysische 'PAWN'-eenheden en gewasparameters;

- parameters die gebiedsspecifiek zijn, zoals het vegetatietype.

De gebiedsspecifieke parameters worden ontleend aan *overlays* tussen kaarten van modeleenheden en van landgebruikskenmerken.

Voor de bodemfysische parameters wordt gebruik gemaakt van de bouwstenen van de Staringreeks (Wosten *et al.*, 2001). Het gebruik van deze bouwstenen voor de PAWN-schematisering van 21 eenheden is beschreven in:

http://www.nhi.nu/referenties/DR11/NHI2008DR11_v1_%20Bodem.pdf

Per bodemlaag van de PAWN eenheden gaat het om de volgende parameters:

- $K(\psi)$: de doorlatendheid (m/d) als functie van de drukhoogte ψ (m);
- $\theta(\psi)$: het vochtgehalte (m^3/m^3) als functie van de drukhoogte ψ (m).

Het NHI-deelrapport over de gebruikte gewasparameters, inclusief *overlay* met de landgebruikskaart van Nederland, is te vinden in:

http://www.nhi.nu/referenties/DR12/NHI2008DR12_v2_Gewaskenmerken.pdf

Sinds het verschijnen van bovengenoemd NHI-deelrapport is er voor de generieke gewasparameters een verbetering gemaakt die is opgenomen als Bijlage 1 van dit rapport. Deze bijlage gaat om toekennen van waarden aan:

- $C_s(t)$: bodembekingsgraad per dag van het jaar (m^2/m^2)
- $LAI(t)$: Leaf Area Index (m^2/m^2)
- $f_T(t)$: gewasfactor for transpiratie (-)
- $f_{Eic}(t)$: gewasfactor for interceptieverdamping (-)
- $S_{c, cap}(t)$: interceptiecapaciteit van de vegetatie (m^3/m^2)

Voor de gewasfactoren van kale grond en plassen worden standaardwaarden van respectievelijk 1.0 (de waarde van nat gras) en 1.25 gebruikt (de waarde voor open water).

3.3 Beschrijving invoer en uitvoer (A8, A9)

Een overzicht van de invoergegevens staat in Tabel 1.2 van Alterra Report 913.3 (*Input and output reference manual*), met in de tabel *hyperlinks* naar de betreffende paragrafen waar de invoerbestanden worden beschreven, inclusief de eenheden waarin de data dienen te worden aangeleverd. Alle bestanden met 'SVAT' in de naam hebben betrekking op MetaSWAP.

Een overzicht van invoerbestanden wordt ook gegeven in Tabel 2.1 van de *User's Guide* (Alterra Report 913.2). Per invoerbestand worden aanwijzingen gegeven over hoe de vereiste data kunnen worden vergaard. In Appendix A van de *User's Guide* wordt beschreven hoe de bodemfysische database van MetaSWAP kan worden gegenereerd vanuit basisgegevens van de bodemfysische schematisering (zie §3.2).

De uitvoer is beschreven in Alterra Report 913.3 (*Input and output reference manual*). De wijze waarop specifieke data uit de door MetaSWAP weggeschreven databases kunnen worden geëxtraheerd staat beschreven in §3 van Alterra Report 913.2 (*User's Guide*). De data worden uitgeleverd in twee vormen:

- als *csv*-bestand voor de aparte SVAT-eenheden;
- als *grid*-bestand.

Er was tot voor kort geen lijst met foutmeldingen beschikbaar. De foutmeldingen waar een gebruiker mee kan worden geconfronteerd zijn nu opgenomen in Tabel 4.1 en Tabel 4.2 van Alterra Report 913.2 (*User's Guide*).

4 Gebruikersdocumentatie

4.1 Overzicht (A11-A15)

Het document met meta-informatie (*About_SIMGRO_and_MetaSWAP-V7_2_0*) kan dienen voor een eerste kennismaking met het model. Het model is toegepast als onderdeel van het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium, zie <http://www.nhi.nu>.

Gebruik van het model vereist minimaal HBO-niveau van kennis op het gebied van bodem-water-atmosfeerinteracties. Voor het runnen van het model is minimaal de volgende computerkennis vereist:

- ervaring met de MS windows omgeving;
- kunnen omgaan met een text editor.

De invoer en uitvoer is beschreven in Alterra Report 913.3 (*Input and output reference manual*). In Alterra Report 913.2 (*User's guide*) wordt per bestand toegelicht hoe de data kunnen worden verkregen. Tevens wordt beschreven hoe specifieke data uit de aangemaakte databases kunnen worden geëxtraheerd. Er is geen *Graphical User Interface* beschikbaar.

Het toepassingsgebied van het model wordt beschreven in §2.3. Voor de beschrijving van een toepassing van het MetaSWAP-model wordt verwezen naar de site van het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium, <http://www.nhi.nu>.

4.2 Hardware restricties (A12)

Het meta-concept is relatief geheugenintensief. Dat komt doordat het leunt op berekeningen die in de voorbewerkingsfase zijn gedaan. De resultaten van die berekeningen worden vanuit een database in het geheugen geladen bij het opstarten van MetaSWAP. Aan de hand van het NHI-model is nagegaan dat voor de 21 PAWN-eenheden en voor de gebruikte wortelzonediktes er een geheugenbeslag is van 1,1Gb, oftewel ca. 50 Mb per bodemeenheid. Voor MetaSWAP zelf is circa 4 kB per SVAT-kolom nodig. Voor het NHI-model van 500.000 eenheden is dan circa 3,1 Gb nodig. Aangezien dit geheugengebruik (plus wat nodig is voor MODFLOW) de 2 Gb overschrijdt, is het nodig om te draaien in een 64-bits omgeving.

Het geheugenbeslag per bodemeenheid betekent dat het aantal eenheden niet onbeperkt kan worden uitgebreid. Er zijn twee ontwikkelingen die de dreigende beperking als gevolg van het geheugenbeslag in belang doet verminderen. De eerste ontwikkeling betreft het idee om via schaalfactoren het gebruik van een bodemeenheid 'op te rekken'. De database voor een bepaalde bodemeenheid kan dan worden gebuikt voor een hele serie eenheden die ervan afgeleid zijn. De tweede ontwikkeling betreft de kostprijs van geheugens. Anno 2011 zijn er *work stations* te koop met een basisprijs van E2000,- die zijn uitgerust met een moederbord waar 196 Gb aan RAM-geheugen op kan worden geïnstalleerd, voor een kostprijs van ca. E2500,- (49 modules van 4 Gb a E50,-). Juist de kostprijs van geheugen is de laatste tijd veel sneller gedaald dan de kostprijs van CPU-tijd.

De rekentijd van MetaSWAP is geklokt aan de hand van het NHI*light*-model met ca 34.000 eenheden. Door het SIMGRO programma worden bestanden aangemaakt waarmee de rekentijd van de programma-onderdelen wordt geregistreerd, zowel de 'Real

Time' als de 'Cpu Time'. Het simuleren van 1 rekenjaar vereiste voor MODFLOW 600 s (Real Time) en voor MetaSWAP 270 s. Voor een zuivere bepaling van de MetaSWAP tijd moet er rekening mee worden gehouden dat MODFLOW extra iteraties maakt als gevolg van de dynamische veranderende bergingscoëfficiënt in de iteratielus van een tijdstap. Om dat aandeel expliciet te krijgen is een speciale versie van MetaSWAP gemaakt waarbij de bergingscoëfficiënt slechts één keer per *tijdstap* wordt aangepast. Uit de gedane rekenrun blijkt dan dat de MODFLOW-rekentijd terugloopt van 600 s naar 440 s per rekenjaar. Het verschil van 160 s moet dus opgeteld worden bij de MetaSWAP-tijd. De MetaSWAP tijd is dus $270+160 = 430$ s en de MODFLOW-tijd 440 s per rekenjaar; de rekentijd-aandelen van MODFLOW en MetaSWAP zijn dus ongeveer gelijk. Per MetaSWAP-kolom is de rekentijd 0.013 s per rekenjaar, inclusief het wegschrijven van de uitvoerdata. Het inlezen van de bodemfysische database aan het begin van de run kostte overigens ca 100 s voor 1,1 Gb.

Wat betreft de gebruikte hardware wordt vooralsnog gerekend met een enkele rekenkern, ook al zijn er meerdere kernen op een computer beschikbaar. Wel zijn reeds een groot aantal van de rekenlussen voorzien van 'PARALLEL DO' *constructs*, in de taal OpenMP (<http://openmp.org/wp/>). Alle toestandsvariabelen van MetaSWAP hebben namelijk een index voor de SVAT-eenheid, waardoor de code relatief makkelijk is te paralleliseren. Er wordt nog wel in de MetaSWAP-code op een vrij grote schaal gebruik gemaakt van tijdelijke variabelen, om geheugen te sparen. Maar gezien de recente hardware-ontwikkelingen is die werkwijze achterhaald, en zouden deze variabelen ook kunnen worden voorzien van een SVAT-index. De eerste ervaringen met OpenMP waren overigens niet onverdeeld gunstig. In veel gevallen werd er slechts weinig winst geboekt, maar ging wel het beslag op de multiple rekenkernen sterk omhoog. Het optimaal gebruik maken van OpenMP is specialistenwerk en zal waarschijnlijk in het kader van een samenwerking met het NMDC (Nationaal Modellen en Data Centrum) worden aangepakt.

5 Verificatie en testen software

5.1 Inleiding (A19)

Bij de verificatie wordt nagegaan of de wiskundige vergelijkingen op een correcte manier zijn omgezet naar software. De beschikbare werkwijzen om dat na te gaan zijn in te delen als:

- directe methoden, waarbij controles op de code zelf worden uitgevoerd;
- indirecte methoden, waarbij doelgericht bepaalde rekentests worden uitgevoerd met de code.

Beide soorten werkwijzen zijn gebruikt. Onder de directe werkwijzen valt het gebruik van software *tools* dat wordt beschreven in §5.2. Onder de indirecte werkwijze vallen onder andere:

- de waterbalanstests beschreven in §5.3;
- de tests van de processimulatie onder stationaire situaties beschreven in §5.4;
- de test van beregeningsoptie beschreven in §5.5.

De stationaire berekeningen zijn tests van wat het 'limietgedrag' wordt genoemd in de toelichting van het WOt-projectformulier voor Status-A-certificering. In dat formulier worden nog een aantal andere suggesties gedaan:

- in de *maximum coverage* test worden alle regels minimaal 1 maal doorlopen. Dit aspect komt hier niet bij de 'verificatie' maar bij de 'validatie' feitelijk aan de orde: er worden in §7 meerdere validaties voor zowel een extreem droog als een extreem nat jaar gepresenteerd. Men kan aannemen dat daarbij alle mogelijke situaties aan bod zijn gekomen, hoewel er niet formeel op dat punt getoetst is;
- een random test wordt voorgesteld. Een dergelijke test heeft echter weinig zin wanneer niet een zeer groot aantal tests wordt gedaan om er significantie aan toe te kunnen kennen;
- de suggestie om de correctheid van de volgorde van de berekeningen te controleren is eerder een soort tip programmeertip. Een formele toets is er niet voor te bedenken.

In het projectvoorstel worden diverse tests van het dynamisch gedrag voorgesteld:

- transient vollopen met water vanuit een droge begintoestand;
- transient leeglopen vanuit een verzadigde begintoestand;
- puls-respons gedrag onder normale condities;
- idem onder extreme condities.

Deze tests komen in feite ook terug in de validatie-simulaties (§7), voor het droge jaar 2003 en voor het natte jaar 1966. Derhalve werd het als niet noodzakelijk geacht aparte tests voor het dynamisch gedrag uit te voeren.

De invloed van de rekestijdstap op de rekenresultaten is uitgebreid onderzocht bij de validatie van de kalibratie, zie §7.

De invloed van de stapgrootte van de wortelzonedikte bij het aanmaken van de bodemfysische database is onderzocht als extra test bij de validatie van de kalibratie.

De gecertificeerde codeversie is opgeslagen als SVN-revisie 350, met als SIMGRO-versie V7_2_0. De meeste berekeningen zijn echter gedaan met een eerdere versie, V7_1_4c. Voor het inhoudelijke verschil tussen deze versies zie Bijlage 3.

5.2 Basale tests van programmacode (A18)

Bij de omzetting van de modelvergelijkingen naar programmacode is gebruik gemaakt van de beschikbare mogelijkheden van de programmeeromgeving om codeerfouten te diagnosticeren.

Ten eerste zijn daartoe alle modules voorzien van het statement `IMPLICIT NONE`, om ervoor te waken dat als gevolg van bijvoorbeeld typefouten een verkeerde variabele naam wordt gebruikt, of dat er verzuimd is de variabele te declareren.

Ten tweede zijn alle code-onderdelen door de code-checker `FORCHECK` gehaald. Het gaat daarbij zowel om de code-versie `V7.1.4c` die gebruikt is om `MetaSWAP` te toetsen aan `SWAP` als de versie `V7.2.0` waar de certificering voor is aangevraagd. De beschrijvingen van de `FORCHECK` tests zijn opgenomen in Bijlage 2.

Voor de programmeertaal Fortran is er geen faciliteit beschikbaar om de controle van dimensies en eenheden geautomatiseerd uit te voeren. Het visueel controleren van de code is uiteraard reeds geschied bij het programmeren zelf; een extra visuele controle achteraf voegt in formele zin niets toe, terwijl het wel zeer arbeidsintensief is om meerdere 1000'en regels nog eens na te lopen.

Indirecte controles van de dimensies en eenheden worden geleverd door de hierna te bespreken waterbalans- en processimulatietests. De correcte programmering van de tijdsdimensie wordt echter niet door deze tests geverifieerd, omdat bij deze tests een tijdstap van 1 dag is gebruikt. De indirecte verificatie van de tijdsdimensie wordt geleverd door de validatie waarbij de tijdstap wordt gevarieerd (A24).

5.3 Waterbalanstests (A18, A20)

De waterbalansen van de SVAT-kolommen worden iedere tijdstap getest bij het draaien van het model. De maximale waarde van 'watercreatie' en 'waterdestructie' worden zowel naar de log-file als naar het scherm uitgevoerd. De maximale fout bedraagt 0.03 mm/d. Gezien het gebruik van *single precision* variabelen wordt dat als een acceptabele nauwkeurigheid gezien. De keuze voor *single precision* is ingegeven door de wens het geheugengebruik te beperken, en de rekensnelheid zo hoog mogelijk te maken.

Indien behalve `MODFLOW` ook een oppervlaktewatermodel aan `SIMGRO` is gekoppeld, dan kan een waterbalanstest van het gehele systeem automatisch worden uitgevoerd, zoals beschreven in §4.4. van Alterra Report 9.1.3. Een voorbeeld van een dergelijke waterbalanstest is beschikbaar voor een eencellig `MODFLOW`-model. Er zijn twee varianten van deze test: Een variant waarbij de `MODFLOW` cel 1:1 gekoppeld is aan één `MetaSWAP`-kolom, en een variant waarbij twee identieke `MetaSWAP`-kolommen zijn gekoppeld aan de ene `MODFLOW` cel. De tests zijn te vinden op:

- `../Tests/Testbank_V7_1_4/MetaSWAP/1cell/1svat_1drng`;
- `../Tests/Testbank_V7_1_4/MetaSWAP/1cell/2svat_2drng`.

De runs worden gedraaid via de bat-file `modmsw.bat`, in de folders van de aparte runs.

De waterbalanstest van het totale systeem staat in de file `TOT_SWMDL1_DTGW.CSV`, waarbij de afwijking in de laatste kolom *Vcr* staat. Met name de tweede test is een indirecte test van de horizontale dimensie (L^2). Vergelijking van de csv files voor de SVAT-kolommen (`svat_dtgw_0000000001.csv`) laat zeer slechts kleine afwijkingen zien (grondwaterstandverschillen < 0.1 mm) tussen de twee tests.

5.4 Processimulatie voor stationaire situaties (A18, A20, A27)

5.4.1 Situaties met capillaire opstijging

Cruciaal in het oplossingschema van de Richards-vergelijking is de wijze waarop wordt omgegaan met de invloed van het verloop van drukhoogte/vochtgehalte op de onverzadigde doorlatendheid. Daarbij wordt voor de flux tussen compartimenten een speciaal soort middeling toegepast. In de stationaire versie van SWAP (die gebruikt wordt in de voorbereidingsfase van MetaSWAP) wordt een wat andere middelingsmethode toegepast dan in SWAP zelf. Bij zeer kleine compartimentdikte zou het rekenresultaat niet gevoelig moeten zijn voor het rekenschema. Daarom is een vergelijking gemaakt tussen MetaSWAP en SWAP aan de hand van rekenresultaten bij een kleine compartimentdikte van SWAP, te weten 0.01 m. Vervolgens is gekeken hoe de rekenresultaten worden beïnvloed door het groter maken van de compartimentdikte.

Om de codering van de processimulatie voor stationaire situaties te verifiëren is gebruikgemaakt van een testset met de volgende kenmerken:

- 21 bodemfysische eenheden van de PAWN-schematisering die ook in het NHI wordt gebruikt; (zie ook onder A7);
- grasland met een gewasfactor van 1.0, met 100% bedekkingsgraad;
- wortelzonedikte van 0.3 m;
- ontwateringsdiepte van 1.0 m en een drainage weerstand van 50 d, met infiltratiemogelijkheid vanuit het oppervlaktewater.

Voor de bovenbeschreven testset met ondiepe ontwatering zijn runs gemaakt met een constante potentiële transpiratie van 0.003 m/d. Daarbij zijn de volgende compartiment-schematiseringen gebruikt:

- $\Delta z = 0.01$ m, in het hele profiel;
- $\Delta z = 0.025$ m, in het hele profiel;
- $\Delta z = 0.05$ m, in het hele profiel;
- $\Delta z =$ volgens het gebruikelijke 'STONE' schema, dat is weergegeven in Tabel 5.1 (zie ook b.v. <http://library.wur.nl/WebQuery/hydrotheek/lang/1878865>)

De SWAP-tests staan onder `../Tests/Testbank_V7_1_4/SWAP`

- `test17ondiep_SteadyCaprise_SWAP3226`, compartimentschematisering zoals in Stone
- `test17ondiep_SteadyCaprise_SWAP3226_dz5cm`, compartimentdikte van 0.05 m
- `test17ondiep_SteadyCaprise_SWAP3226_dz2p5cm`, " van 0.025 m
- `test17ondiep_SteadyCaprise_SWAP3226_dz1cm`, " van 0.01 m

De runs worden gedraaid via de bat-file `hupsel.cmd`, in de folders van de aparte runs.

De MetaSWAP tests staan onder `../Tests/Testbank_V7_1_4/MetaSWAP/`

- `cali06/test17ondiep_Ebs_cal_SteadyCapRise_riv` met de STONE-schematisering;
- `cali07/test17ondiep_Ebs_cal_SteadyCapRise_riv`, met compartimentdikte van 0.01m.

De runs worden gedraaid via de bat-file `modmsw.bat`, in de folders van de aparte runs.

Voor de SWAP-tests zijn de verschillende compartimentschematiseringen ingevoerd in de `.swp` bestanden, onder "Part 4: Vertical discretization of soil profile". De schematiseringen met een compartimentdikte van 0.025 m en 0.05 m zijn alleen gedaan voor PAWN-eenheid 11. Het gebruikte 'rekenjaar' is 2003 voor de constante potentiële transpiratie/neerslag, zie bestand `weather/260.003`. De runs worden uitgevoerd via het `hupsel.cmd` bestand.

Voor de MetaSWAP-tests met verschillende compartimentschematiseringen zijn precies dezelfde modelbestanden gebruikt, behalve het bestand `PARA_SIM.INP`: de parameter `unsa_svat_path` wijst naar verschillende bodemfysische databases, die gemaakt zijn met verschillende compartiment-schematiseringen. De runs worden uitgevoerd via het `modmsw.bat` bestand in de work directory.

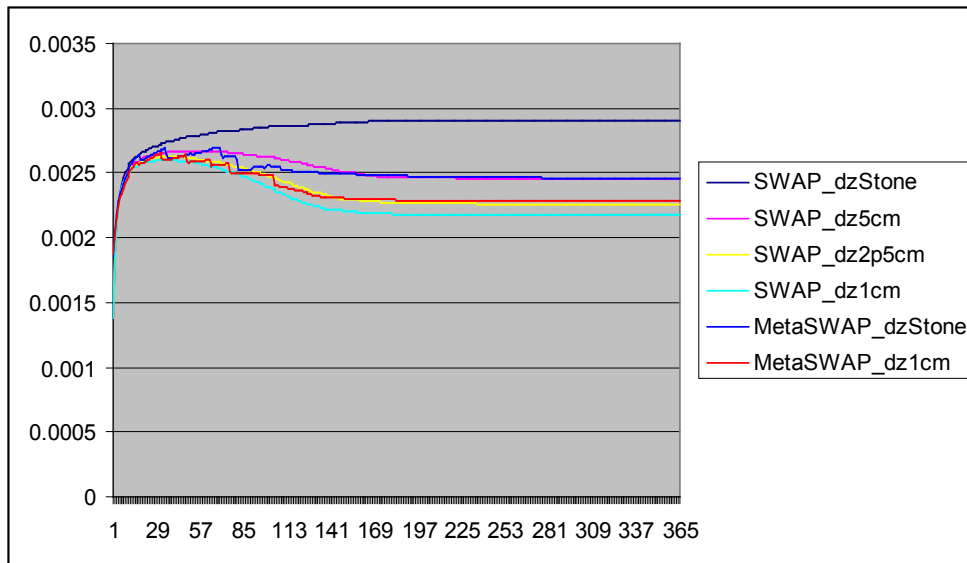
De berekeningen hebben gelopen voor een volledig simulatiejaar. In Tabel 5.2 is de vergelijking opgenomen tussen de SWAP runs voor de twee uitersten van bovenstaande schematiseringen. In Figuur 5.1 zijn de resultaten voor eenheid 11 geplot. Uit deze rekenexercitie is geconcludeerd dat de berekeningen met een compartimentdikte van 0.01 m zouden moeten geschieden om invloed van de schematisering uit te sluiten

Tabel 5.1: Compartimentdikte-schematisering in STONE

Diepteinterval (m)	SWAP compartimentdikte (m)
0-0.05	0.01
0.05-0.35	0.025
0.35-0.50	0.05
0.50-2.0	0.10
2.0-3.0	0.20
3.0-5.0	0.40

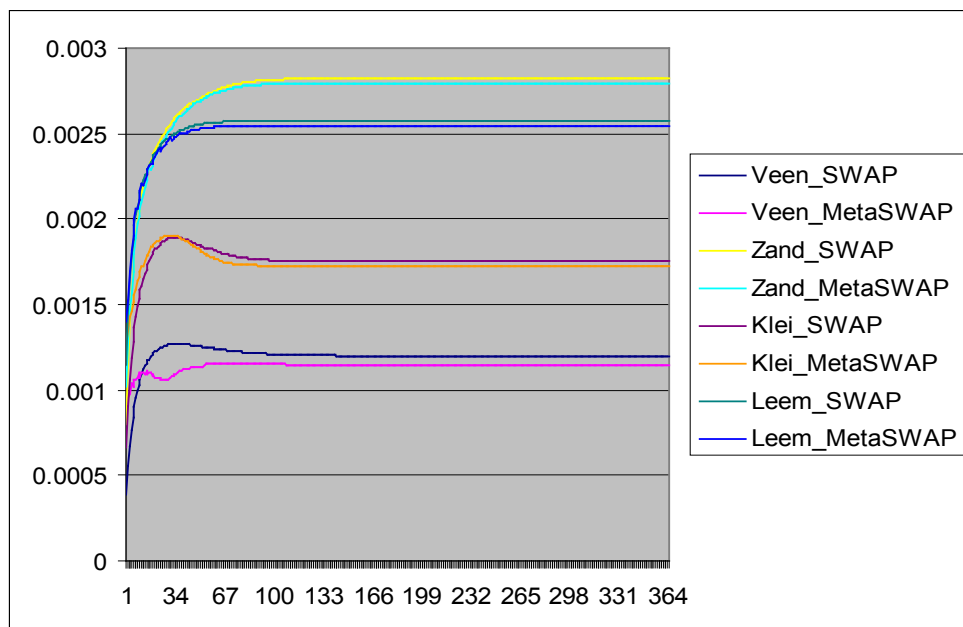
Tabel 5.2: Vergelijking van door SWAP met twee verschillende laagschematiseringen berekende jaartranspiratie, bij een constante potentiële transpiratie van 0.003 m/d, bij een oppervlaktewaterpeil van 1 m-mv en een infiltratieweerstand van 50 d (test17ondiep).

PAWN- eenheid	Wortelzone dikte (m)	Tact_ SWAP_ dzSTONE (mm a ⁻¹)	Tact_ SWAP_ dz1cm (mm a ⁻¹)	Δ (%)
1	0.3	532	517	-2.9
2	0.3	761	727	-4.5
3	0.3	476	457	-4.0
4	0.3	516	489	-5.3
5	0.3	644	611	-5.2
6	0.3	336	322	-4.4
7	0.3	744	724	-2.7
8	0.3	893	871	-2.5
9	0.3	1059	1045	-1.4
10	0.3	1061	1046	-1.4
11	0.3	1087	896	-17.6
12	0.3	964	943	-2.2
13	0.3	1095	1095	0.0
14	0.3	144	127	-11.6
15	0.3	983	968	-1.6
16	0.3	714	693	-2.9
17	0.3	226	213	-5.9
18	0.3	293	266	-9.2
19	0.3	972	920	-5.3
20	0.3	738	601	-18.6
21	0.3	981	964	-1.7



Figuur 5.1: Verloop van de met SWAP en MetaSWAP berekende capillaire opstijging (m/d) met diverse verschillende laagschematiseringen, bij een constante potentiële transpiratie van 0.003 m/d, voor PAWN-bodemeenheid nummer 11

In Figuur 5.2 zijn voor een viertal grondsoorten het verloop van de gesimuleerde capillaire opstijging getoond, bij gebruik van een compartimentdikte van 0.01 m. De 'hobbel' in het verloop voor klei en veen is een gevolg van de heuristische rekenwijze voor de niet-stationaire component van de opstijging. Die wordt berekend door het 'gedwongen' mee laten uitdrogen van de laag 2, waarvan de dikte d_2 wordt bepaald via kalibratie (zie §6).



Figuur 5.2: Simulatie van de capillaire opstijging bij een constante potentiële transpiratie van 0.003 m/d, voor een viertal gronden. De PAWN-eenheden zijn respectievelijk: 1=veen ; 9=zand; 16=klei; 21=leem, bij een wortelzonedikte van 0.3 m, een oppervlaktewateterpeil van 1.0 m -mv, en een infiltratieweerstand van 50 d.

In Tabel 5.3 is de jaarsom van de actuele transpiratie getoond voor SWAP en MetaSWAP. De maximale afwijking van eenheden die meer dan 1% van het NHI-model vormen is 6.2%. De getoonde afwijkingen worden toegeschreven aan 'toevallige' interpolatiefouten. Er blijkt namelijk geen structurele fout op te treden: Het gewogen gemiddelde van de fout bedraagt -0.8%. Het gewogen gemiddelde van de absolute waarde van de fout bedraagt 1.4%.

Tabel 5.3: Vergelijking tussen de totale jaartranspiratie van SWAP en MetaSWAP voor een constante potentiële transpiratie van 0.003 m/d (test17ondiep).

PAWN-eenheid	Wortelzone dikte (m)	Tact_SWAP (mm a ⁻¹)	Tact_metaSWAP_ (mm a ⁻¹)	Δ (%)
1	0.3	517	500	-3.3
2	0.3	727	718	-1.2
3	0.3	457	429	-6.2
4	0.3	489	453	-7.3
5	0.3	611	599	-1.9
6	0.3	322	321	-0.3
7	0.3	724	726	0.3
8	0.3	871	882	1.3
9	0.3	1045	1047	0.2
10	0.3	1046	1048	0.2
11	0.3	896	940	4.9
12	0.3	943	940	-0.2
13	0.3	1095	1095	0.0
14	0.3	127	122	-3.9
15	0.3	968	975	0.7
16	0.3	693	693	0.0
17	0.3	213	213	0.1
18	0.3	266	260	-2.0
19	0.3	920	912	-0.9
20	0.3	601	636	5.8
21	0.3	964	964	-0.1
1	1.0	997	946	-5.2
2	1.0	1095	1094	-0.1
3	1.0	973	918	-5.6
4	1.0	1032	970	-5.9
5	1.0	1078	1049	-2.6
6	1.0	758	695	-8.3
7	1.0	1095	1095	0.0
8	1.0	1095	1095	0.0
9	1.0	1095	1095	0.0
10	1.0	1095	1095	0.0
11	1.0	1030	1064	3.4
12	1.0	1095	1095	0.0
13	1.0	1095	1095	0.0
14	1.0	671	631	-5.9
15	1.0	1095	1095	0.0
16	1.0	1053	1044	-0.9
17	1.0	624	581	-6.9
18	1.0	830	764	-7.9
19	1.0	1095	1095	0.0
20	1.0	882	870	-1.4
21	1.0	1095	1095	0.0

5.4.2 Situaties met percolatie

Voor het doen van rekenexperimenten met percolatie is gekozen voor een neerslag van 0.015 m/d, een ontwateringsdiepte van 1 m, en een drainageweerstand van 50 d. Bij een volledige infiltratie van de neerslag hoort een opbolling van $0.015 \cdot 50 = 0.75$ m. De modellen zouden dan moeten uitkomen op een grondwaterstand van 0.25 m -mv. Bij niet volledige infiltratie van de neerslag moet op een diepere grondwaterstand worden uitgekomen.

In het MetaSWAP-model wordt de infiltratiecapaciteit in eerste instantie bepaald door de bovenste bouwsteen van de bodemfysische schematisering. De doorstroming kan echter ook worden belemmerd door de doorlatendheid van een diepere bouwsteen, als deze zich in het onverzadigde deel van het profiel bevindt.

In SWAP maakt het *verzadigde* deel van de kolom ook onderdeel uit van de berekening. Maar de drainageflux is gekoppeld aan de *grondwaterstand*. Dus ook hier is alleen de doorlatendheid boven de grondwaterstand bepalend voor de infiltratiecapaciteit en doorstroming van de kolom.

De SWAP-test staat onder

```
../Tests/Testbank_V7_1_4/SWAP/test17ondiep_SteadyPercol SWAP3226_dz1cm_pondmx0_crun0p5
```

De MetaSWAP-test staat onder

```
../Tests/Testbank_V7_1_4/cali07/test17ondiep_SteadyPercol_riv_05d_pondmx0_crun0p5
```

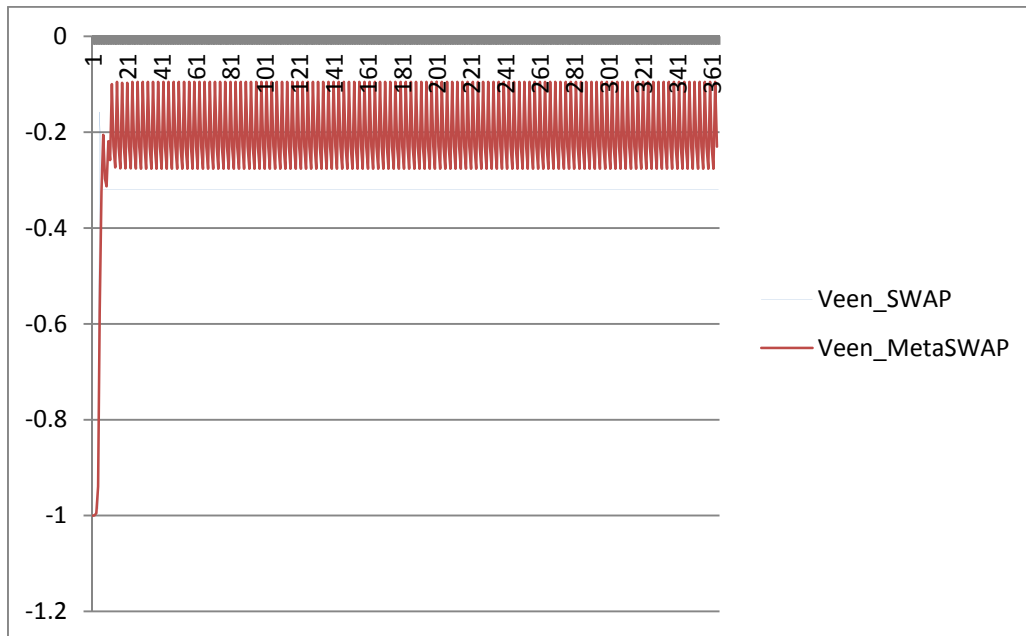
Beide modellen hebben een '*pondmx*' van 0, zodat bovengrondse afvoer kan plaatsvinden. De afvoerweerstand is ingesteld op 0.5 d. Bij de MetaSWAP-test is gerekend met een tijdstap van 0.5 d voor de langzame processen, en 1 uur voor de snelle processen, waaronder de bovengrondse afvoer. Voor een aantal kenmerkende grondsoorten zijn de rekenresultaten vergeleken met SWAP.

Bij de veengrond (PAWN 1, Fig. 5.3) blijkt MetaSWAP problemen te hebben met de stabiliteit van de berekening. Daarbij schommelt het verzadigingstekort van de kolom tussen 0.7 en 1.5 mm. De kolom is dus vrijwel verzadigd. De 'grondwaterstand' is dan zeer gevoelig voor kleine veranderingen van het vochtgehalte, en is geen goede indicator voor het gesimuleerde toestandsverloop van het system. Wanneer gekeken wordt naar de waterbalanstermen, dan blijkt de simulatie echter wel correct te zijn: er wordt een infiltratie berekend van 0.015 m/d. Dat is de goede waarde, want de verzadigde doorlatendheid van het veen is 0.0667 m/d in de bovenste 0.35 m van PAWN 1, en 0.0275 m/d in het profiel beneden 0.35 m -mv. De drainageflux vertoont schommelingen als gevolg van de instabiele grondwaterstand, maar middelt over een aantal dagen uit naar de correcte waarde van 0.015 m/d die in evenwicht is met de infiltratieflux.

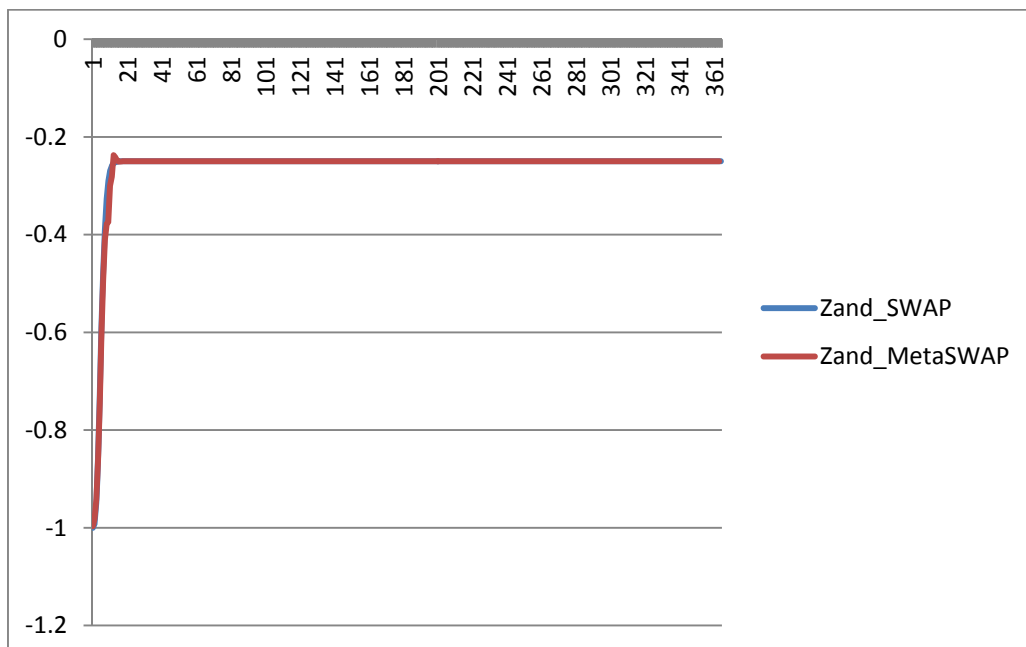
De door SWAP berekende grondwaterstand van 0.32 m -mv voor PAWN 1 (Fig. 5.3) is niet geheel correct (moet zijn 0.25 m -mv), maar de gesimuleerde infiltratie- en drainageflux is dat wel.

Bij de kleigrond (PAWN 16, Fig. 5.5) blijkt SWAP problemen te hebben met de stabiliteit van de berekening, en de infiltratieflux wordt ook niet geheel correct berekend: 0.0104 m/d in plaats van gelijk te zijn aan de verzadigde doorlatendheid van 0.0117 m/d (bouwsteen B12 van de Staringreeks). In een stationaire situatie als deze is namelijk de verticale potentiaalgradiënt gelijk aan de eenheid. Bij een verlaging van de maximale tijdstap *dtmax* van 0.05 d naar 0.01 d bleek de simulatie wel nagenoeg correct te zijn. Een waarde van *dtmax*=0.2 is gangbaar in de rekenpraktijk (STONE hydrologie).

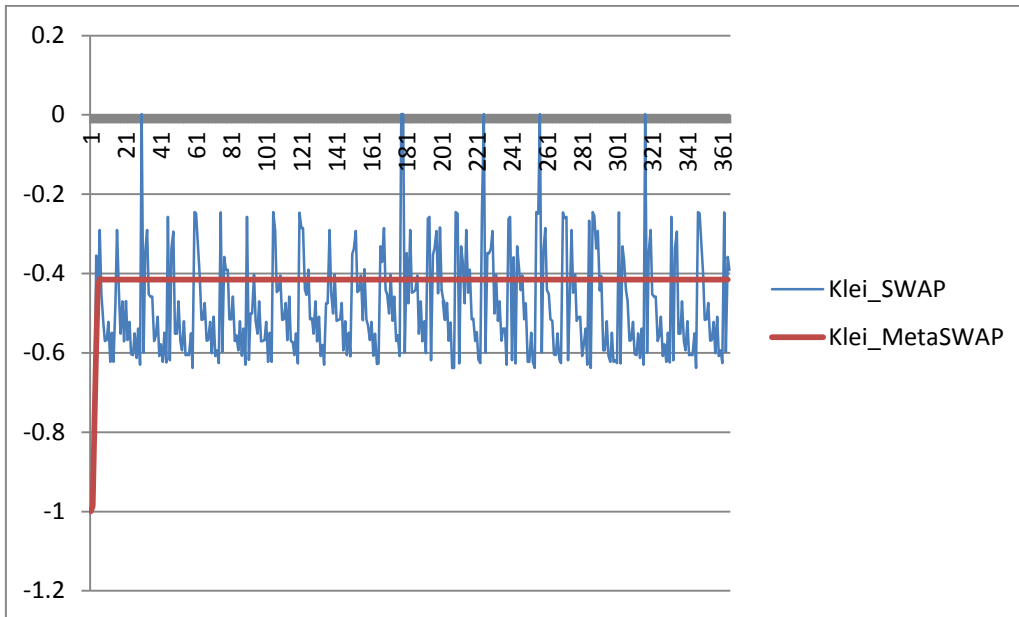
MetaSWAP kan deze situatie voor een kleigrond correct simuleren bij een tijdstap van 0.5 d, hetgeen blijkt uit het feit dat de berekende grondwaterstand uitkomt op 0.415 m –mv. Kennelijk is de berekende drainageflux gelijk aan $(0.415 - 1.0)/50 = 0.0117$ m/d.



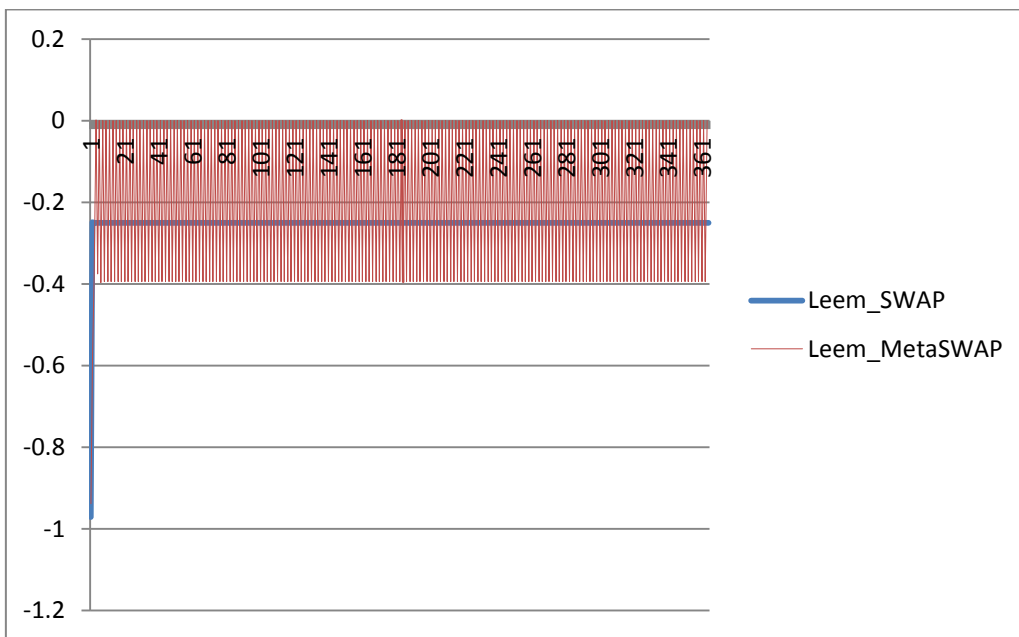
Figuur 5.3: Vergelijking simulatie van grondwaterstanden van SWAP/MetaSWAP, voor een ontwateringsdiepte van 1.0 m en een drainageweerstand van 50 d, voor grasland op een **veengrond** (PAWN 1), bij een constante neerslag van 0.015 m/d.



Figuur 5.4: Vergelijking simulatie van grondwaterstanden van SWAP/MetaSWAP, voor een ontwateringsdiepte van 1.0 m en een drainageweerstand van 50 d, voor grasland op een **zandgrond** (PAWN 9), bij een constante neerslag van 0.015 m/d.



Figuur 5.5: Vergelijking simulatie van grondwaterstanden van SWAP/MetaSWAP, voor een ontwateringsdiepte van 1.0 m en een drainageweerstand van 50 d, voor grasland op een **kleigrond** (PAWN 16), bij een constante neerslag van 0.015 m/d.



Figuur 5.6: Vergelijking simulatie van grondwaterstanden van SWAP/MetaSWAP, voor een ontwateringsdiepte van 1.0 m en een drainageweerstand van 50 d, voor grasland op een **leemgrond** (PAWN 21), bij een constante neerslag van 0.015 m/d.

Bij een tijdstap van 0.5 d heeft MetaSWAP problemen met de stabiliteit van de berekening voor een leemgrond (PAWN 21, Fig. 5.6).

Bij een tijdstap van 0.125 d zijn die problemen geheel verdwenen.

5.5 Berekening (A18, A20)

MetaSWAP heeft opties voor zowel berekening uit grondwater als uit oppervlaktewater. Bij de berekening uit grondwater wordt aangenomen dat het water altijd beschikbaar is. Bij berekening uit oppervlaktewater, daarentegen, wordt eerst aan het oppervlaktewatermodel 'gevraagd' of aan een bepaalde *demand* wel voldaan kan worden. Aan de hand van de *realisation* wordt vervolgens de beregeningsgift al dan niet daadwerkelijk toegediend. Geverifieerd is de optie voor berekening uit oppervlaktewater, omdat die optie extra code regels bevat ten opzichte van de berekening uit grondwater.

De test van de beregeningsoptie is gedaan voor het droge jaar 2003:

```
../Tests/Testbank_V7_1_4/MetaSWAP/cali07/test17diep_2003_sprinkling
```

De daarbij gebruikte parameters bevinden zich in de bestanden *luse_svat.inp* en *scap_svat.inp*. De parameters in *luse_svat.inp* zijn opgenomen in Tabel 5.4

In bestand *scap_svat.inp* is de beregeningscapaciteit gespecificeerd als 25 mm/d, en de oppervlaktewaterlocatie waar het water vandaan moet komen als '0'. In dat geval wordt de berekening geleverd door de 'rand' van het modelgebied, waarvan verondersteld wordt dat er een oneindige voorraad beregeningswater beschikbaar is. Het model dient dus een 100% realisatie te simuleren binnen de periode dat de beregeningsoptie actief is, te weten tussen dag 90 en 230.

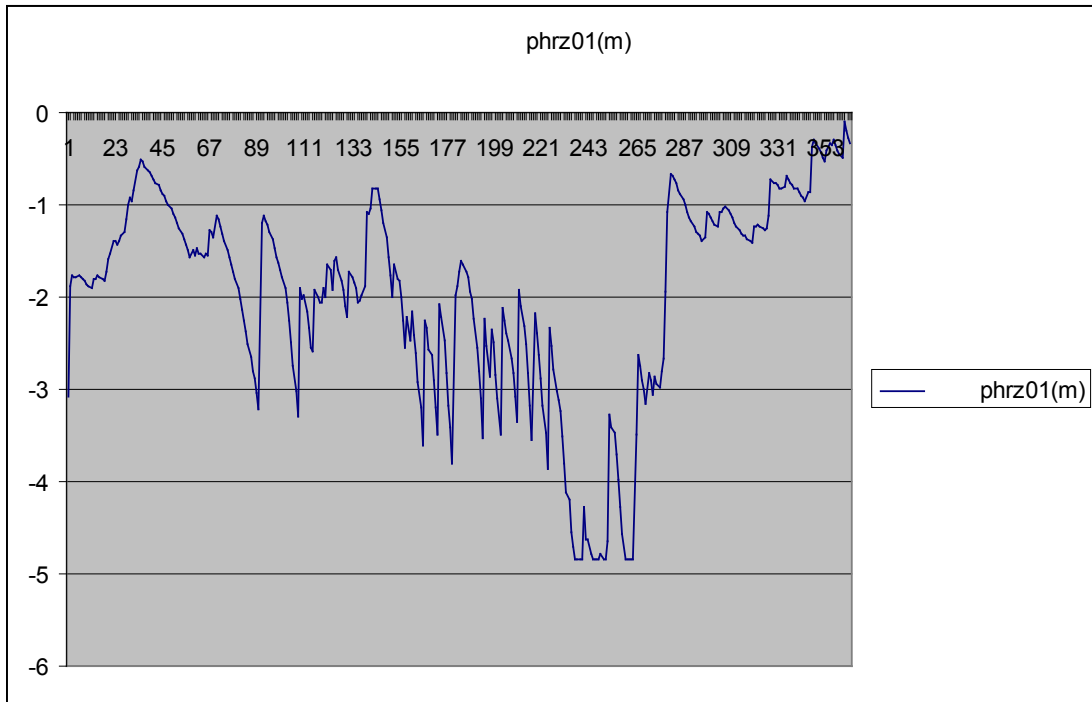
Tabel 5.4: Gebruikte parameters voor de berekeningstest, gespecificeerd in het bestand *luse_svat.inp*.

Symbool	Eenheid	Omschrijving	Waarde
pbgspu	m	pressure head begin sprinkling	-3.2
frevspu	-	fraction evaporated sprinkling water	0.05
gispu	mm	gift in rotational period	25
tigspu	d	duration gift	0.25
rpspu	d	rotational period	7
tdbgspu	d	beginning of sprinkling period, from 00:00:00	90
tdedspu	d	end of sprinkling period	230

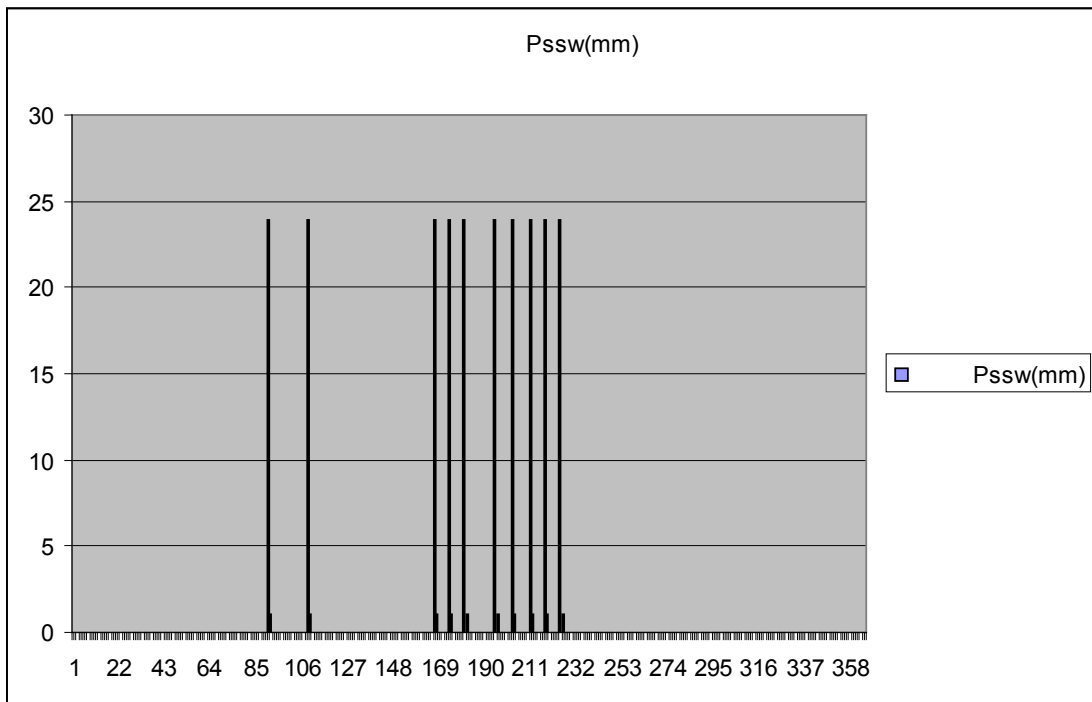
De test is gedaan met een tijdstap van 1 uur voor de snelle processen en 1 dag voor de langzame. In Figuur 5.7 is de gesimuleerde drukhoogte van de wortelzone uitgebeeld voor de tweede helft van de zomerperiode; Figuur 5.8 toont de beregeningshoeveelheden. Aan de figuren is te zien dat:

- de berekening alleen plaatsvindt in de toegestane periode van dag 90-230;
- er pas een gift plaatsvindt indien de drukhoogte beneden de *trigger* van -3.2 m is gekomen;
- er inderdaad niet vaker dan eens per 7 dagen een gift wordt gegeven;
- er in totaal een gift van 25 mm wordt gegeven per cyclus.

In Figuur 5.8 is te zien dat een 25 mm-gift verspreid wordt over twee dagen. Dat wordt als volgt verklaard. Ten eerste is het zo dat de opgegeven 'duur' van de gift weliswaar 0.25 dag weliswaar, maar de beperking in de levering van water wordt in dit geval gevormd door de in *scap_svat.inp* opgegeven capaciteit van 25 mm/d. Aangezien in dit geval de realisatie altijd 100% is, wordt de totale gift van 25 mm gegeven in 24 uurgiften van 25/24 mm. Een realisatie wordt pas het volgende uur daadwerkelijk toegediend. In dit geval worden 23 van de 24 uurgiften binnen dezelfde dag afgeleverd, en komt de laatste uurgift pas de volgende dag.



Figuur 5.7: Gesimuleerd verloop van de drukhoogte van de wortelzone, voor de beregende eenheid 2 van Test17diep_2003_sprinkling



Figuur 5.8: Gesimuleerd verloop van de beregeningsgift, voor de beregende eenheid 2 van Test17diep_2003_sprinkling

5.6 Schaalfactoren bodemfysica (A18, A20)

De modelcode heeft de optie om de bodemfysische parameters aan te passen via schaleringsfactoren van vochtgehalte, doorlatendheid en drukhoogte. Deze optie maakt het mogelijk om een *quick-scan* van de parameter ruimte uit te voeren zonder dat de bodemfysische database steeds opnieuw moet worden aangemaakt. De factoren kunnen per SVAT-eenheid worden opgegeven. Daarmee wordt het ook mogelijk om een model met plaats specifieke parameters te kalibreren, zonder dat de omvang van de database sterk gaat toenemen. Wel dient men daarbij te bedenken dat bij grote aanpassingen een nieuwe kalibratie van de dikte van de capillaire beïnvloede aggregatielaag nodig kan zijn (zie §6).

De technische implementatie van de schaalfactoren voor het vochtgehalte is geverifieerd met de volgende runs:

```
../Tests/Testbank_V7_2_0/MetaSWAP/  
test17_ScGrassA_RzdA_Ebs_cal_1966_dz5cm_5m_Xi_theta_0p5  
../Tests/Testbank_V7_2_0/MetaSWAP/  
test17_ScGrassA_RzdA_Ebs_cal_1966_dz5cm_5m_Xi_theta_0p5_unsa
```

In de runs is het vochtgehalte aangepast met een factor 0.5. In de eerste run is dat gedaan via het bestand USCL_SVAT.INP. Voor de tweede run is gebruik gemaakt van een database waarvan de vochtgehalte parameters θ_{sat} en θ_{res} zij gehalveerd:

```
../Tests/PreMetaSWAP_V2_0_11_SIMGRO_V7_1_4/  
out_PAWN_dz5cm_5m_cali07_macro000_cal_Xi_theta_0p5
```

De resultaten van de twee runs zijn identiek. Dat komt doordat het vochtgehalte geen invloed heeft op de berekening van een stationair drukhoogte-profiel, zoals geschiedt bij het aanmaken van de bodemfysische database.

De technische implementatie van de schaalfactoren voor de doorlatendheid is geverifieerd met de volgende runs:

```
../Tests/Testbank_V7_2_0/MetaSWAP/test17_ScGrassA_RzdA_  
Ebs_cal_1966_dz5cm_5m_Xi_Ksat_0p1_pondmx0_crun0p5  
../Tests/Testbank_V7_2_0/MetaSWAP/test17_ScGrassA_RzdA_  
Ebs_cal_1966_dz5cm_5m_Xi_Ksat_0p1_pondmx0_crun0p5_unsa
```

In runs is de doorlatendheid aangepast met een factor 0.1. In de eerste run is dat gedaan via het bestand USCL_SVAT.INP. Voor de tweede run is gebruik gemaakt van een database waarvan de verzadigde doorlatendheid K_{sat} is vermenigvuldigd met 0.1:

```
../Tests/PreMetaSWAP_V2_0_11_SIMGRO_V7_1_4/  
out_PAWN_dz5cm_5m_cali07_macro000_cal_Xi_Ksat_0p1
```

In dit geval zijn de resultaten van de runs enigszins verschillend (Tabel 5.5). Dat komt door dat de aanpassing van de doorlatendheid gevolgen heeft voor de berekende stationaire drukhoogteprofielen in de voorbereidingsfase. De interpolatie van de 'metafuncties' loopt daardoor iets anders. Uitschieters doen zich voor bij ongerijpte klei (PAWN 6) en gronden met een zware kleilaag (PAWN 17 en 18). Deze gronden krijgen na toepassing van een doorlatendheidsfactor van 0.1 een vrijwel dicht profiel, wat het simuleren van de stroming problematisch maakt voor ieder model.

Tabel 5.5: Vergelijking tussen MetaSWAP-resultaten voor 2003 van de totale evapotranspiratie, respectievelijk berekend met aanpassing van de verzadigde doorlatendheid K_{sat} bij het aanmaken van de bodemfysische database ($_{unsa}$), en met een schaleringsfactor 0.1 voor de doorlatendheid ($_{uscl}$)

PAWN- eenheid	Vegetatie	Etot_ MetaSWAP_un sa (mm a ⁻¹)	Etot_ MetaSWAP _uscl (mm a ⁻¹)	Δ (%)
1	bouwland	447	457	2.2
2	bouwland	452	454	0.4
3	bouwland	454	463	1.9
4	bouwland	446	447	0.2
5	bouwland	436	436	0.0
6	bouwland	441	454	2.9
7	bouwland	373	374	0.2
8	bouwland	391	391	0.0
9	bouwland	418	418	0.0
10	bouwland	437	438	0.1
11	bouwland	443	448	1.2
12	bouwland	441	441	0.0
13	bouwland	419	420	0.2
14	bouwland	368	368	0.1
15	bouwland	490	491	0.2
16	bouwland	523	525	0.5
17	bouwland	406	430	6.0
18	bouwland	433	447	3.2
19	bouwland	465	466	0.3
20	bouwland	475	475	-0.1
21	bouwland	461	466	1.1

De technische implementatie van de schaleringsfactor voor de drukhoogte is geverifieerd met de volgende runs:

```
../Tests/Testbank_V7_2_0/MetaSWAP/test17_ScGrassA_Rzda_
Ebs_cal_2003_dz5cm_5m_Xi_prz_0p5_sprinkling
../Tests/Testbank_V7_2_0/MetaSWAP/test17_ScGrassA_Rzda_
Ebs_cal_2003_dz5cm_5m_Xi_prz_0p5_sprinkling_luse
```

In de runs zijn de drukhoogte-parameters van het grondgebruik (bestand LUSE_SVAT.INP) met een factor 0.5 aangepast. In de eerste run is dat gedaan via het bestand USCL_SVAT.INP. In de tweede run is dat gedaan via aanpassing van bestand LUSE_SVAT.INP. De rekenresultaten van de twee runs zijn identiek.

5.7 Conclusies verificatietests

Gebruik is gemaakt een zogenaamde *code checker* die de programma naloop op programmeerfouten die niet door een *compiler* worden gedetecteerd. Deze controle brengt geen 'errors' aan het licht.

Bij iedere tijdstap wordt per bodem-plant-atmosfeer kolom een waterbalans opgesteld. De maximale fout wordt uitgevoerd naar het scherm. De fout blijkt $3 \cdot 10^{-5}$ mm/d te bedragen, wat gezien wordt als acceptabel. Tevens wordt een waterbalans van het

totale system van bodem-grond-oppervlaktewater opgesteld. Met die balans wordt ondermeer gecontroleerd of de volgende zaken goed zijn geprogrammeerd:

- de ruimtelijke dimensie;
- de overdracht van gegevens tussen deelmodellen.

De test met constante potentiële transpiratie van 0.003 m/d gaf aan dat er in MetaSWAP geen structurele fouten worden gemaakt in de berekening van de verdampingsreductie als gevolg van vochttekort en in de berekening van de capillaire opstijging: de gemiddelde afwijking van MetaSWAP ten opzichte van SWAP bedraagt -0.8%. Het maximale verschil (van bodemeenheden die meer dan 1% van het areaal in NL vertegenwoordigen) bedraagt 6%; dat verschil wordt toegeschreven aan numerieke ruis als gevolg van tabelinterpolaties.

Bij de verificatietests met constante neerslag van 0.015 m/d bleken zowel MetaSWAP als SWAP gevoelig te zijn voor de lengte van de tijdstap; bij SWAP kan het voor een correcte simulatie nodig zijn de maximale tijdstap te verkleinen naar 0.01 d (terwijl 0.2 d de gangbare waarde is); bij MetaSWAP bleek een tijdstap van 0.125 d voor alle gronden te voldoen.

De test van de beregeningsmodule liet zien dat de volgende zaken correct zijn geprogrammeerd:

- de toegestane periode;
- de drukhoogte *trigger*;
- de beregeningsgift en toedieningsduur.

De tests voor de implementatie van de bodemfysische schaleringsfactoren leverde voor de aanpassingen van het vochtgehalte en de drukhoogte identieke resultaten in vergelijking met aanpassing van respectievelijk de bodemfysische bouwstenen zelf (vochtgehalte parameters) en de drukhoogte parameters. Bij de test van de doorlatendheids-aanpassing kwamen wel afwijkingen aan het licht tussen gebruik van schaleringsfactoren en het aanmaken van een nieuwe database met aangepaste doorlatendheids-parameters. Deze afwijkingen worden toegeschreven aan de interpolatiemethode die voor het construeren van de 'metafuncties' wordt gebruikt.

Uit de doorgevoerde tests zijn geen bedenkingen naar voren gekomen ten aanzien van de omzetting van de wiskundige vergelijkingen naar programmacode.

6 Kalibratie

6.1 Inleiding (A22)

Wat betreft de simulatie van plant-atmosfeerprocessen zijn er in principe geen conceptuele verschillen tussen MetaSWAP en SWAP. Wel zijn er verschillen wat betreft de interceptieverdamping, waarbij de conceptualisering in MetaSWAP voorloopt op die in SWAP, zoals uiteengezet in §2.1. De manier waarop de parameters van de vegetatie zijn verkregen door middel van een kalibratieprocedure is beschreven in Bijlage 1. Overigens wordt bij die kalibratie gebruik gemaakt van enkele veldproeven van vóór 1987 (Feddes, 1987). Het is de vraag of deze proeven nog wel geldig zijn voor de tegenwoordig gebruikte gewasvariëteiten. Een actualisering van deze proeven is dringend gewenst. Ook urgent is het doen van onderzoek naar de interceptieverdamping onder Nederlandse omstandigheden.

Wat betreft de simulatie van processen beneden maaiveld is MetaSWAP een 'meta-model' van SWAP. Als kan worden aangetoond dat MetaSWAP de rekenresultaten van SWAP voldoende goed benadert, dan is het geven van voorbeelden van kalibratie op meetgegevens niet meer nodig: van SWAP zijn er namelijk meerdere voorbeelden voorhanden waarbij gekalibreerd is op meetgegevens. Daar waar SWAP in dit opzicht tekort schiet, schiet ook MetaSWAP tekort. Hier ligt op de focus op die aspecten *waar MetaSWAP afwijkt ten opzichte van SWAP*; het gaat dus om zaken die specifiek zijn voor MetaSWAP, en *niet* om 'algemene' vragen zoals de bruikbaarheid van SWAP/MetaSWAP in situaties waar de onzekerheid van de gewasparameters mogelijk een overheersende rol speelt.

Zoals aangetoond is bij de verificatietests van het rekenhart, kan MetaSWAP voor 'stationaire' situaties berekeningen uitvoeren waarvan de verdampingsresultaten binnen een enkele procenten van die van SWAP liggen. Voor dynamische situaties leunt MetaSWAP op de aanname dat beneden de wortelzone er een capillair beïnvloede zone is waarvan de drukhoogte volledig wordt bepaald door de situatie in de wortelzone, althans wanneer er sprake is van capillaire opstijging. Bij een capillaire goed geleidende grond zal deze capillair beïnvloede zone dikker zijn dan bij een slecht geleidende grond. De dikte van deze zone moet via kalibratie worden bepaald, aan de hand van SWAP simulaties.

De berekening van de kale grond verdamping maakt in SWAP gebruik van de methode van Boesten en Stroosnijder (1986) in combinatie met het gesimuleerde vochtgehalte in het bovenste compartiment. In MetaSWAP is dit vochtgehalte niet op een dergelijk schaalniveau beschikbaar, althans niet voor de niet-stationaire situaties waar het hier om gaat. Om langjarig uit te komen op hetzelfde gemiddelde van de kalegrondverdamping is het nodig om de Boesten-parameter in MetaSWAP lager te maken dan de standaardwaarde die in SWAP wordt gebruikt ($0.054 \text{ m}^{1/2}$).

Samenvattend, vereist het operationeel maken van MetaSWAP de kalibratie van de volgende parameters:

- de dikte d_2 van de capillair beïnvloede aggregatielaag;
- de gereduceerde β_2 -parameter van de Boesten-methode voor de berekening van kalegrondverdamping (waarbij het subscript '2' hier geen betrekking heeft op de laag).

Het is algemeen bekend dat bodemfysische processen zeer gevoelig zijn voor de bodemeigenschappen. Beide te kalibreren parameters d_2 en β_2 zijn gerelateerd aan bodemfysische processen. Dus geldt de genoemde gevoeligheid ook voor deze parameters. Daarom is de kalibratie per bodemfysische eenheid uitgevoerd, voor beide parameters. Ook de wortelzonedikte heeft invloed op de uitkomst van de kalibratie, met name op de laagdikte d_2 van heterogene profielen. De wortelzonedikte bepaalt namelijk de bovengrens van de aggregatielaag 2 waar d_2 de dikte van is. In een heterogeen profiel worden daarom de bodemfysische kenmerken van laag 2 medebepaald door de wortelzonedikte. Aangezien er in de modelcode met een enkele waarde van d_2 per bodemeenheid wordt gerekend, zal bij de kalibratie een compromis moeten worden gesloten wat betreft de invloed van de wortelzonedikte.

De berekening van de kalegrond-verdamping wordt in MetaSWAP niet door het bodemvocht beïnvloed. Dat maakt het verantwoord om de twee parameters d_2 en β_2 geheel *onafhankelijk* van elkaar te kalibreren. Sterker nog: het tegelijkertijd kalibreren van de twee soorten parameters zou kunnen leiden tot compensatie-effecten die specifiek zijn voor de kalibratie-dataset, en die later via de validatie zouden moeten worden afgekeurd.

De volgende testsets zijn gebruikt bij de kalibratie van MetaSWAP:

- 21 bodemfysische eenheden van de PAWN-schematisering die ook in het NHI wordt gebruikt (Nationaal Hydrologisch Instrumentarium, www.nhi.nu);
- grasland met een gewasfactor van 1.0;
- 2 wortelzonediktes van 0.3 en 1.0 m, als representanten van een dunne en dikke wortelzone;
- ontwateringsdiepte van 5.0 m en drainage weerstand van 100 d (*test17diep*);
- weerreeks 1971-2000.

Bij de kalibratie wordt een diepe ontwateringsdiepte gebruikt omdat dan de gewasverdamping het meest gevoelig is voor de te kalibreren parameter d_2 .

In geen van de testmodellen van MODFLOW-SIMGRO wordt uitwisseling via de MODFLOW ondergrond toegestaan; daartoe zijn de doorlatendheden van de aquifer op ~ 0 gesteld.

In Nederland wordt een schematisering in termen van 21 PAWN-eenheden gebruikt, zowel voor regionale toepassing van het model als voor het NHI. De kalibratie voor deze schematisering zoals hieronder beschreven hoeft dus niet apart voor de regionale en nationale toepassing van MetaSWAP te worden gedaan, althans zolang geen nieuwe gegevens voor de regio's beschikbaar zijn.

Bij de interpretatie van de rekenresultaten is het van belang om te weten welk areaalpercentage een bepaalde bodemeenheid omvat, en in combinatie met welke wortelzonedikte. In Tabel 6.1 is een overzicht opgenomen van de percentages die in de NHI-schematisering voorkomen.

Tabel 6.1: Areaalpercentages van bodemeenheid-wortelzonedikte combinaties in de schematisering van het NHI (Nationaal Hydrologisch Instrumentarium)

PAWN- eenheid	Omschrijving	Wortel- zone-dikte (m)	n_{NHI} (%)
1	Veraarde bovengrond op diep veen	≤0.5	3.2
2	Veraarde bovengrond op veen op zand	≤0.5	3.1
3	Kleidek op veen	≤0.5	2.7
4	Kleidek op veen op zand	≤0.5	0.7
5	Zanddek op veen op zand	≤0.5	4.5
6	Veen op ongerijpte klei	≤0.5	1.0
7	Stuifzand	≤0.5	2.1
8	Leemarm zand	≤0.5	0.6
9	Zwaklemig fijn zand	≤0.5	23.0
10	Zwaklemig fijn zand op grof zand	≤0.5	1.2
11	Sterk lemig fijn zand op (kei-)leem	≤0.5	3.6
12	Enkeerdgronden (fijn zand)	≤0.5	4.3
13	Sterk lemig zand	≤0.5	4.5
14	Grof zand	≤0.5	1.6
15	Zavel met homogeen profiel	≤0.5	7.2
16	Lichte klei met homogeen profiel	≤0.5	6.6
17	Klei met zware tussenlaag of ondergrond	≤0.5	5.1
18	Klei op veen	≤0.5	3.2
19	Klei op zand	≤0.5	4.6
20	Klei op grof zand	≤0.5	0.6
21	Leem	≤0.5	0.1
1	Veraarde bovengrond op diep veen	>0.5	0.0
2	Veraarde bovengrond op veen op zand	>0.5	0.1
3	Kleidek op veen	>0.5	0.0
4	Kleidek op veen op zand	>0.5	0.0
5	Zanddek op veen op zand	>0.5	0.1
6	Veen op ongerijpte klei	>0.5	0.0
7	Stuifzand	>0.5	1.8
8	Leemarm zand	>0.5	0.8
9	Zwaklemig fijn zand	>0.5	2.3
10	Zwaklemig fijn zand op grof zand	>0.5	0.3
11	Sterk lemig fijn zand op (kei-)leem	>0.5	0.5
12	Enkeerdgronden (fijn zand)	>0.5	1.5
13	Sterk lemig zand	>0.5	0.4
14	Grof zand	>0.5	1.9
15	Zavel met homogeen profiel	>0.5	2.7
16	Lichte klei met homogeen profiel	>0.5	2.1
17	Klei met zware tussenlaag of ondergrond	>0.5	0.6
18	Klei op veen	>0.5	0.3
19	Klei op zand	>0.5	0.9
20	Klei op grof zand	>0.5	0.0
21	Leem	>0.5	0.1

6.2 Kalibratie dikte van capillair beïnvloede laag (A23, A27)

Het kalibreren van de dikte d_2 van laag 2 bestaat uit de volgende stappen:

- bodemfysische databases worden aangemaakt voor een serie waarden van dikte d_2 van de capillair beïnvloede laag, waarbij d_2 wordt gevarieerd tussen de waarden die fysisch als uitersten worden gezien, namelijk 5cm, 10 cm, 15 cm, ..., 75 cm;
- voor iedere dikte van laag 2 wordt de *test17diep* gedraaid met 100% gewasbedekking (grasland, zie ook A17); deze test omvat 21x2 eenheden, voor 21 bodemeenheden van de PAWN-schematisering, en twee wortelzonediktes (30 cm en 100 cm); gedraaid wordt voor de 30 jarige weerreeks van 1971-2000;
- SWAP wordt voor de 21x2 bodemeenheden eveneens gedraaid voor de weerreeks;
- de laagdikte d_2 wordt per bodemeenheid gekalibreerd aan de hand van de SWAP-resultaten.

De gebruikte SWAP run is te vinden onder:

```
../Tests/Testbank_V7_1_4/SWAP/test17diep_SWAP3226_dz1cm
```

De MetaSWAP databases die gebruikt worden bij de gevoeligheidsanalyse ten aanzien van d_2 worden aangemaakt via een bat-file. Deze is te vinden op:

```
../Tests/PreMetaSWAP_V2_0_11_SIMGRO_V7_1_4/bat/  
PreMetaSWAP_cali07_box2_30cm100cm.bat
```

De aangemaakte databases bevinden zich op:

```
../Tests/PreMetaSWAP_V2_0_11_SIMGRO_V7_1_4/out_PAWN_*.cm
```

Na het draaien van de bat-file moeten de bestanden worden aangevuld met een file *beta2_svat.inp*, zoals beschreven in de User's Guide Appendix A. Voor deze gevoeligheidsanalyses doet de waarde van β_2 er niet toe, want de databases worden hier gebruikt voor runs met een 100% gewasbedekking, waar dus helemaal geen kalegrondverdamming in voorkomt.

De serie van rekenruns met *test17diep* voor de verschillende diktes van laag 2 (**=05,10,...,75 cm) is te vinden op:

```
../Tests/Testbank_V7_1_4/metaSWAP/cali07/test17diep_box2_**.cm
```

De runs worden gedraaid via de bat-file *modmsw.bat*, in de folders van de aparte runs.

Uit de rekenresultaten worden langjarige gemiddelden berekend van de actuele transpiratie, die in dit geval gelijk is aan de totale transpiratie; hiervoor dient het programma *Unsa_calibratie_lta*, te vinden op:

```
../Tests/Testbank/Tools
```

Dit programma wordt voor de runs van de gevoeligheidsanalyse aangeroepen via:

```
../Tests/Testbank_V7_1_4/bat/Run_E_LTA_box2_cali07.bat
```

De uitvoerfiles van dit programma zijn te vinden in de subdirectory */fig* van de betreffende runs:

- *Act_Eact.csv*, met het langjarig gemiddelde van de som van de kalegrond- en ponding verdamping, van SWAP en MetaSWAP
- *Act_Tact.csv*, met het langjarig gemiddelde van de actuele transpiratie, van SWAP en MetaSWAP
- *Act_Etot.csv*, met het langjarig gemiddelde van de totale evapotranspiratie, van SWAP en MetaSWAP
- *Stat_Hgw.csv*, met de statistieken van de grondwaterstandsverschillen tussen MetaSWAP en SWAP

De uitkomsten van de gevoeligheidsanalyse voor de laagdikte $d2$ zijn opgenomen in Tabel 6.2. De uitkomsten voor een wortelzonedikte van 0.30 m variëren relatief weinig over de bodemeenheden wat betreft het verschil tussen de transpiratie bij een $d2$ van 0.05 m en 0.60 m. Grote verschillen zijn er wel voor een wortelzonedikte van 1.00 m. Die verschillen ontstaan doordat de transpiratie voor bepaalde gronden reeds bij een $d2$ van 0.05 m de potentiële waarde benadert (542.6, zie b.v. PAWN 6), en voor andere gronden niet (b.v. PAWN 7). Bij een transpiratie dicht tegen de potentiële waarde is er dan nog maar weinig ruimte voor toename als gevolg van een grotere $d2$.

Bij de kalibratie worden beide wortelzonediktes (0.30 m en 1.00 m) betrokken; dat gebeurt door de resultaten met gelijk gewicht op te nemen in de 'doelfunctie'. Aan de hand van die doelfunctie worden de runs van *test17diep* vergeleken voor de verschillende diktes van laag 2 ($d2 = 0.05$ m, 0.10 m, 0.15 m,..., 0.60 cm), en wordt per bodemeenheid de dikte geselecteerd waarvoor de doelfunctie de laagste waarde bereikt:

$$\text{OBJECTIVE} = \sum_{rz=30, 100} (Etot_SWAP(rzd) - Etot_MetaSWAP(rzd,d2))^2 \rightarrow \text{min}$$

waarin:

- *Etot_SWAP(rzd)* - langjarig gemiddelde van de verdamping van SWAP, voor gras met een wortelzone *rzd* (mm/jr)
- *Etot_MetaSWAP(rzd,d2)* - langjarig gemiddelde van de verdamping van MetaSWAP, voor gras met een wortelzone *rzd* en laagdikte *d2* (mm/jr)
- *rzd* - wortelzone dikte (m)
- *d2* - dikte van laag 2 in MetaSWAP (m)

Het programma *Unsa_calibratie_07_minSSQ* voor de $d2$ -kalibratie is te vinden op:
`../Tests/Testbank_V7_1_4/Tools`

Het wordt aangeroepen via:
`../Tests/Testbank_V7_1_4/bat/Run_box2_cali07.bat`

De resultaten voor de kalibratie worden weggeschreven naar:
`../Tests/TestbankV7_1_4/Etot_cali07.csv`

Deze waarden van $d2$ in file *Etot_cali07.csv* zijn overbracht naar de tweede kolom van:
`../Tests/PreMetaSWAP_V2_0_11_SIMGRO_V7_1_4/inp/box_swap_PAWN_cali07.csv`

Deze file wordt vervolgens gebruikt in de procedure:
`../Tests/PreMetaSWAP_V2_0_11_SIMGRO_V7_1_4/bat/PreMetaSWAP_cali07_30cm100cm.bat`

De met deze procedure gemaakte database staat opgeslagen in:
`../Tests/PreMetaSWAP_V2_0_11_SIMGRO_V7_1_4/out_PAWN_cali07_macro000_054_30cm100cm`

Na het draaien van de bat-file moeten de bestanden worden aangevuld met een file *beta2_svat.inp*, zoals boven reeds is beschreven bij het maken van de databases ten behoeve van de gevoeligheidsanalyse voor de dikte van laag 2. Op dit punt in de kalibratie is er nog niet de beschikking over gekalibreerde Boesten-parameters; daarom wordt voorsnog een waarde van 0.054 ingevuld in *beta2_svat.inp*. De code "macro000_" heeft betrekking op het niet aanwezig zijn van macro-porieën.

Met dit bestand is vervolgens *test17diep* gedraaid voor de 30 jarige reeks, zie
`../Tests/Testbank_V7_1_4/MetaSWAP/cali07/test17diep`

Tabel 6.2: Gevoeligheid van het langjarig gemiddelde (1971-2000) van de actuele evapotranspiratie Tact (mm/a) voor de dikte d2 van de tweede laag van de MetaSWAP schematisering, voor de 21 PAWN-eenheden, voor een wortelzonedikte van 0.3 m en 1.0 m, bij een ontwateringsdiepte van 5 m (test17diep)

PAWN-eenheid	Wortelzone-dikte (m)	d2 (m)										
		0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55
1	0.3	474	487	498	507	514	520	524	528	531	533	535
2	0.3	488	498	506	513	518	522	526	528	529	530	531
3	0.3	446	463	479	492	502	510	517	522	526	529	532
4	0.3	435	453	470	483	494	503	509	515	517	519	520
5	0.3	482	497	508	516	522	526	529	532	533	533	534
6	0.3	478	486	492	498	503	507	510	514	518	520	522
7	0.3	406	415	422	428	434	440	445	450	454	459	463
8	0.3	431	437	442	448	452	457	461	465	469	473	477
9	0.3	435	445	453	461	466	471	475	478	482	485	489
10	0.3	438	448	457	466	472	478	484	489	495	500	505
11	0.3	455	466	475	484	491	496	501	506	510	514	518
12	0.3	437	447	456	464	471	478	484	490	495	500	504
13	0.3	435	443	450	457	462	466	471	475	478	482	485
14	0.3	430	435	440	445	449	453	457	461	464	468	471
15	0.3	459	470	479	486	493	499	505	509	513	516	519
16	0.3	454	465	475	484	491	497	503	508	512	516	519
17	0.3	433	444	453	461	468	476	482	488	493	497	501
18	0.3	434	444	451	458	464	469	480	491	500	508	514
19	0.3	444	455	464	472	479	486	490	493	496	498	501
20	0.3	454	466	477	486	494	501	504	506	508	510	512
21	0.3	446	454	460	466	471	476	481	485	488	492	495
1	1.0	541	541	542	542	542	542	542	542	542	542	542
2	1.0	534	534	535	536	536	537	537	538	538	538	538
3	1.0	540	541	541	541	542	542	542	542	542	542	542
4	1.0	524	525	527	528	529	529	530	531	532	532	533
5	1.0	536	537	537	538	538	538	539	539	539	539	539
6	1.0	530	532	533	533	535	535	536	536	537	537	537
7	1.0	480	484	488	491	495	498	501	503	506	508	510
8	1.0	494	498	501	503	506	508	511	513	514	516	518
9	1.0	500	503	506	508	510	512	514	516	517	519	520
10	1.0	518	520	521	523	524	525	526	527	528	529	530
11	1.0	525	526	528	529	530	531	532	532	533	534	534
12	1.0	512	514	516	518	520	521	523	524	525	526	527
13	1.0	499	502	504	507	509	511	513	515	516	518	519
14	1.0	487	490	493	496	499	502	504	506	508	510	512
15	1.0	532	533	534	535	536	537	538	538	539	539	539
16	1.0	531	532	534	535	536	537	537	538	539	539	539
17	1.0	516	519	521	523	525	526	528	529	530	531	532
18	1.0	535	537	538	539	540	540	541	541	541	542	542
19	1.0	510	512	514	516	517	519	520	522	523	524	525
20	1.0	518	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529
21	1.0	517	519	521	522	524	525	526	527	528	529	530

De gekalibreerde waarden en afwijkingen zijn weergegeven in Tabel 6.3. De afwijkingen van respectievelijk 7.4 en 8.2% voor eenheden 14 en 20 en een wortelzonedikte van 1.0 m is een gevolg van het strikt toegepaste Feddes-concept voor het gelijkmatig verdelen van de potentiële transpiratie over de wortelzone. Dit is de reguliere werkwijze voor SWAP-toepassingen, zoals in 'STONE'. In het geval van eenheid 20 leidt dit er zelfs tot een vanuit de plant geredeneerd onlogisch resultaat van het SWAP-model, waarbij de verdamping voor een wortelzone van 1.0 m *lager* is dan voor 0.3 m. De vraag kan worden opgeworpen waarom het 'metamodel' niet ook dit onlogisch resultaat reproduceert. Dat is onderzocht aan de hand van het jaar 1971, met een droge zomer waar dit effect ook wordt waargenomen. De testrun voor 1971 staat onder:

```
../Tests/Testbank_V7_1_4/MetaSWAP/cali07/test17diep_1971
```

De run wordt gedaan via de bat-file *modmsw.bat*.

De verkorte run is gevolgd door toepassing van de disaggregatieprocedure *PostMetaSWAP*. Deze levert de drukhoogte en vochtgehalteprofielen zoals die ook in de preprocessing zijn aangemaakt, maar dan voor de tabelinterpolatie aan de hand van de actuele wortelzone drukhoogte en grondwaterstand. Voor de PAWN-eenheid en een wortelzonedikte van 1.0 m staan de drukhoogteprofielen in *svat_phead_per_0000000041.csv*.

Tot en met dag 232 (20 Aug 1971) is er nauwelijks reductie van de transpiratie in het SWAP-model. Daarna begint SWAP wel te reduceren, maar MetaSWAP niet. In het gedisaggregeerde drukhoogte-profiel van MetaSWAP is er op dag 232 op 0.3 m diepte een drukhoogte van -2.6 m, en op -0.85 m van -2.5 m. Het SWAP-model (zie de *.vap* file) heeft op 0.30 m een drukhoogte van -2.5 m en op -0.85 m van -80 m (!). In SWAP wordt dus op dat moment de gewasonttrekking al zwaar gereduceerd in het onderste deel van de wortelzone. Het SWAP-drukhoogteprofiel is heel erg niet-stationair bepaald: een *steady state* profiel ziet er nooit zo uit: bij capillaire opstijging neemt de potentiaal (=drukhoogte + plaatshoogte) naar boven toe altijd af. Dus MetaSWAP kan een dergelijke situatie nooit adequaat simuleren, dat is een beperking van het concept. Dat wordt dan vooral duidelijk bij een wortelzone die een scherpe overgang kent van goed vochthoudende grond naar slecht vochthoudende grond *binnen de wortelzone*, in dit geval bij 0.65 m diepte. Deze situatie gaat ook voor PAWN-eenheid 14, waarbij de overgang zelfs al bij 0.15 m diepte plaatsvindt. Dat verklaart tevens waarom MetaSWAP in het geval van PAWN 14 de verdamping niet alleen bij een wortelzonedikte van 1.0 m overschat, maar ook bij een dikte van 0.3 m.

Indien er een overgang is van het vochthoudend vermogen binnen de wortelzone, dan is het van de plant uit geredeneerd niet logisch dat de potentiële transpiratie gelijkmatig over de diepte wordt gedeeld. Dit betekent dus dat het afwijken van het metamodel ten opzichte van SWAP betrekking heeft op situaties die in de rekenpraktijk niet zouden moeten voorkomen; men zou in dergelijke situaties moeten werken met een ongelijke wortelverdeling over de diepte. De bestaande rekenpraktijk van SWAP blijkt hier niet aan te voldoen, zie het zogenaamde STONE instrumentarium. De conclusie is dan ook dat het geconstateerde 'tekortschieten' van MetaSWAP geen praktische relevantie heeft.

Tabel 6.3: Gekalibreerde waarden van de dikte d_2 van laag 2, voor de 21 PAWN-eenheden, en afwijkingen van het langjarige gemiddelde (1971-2000) van de actuele transpiratie voor een wortelzonedikte van 0.3 m en 1.0 m, bij een ontwateringsdiepte van 5 m (test17diep)

PAWN-eenheid	d_2 (m)	Wortel-zone-dikte (m)	RMSE (m)	Etot_ SWAP (mm a⁻¹)	Etot_ meta SWAP (mm a⁻¹)	Δ (%)
1	0.20	0.3	0.04	508	507	-0.2
2	0.30	0.3	0.03	523	522	-0.1
3	0.20	0.3	0.03	488	492	0.7
4	0.20	0.3	0.04	481	483	0.5
5	0.15	0.3	0.03	511	508	-0.7
6	0.25	0.3	0.34	502	503	0.0
7	0.15	0.3	0.04	424	422	-0.4
8	0.15	0.3	0.04	454	442	-2.5
9	0.25	0.3	0.04	476	466	-2.0
10	0.45	0.3	0.04	499	495	-0.9
11	0.50	0.3	0.06	517	514	-0.6
12	0.35	0.3	0.04	483	484	0.2
13	0.35	0.3	0.04	479	471	-1.7
14	0.05	0.3	0.04	419	430	2.7
15	0.40	0.3	0.03	508	509	0.3
16	0.35	0.3	0.04	502	503	0.3
17	0.20	0.3	0.35	461	461	-0.1
18	0.20	0.3	0.04	457	458	0.2
19	0.35	0.3	0.04	496	490	-1.3
20	0.30	0.3	0.04	502	501	-0.2
21	0.40	0.3	0.04	484	485	0.1
1	0.20	1.0	0.03	542	542	0.0
2	0.30	1.0	0.03	519	537	3.5
3	0.20	1.0	0.03	542	541	0.0
4	0.20	1.0	0.03	514	528	2.7
5	0.15	1.0	0.03	522	537	2.9
6	0.25	1.0	0.32	533	535	0.4
7	0.15	1.0	0.03	476	488	2.5
8	0.15	1.0	0.03	478	501	4.8
9	0.25	1.0	0.03	491	510	3.9
10	0.45	1.0	0.03	505	528	4.5
11	0.50	1.0	0.07	525	534	1.7
12	0.35	1.0	0.03	515	523	1.6
13	0.35	1.0	0.03	489	513	4.8
14	0.05	1.0	0.04	446	487	9.1
15	0.40	1.0	0.02	538	538	0.1
16	0.35	1.0	0.08	537	537	0.1
17	0.20	1.0	0.29	518	523	0.9
18	0.20	1.0	0.03	538	539	0.1
19	0.35	1.0	0.03	497	520	4.7
20	0.30	1.0	0.04	468	524	12.0
21	0.40	1.0	0.06	526	527	0.3

6.3 Kalibratie van de gereduceerde Boesten-parameter (A23, A27)

De gereduceerde Boesten-parameter voor de kalegrondverdamping is gekalibreerd en gevalideerd op runs met het SWAP model, waarbij de volgende SWAP-opties voor de kalegrond-verdamping zijn gebruikt:

- SWCFBS = 1 en CFBS = 1.0: De potentiële bodemverdamping wordt berekend als $1.0 \cdot ET_{ref} \cdot Sc$, waarbij ET_{ref} de Makkink referentieverdamping is, en Sc de bodembedekkingsgraad;
- SWREDU = 2, COFRED = $0.54 \text{ cm}^{1/2}$, RSIGNI = 1.0: De verdampingsreductie wordt berekend met de methode van Boesten, met de parameter $\beta_2 = 0.54 \text{ cm}^{1/2}$; de parameter RSIGNI hoort niet tot de standaard Boesten-methode, en wordt in de versie SWAP3226 ook niet meer daadwerkelijk gebruikt;
- GCTB = 0.75 in gewasfiles: voor de kalibratie is een bedekkingsgraad aangehouden van 75%.

De SWAP-run met een bedekkingsgraad van 0.75 is gebruikt voor de kalibratie, omdat gewassen in de praktijk meestal een bedekkingsgraad van maximaal 0.8 bereiken. De gebruikte run is te vinden op:

```
../Tests/Testbank_V7_1_4/SWAP/test17diep_Sc75_Ebs_SWAP3226_dz1cm
```

De runs voor de gevoeligheidsanalyse met MetaSWAP zijn gedaan voor een Boesten-parameter van 0.044, 0.046, ... 0.054 $\text{m}^{1/2}$. De runs zijn te vinden op (*=44,46,...,54):

```
../Tests/Testbank_V7_1_4/MetaSWAP/cali07/test17diep_Sc75_Ebs_0*
```

De resultaten van de gevoeligheidsanalyse zijn opgenomen in Tabel 6.4.

De kalibratie is gedaan met dezelfde methode als de kalibratie van laag 2 ($d2$). Het kalibratie-programma *Unsa_calibratie_Ebs_minSSQ* is te vinden op:

```
../Tests/Testbank_V7_1_4/Tools
```

Het programma wordt aangeroepen via:

```
../Tests/Testbank_V7_1_4/bat/Run_beta2_cali07.bat
```

De resultaten zijn te vinden in file:

```
../Tests/Testbank_V7_1_4/Etot_Eact_cali07.csv
```

Daaruit blijkt dat geen van de gekalibreerde waarden een van de uiterste waarden van de gevoeligheidsruns heeft aangenomen.

De database met gekalibreerde dikte $d2$ en gekalibreerde Boesten-parameters is te vinden op:

```
../Tests/PreMetaSWAP_V2_0_11_SIMGRO_V7_1_4/  
out_PAWN_cali07_macro000_cal
```

Er is tevens een verkleinde versie van de database beschikbaar, waarin alleen de wortelzone diktes van 0.3 m en 1.0 m voorkomen:

```
../Tests/PreMetaSWAP_V2_0_11_SIMGRO_V7_1_4/  
out_PAWN_cali07_macro000_cal_30cm100cm
```

De lijst van gekalibreerde waarden en afwijkingen ten opzichte van SWAP is opgenomen in Tabel 6.5. De maximale afwijking is 3.5%.

Tabel 6.4: Gevoeligheid van het langjarig gemiddelde (1971-2000) van de actuele kalegrond-verdamping E_{act} (mm/a) voor de Boesten-parameter β_2 , voor de 21 PAWN-eenheden, voor een wortelzonedikte van 0.3 m en 1.0 m, bij een ontwateringsdiepte van 5 m (test17diep)

PAWN-eenheid	Wortelzone-dikte (m)	β (m ^{1/2})					
		0.044	0.046	0.048	0.050	0.052	0.054
1	0.3	102	104	106	107	108	110
2	0.3	102	104	105	107	108	110
3	0.3	102	104	105	107	108	110
4	0.3	102	104	105	107	108	110
5	0.3	102	104	105	107	108	110
6	0.3	102	104	105	107	108	110
7	0.3	99	100	102	103	104	105
8	0.3	102	104	105	107	108	110
9	0.3	102	104	105	107	108	110
10	0.3	102	104	105	107	108	110
11	0.3	102	104	105	107	108	110
12	0.3	102	104	105	107	108	110
13	0.3	102	104	105	107	108	110
14	0.3	100	101	103	104	105	106
15	0.3	103	104	106	107	108	110
16	0.3	104	105	107	108	110	111
17	0.3	102	104	105	107	108	110
18	0.3	102	104	105	107	108	110
19	0.3	103	104	106	107	108	110
20	0.3	103	104	106	107	108	110
21	0.3	102	104	105	107	108	110
1	1.0	102	104	105	107	108	110
2	1.0	102	104	105	107	108	110
3	1.0	102	104	105	107	108	110
4	1.0	102	104	105	107	108	110
5	1.0	102	104	105	107	108	110
6	1.0	102	104	105	107	108	110
7	1.0	102	104	105	107	108	110
8	1.0	102	104	105	107	108	110
9	1.0	102	104	105	107	108	110
10	1.0	102	104	105	107	108	110
11	1.0	102	104	105	107	108	110
12	1.0	102	104	105	107	108	110
13	1.0	102	104	105	107	108	110
14	1.0	102	103	105	106	107	109
15	1.0	103	104	106	107	108	110
16	1.0	104	105	107	108	110	111
17	1.0	102	104	105	107	108	110
18	1.0	102	104	105	107	108	110
19	1.0	103	104	106	107	108	110
20	1.0	103	104	106	107	108	110
21	1.0	102	104	105	107	108	110

Tabel 6.5: Gekalibreerde waarden van de gereduceerde Boesten-parameter β_2 , voor de 21 PAWN-eenheden, en afwijkingen van het langjarige gemiddelde (1971-2000) van de actuele evaporatie, bij een ontwateringsdiepte van 5 m (test17diep met 75% gewasbedekking)

PAWN-eenheid	β_2 ($m^{1/2}$)	Wortelzone -dikte (m)	Etot_ SWAP ($mm\ a^{-1}$)	Etot_ metaSWAP ($mm\ a^{-1}$)	Δ (%)
1	0.054	0.3	110	110	-0.3
2	0.054	0.3	110	110	0.1
3	0.054	0.3	111	110	-1.4
4	0.054	0.3	111	110	-1.4
5	0.052	0.3	108	108	0.6
6	0.054	0.3	110	110	-0.5
7	0.046	0.3	97	100	3.5
8	0.050	0.3	105	107	1.7
9	0.052	0.3	106	108	1.8
10	0.052	0.3	107	108	0.8
11	0.054	0.3	109	110	0.5
12	0.052	0.3	107	108	1.7
13	0.052	0.3	108	108	0.2
14	0.054	0.3	107	106	-0.3
15	0.054	0.3	110	110	-0.2
16	0.054	0.3	112	111	-0.9
17	0.054	0.3	111	110	-1.1
18	0.054	0.3	111	110	-1.1
19	0.054	0.3	110	110	-0.2
20	0.054	0.3	110	110	-0.3
21	0.052	0.3	108	108	0.2
1	0.054	1.0	110	110	-0.4
2	0.054	1.0	110	110	0.0
3	0.054	1.0	111	110	-1.6
4	0.054	1.0	111	110	-1.5
5	0.052	1.0	110	108	-1.3
6	0.054	1.0	111	110	-0.8
7	0.046	1.0	108	104	-3.3
8	0.050	1.0	110	107	-2.5
9	0.052	1.0	110	108	-1.2
10	0.052	1.0	110	108	-1.2
11	0.054	1.0	110	110	0.0
12	0.052	1.0	110	108	-1.2
13	0.052	1.0	110	108	-1.2
14	0.054	1.0	110	109	-0.9
15	0.054	1.0	110	110	-0.4
16	0.054	1.0	112	111	-1.4
17	0.054	1.0	111	110	-1.4
18	0.054	1.0	111	110	-1.4
19	0.054	1.0	110	110	-0.5
20	0.054	1.0	110	110	-0.5
21	0.052	1.0	110	108	-1.3

7 Validatie

7.1 Inleiding (A24-A26)

MetaSWAP is alleen een 'metamodel' van SWAP wat betreft de simulatie van bodemfysische processen. Bij de overige processen is er een overlap in de systeem-beschrijving. De validatie heeft zich alleen gericht op die aspecten waar MetasWAP en SWAP daadwerkelijk van elkaar verschillen met betrekking tot de oplossing van de 'straight' Richards-vergelijking.

MetaSWAP is gekalibreerd over de periode 1971-2000, bij een diepe ontwateringsdiepte (5 m), een gewasbedekking van 100% en 75%, vaste wortelzonediktes van respectievelijk 0.30 en 1.00 m, bij een tijdstap van 1 d, en een bodemfysische database die met stappen van 0.05 m is aangemaakt. De doelvariabele was de gesimuleerde evapotranspiratie. Bij de validatieruns zijn de volgende situaties getest:

- andere ontwateringsdiepte;
- extreem droog jaar 2003;
- extreem nat jaar 1966;
- in de tijd variërende 'dynamische' gewasbedekkingsgraad;
- in de tijd variërende 'dynamische' wortelzonedikte;
- kleinere tijdstap;
- kleinere stapgrootte van de wortelzone in de bodemfysische database;
- andere toestandsvariabelen.

Deze aanpassingen voor de validatietests worden hieronder verder toegelicht.

De kalibraties zijn gedaan met een ontwateringsdiepte van 5 m. Bij de validatie voor een andere ontwateringsdiepte zijn twee tests gebruikt:

- *test17* met een ontwateringsdiepte van 1.5 m en dezelfde drainageweerstand van 100 d;
- *test17ondiep* met een ontwateringsdiepte van 1.0 m en een drainageweerstand van 50 d.

Een validatietest voor zeer diepe grondwaterstanden zoals onder de Veluwe werd niet essentieel geacht, want dergelijke diepe grondwaterstanden hebben geen directe ecohydrologische betekenis. Het enige wat telt is of het neerslagoverschot correct wordt bepaald. Dat wordt reeds getest door de runs met een ontwateringsdiepte van 5 m.

De bodembedekkingsgraad van de kalibratieruns was 100% bij de *d2*-kalibratie en 75% bij de kalibratie van de gereduceerde Boesten-parameter. Bij de validatie zijn runs gemaakt met 0% bedekking en met bedekkingsgraadverlopen die kenmerkend zijn voor respectievelijk grasland en bouwland. Daartoe zijn de volgende handelingen verricht:

- de NHI-bedekkingsgraadverlopen in de MetaSWAP invoerfile *fact_svat.inp* zijn enigszins geschematiseerd in de tijd om de invoer in SWAP mogelijk te maken (er kan namelijk niet voor iedere dag van het jaar een waarde worden opgegeven, maximaal 36 data-paren), zie:
../Tests/Cropfactors&interception/work_nhi_vs5i/fact_StA_calc.xls;
- SWAP hanteert een 'development stage' (*dvs*), die voor gras lineair in de tijd verloopt binnen een jaar, van 0.0 tot 2.0 (maar in het WOFOST model loopt voor gras de *dvs* tussen 0.0 en 1.0). Dit gegeven is gebruikt voor het omrekenen van de *Julian days* van de *fact_svat.inp* file naar de *dvs* in de SWAP invoertabel voor de bedekkingsgraad in de *.crp* files.

Het gebruik van een dynamische bedekkingsgraadverloop komt terug in de namen van de testrun-directories van zowel MetaSWAP als SWAP:

- *ScGrassA* : verloop volgens bouwland;
- *ScGrassG* : verloop volgens grassland.

De kalibratieruns zijn gedaan voor twee verschillende wortelzonediktes, maar zonder variatie in de tijd. Voor grasland en bouwland zijn voor de validatie kenmerkende tijdverlopen van de wortelzonedikte afgeleid:

- de wortelzonediktes in de MetaSWAP invoerfile *fact_svat.inp* zijn enigszins geschematiseerd in de tijd om de invoer in SWAP mogelijk te maken (er kan namelijk niet voor iedere dag van het jaar een waarde worden opgegeven, maximaal 36 dataparen), zie:
`../Tests/Cropfactors&interception/work_nhi_vs5i/fact_StA_rz_calc.xls`
- de tabelfunctie voor de wortelzonedikte in SWAP staat in de *.crp* file

Het gebruik van een dynamisch verloop van de wortelzonedikte komt terug in de namen van de testrun directories van zowel MetaSWAP als SWAP:

- *RzdA* : verloop volgens bouwland;
- *RzdG* : verloop volgens grassland.

Voor een ander 'extreem droog jaar' is genomen 2003; hoewel dit jaar lang niet zo extreem is als 1976, staat het toch te boek als 'heet en zeer droog': zie http://www.knmi.nl/cms/content/12029/zomer_2003_was_heet_en_zeer_droog

Voor een ander 'extreem nat jaar' is genomen 1966. In De Bilt viel in dat jaar 1148 mm, wat vergelijkbaar is met de neerslag in het jaar 1998.

Wat betreft andere 'toestandsvariabelen' is gekeken naar het grondwaterstandsverloop (de zogenaamde *Root Mean Squared Error*) en de maximale afvoer in een nat jaar.

De tijdstap is gevarieerd van 1 dag tot 3 uur (0.125 d) bij runs voor het natte jaar 1966.

De stapgrootte van de wortelzonedikte is gehalveerd en het effect op de gesimuleerde verdamping is onderzocht.

In de hierna beschreven tests zijn een aantal aspecten gecombineerd. Vaak zijn de tests eerst wel eerst apart gedaan. Maar toen de combinatie test goed bleek uit te pakken is geconcludeerd dat het geen zin heeft om de aparte tests nog in de rapportage op te nemen.

7.2 Ontwateringsdiepte: grondwaterstand (A24)

De 30-jarige weerreeks waarmee *test17diep* is doorgerekend bij de kalibratie is ook doorgerekend bij een ontwateringsdiepte van 1.5 m in *test17*. De MetaSWAP-test met versie V7_1_4c is te vinden onder:

```
../Tests/Testbank_V7_1_4/MetaSWAP/cali07/test17
```

De SWAP-test is te vinden onder:

```
../Tests/Testbank_V7_1_4/SWAP/test17_SWAP3226_dz1cm
```

De berekening van de langjarig gemiddelden en afwijkingen van de grondwaterstand gaan via de aanroep van:

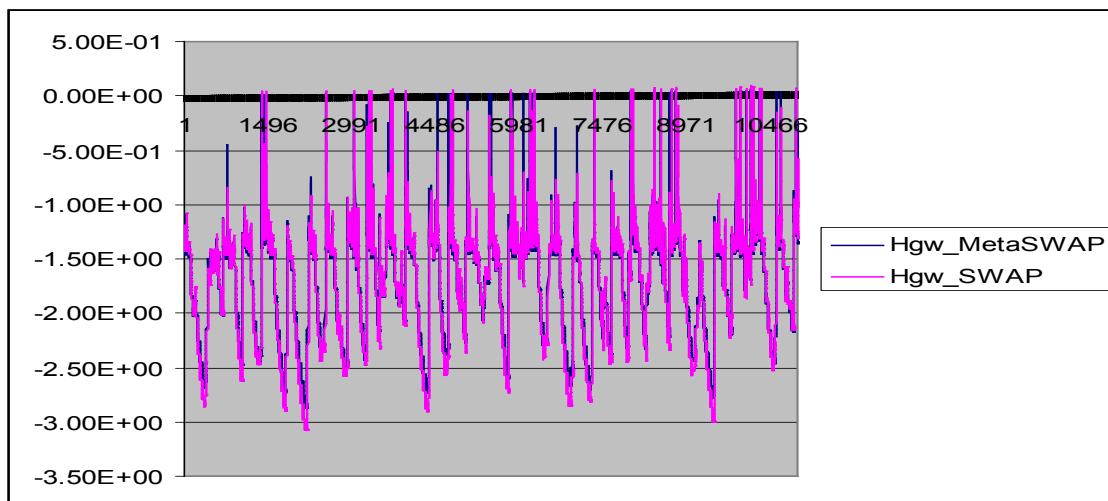
```
../Tests/Testbank_V7_1_4/bat/Run_E_LTA_test17_cali07.bat
```

De verschillen (Tabel 7.1) wat betreft de verdamping vallen lager uit dan bij de *test17diep* waarop is gekalibreerd. Het gewogen gemiddelde van de absolute afwijking is voor een wortelzonedikte van 0.30 m beneden 0.5% en voor een wortelzonedikte van 1.0 m beneden 1.0 %. Dat de afwijkingen kleiner zijn voor een minder diepe ontwatering is een te verwachten resultaat, omdat de minder diepe grondwaterstand het verschil tussen actuele en potentiële transpiratie verkleint.

Tabel 7.1: Validatierun voor een ontwateringsdiepte van 1.5 m in test17 (vgl 5.0 m in test17diep), voor de 21 PAWN-eenheden, en afwijkingen van het langjarige gemiddelde (1971-2000) van de actuele transpiratie voor wortelzonediktes van 0.3 m en 1.0 m

PAWN-eenheid	d2 (m)	Wortel-zone-dikte (m)	RMSE (m)	Etot_SWAP (mm a⁻¹)	Etot_meta SWAP (mm a⁻¹)	Δ (%)
1	0.20	0.3	0.07	517	510	-1.4
2	0.30	0.3	0.02	535	533	-0.3
3	0.20	0.3	0.07	496	491	-1.1
4	0.20	0.3	0.03	496	489	-1.4
5	0.15	0.3	0.03	524	522	-0.3
6	0.25	0.3	0.23	505	501	-0.8
7	0.15	0.3	0.01	460	452	-1.7
8	0.15	0.3	0.01	491	487	-0.8
9	0.25	0.3	0.02	519	515	-0.7
10	0.45	0.3	0.02	518	516	-0.3
11	0.50	0.3	0.07	528	525	-0.6
12	0.35	0.3	0.02	520	518	-0.4
13	0.35	0.3	0.02	526	524	-0.3
14	0.05	0.3	0.01	420	429	2.2
15	0.40	0.3	0.09	528	529	0.1
16	0.35	0.3	0.11	515	516	0.3
17	0.20	0.3	0.19	463	460	-0.5
18	0.20	0.3	0.06	463	465	0.3
19	0.35	0.3	0.02	525	526	0.1
20	0.30	0.3	0.01	504	507	0.6
21	0.40	0.3	0.11	512	507	-1.1
1	0.20	1.0	0.14	543	541	-0.3
2	0.30	1.0	0.09	543	542	-0.1
3	0.20	1.0	0.14	543	539	-0.6
4	0.20	1.0	0.09	543	535	-1.3
5	0.15	1.0	0.10	543	542	-0.1
6	0.25	1.0	0.28	536	532	-0.7
7	0.15	1.0	0.11	536	511	-4.7
8	0.15	1.0	0.09	536	526	-2.0
9	0.25	1.0	0.06	542	538	-0.7
10	0.45	1.0	0.02	533	534	0.2
11	0.50	1.0	0.11	534	537	0.4
12	0.35	1.0	0.06	543	540	-0.4
13	0.35	1.0	0.05	541	539	-0.5
14	0.05	1.0	0.06	478	476	-0.5
15	0.40	1.0	0.13	542	541	-0.2
16	0.35	1.0	0.17	542	539	-0.5
17	0.20	1.0	0.28	523	511	-2.3
18	0.20	1.0	0.21	541	523	-3.3
19	0.35	1.0	0.05	542	540	-0.3
20	0.30	1.0	0.06	502	522	3.8
21	0.40	1.0	0.20	540	534	-1.0

De afwijkingen van de grondwaterstand (*RMSE*) zijn groter als gevolg van de veel hogere dynamiek van de ondiepe grondwaterstanden. Maar de gronden met uitschieters naar 0.20 m en hoger komen niet of nauwelijks voor in het model van het NHI (Tabel 6.1), zoals de ongerijpte klei van eenheid 6. Ook zegt de *RMSE* niet altijd alles over de dynamiek, de afwijkende *RMSE* kan ook ontstaan als gevolg van een kleine verschuiving in de tijd. (In dat geval zou eigenlijk naar de percentielen van de relatieve frequentieverdeling moeten worden gekeken.) En in het geval van eenheid 21 (leem) varieert de grondwaterstand tussen maaiveld en 3 m diepte, zie Figuur 7.1 De afwijkingen kunnen ook visueel beoordeeld worden aan de hand van de grafieken die voor het jaar 1966 zijn gegeven (zie §7.6).



Figuur 7.1: Gesimuleerd verloop (1971-2000) van de grondwaterstand in een leemgrond (PAWN 21), in test17 (ontwateringsdiepte van 1.5 m en een drainageweerstand van 100 d)

7.3 Het droge jaar 2003: verdamping en grondwaterstand (A24, A27)

Om de simulatie van verdamping en grondwaterstand te valideren voor een droog jaar zijn runs gedaan voor 2003. De MetaSWAP runs bevinden zich onder
`../Tests/Testbank_V7_1_4/MetaSWAP/cali07`

De SWAP runs bevinden zich onder `../Tests/Testbank_V7_1_4/SWAP`

De tests hebben de volgende directory-namen:

- `test17diep_2003` : 100% bedekkingsgraad, vaste wortelzonediktes
- `test17diep_ScGrassA_RzdA_Ebs_cal_2003` : verloop bedekkingsgraad volgens bouwland, dynamische wortelzonedikte
- `test17diep_ScGrassG_RzdG_Ebs_cal_2003` : verloop bedekkingsgraad volgens grasland, dynamische wortelzonedikte
- `test17diep_Sc00_Ebs_cal_2003` : 100% kale grond
- `test17_2003` : 100% bedekkingsgraad, vaste wortelzone diktes
- `test17_ScGrassA_RzdA_Ebs_cal_2003` : verloop bedekkingsgraad volgens bouwland dynamische wortelzonedikte
- `test17_ScGrassG_RzdG_Ebs_cal_2003` : verloop bedekkingsgraad volgens grasland, dynamische wortelzonedikte
- `test17_Sc00_Ebs_cal_2003` : 100% kale grond

De validatieruns met variërende wortelzonedikte in combinatie met een bodemfysische database gebaseerd op een SWAP-compartimentdikte van 1 cm leidt tot problemen bij de geheugenopslag op een 32-bits computer. Om de tests ook toegankelijk te houden voor 32-bits computers zijn de runs in tweeën gesplitst: voor de bodemeenheden 1-11 en voor de eenheden 12-21. De resultaten van deze runs zijn vervolgens gecopieerd naar de directorynaam zoals boven genoemd. Vervolgens is de berekening van het jaartotaal van de verdamping en van de afwijkingen van de grondwaterstanden gedaan via de aanroep `../Tests/Testbank_V7_1_4/Run_E_LTA_Ebs_val_2003_cali07.bat`.

Bij *test17diep* (Tabel 7.2-7.4) zien we overwegend dat MetaSWAP hogere waarden berekent dan SWAP. Met deze gevallen is een van de twee volgende situaties aan de hand:

- het gaat vaak om nauwelijks voorkomende situaties (areaalpercentage in de NHI-schematisering lager dan 0.5%, zie Tabel 6.1);
- of het gaat om de 'probleem' eenheden 14 en 20, waarbij echter het gebruik van een uniforme verdeling van de potentiële transpiratie over de wortelzone waar-schijnlijk niet realistisch is;
- opvallend is dat bij de runs met een variabele wortelzonedikte de overeenkomst tussen MetaSWAP en SWAP *beter* is dan bij een vaste wortelzonedikte. Dit zijn tevens de runs waar het echt om gaat wat betreft de landbouwgewassen zoals die met het NHI worden gesimuleerd.

De runs voor *test17* (Tabel 7.5-7.7) laten juist bij een wortelzonedikte van 1 m overwegend hogere waarden zien voor de SWAP-simulaties. SWAP gaat uit van een homogene grond, zonder preferente stroming. Daardoor dringen buien tijdens de zomerperiode niet diep door, en blijft de drukhoogte onderin de wortelzone op een sterk negatieve waarde. Daardoor kan de capillaire opstijging door blijven gaan op volle kracht. In MetaSWAP, daarentegen, worden buien toegevoegd aan de waterbalans van de wortelzone als geheel, met als gevolg dat buien tijdens de zomer ook onderin de wortelzone de drukhoogte minder negatief maken, en daarmee een afname van de capillaire opstijging veroorzaken. Daarmee wordt een effect veroorzaakt dat lijkt op dat van preferente stroming, althans wat betreft de drukhoogteverdeling in de wortelzone. Deze analyse geldt wel voor *test17* maar niet voor *test17diep*, want in dat laatste geval is er geen opstijging vanuit de grondwaterstand, die is daarvoor te diep.

De conclusie van deze validatieruns is dat de performance van MetaSWAP wat betreft de actuele transpiratie ook adequaat is in een droog jaar dat niet voorkomt in de kalibratiereeks.

Tabel 7.2: Vergelijking tussen SWAP/MetaSWAP van de simulatieresultaten voor 2003 van de totale evapotranspiratie, **100% bedekkingsgraad**, met afgezien van de bedekkingsgraad de gewassenmerken als grasland, bij een ontwateringsdiepte van 5 m (test17diep)

PAWN- eenheid	Wortel- zonedikte (m)	RMSE (m)	Etot_ SWAP (mm a ⁻¹)	Etot_ metaSWAP (mm a ⁻¹)	Δ (%)
1	0.3	0.01	463	480	3.6
2	0.3	0.00	501	518	3.4
3	0.3	0.01	446	457	2.5
4	0.3	0.00	452	450	-0.4
5	0.3	0.00	477	479	0.5
6	0.3	0.00	464	478	2.9
7	0.3	0.00	376	373	-0.7
8	0.3	0.00	402	394	-2.0
9	0.3	0.00	428	420	-2.0
10	0.3	0.00	443	447	1.1
11	0.3	0.00	446	466	4.5
12	0.3	0.00	439	441	0.4
13	0.3	0.00	431	426	-1.3
14	0.3	0.01	371	384	3.7
15	0.3	0.01	473	483	2.0
16	0.3	0.01	466	474	1.7
17	0.3	0.00	424	418	-1.3
18	0.3	0.01	413	416	0.6
19	0.3	0.00	467	462	-1.0
20	0.3	0.00	479	483	1.0
21	0.3	0.02	446	449	0.7
1	1.0	0.00	599	597	-0.3
2	1.0	0.00	490	540	10.3
3	1.0	0.00	596	591	-1.0
4	1.0	0.00	498	519	4.1
5	1.0	0.00	486	537	10.5
6	1.0	0.00	545	563	3.4
7	1.0	0.00	411	423	2.9
8	1.0	0.00	423	442	4.5
9	1.0	0.00	444	463	4.4
10	1.0	0.00	442	461	4.4
11	1.0	0.00	499	499	0.0
12	1.0	0.00	468	487	3.9
13	1.0	0.00	445	473	6.2
14	1.0	0.00	393	431	9.6
15	1.0	0.00	572	573	0.2
16	1.0	0.00	565	567	0.5
17	1.0	0.00	508	517	1.8
18	1.0	0.00	568	563	-0.9
19	1.0	0.00	473	499	5.4
20	1.0	0.00	451	507	12.4
21	1.0	0.01	539	542	0.6

Tabel 7.3: Vergelijking tussen SWAP/MetaSWAP van de simulatieresultaten voor 2003 van de totale evapotranspiratie, voor een representatief verloop van de bedekkingsgraad volgens **bouwland en grasland**, bij een dynamisch verloop van de wortelzonedikte volgens respectievelijk bouwland en grasland, bij een ontwateringsdiepte van 5 m (test17diep)

PAWN- eenheid	Vegetatie	RMSE (m)	Etot_ SWAP (mm a ⁻¹)	Etot_ metaSWAP (mm a ⁻¹)	Δ (%)
1	grasland	0.01	488	494	1.1
2	grasland	0.00	518	523	1.0
3	grasland	0.01	466	467	0.1
4	grasland	0.00	473	463	-1.9
5	grasland	0.00	495	492	-0.7
6	grasland	0.00	480	486	1.4
7	grasland	0.01	377	371	-1.7
8	grasland	0.00	402	395	-1.9
9	grasland	0.00	427	417	-2.4
10	grasland	0.00	444	447	0.7
11	grasland	0.00	447	464	4.0
12	grasland	0.00	444	446	0.3
13	grasland	0.00	430	424	-1.3
14	grasland	0.01	375	384	2.4
15	grasland	0.01	481	490	2.0
16	grasland	0.01	474	481	1.5
17	grasland	0.00	432	424	-1.9
18	grasland	0.01	423	420	-0.6
19	grasland	0.00	472	459	-2.6
20	grasland	0.00	483	480	-0.6
21	grasland	0.02	455	460	1.3
1	bouwland	0.01	453	454	0.2
2	bouwland	0.00	441	446	1.2
3	bouwland	0.01	450	453	0.6
4	bouwland	0.01	439	430	-2.1
5	bouwland	0.00	441	440	-0.3
6	bouwland	0.00	451	450	-0.2
7	bouwland	0.01	356	343	-3.5
8	bouwland	0.01	378	371	-2.0
9	bouwland	0.01	399	396	-0.7
10	bouwland	0.00	427	416	-2.7
11	bouwland	0.00	423	428	1.4
12	bouwland	0.01	426	416	-2.4
13	bouwland	0.01	397	400	0.7
14	bouwland	0.00	342	351	2.7
15	bouwland	0.01	448	452	1.0
16	bouwland	0.01	450	450	0.1
17	bouwland	0.01	430	427	-0.9
18	bouwland	0.01	433	445	2.6
19	bouwland	0.01	422	418	-0.9
20	bouwland	0.00	408	430	5.4
21	bouwland	0.02	438	439	0.4

Tabel 7.4: Vergelijking tussen SWAP/MetaSWAP van de simulatieresultaten voor 2003 van de evaporatie, voor **100% kale grond**, bij een ontwateringsdiepte van 5 m (test17diep)

PAWN- eenheid	Wortelzone -dikte (m)	RMSE (m)	Etot_ SWAP (mm a⁻¹)	Etot_ metaSWAP (mm a⁻¹)	Δ (%)
1	0.3	0.01	262	262	-0.2
2	0.3	0.01	262	262	0.0
3	0.3	0.01	268	262	-2.5
4	0.3	0.01	265	262	-1.2
5	0.3	0.01	262	259	-1.1
6	0.3	0.01	263	262	-0.6
7	0.3	0.01	260	248	-4.7
8	0.3	0.01	262	256	-2.3
9	0.3	0.01	262	259	-1.1
10	0.3	0.00	262	259	-1.1
11	0.3	0.01	262	262	0.0
12	0.3	0.01	262	259	-1.1
13	0.3	0.01	262	259	-1.1
14	0.3	0.01	262	262	0.0
15	0.3	0.01	263	261	-0.6
16	0.3	0.01	272	263	-3.3
17	0.3	0.01	264	262	-0.8
18	0.3	0.01	263	262	-0.6
19	0.3	0.01	263	261	-0.6
20	0.3	0.01	262	261	-0.4
21	0.3	0.01	262	259	-1.1
1	1.0	0.02	262	262	-0.2
2	1.0	0.00	262	262	0.0
3	1.0	0.02	268	262	-2.5
4	1.0	0.01	265	262	-1.2
5	1.0	0.00	262	259	-1.1
6	1.0	0.01	263	262	-0.6
7	1.0	0.01	260	248	-4.7
8	1.0	0.01	262	256	-2.3
9	1.0	0.01	262	259	-1.1
10	1.0	0.00	262	259	-1.1
11	1.0	0.00	262	262	0.0
12	1.0	0.01	262	259	-1.1
13	1.0	0.01	262	259	-1.1
14	1.0	0.01	262	262	0.0
15	1.0	0.01	263	261	-0.6
16	1.0	0.01	272	263	-3.3
17	1.0	0.01	264	262	-0.8
18	1.0	0.01	263	262	-0.6
19	1.0	0.01	263	261	-0.6
20	1.0	0.00	262	261	-0.4
21	1.0	0.01	262	259	-1.1

Tabel 7.5: Vergelijking tussen SWAP/MetaSWAP van de simulatieresultaten voor 2003 van de totale evapotranspiratie, voor een **100% bedekkingsgraad**, met afgezien van de bedekkingsgraad de gewassenmerken als grasland, bij een ontwateringsdiepte van 1.5 m (test17)

PAWN- eenheid	Wortel- zonedikte (m)	RMSE (m)	Etot_ SWAP (mm a⁻¹)	Etot_ metaSWAP (mm a⁻¹)	Δ (%)
1	0.3	0.08	525	512	-2.4
2	0.3	0.03	575	570	-0.9
3	0.3	0.08	497	485	-2.4
4	0.3	0.04	500	486	-2.7
5	0.3	0.03	546	534	-2.1
6	0.3	0.16	491	488	-0.7
7	0.3	0.02	442	430	-2.6
8	0.3	0.01	474	470	-0.7
9	0.3	0.02	528	519	-1.8
10	0.3	0.02	526	517	-1.8
11	0.3	0.08	539	530	-1.7
12	0.3	0.02	536	529	-1.3
13	0.3	0.02	538	532	-1.0
14	0.3	0.01	372	385	3.4
15	0.3	0.10	557	554	-0.5
16	0.3	0.11	524	522	-0.3
17	0.3	0.14	436	431	-1.1
18	0.3	0.03	443	442	-0.2
19	0.3	0.02	551	548	-0.5
20	0.3	0.01	491	495	0.9
21	0.3	0.12	512	505	-1.3
1	1.0	0.19	635	619	-2.4
2	1.0	0.13	635	631	-0.6
3	1.0	0.19	633	608	-3.9
4	1.0	0.15	633	596	-6.0
5	1.0	0.16	635	623	-1.9
6	1.0	0.29	602	575	-4.4
7	1.0	0.13	569	526	-7.5
8	1.0	0.13	585	552	-5.7
9	1.0	0.11	618	587	-5.0
10	1.0	0.03	578	575	-0.6
11	1.0	0.16	586	586	0.0
12	1.0	0.10	632	606	-4.2
13	1.0	0.09	614	591	-3.7
14	1.0	0.09	457	446	-2.5
15	1.0	0.17	631	624	-1.1
16	1.0	0.21	623	603	-3.2
17	1.0	0.28	550	520	-5.5
18	1.0	0.22	618	559	-9.5
19	1.0	0.09	629	611	-2.9
20	1.0	0.11	532	536	0.8
21	1.0	0.24	609	583	-4.3

Tabel 7.6: Vergelijking tussen SWAP/MetaSWAP van de simulatieresultaten voor 2003 van de totale evapotranspiratie, voor een representatief verloop van de bedekkingsgraad volgens **bouwland en grasland**, bij een dynamisch verloop van de wortelzonedikte volgens respectievelijk bouwland en grasland, bij een ontwateringsdiepte van 1.5 m (test17)

PAWN- eenheid	Vegetatie	RMSE (m)	Etot_ SWAP (mm a ⁻¹)	Etot_ metaSWAP (mm a ⁻¹)	Δ (%)
1	grasland	0.10	545	531	-2.6
2	grasland	0.03	578	572	-1.1
3	grasland	0.09	519	507	-2.2
4	grasland	0.05	523	506	-3.1
5	grasland	0.03	554	546	-1.6
6	grasland	0.16	508	504	-0.8
7	grasland	0.02	451	439	-2.6
8	grasland	0.01	479	475	-0.7
9	grasland	0.02	532	524	-1.5
10	grasland	0.02	528	522	-1.3
11	grasland	0.05	541	536	-1.0
12	grasland	0.02	540	533	-1.3
13	grasland	0.01	539	535	-0.8
14	grasland	0.01	378	390	3.4
15	grasland	0.10	559	559	0.0
16	grasland	0.11	529	529	0.0
17	grasland	0.13	445	439	-1.4
18	grasland	0.05	456	454	-0.6
19	grasland	0.02	554	551	-0.5
20	grasland	0.00	495	500	0.9
21	grasland	0.13	520	514	-1.1
1	bouwland	0.11	458	457	0.0
2	bouwland	0.05	457	458	0.2
3	bouwland	0.12	457	455	-0.4
4	bouwland	0.07	456	447	-2.1
5	bouwland	0.06	457	454	-0.5
6	bouwland	0.23	454	452	-0.4
7	bouwland	0.07	431	402	-6.8
8	bouwland	0.08	451	427	-5.2
9	bouwland	0.04	456	452	-0.9
10	bouwland	0.02	456	450	-1.3
11	bouwland	0.08	457	456	-0.1
12	bouwland	0.04	456	454	-0.5
13	bouwland	0.04	457	453	-0.7
14	bouwland	0.03	362	367	1.4
15	bouwland	0.09	457	457	0.0
16	bouwland	0.14	460	456	-0.8
17	bouwland	0.26	433	421	-2.8
18	bouwland	0.14	444	429	-3.5
19	bouwland	0.03	457	457	-0.1
20	bouwland	0.05	429	438	2.0
21	bouwland	0.16	454	448	-1.3

Tabel 7.7: Vergelijking tussen SWAP/MetaSWAP van de simulatieresultaten voor 2003 van de evaporatie, voor **100% kale grond**, bij een ontwateringsdiepte van 1.5 m (test17)

PAWN- eenheid	Wortelzone -dikte (m)	RMSE (m)	Etot_ SWAP (mm a⁻¹)	Etot_ metaSWAP (mm a⁻¹)	Δ (%)
1	0.3	0.02	262	262	-0.3
2	0.3	0.01	262	262	0.0
3	0.3	0.02	269	262	-2.8
4	0.3	0.01	268	262	-2.5
5	0.3	0.01	262	259	-1.1
6	0.3	0.15	263	262	-0.5
7	0.3	0.01	262	248	-5.2
8	0.3	0.01	262	256	-2.3
9	0.3	0.01	262	259	-1.1
10	0.3	0.01	262	259	-1.1
11	0.3	0.02	262	262	0.0
12	0.3	0.01	262	259	-1.1
13	0.3	0.01	262	259	-1.1
14	0.3	0.01	262	262	0.0
15	0.3	0.02	263	261	-0.6
16	0.3	0.05	272	263	-3.3
17	0.3	0.18	264	262	-0.8
18	0.3	0.07	263	262	-0.6
19	0.3	0.01	263	261	-0.6
20	0.3	0.01	263	261	-0.6
21	0.3	0.08	262	259	-1.2
1	1.0	0.07	262	262	-0.3
2	1.0	0.05	262	262	0.0
3	1.0	0.07	269	262	-2.8
4	1.0	0.02	268	262	-2.5
5	1.0	0.02	262	259	-1.1
6	1.0	0.19	263	262	-0.6
7	1.0	0.03	262	248	-5.2
8	1.0	0.02	262	256	-2.3
9	1.0	0.03	262	259	-1.1
10	1.0	0.02	262	259	-1.1
11	1.0	0.04	262	262	0.0
12	1.0	0.04	262	259	-1.1
13	1.0	0.02	262	259	-1.1
14	1.0	0.02	262	262	0.0
15	1.0	0.11	263	261	-0.6
16	1.0	0.14	272	263	-3.3
17	1.0	0.20	264	262	-0.7
18	1.0	0.12	263	262	-0.6
19	1.0	0.04	263	261	-0.6
20	1.0	0.01	263	261	-0.6
21	1.0	0.13	262	259	-1.2

7.4 Het droge jaar 2003: bovengrondse afvoer en tijdstap (A24, A27)

De bovengrondse afvoer van SWAP en MetaSWAP zijn vergeleken voor het simulatiejaar 2003. Daartoe zijn testbestanden aangemaakt waarin de drempel van de bovengrondse afvoer is verwijderd. Ook de gevoeligheid voor de gebruikte tijdstap is onderzocht. Bij SWAP gaat het daarbij om de maximale tijdstap *dtmax*. De volgende SWAP-tests zijn beschikbaar:

```
..\Tests\Testbank_V7_2_0\SWAP\test17_ScGrassA_RzDA_Ebs_2003_
  SWAP3226_dz1cm_pondmx0_crun0p5_dtmax0p2, met dtmax = 0.2 d
..\Tests\Testbank_V7_2_0\SWAP\test17_ScGrassA_RzDA_Ebs_2003_
  SWAP3226_dz1cm_pondmx0_crun0p5, met dtmax = 0.05 d
..\Tests\Testbank_V7_2_0\SWAP\test17_ScGrassA_RzDA_Ebs_2003_
  SWAP3226_dz1cm_pondmx0_crun0p5_dtmax0p1, met dtmax = 0.01 d
..\Tests\Testbank_V7_2_0\SWAP\test17_ScGrassA_RzDA_Ebs_2003_
  SWAP3226_dz1cm_pondmx0_crun0p5_dtmax0p01, met dtmax = 0.01d
```

Voor MetaSWAP zijn de volgende tests beschikbaar:

```
..\Tests\Testbank_V7_2_0\MetaSWAP\cali07\test17_ScGrassA_RzDA_Ebs_cal_2003_
  dz5cm_5m_Xi_Ksat_0p1_unsa_pondmx0_crun0p5, met dtgw = 1 d
..\Tests\Testbank_V7_2_0\MetaSWAP\cali07\test17_ScGrassA_RzDA_Ebs_cal_2003_
  dz5cm_5m_Xi_Ksat_0p1_unsa_pondmx0_crun0p5_dtgw3hr, met dtgw = 3 u
..\Tests\Testbank_V7_2_0\MetaSWAP\cali07\test17_ScGrassA_RzDA_Ebs_cal_2003_
  dz5cm_5m_Xi_Ksat_0p1_unsa_pondmx0_crun0p5_dtgw1hr, met dtgw = 1 u
```

De tests zijn ook beschikbaar voor een sterk gereduceerde doorlatendheid, met een factor 0.1. In de naamgeving van de testbestanden is dit aangegeven met 'Xi_Ksat_Op1'.

Deze tests zijn verricht met de versie V7_2_0; in §7.9 wordt aangegeven waarin die versie verschilt ten opzichte van V7_1_4c.

Infiltratie is een van de sleutelprocessen voor het simuleren van de bovengrondse afvoer. Het andere sleutelproces is de modellering van de afstroming over het maaiveld; water dat eerst lokaal bovengronds wordt afgevoerd kan even verderop alsnog infiltreren. Onder droge omstandigheden kan dat 'verderop' slechts een decimeter zijn, zoals bij gescheurde klei en veengronden. Onderstaande tests beperken zich tot gronden met een 'homogene matrix' zonder scheuren, omdat MetaSWAP vooralsnog geen scheurvorming kan modelleren.

Ook het infiltratieconcept van MetaSWAP in een homogene bodemmatrix is vooralsnog nauwelijks ontwikkeld. In MetaSWAP kan de infiltratie alleen worden beperkt door:

- de verzadigde doorlatendheid;
- het verzadigd zijn van een grond.

In SWAP daarentegen, wordt de maximale infiltratie ook op de volgende manier beïnvloed:

- bij water op het maaiveld kan een verticale potentiaalgradiënt ontstaan die groter is dan de eenheid, zodat de infiltratie groter kan worden dan de verzadigde doorlatendheid;
- als gevolg van de zuigkracht van een uitgedroogde grond (en de daarbij horende grote potentiaalgradiënt) kan eveneens de infiltratie groter worden dan de verzadigde doorlatendheid;
- als gevolg van de lage doorlatendheid van een uitgedroogde grond kan de infiltratie juist beperkt worden.

De in Tabel 7.8 gemaakte vergelijking tussen SWAP en MetaSWAP laten zien dat wanneer beide modellen met een kleine tijdstap werken (middelste kolommen van de tabel), er nauwelijks verschil is tussen de uitkomsten voor 2003, ondanks de conceptuele gebreken van het MetaSWAP infiltratieconcept.

Opvallend is de grote tijdstap-gevoeligheid van de door SWAP berekende bovengrondse afvoer. In de huidige praktijk is een dt_{max} van 0.2 d de gangbare waarde. Uit de resultaten blijkt echter dat de modelcode een dergelijke tijdstap niet aankan. Daarmee is overigens nog niet gezegd dat bij een kleine tijdstap wel de correcte waarde wordt berekend. Met name infiltratie in een uitgedroogde grond is een zeer complex proces, met proceskenmerken die niet door de Richards-vergelijking worden beschreven.

In Tabel 7.9 zijn de uitkomsten weergegeven voor de tests met een sterk gereduceerde doorlatendheid. Over het algemeen berekent MetaSWAP meer bovengrondse afvoer dan SWAP. Dat komt doordat in MetaSWAP de extra verticale potentiaalgradiënt als gevolg van water op het maaiveld niet wordt meegenomen.

*Tabel 7.8: Vergelijking tussen SWAP/MetaSWAP van de simulatieresultaten voor 2003 van de **totale runoff**, voor bouwland, bij een ontwateringsdiepte van 5.0 m en een drainageweerstand van 100 d (test17diep), bij verschillende rekentijdstappen van SWAP en MetaSWAP*

PAWN- een- heid	Qrun_ SWAP dtmax= 0.2d (mm)	Qrun_ SWAP dtma= 0.05d (mm)	Qrun_ SWAP dtmax= 0.01d (mm)	Qrun_ Meta- SWAP dtgw= 0.05d (mm)	Qrun_ Meta- SWAP dtgw= 0.125d (mm)	Qrun_ Meta- SWAP dtgw= 1.0 d (mm)
1	30	2	0	1	1	5
2	0	0	0	0	0	0
3	85	25	3	0	0	0
4	86	24	3	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	33	8	3	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0
15	16	3	2	3	3	3
16	71	47	42	57	57	57
17	43	27	1	0	0	0
18	43	26	1	0	0	0
19	19	5	2	3	3	3
20	23	7	3	3	3	3
21	7	0	0	0	0	0

Tabel 7.9: Vergelijking tussen SWAP/MetaSWAP aan de hand van de simulatieresultaten voor 2003 van de **totale runoff**, voor bouwland, bij een ontwateringsdiepte van 5.0 m en een drainageweerstand van 100 d (test17diep), bij verschillende rekentijdstappen van SWAP en MetaSWAP, bij een **doorlatendheid X 0.1**

PAWN- een- heid	Qrun_ SWAP dtmax= 0.05d (mm)	Qrun_ SWAP dtma= 0.01d (mm)	Qrun_ SWAP dtmax= 0.001d (mm)	Qrun_ Meta- SWAP dtgw= 0.05d (mm)	Qrun_ Meta- SWAP dtgw= 0.125d (mm)	Qrun_ Meta- SWAP dtgw= 1.0 d (mm)
1	135	122	117	133	136	145
2	45	42	42	41	41	42
3	189	172	160	167	168	168
4	189	172	160	167	167	167
5	63	62	62	81	82	88
6	143	133	131	132	133	134
7	1	1	1	42	42	42
8	9	7	7	17	17	18
9	32	30	30	80	81	80
10	32	30	30	81	82	80
11	9	7	6	16	16	16
12	32	30	29	81	82	81
13	9	7	7	16	16	16
14	11	10	9	17	17	17
15	184	181	181	293	293	293
16	260	258	258	368	368	367
17	137	108	90	27	27	27
18	137	107	89	27	27	27
19	187	185	185	291	291	291
20	188	185	185	291	291	290
21	143	139	138	223	223	223

7.5 Het natte jaar 1966: grondwaterstand (A24)

Om de simulatie van de grondwaterstand te valideren voor een nat jaar zijn runs gedaan voor 1966, allemaal met een dynamische wortelzonedikte.

De MetaSWAP runs bevinden zich onder `../Tests/Testbank_V7_1_4/MetaSWAP/cali07`
De SWAP runs bevinden zich onder: `../Tests/Testbank_V7_1_4/SWAP`

De beschikbare runs zijn:

- `test17diep_ScGrassA_RzdA_Ebs_cal_1966` : bedekkingsgraad volgens bouwland
- `test17diep_ScGrassG_RzdG_Ebs_cal_1966` : bedekkingsgraad volgens grasland
- `test17_ScGrassA_RzdA_Ebs_cal_1966` : bedekkingsgraad volgens bouwland
- `test17_ScGrassG_RzdG_Ebs_cal_1966` : bedekkingsgraad volgens grasland

Voor de reden van het splitsen van de runs in twee series (bodemeenheden 1-11 en 12-21) wordt verwezen naar §7.3 De berekening van jaartotalen van de verdamping en van afwijkingen van de grondwaterstanden wordt gedaan via de aanroep:

`../Tests/Testbank_V7_1_4/bat/Run_E_LTA_Ebs_val_1966_cali07.bat`

De tests laten voor bijna alle gronden vrijwel potentiële verdamping zien (Tabel 7.10 en 7.11), met uitzondering van grasland op de eenheid 14, 'podzolgronden in grof zand'.

De simulatie van grondwaterstanden voor het natte jaar 1966 blijkt ten opzichte van SWAP een *RMSE* maximaal 0.15 m te hebben, wanneer gekeken wordt naar de eenheden die in het de NHI-schematisering voorkomen.

Tabel 7.10: Vergelijking tussen SWAP/MetaSWAP van de simulatieresultaten voor 1966 van de grondwaterstand (*RMSE*) en de totale evapotranspiratie, voor een representatief verloop van de bedekkingsgraad en wortelzonedikte volgens **bouwland en grasland**, bij een ontwateringsdiepte van 5.0 m en drainageweerstand van 100 d (test17diep)

PAWN- eenheid	Wortelzone- dikte (m)	RMSE (m)	Etot_ SWAP (mm a⁻¹)	Etot_ metaSWAP (mm a⁻¹)	Δ (%)
1	grasland	0.03	493	494	0.2
2	grasland	0.02	494	494	0.0
3	grasland	0.02	489	494	1.1
4	grasland	0.03	488	494	1.2
5	grasland	0.02	494	493	-0.1
6	grasland	0.54	493	494	0.1
7	grasland	0.04	458	461	0.6
8	grasland	0.03	480	477	-0.5
9	grasland	0.03	492	490	-0.3
10	grasland	0.02	494	493	-0.1
11	grasland	0.04	494	494	0.0
12	grasland	0.02	492	493	0.2
13	grasland	0.03	492	491	-0.1
14	grasland	0.05	451	464	2.9
15	grasland	0.02	493	494	0.2
16	grasland	0.03	493	494	0.3
17	grasland	0.49	478	487	1.9
18	grasland	0.02	474	485	2.2
19	grasland	0.03	492	493	0.2
20	grasland	0.03	493	494	0.1
21	grasland	0.06	490	492	0.4
1	bouwland	0.03	400	400	0.0
2	bouwland	0.02	400	400	0.1
3	bouwland	0.02	402	400	-0.5
4	bouwland	0.04	402	400	-0.5
5	bouwland	0.02	400	398	-0.5
6	bouwland	0.56	402	400	-0.4
7	bouwland	0.04	400	390	-2.3
8	bouwland	0.04	400	395	-1.1
9	bouwland	0.04	400	398	-0.5
10	bouwland	0.04	400	398	-0.5
11	bouwland	0.04	400	400	0.1
12	bouwland	0.04	400	398	-0.5
13	bouwland	0.04	400	398	-0.5
14	bouwland	0.05	400	400	0.1
15	bouwland	0.03	400	400	0.0
16	bouwland	0.05	404	400	-0.8
17	bouwland	0.45	402	400	-0.4
18	bouwland	0.03	401	400	-0.2
19	bouwland	0.04	400	400	0.0
20	bouwland	0.05	400	400	-0.1
21	bouwland	0.06	400	398	-0.5

Tabel 7.11: Vergelijking tussen SWAP/MetaSWAP van de simulatieresultaten voor 1966 van de totale evapotranspiratie, voor een representatief verloop van de bedekkingsgraad en wortelzonedikte volgens bouwland en grasland, bij een ontwateringsdiepte van 1.5 m (test17)

PAWN- eenheid	Vegetatie- type	RMSE (m)	Etot_ SWAP (mm a ⁻¹)	Etot_ metaSWAP (mm a ⁻¹)	Δ (%)
1	grasland	0.09	494	494	0.0
2	grasland	0.02	494	494	0.0
3	grasland	0.08	491	493	0.3
4	grasland	0.04	490	490	0.1
5	grasland	0.06	494	493	-0.2
6	grasland	0.33	493	488	-1.1
7	grasland	0.01	479	471	-1.5
8	grasland	0.01	493	491	-0.5
9	grasland	0.01	494	493	-0.1
10	grasland	0.01	494	493	-0.2
11	grasland	0.03	494	494	0.0
12	grasland	0.01	494	493	-0.1
13	grasland	0.01	494	493	-0.2
14	grasland	0.02	451	463	2.6
15	grasland	0.09	494	489	-1.1
16	grasland	0.15	493	485	-1.8
17	grasland	0.30	478	480	0.3
18	grasland	0.14	477	481	0.7
19	grasland	0.03	494	494	0.0
20	grasland	0.01	493	493	0.0
21	grasland	0.11	493	482	-2.4
1	bouwland	0.11	400	400	0.0
2	bouwland	0.09	400	400	0.1
3	bouwland	0.15	402	399	-0.7
4	bouwland	0.07	402	400	-0.6
5	bouwland	0.11	400	398	-0.5
6	bouwland	0.43	401	396	-1.5
7	bouwland	0.03	400	390	-2.3
8	bouwland	0.02	400	395	-1.1
9	bouwland	0.02	400	398	-0.5
10	bouwland	0.01	400	398	-0.5
11	bouwland	0.06	400	400	0.1
12	bouwland	0.06	400	398	-0.5
13	bouwland	0.02	400	398	-0.5
14	bouwland	0.03	400	400	0.1
15	bouwland	0.12	400	397	-0.7
16	bouwland	0.12	404	400	-1.0
17	bouwland	0.31	402	392	-2.5
18	bouwland	0.15	402	398	-0.8
19	bouwland	0.04	400	400	-0.1
20	bouwland	0.02	400	400	-0.1
21	bouwland	0.12	400	389	-2.7

7.6 Het natte jaar 1966: drainageafvoer en tijdstap (A24, A27)

De gevoeligheid van de drainageafvoer-rekenresultaten voor de tijdstap van MetaSWAP is onderzocht door voor het simulatiejaar 1966 runs te doen met respectievelijk tijdstappen van 1.0 d, 0.5 d, en 0.25 d. Daarbij is de SIMGRO-drainage omgezet naar het *river package* van MODFLOW, omdat dan een volledig impliciete berekening wordt verkregen. De volgende series runs zijn beschikbaar:

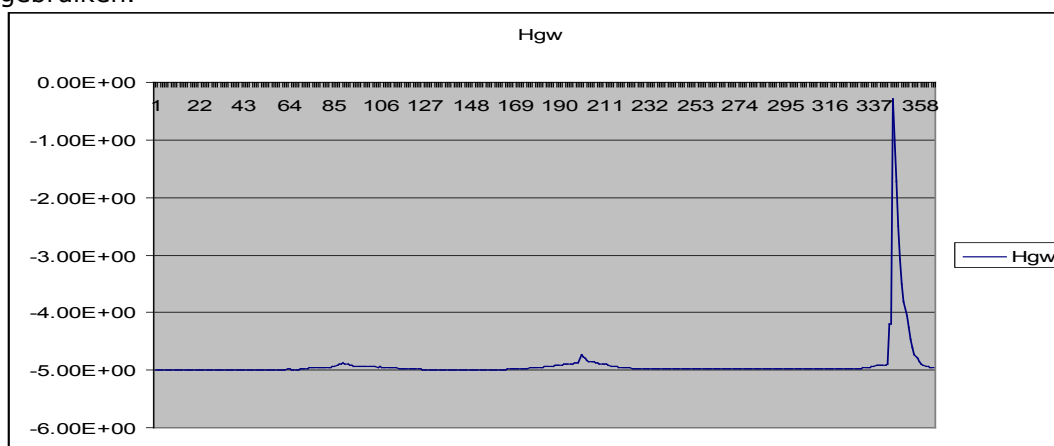
- *test17diep_ScGrassA_RzdA_Ebs_cal_1966_riv,_riv05d,_riv025d* (Tabel 7.12)
- *test17diep_ScGrassG_RzdG_Ebs_cal_1966_riv,_riv05d,_riv025d* (Tabel 7.12)
- *test17_ScGrassA_RzdA_Ebs_cal_1966_riv,_riv05d,_riv025d* (Tabel 7.13 & 7.16)
- *test17_ScGrassG_RzdG_Ebs_cal_1966_riv,_riv05d,_riv025d* (Tabel 7.13 & 7.16)
- *test17ondiep_ScGrassA_RzdA_Ebs_cal_1966_riv,_riv05d,_riv025d* (Tabel 7.14, & 7.17)
- *test17ondiep_ScGrassG_RzdG_Ebs_cal_1966_riv,_riv05d,_riv025d* (Tabel 7.14 & 7.17)

Bij deze runs is de bovengrondse afvoer onderdrukt door het aanbrengen van een hoge drempel; in het SWAP model heet deze parameter '*pondmx*'. De runs zijn alleen beschikbaar voor een eerdere versie van de kalibratie, onder `../Tests/Testbank_V7_1_4/MetaSWAP/cali06`

De kalibratie '*cali06*' is gebaseerd op de STONE schematisering in SWAP. Aangezien het hier niet gaat om capillaire opstijging zullen de resultaten voor '*cali07*' niet betekenend afwijken van die van *cali06*.

Bij de afvoerresultaten van eenheid 6 ("Veengronden en moerige gronden op ongerijpte klei") met grasland valt de hoge maximale afvoer bij een diepe ontwatering (Tabel 7.15). Met name opvallend is dat de afvoer zeer sterk oploopt bij kleinere tijdstap. Bij een tijdstap van 0.25 d blijkt dat de maximale grondwaterstand net tot in de wortelzone reikt. Bij het dalen van de grondwaterstand worden in MetaSWAP aannames gedaan ten aanzien van de invloed op de drukhoogte in de wortelzone. Aangenomen wordt dat de drukhoogte wordt 'meegetrokken' door de grondwaterstand. In het geval van ongerijpte klei is dat niet realistisch, en leidt het tot overdreven grote piekafvoerberekening. Het betreft echter een in de praktijk 'onmogelijke' combinatie van grondsoort en drainageweerstand: een ongerijpte klei kan nooit een drainageweerstand hebben van 100 d, daarvoor moet de grond eerst rijpen. En het betreft overigens een niet in het NHI voorkomende grondsoort.

Uit de tests komt naar voren dat voor het doen van simulaties met als doel afvoerstatistieken af te leiden het nodig is om een tijdstap van 0.5d of kleiner te gebruiken.



Figuur 7.2: Simulatie van de grondwaterstand in ongerijpte klei onder grasland, voor het jaar 1966, bij een ontwateringsdiepte van 5.0 m en een drainage weerstand van 100 d.

Tabel 7.12: Vergelijking tussen SWAP/MetaSWAP van de simulatieresultaten voor 1966 van de **grondwaterstand**, voor bouwland en grasland, bij een ontwateringsdiepte van 5.0 m en drainageweerstand van 100 d (test17diep), bij verschillende rekentijdstappen van MetaSWAP

PAWN- eenheid	Vegetatietype	RMSE bij $\Delta t=1$ d (m)	RMSE bij $\Delta t=0.5$ d (m)	RMSE bij $\Delta t=0.25$ d (m)
1	grasland	0.03	0.11	0.11
2	grasland	0.02	0.02	0.02
3	grasland	0.02	0.02	0.13
4	grasland	0.03	0.03	0.03
5	grasland	0.02	0.02	0.02
6	grasland	0.16	0.27	0.31
7	grasland	0.03	0.04	0.04
8	grasland	0.03	0.03	0.03
9	grasland	0.03	0.03	0.03
10	grasland	0.02	0.02	0.02
11	grasland	0.04	0.04	0.05
12	grasland	0.02	0.02	0.02
13	grasland	0.03	0.03	0.03
14	grasland	0.04	0.04	0.04
15	grasland	0.02	0.02	0.07
16	grasland	0.03	0.03	0.08
17	grasland	0.16	0.18	0.18
18	grasland	0.02	0.02	0.07
19	grasland	0.03	0.03	0.03
20	grasland	0.03	0.03	0.03
21	grasland	0.05	0.05	0.05
1	bouwland	0.03	0.07	0.09
2	bouwland	0.02	0.02	0.02
3	bouwland	0.02	0.03	0.09
4	bouwland	0.04	0.04	0.04
5	bouwland	0.02	0.02	0.02
6	bouwland	0.29	0.29	0.23
7	bouwland	0.04	0.04	0.04
8	bouwland	0.04	0.04	0.04
9	bouwland	0.04	0.04	0.04
10	bouwland	0.03	0.03	0.03
11	bouwland	0.06	0.06	0.06
12	bouwland	0.04	0.04	0.04
13	bouwland	0.04	0.04	0.04
14	bouwland	0.04	0.04	0.04
15	bouwland	0.03	0.03	0.04
16	bouwland	0.04	0.04	0.04
17	bouwland	0.20	0.21	0.22
18	bouwland	0.03	0.03	0.03
19	bouwland	0.04	0.04	0.04
20	bouwland	0.04	0.04	0.04
21	bouwland	0.06	0.06	0.06

Tabel 7.13: Vergelijking tussen SWAP/MetaSWAP van de simulatieresultaten voor 1966 van de **grondwaterstand**, voor bouwland en grasland, bij een ontwateringsdiepte van 1.5 m (test17), bij verschillende rekentijdstappen van MetaSWAP

PAWN- eenheid	Vegetatie- type	RMSE bij $\Delta t=1$ d (m)	RMSE bij $\Delta t=0.5$ d (m)	RMSE bij $\Delta t=0.25$ d (m)
1	grasland	0.06	0.06	0.05
2	grasland	0.01	0.01	0.03
3	grasland	0.07	0.06	0.05
4	grasland	0.04	0.03	0.02
5	grasland	0.05	0.05	0.05
6	grasland	0.28	0.25	0.22
7	grasland	0.01	0.01	0.01
8	grasland	0.01	0.01	0.01
9	grasland	0.01	0.01	0.01
10	grasland	0.01	0.01	0.01
11	grasland	0.03	0.03	0.03
12	grasland	0.01	0.01	0.01
13	grasland	0.01	0.01	0.01
14	grasland	0.02	0.01	0.01
15	grasland	0.11	0.10	0.05
16	grasland	0.09	0.07	0.07
17	grasland	0.26	0.20	0.16
18	grasland	0.10	0.08	0.08
19	grasland	0.02	0.01	0.02
20	grasland	0.01	0.01	0.01
21	grasland	0.15	0.11	0.07
1	bouwland	0.10	0.10	0.10
2	bouwland	0.07	0.06	0.07
3	bouwland	0.12	0.12	0.12
4	bouwland	0.05	0.06	0.06
5	bouwland	0.07	0.07	0.06
6	bouwland	0.25	0.21	0.20
7	bouwland	0.03	0.02	0.02
8	bouwland	0.02	0.02	0.02
9	bouwland	0.02	0.02	0.02
10	bouwland	0.01	0.01	0.01
11	bouwland	0.06	0.06	0.06
12	bouwland	0.03	0.03	0.03
13	bouwland	0.02	0.01	0.01
14	bouwland	0.03	0.03	0.03
15	bouwland	0.09	0.08	0.08
16	bouwland	0.09	0.07	0.07
17	bouwland	0.21	0.18	0.19
18	bouwland	0.13	0.13	0.13
19	bouwland	0.04	0.04	0.03
20	bouwland	0.02	0.02	0.02
21	bouwland	0.13	0.10	0.07

Tabel 7.14: Vergelijking tussen SWAP/MetaSWAP van de simulatieresultaten voor 1966 van de **grondwaterstand**, voor bouwland en grasland, bij een ontwateringsdiepte van 1.0 m en een drainageweerstand van 50 d (test17ondiep), bij verschillende rekentijdstappen van MetaSWAP

PAWN-eenheid	Vegetatie-type	RMSE bij $\Delta t=1$ d (m)	RMSE bij $\Delta t=0.5$ d (m)	RMSE bij $\Delta t=0.25$ d (m)	RMSE bij $\Delta t=0.125$ d (m)
1	grasland	0.07	0.05	0.04	0.07
2	grasland	0.05	0.03	0.02	0.02
3	grasland	0.10	0.07	0.07	0.09
4	grasland	0.08	0.06	0.06	0.08
5	grasland	0.08	0.06	0.06	0.06
6	grasland	0.20	0.17	0.16	0.14
7	grasland	0.01	0.01	0.01	0.01
8	grasland	0.01	0.01	0.01	0.01
9	grasland	0.02	0.01	0.01	0.01
10	grasland	0.02	0.01	0.01	0.01
11	grasland	0.02	0.02	0.02	0.02
12	grasland	0.02	0.01	0.01	0.01
13	grasland	0.02	0.01	0.01	0.01
14	grasland	0.01	0.01	0.01	0.01
15	grasland	0.13	0.11	0.07	0.06
16	grasland	0.07	0.05	0.05	0.05
17	grasland	0.18	0.13	0.09	0.08
18	grasland	0.14	0.09	0.05	0.06
19	grasland	0.11	0.10	0.07	0.03
20	grasland	0.06	0.06	0.05	0.02
21	grasland	0.13	0.11	0.06	0.04
1	bouwland	0.09	0.09	0.08	0.08
2	bouwland	0.07	0.06	0.06	0.06
3	bouwland	0.11	0.10	0.10	0.09
4	bouwland	0.09	0.09	0.08	0.07
5	bouwland	0.09	0.08	0.08	0.08
6	bouwland	0.20	0.18	0.16	0.17
7	bouwland	0.03	0.03	0.03	0.02
8	bouwland	0.03	0.03	0.03	0.03
9	bouwland	0.03	0.03	0.03	0.03
10	bouwland	0.03	0.03	0.03	0.03
11	bouwland	0.03	0.03	0.02	0.02
12	bouwland	0.04	0.04	0.04	0.04
13	bouwland	0.03	0.03	0.02	0.02
14	bouwland	0.02	0.02	0.02	0.02
15	bouwland	0.13	0.11	0.10	0.09
16	bouwland	0.08	0.05	0.05	0.05
17	bouwland	0.16	0.15	0.13	0.11
18	bouwland	0.13	0.11	0.09	0.07
19	bouwland	0.10	0.08	0.08	0.07
20	bouwland	0.07	0.06	0.06	0.05
21	bouwland	0.12	0.09	0.07	0.06

Tabel 7.15: Vergelijking tussen SWAP/MetaSWAP van de simulatieresultaten voor 1966 van de **maximale afvoer**, voor bouwland en grasland, bij een ontwateringsdiepte van 5.0 m en drainageweerstand van 100 d (test17diep), bij verschillende rekentijdstappen van MetaSWAP

PAWN- eenheid	Vegetatie- type	Q_max_ SWAP	Q_max_ MetaSWAP $\Delta t=1$ d	Q_max_ MetaSWAP $\Delta t=0.5$ d	Q_max_ MetaSWAP $\Delta t=0.25$ d
		(mm d ⁻¹)	(mm d ⁻¹)	(mm d ⁻¹)	(mm d ⁻¹)
1	grasland	0.02	0.75	2.27	2.39
2	grasland	0.82	1.49	1.47	1.40
3	grasland	0.03	0.52	0.49	2.67
4	grasland	1.07	1.81	1.80	1.76
5	grasland	0.68	1.37	1.34	1.24
6	grasland	13.75	10.93	25.40	36.73
7	grasland	1.47	1.98	1.97	1.95
8	grasland	1.21	1.87	1.86	1.85
9	grasland	1.14	1.85	1.84	1.81
10	grasland	0.77	1.81	1.79	1.70
11	grasland	5.06	3.11	3.05	2.90
12	grasland	1.10	1.77	1.76	1.75
13	grasland	1.18	1.97	1.95	1.93
14	grasland	1.41	2.24	2.23	2.22
15	grasland	0.99	1.93	1.89	1.62
16	grasland	3.62	2.15	2.02	2.33
17	grasland	16.35	13.95	15.21	15.29
18	grasland	0.06	0.64	0.61	2.00
19	grasland	1.18	1.96	1.95	1.92
20	grasland	1.13	2.15	2.14	2.13
21	grasland	6.92	4.01	4.03	4.00
1	bouwland	0.04	1.31	1.84	2.34
2	bouwland	1.30	1.97	1.96	1.96
3	bouwland	0.05	0.77	0.71	2.70
4	bouwland	1.73	2.25	2.24	2.23
5	bouwland	1.11	1.85	1.84	1.82
6	bouwland	14.34	10.21	13.07	13.66
7	bouwland	1.94	2.31	2.31	2.30
8	bouwland	1.91	2.28	2.27	2.26
9	bouwland	1.93	2.27	2.27	2.26
10	bouwland	1.28	2.32	2.31	2.29
11	bouwland	8.91	3.98	3.99	3.93
12	bouwland	1.85	2.23	2.22	2.22
13	bouwland	2.05	2.39	2.38	2.37
14	bouwland	1.95	2.53	2.52	2.51
15	bouwland	1.73	2.51	2.49	2.28
16	bouwland	4.38	3.01	2.94	2.82
17	bouwland	18.43	12.55	14.50	15.20
18	bouwland	0.11	0.90	0.87	0.77
19	bouwland	2.03	2.36	2.35	2.35
20	bouwland	1.76	2.55	2.55	2.54
21	bouwland	7.69	4.25	4.35	4.41

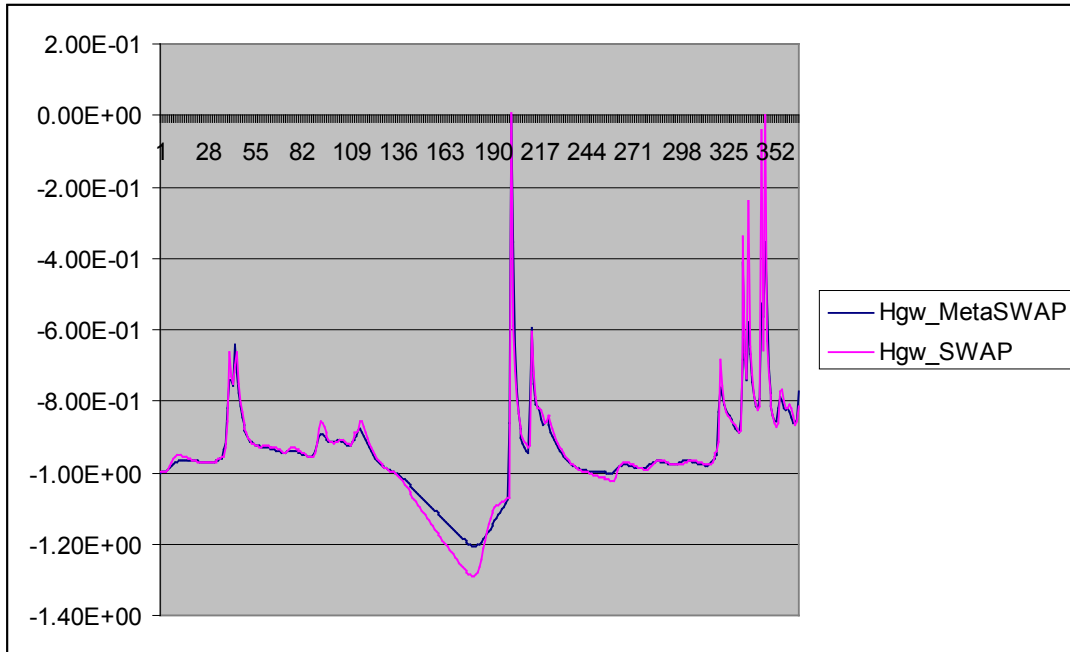
Tabel 7.16: Vergelijking tussen SWAP/MetaSWAP van de simulatieresultaten voor 1966 van de **maximale afvoer**, voor bouwland en grasland, bij een ontwateringsdiepte van 1.5 m (test17), bij verschillende rekentijdstappen van MetaSWAP. Het naar het areaalpercentage van de NHI schematisering (Tabel 6.1) gewogen gemiddelde van de SWAP afvoer bedraagt 6.6 mm d^{-1} en dat van MetaSWAP 6.3 mm d^{-1}

PAWN- eenheid	Vegetatie- type	Q_max_ SWAP (mm d ⁻¹)	Q_max_ MetaSWAP $\Delta t=1 \text{ d}$ (mm d ⁻¹)	Q_max_ MetaSWAP $\Delta t=0.5 \text{ d}$ (mm d ⁻¹)	Q_max_ MetaSWAP $\Delta t=0.25 \text{ d}$ (mm d ⁻¹)
1	grasland	13.65	10.82	13.82	13.87
2	grasland	9.96	7.72	8.83	11.34
3	grasland	13.85	11.23	13.65	12.76
4	grasland	12.78	9.90	11.01	12.69
5	grasland	8.71	12.21	12.77	12.90
6	grasland	15.18	15.13	15.14	15.07
7	grasland	5.76	5.42	5.52	5.57
8	grasland	5.93	5.57	5.70	5.76
9	grasland	6.13	5.73	5.84	5.91
10	grasland	5.22	4.81	4.90	4.94
11	grasland	8.07	7.86	8.06	8.16
12	grasland	6.93	6.41	6.58	6.66
13	grasland	6.54	6.22	6.32	6.42
14	grasland	5.57	5.05	5.15	5.20
15	grasland	13.91	9.98	11.80	14.26
16	grasland	11.37	11.03	11.71	11.70
17	grasland	15.22	15.03	15.09	15.14
18	grasland	14.55	12.31	14.60	13.33
19	grasland	11.89	8.52	9.49	12.24
20	grasland	5.82	5.57	5.69	5.75
21	grasland	15.12	11.04	13.82	13.87
1	bouwland	13.64	11.95	12.31	13.19
2	bouwland	10.78	8.14	8.36	9.11
3	bouwland	14.35	12.25	12.71	13.66
4	bouwland	11.61	9.05	9.89	10.81
5	bouwland	10.37	8.46	8.66	8.10
6	bouwland	15.34	15.13	15.13	15.14
7	bouwland	5.82	5.40	5.52	5.59
8	bouwland	5.99	5.58	5.70	5.77
9	bouwland	6.19	5.76	5.91	5.99
10	bouwland	5.36	4.89	4.98	5.04
11	bouwland	8.09	8.05	8.01	8.10
12	bouwland	7.01	6.46	6.62	6.72
13	bouwland	6.60	6.24	6.38	6.47
14	bouwland	5.67	4.81	4.86	4.89
15	bouwland	15.20	12.36	13.40	14.24
16	bouwland	11.25	10.07	11.65	11.81
17	bouwland	15.35	15.06	15.03	15.18
18	bouwland	15.09	13.20	14.64	14.63
19	bouwland	12.24	8.42	9.25	10.33
20	bouwland	5.90	5.53	5.64	5.71
21	bouwland	15.28	15.11	15.20	15.21

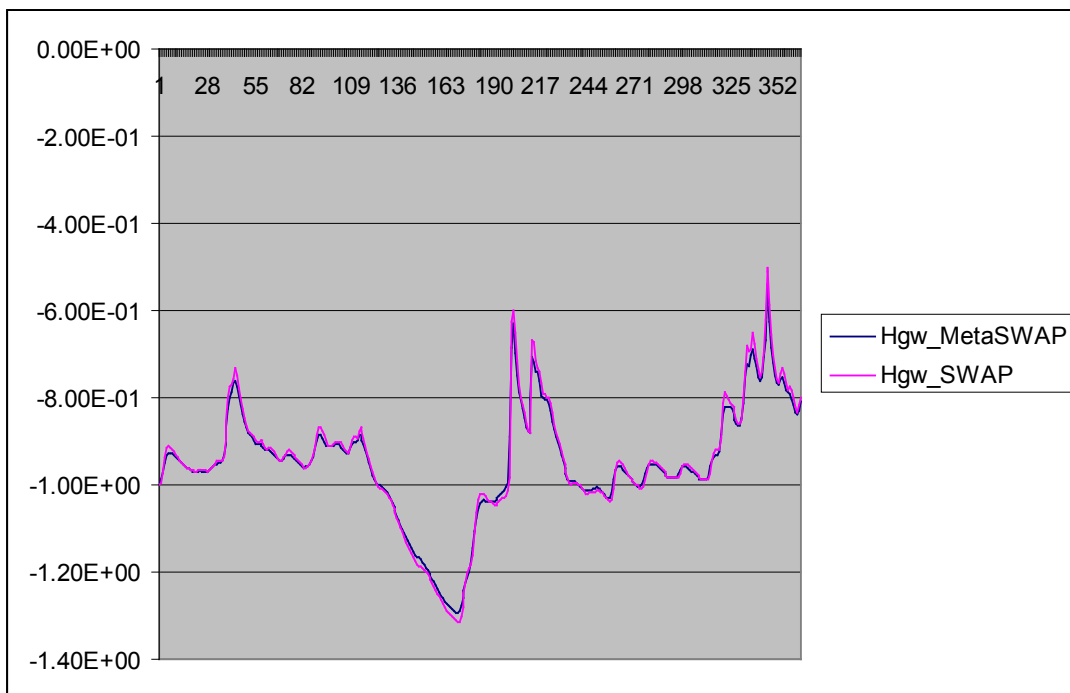
Tabel 7.17: Vergelijking tussen SWAP/MetaSWAP van de simulatieresultaten voor 1966 van de **maximale afvoer**, voor bouwland en grasland, bij een ontwateringsdiepte van 1.0 m en een drainageweerstand van 50 d (test17ondiep), bij verschillende rekentijdstappen van MetaSWAP. Het naar het areaalpercentage van de NHI schematisering (Tabel 6.1) gewogen gemiddelde van de SWAP afvoer bedraagt 14.8 mm d^{-1} en dat van MetaSWAP 14.4 mm d^{-1}

PAWN- een- heid	Vegetatie- type	Q_max_ SWAP (mm d⁻¹)	Q_max_ Meta- SWAP Δt=1 d (mm d⁻¹)	Q_max_ Meta- SWAP Δt=0.5 d (mm d⁻¹)	Q_max_ Meta- SWAP Δt=0.25d (mm d⁻¹)	Q_max_ Meta- SWAP Δt=0.125d (mm d⁻¹)
1	grasland	16.0	11.7	16.6	18.5	19.0
2	grasland	14.3	13.7	14.9	14.9	15.7
3	grasland	20.2	12.3	19.3	19.5	20.2
4	grasland	20.1	12.2	20.0	19.3	20.2
5	grasland	13.1	13.7	15.5	15.0	14.9
6	grasland	20.5	20.2	20.3	20.3	20.3
7	grasland	8.9	8.9	8.5	8.8	8.9
8	grasland	9.9	9.5	9.3	9.6	9.7
9	grasland	10.6	9.9	9.7	10.1	10.3
10	grasland	10.6	9.9	9.7	10.1	10.3
11	grasland	11.9	12.8	11.9	11.0	11.2
12	grasland	10.8	10.2	9.9	10.3	10.6
13	grasland	11.4	12.1	11.0	10.3	10.8
14	grasland	7.9	7.4	7.5	7.7	7.7
15	grasland	20.4	10.6	20.2	20.4	20.4
16	grasland	11.2	11.4	11.7	11.7	11.7
17	grasland	20.7	18.8	20.5	20.4	20.4
18	grasland	20.6	15.5	20.4	20.3	20.3
19	grasland	20.4	10.0	16.9	18.9	20.1
20	grasland	14.1	9.7	11.5	16.5	13.8
21	grasland	20.5	11.3	20.1	20.3	20.5
1	bouwland	20.2	15.8	16.6	18.5	19.0
2	bouwland	19.5	13.2	14.9	14.9	15.7
3	bouwland	20.3	20.0	19.3	19.5	20.2
4	bouwland	20.3	18.8	20.0	19.3	20.2
5	bouwland	13.3	13.8	15.5	15.0	14.9
6	bouwland	20.8	20.1	20.3	20.3	20.3
7	bouwland	8.9	8.6	8.5	8.8	8.9
8	bouwland	9.9	9.7	9.3	9.6	9.7
9	bouwland	10.6	11.0	9.7	10.1	10.3
10	bouwland	10.6	11.0	9.7	10.1	10.3
11	bouwland	16.6	12.3	11.9	11.0	11.2
12	bouwland	10.8	11.2	9.9	10.3	10.6
13	bouwland	14.9	11.8	11.0	10.3	10.8
14	bouwland	7.9	8.0	7.5	7.7	7.7
15	bouwland	20.7	16.3	20.2	20.4	20.4
16	bouwland	11.7	10.4	11.7	11.7	11.7
17	bouwland	20.7	20.2	20.5	20.4	20.4
18	bouwland	20.6	20.1	20.4	20.3	20.3
19	bouwland	20.4	14.5	16.9	18.9	20.1
20	bouwland	15.9	12.8	11.5	16.5	13.8
21	bouwland	20.6	20.4	20.1	20.3	20.5

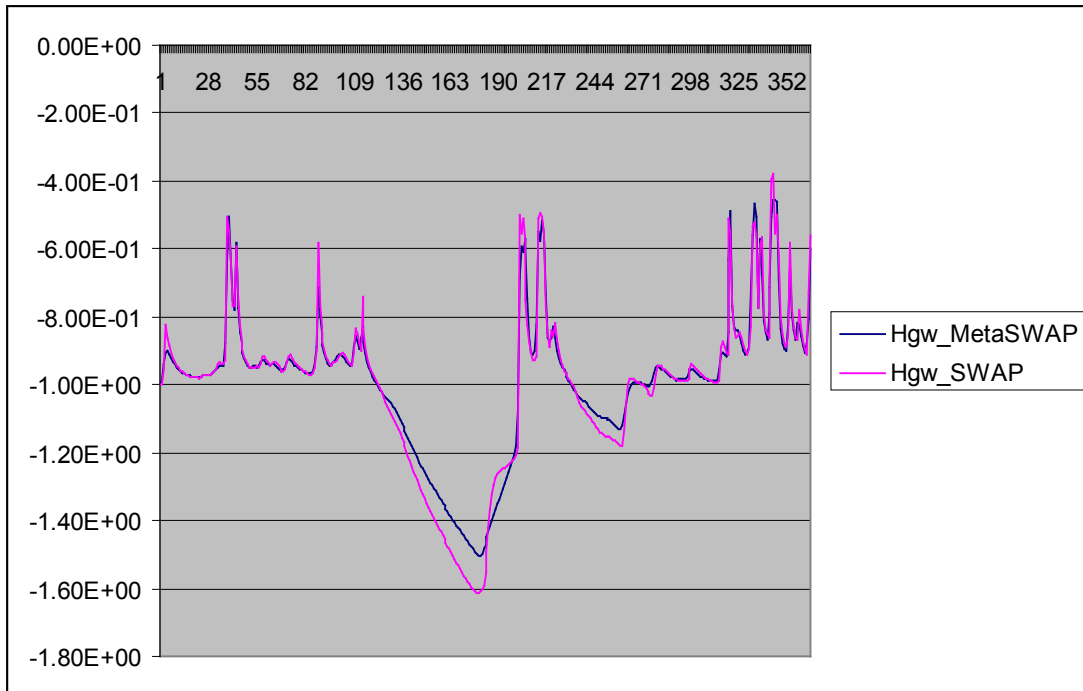
Aan de test met ondiepe ontwatering zijn enkele voorbeelden van gesimuleerde grondwaterstanden ontleend, zie Figuur 7.3-7.6.



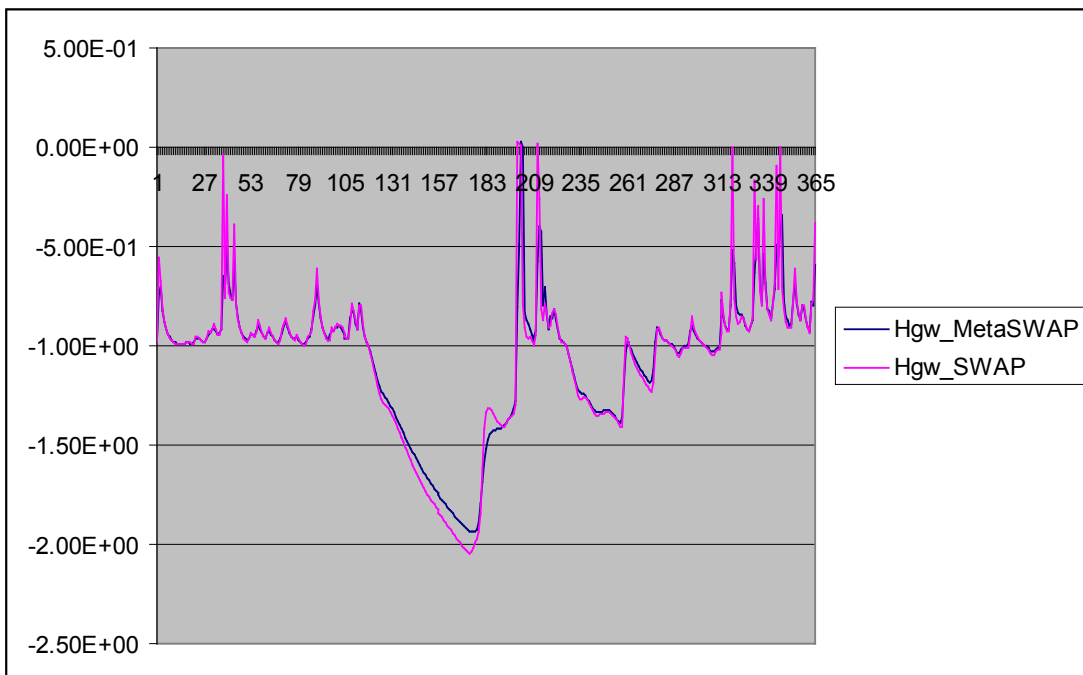
Figuur 7.3: Vergelijking simulatie van grondwaterstanden van SWAP/MetaSWAP voor het jaar 1966, voor een ontwateringsdiepte van 1.0 m en een drainageweerstand van 50 d, voor grasland op een **veengrond** (PAWN 1)



Figuur 7.4: Vergelijking simulatie van grondwaterstanden van SWAP/MetaSWAP voor het jaar 1966, voor een ontwateringsdiepte van 1.0 m en een drainageweerstand van 50 d, voor grasland op een **zandgrond** (PAWN 9)



Figuur 7.5: Vergelijking simulatie van grondwaterstanden van SWAP/MetaSWAP voor het jaar 1966, voor een ontwateringsdiepte van 1.0 m en een drainageweerstand van 50 d, voor grasland op een (lichte) kleigrond (PAWN 16)



Figuur 7.6: Vergelijking simulatie van grondwaterstanden van SWAP/MetaSWAP voor het jaar 1966, voor een ontwateringsdiepte van 1.0 m en een drainageweerstand van 50 d, voor grasland op een leemgrond (PAWN 21)

De meest gronden laten bij het uitzakken tijdens de zomer een verschil zien, waarbij de grondwaterstand van SWAP dieper wegzakt dan die van MetaSWAP. Dat komt doordat het homogene grond concept van SWAP ertoe leidt dat kleine buien in de zomer alleen enkele centimeters in het profiel doordringen; dit leidt niet tot verstoring van de drukhoogte onderin de wortelzone, en die is bepalend voor de zuigkracht en de capillaire opstijging. In MetaSWAP hebben buien invloed op de totale vochtvoorraad, en daarmee op de drukhoogte die voor de zuigkracht moet zorgen. Die wordt dus eerder beïnvloed dan in SWAP. De waarheid zal ergens tussenin liggen: in werkelijkheid is de grond niet homogeen en sijpelt er water naar beneden via preferente stroming. Als dat wel in SWAP zou worden gemodelleerd dan zou dat ook een afname van de zuigkracht veroorzaken, en de gesimuleerde grondwaterstand dichter bij die van MetaSWAP komen te lopen.

7.7 Het natte jaar 1966: bovengrondse afvoer en tijdstap (A24, A27)

De bovengrondse-afvoer van SWAP en MetaSWAP zijn vergeleken voor het simulatiejaar 1966. Daartoe zijn testbestanden aangemaakt waarin de drempel van de bovengrondse afvoer is verwijderd. Ook de gevoeligheid voor de gebruikte tijdstap is onderzocht. Bij SWAP gaat het daarbij om de maximale tijdstap *dtmax*. De volgende SWAP-tests zijn beschikbaar:

```
..\Tests\Testbank_V7_2_0\SWAP\test17_ScGrassA_Rzda_Ebs_1966_
  SWAP3226_dz1cm_pondmx0_crun0p5_dtmax0p2, met dtmax = 0.2 d
..\Tests\Testbank_V7_2_0\SWAP\test17_ScGrassA_Rzda_Ebs_1966_
  SWAP3226_dz1cm_pondmx0_crun0p5, met dtmax = 0.05 d
..\Tests\Testbank_V7_2_0\SWAP\test17_ScGrassA_Rzda_Ebs_1966_
  SWAP3226_dz1cm_pondmx0_crun0p5_dtmax0p1, met dtmax = 0.01 d
..\Tests\Testbank_V7_2_0\SWAP\test17_ScGrassA_Rzda_Ebs_1966_
  SWAP3226_dz1cm_pondmx0_crun0p5_dtmax0p01, met dtmax = 0.01d
```

Voor MetaSWAP zijn de volgende tests beschikbaar:

```
..\Tests\Testbank_V7_2_0\MetaSWAP\cali07\test17_ScGrassA_Rzda_Ebs_cal_1966_
  dz5cm_5m_pondmx0_crun0p5, met dtgw = 1 d
..\Tests\Testbank_V7_2_0\MetaSWAP\cali07\test17_ScGrassA_Rzda_Ebs_cal_1966_
  dz5cm_5m_pondmx0_crun0p5_dtgw3hr, met dtgw = 3 u
..\Tests\Testbank_V7_2_0\MetaSWAP\cali07\test17_ScGrassA_Rzda_Ebs_cal_1966_
  dz5cm_5m_pondmx0_crun0p5_dtgw1hr, met dtgw = 1 u
```

Bovengenoemd tests hebben geen 'drempel' voor de bovengrondse afvoer, wat in de naamgeving van bestandsfolders is aangeduid met '*_pondmx0*'. Dit is een voor de praktijk niet realistische waarde. Daarom zijn de tests zijn ook beschikbaar met een afvoerdrempel van 0.002 m, wat in de naamgeving van bestandsfolders is aangeduid met '*_pondmx0p2*'. Deze drempelwaarde is gangbaar bij de STONE-hydrologie.

De tests zijn ook beschikbaar voor een sterk gereduceerde doorlatendheid, met een factor 0.1. In de naamgeving van de testbestanden is dit aangegeven met '*Xi_Ksat_Op1_unsa*'.

Deze tests zijn verricht met de versie V7_2_0; in §7.9 wordt aangegeven waarin die versie verschilt ten opzichte van V7_1_4c. Het verschil tussen het infiltratieconcept van SWAP en MetaSWAP is kort toegelicht in §7.4. Voor deze berekeningen heeft dit nauwelijks gevolgen.

Uit de resultaten voor de kleinste tijdstappen (middelste kolommen van Tabel 7.18) blijkt dat voor de eenheden die er in de praktijk toe doen (zie de NHI-schematisering, Tabel 6.1) er weliswaar verschillen zijn tussen MetaSWAP en SWAP, maar dat in absolute termen de verschillen meevallen als men in beschouwing neemt hoe simpel het infiltratieconcept van MetaSWAP is. Dat geldt zeker indien met een realistische waarde van de afvoerdrempel wordt gerekend (Tabel 7.19). Maar dat neemt niet weg dat er de nodige terughoudendheid moet worden betracht bij het gebruik voor processimulaties waar bovengrondse afvoer een cruciale rol speelt, zoals bij het simuleren van fosfaatafspoeling.

Bij verlaging van de doorlatendheid worden alle waarden en verschillen groter, zoals te zien is in Tabel 7.20.

Wederom valt op dat het rekenschema van het SWAP model een dt_{max} van 0.2 (de gangbare waarde) niet aan kan.

Tabel 7.18: Vergelijking tussen SWAP/MetaSWAP van de simulatieresultaten voor 1966 van de **totale runoff**, bij een **afvoerdrempel van 0.0 m**, voor bouwland, bij een ontwateringsdiepte van 1.5 m en een drainageweerstand van 100 d (test17), bij verschillende reken-tijdstappen van SWAP en MetaSWAP

PAWN- een- heid	Qrun_ SWAP dtmax= 0.2d (mm)	Qrun_ SWAP dtma= 0.05d (mm)	Qrun_ SWAP dtmax= 0.01d (mm)	Qrun_ Meta- SWAP dtgw= 0.05d (mm)	Qrun_ Meta- SWAP dtgw= 0.125d (mm)	Qrun_ Meta- SWAP dtgw= 1.0 d (mm)
1	115	37	13	3	4	9
2	16	11	5	0	0	3
3	238	84	26	8	9	6
4	240	82	24	7	8	16
5	36	31	29	0	0	0
6	173	94	67	10	19	58
7	1	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	9	0	0	0	0	0
10	9	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0
12	9	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0
14	1	0	0	0	0	0
15	110	59	48	53	55	61
16	267	176	147	150	150	156
17	153	110	54	15	22	64
18	131	85	25	7	9	37
19	119	61	47	50	51	58
20	122	64	47	49	49	49
21	72	39	32	30	33	68

Tabel 7.19: Vergelijking tussen SWAP/MetaSWAP van de simulatieresultaten voor 1966 van de **totale runoff**, bij een **afvoerdrempel van 0.002 m**, voor bouwland, bij een ontwateringsdiepte van 1.5 m en een drainageweerstand van 100 d (test17), bij verschillende rekentijdstappen van SWAP en MetaSWAP

PAWN- een- heid	Qrun_ SWAP dtmax= 0.2d (mm)	Qrun_ SWAP dtma= 0.05d (mm)	Qrun_ SWAP dtmax= 0.01d (mm)	Qrun_ Meta- SWAP dtgw= 0.05d (mm)	Qrun_ Meta- SWAP dtgw= 0.125d (mm)	Qrun_ Meta- SWAP dtgw= 1.0 d (mm)
1	87	27	9	1	1	5
2	12	8	4	0	0	1
3	176	52	17	5	5	5
4	177	50	15	4	5	12
5	30	25	23	0	0	0
6	137	75	54	4	9	30
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	7	0	0	0	0	0
10	7	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0
12	7	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0
15	85	46	38	42	43	49
16	203	130	112	116	116	131
17	109	82	42	19	14	41
18	93	59	16	3	5	32
19	92	48	37	41	42	48
20	94	49	37	40	40	40
21	57	31	26	22	25	56

Tabel 7.20: Vergelijking tussen SWAP/MetaSWAP aan de hand van de simulatieresultaten voor 1966 van de **totale runoff**, bij een **afvoerdrempel van 0.0 m**, voor bouwland, bij een ontwateringsdiepte van 1.5 m en een drainageweerstand van 100 d (test17), bij verschillende rekentijdstappen van SWAP en MetaSWAP, bij een **doorlatendheid X 0.1**

PAWN- een- heid	Qrun_ SWAP dtmax= 0.05d (mm)	Qrun_ SWAP dtma= 0.01d (mm)	Qrun_ SWAP dtmax= 0.001d (mm)	Qrun_ Meta- SWAP dtgw= 0.05d (mm)	Qrun_ Meta- SWAP dtgw= 0.125d (mm)	Qrun_ Meta- SWAP dtgw= 1.0 d (mm)
1	419	384	376	318	324	388
2	338	332	331	121	122	136
3	486	455	430	388	388	393
4	477	439	423	388	388	388
5	490	489	489	198	200	230
6	541	532	521	315	315	332
7	47	45	44	123	123	123
8	67	62	61	80	80	83
9	151	146	145	198	198	198
10	152	146	145	198	198	198
11	92	86	85	77	78	86
12	155	149	148	198	198	203
13	70	63	62	77	78	85
14	66	62	61	79	79	79
15	581	577	576	661	661	661
16	725	725	723	805	806	806
17	456	384	370	98	102	154
18	424	375	339	97	98	128
19	587	581	580	661	661	661
20	589	583	582	660	661	661
21	468	451	443	499	498	514

7.8 Stapgrootte dynamische wortelzonedikte (A24)

In het model wordt de overgang van de ene wortelzonedikte naar de volgende gebruik gemaakt van een *online downscaling* van het vochtprofiel. De validatie van deze rekenwijze kan alleen op een indirecte wijze geschieden. Gedeeltelijk is deze validatie reeds afgedekt door de rekenruns met variërende wortelzonedikte. Hier wordt het concept indirect getoetst door de onderzoeken of de rekenresultaten gevoelig zijn voor de stapgrootte van de wortelzonedikte in de bodemfysische database. Daartoe is in de *preprocessing* de stapgrootte van de wortelzonedikte in database vrijwel over het hele bereik gehalveerd. De test is gedaan voor zowel grasland als bouwland, voor het validatiejaar 2003.

De tests zijn gedaan voor een eerdere kalibratie 'cali06'. De gebruikte databases zijn aangemaakt onder:

```
../Tests/PreMetaSWAP_V2_0_10_SIMGRO_V7_1_4
```

De MetaSWAP-tests zijn te vinden onder:

```
../Tests/Testbank/metaSWAP_testprograms/mswap_100531_714_cali06
```

De tests met gehalveerde stapgrootte van de wortelzonedikte hebben 'rzint' in de naam:

- test17diep_ScGrassA_RzdG_Ebs_cal_2003 grasland
- test17diep_ScGrassA_RzdG_rzint_Ebs_cal_2003 grasland
- test17diep_ScGrassA_RzdA_Ebs_cal_2003 bouwland
- test17diep_ScGrassA_RzdA_rzint_Ebs_cal_2003 bouwland

Uit Tabel 7.21 blijkt dat een halvering van de stapgrootte nauwelijks gevolgen heeft.

Tabel 7.21: Vergelijking tussen MetaSWAP resultaten voor een dynamische wortel-zonedikte, bij twee verschillende stapgrootten van de database (de normale stapgrootte en de gehalveerde), bij een ontwateringsdiepte van 5.0 m en drainageweerstand van 100 d (test17diep), voor 2003

PAWN-eenheid	Vegetatie	Etot_ metaSWAP (mm a ⁻¹)	Etot_ metaSWAP_ Δdprz*0.5 (mm a ⁻¹)	Δ (%)
1	grasland	502.7	503.1	0.1
2	grasland	525.5	525.2	-0.1
3	grasland	466.1	466.4	0.1
4	grasland	467.4	467.8	0.1
5	grasland	493.3	487.6	-1.2
6	grasland	491.2	492.5	0.3
7	grasland	371.5	371.5	0.0
8	grasland	398.4	400.6	0.6
9	grasland	421.9	422.2	0.1
10	grasland	449.1	449.4	0.1
11	grasland	461	461.1	0.0
12	grasland	445.6	445.9	0.1
13	grasland	428.6	430.2	0.4
14	grasland	386.2	387.0	0.2
15	grasland	492.5	492.2	-0.1
16	grasland	477.3	476.5	-0.2
17	grasland	426.1	425.5	-0.1
18	grasland	418.1	417.3	-0.2
19	grasland	460.8	460.5	-0.1
20	grasland	481.4	480.9	-0.1
21	grasland	463.1	463.1	0.0
1	bouwland	454.6	454.6	0.0
2	bouwland	445.6	445.0	-0.1
3	bouwland	451.8	451.9	0.0
4	bouwland	430.8	430.7	0.0
5	bouwland	439.6	438.4	-0.3
6	bouwland	448.1	448.3	0.0
7	bouwland	344.3	344.3	0.0
8	bouwland	374.8	376.3	0.4
9	bouwland	397.9	397.8	0.0
10	bouwland	416.9	417.0	0.0
11	bouwland	428.1	428.0	0.0
12	bouwland	417.6	417.5	0.0
13	bouwland	402.5	403.6	0.3
14	bouwland	354	354.4	0.1
15	bouwland	451.8	451.6	0.0
16	bouwland	449.2	449.0	0.0
17	bouwland	414.4	414.4	0.0
18	bouwland	441.7	441.8	0.0
19	bouwland	418.4	418.0	-0.1
20	bouwland	434.1	433.8	-0.1
21	bouwland	439.7	439.5	0.0

7.9 Validatie van versie V7.2.0 (A24)

In versie V7_2_0 is ten opzichte van V7_1_4 het volgende gewijzigd (zie ook de Release_notes):

- de speciale aanpassing van de plasverdamping om consistent te zijn met SWAP is ongedaan gemaakt, aangezien het berust op een onjuist concept;
- op het deel van de grond dat bedekt is met vegetatie en waarvan de transpiratie gereduceerd is door natschade kan in de nieuwe versie de kale-grondverdamping op gang komen; indien vervolgens de grondwaterstand tot in het maaiveld reikt, dan neemt de plasverdamping het weer over;
- de optie om de bodemfysische parameters door middel van schaleringsfactoren aan te passen;
- enkele logistieke aanpassingen zijn gedaan die de processimulatie zelf niet raken.

De tests die als 'essentieel' worden beschouwd zijn onder te verdelen in tests van:

- de verdamping van hangwaterprofielen in een droog jaar;
- de verdamping en het dynamisch gedrag van de grondwaterstand in een nat jaar;
- de bovengrondse afvoer, in zowel een droog als een nat jaar.

De volgende tests zijn respectievelijk gebruikt:

- *test17diep_ScGrassA_RzdA_Ebs_cal_2003* : bedekkingsgraad volgens bouwland
- *test17diep_ScGrassG_RzdG_Ebs_cal_2003* : bedekkingsgraad volgens grasland
- *test17_ScGrassA_RzdA_Ebs_cal_1966* : bedekkingsgraad volgens bouwland
- *test17_ScGrassG_RzdG_Ebs_cal_1966* : bedekkingsgraad volgens grasland

De tests van de bovengrondse afvoer zijn voor V7_2_0 reeds beschreven in §7.4 en §7.7

De tests zijn opgeslagen onder:

```
../Tests/Testbank_V7_2_0/MetaSWAP/cali07
```

Ten opzichte van de in Tabel 7.3 opgenomen jaarverdamping in 2003 van versie V7_1_4 is het verschil maximaal 0.3 mm voor bouwland en 1.6 mm voor grasland. Dit kan men zien aan de hand van de vergelijking van de volgende bestanden voor bouwland:

```
../Tests/Testbank_V7_1_4/MetaSWAP/cali07/  
test17diep_ScGrassA_RzdA_Ebs_cal_2003/fig/Act_Etot.csv  
../Tests/Testbank_V7_2_0/MetaSWAP/cali07/  
test17diep_ScGrassA_RzdA_Ebs_cal_2003/fig/Act_Etot.csv
```

En voor grasland van:

```
../Tests/Testbank_V7_1_4/MetaSWAP/cali07/  
test17diep_ScGrassA_RzdG_Ebs_cal_2003/fig/Act_Etot.csv  
../Tests/Testbank_V7_2_0/MetaSWAP/cali07/  
test17diep_ScGrassA_RzdG_Ebs_cal_2003/fig/Act_Etot.csv
```

De totale verdamping voor 1966 berekend met versie V7_2_0 zijn opgenomen in Tabel 7.22. Ten opzichte van de in Tabel 7.4 opgenomen jaarverdamping in 1966 van versie V7_1_4 zijn er wel significante verschillen tussen de oude en nieuwe versie. Dit kan men ook zien aan de hand van de vergelijking van de volgende bestanden:

```
../Tests/Testbank_V7_1_4/MetaSWAP/cali07/  
test17diep_ScGrassA_RzdA_Ebs_cal_1966/fig\Act_Etot.csv  
../Tests/Testbank_V7_2_0/MetaSWAP/cali07/  
test17diep_ScGrassA_RzdA_Ebs_cal_1966/fig\Act_Etot.csv
```

De kalegrondverdamping is bij de resultaten van versie V7_2_0 tot 7.4 mm hoger voor eenheid 21. Dat is een gevolg van het feit dat bij deze eenheid de grondwaterstand in het maaiveld komt en dat dan de plasverdamping in V7_2_0 ook kan plaatsvinden op

plekken waar de grond met vegetatie is bedekt, maar waar de transpiratie tot nul is gereduceerd vanwege de 'natschade' reductie.

Tabel 7.22: Vergelijking tussen SWAP/MetaSWAP van de simulatieresultaten voor 1966 van de totale evapotranspiratie, voor een representatief verloop van de bedekkingsgraad en wortelzonedikte volgens **bouwland en grasland**, bij een ontwateringsdiepte van 1.5 m (test17)

PAWN- eenheid	Vegetatie- type	RMSE (m)	Etot_ SWAP (mm a ⁻¹)	Etot_ MetaSWAP (mm a ⁻¹)	Δ (%)
1	grasland	0.09	494	494	0.0
2	grasland	0.02	494	494	0.0
3	grasland	0.08	491	493	0.4
4	grasland	0.04	490	490	0.1
5	grasland	0.06	494	493	-0.2
6	grasland	0.32	493	494	0.1
7	grasland	0.01	479	471	-1.5
8	grasland	0.01	493	491	-0.5
9	grasland	0.01	494	493	-0.1
10	grasland	0.01	494	493	-0.2
11	grasland	0.03	494	494	0.0
12	grasland	0.01	494	493	-0.1
13	grasland	0.01	494	493	-0.2
14	grasland	0.02	451	463	2.6
15	grasland	0.15	494	494	0.0
16	grasland	0.21	493	494	0.1
17	grasland	0.30	478	485	1.4
18	grasland	0.14	477	481	0.7
19	grasland	0.03	494	494	0.0
20	grasland	0.01	493	493	0.0
21	grasland	0.13	493	493	-0.1
1	bouwland	0.11	400	400	0.0
2	bouwland	0.09	400	400	0.1
3	bouwland	0.15	402	400	-0.6
4	bouwland	0.08	402	400	-0.6
5	bouwland	0.11	400	398	-0.5
6	bouwland	0.43	401	400	-0.4
7	bouwland	0.03	400	390	-2.3
8	bouwland	0.02	400	395	-1.1
9	bouwland	0.02	400	398	-0.5
10	bouwland	0.01	400	398	-0.5
11	bouwland	0.06	400	400	0.1
12	bouwland	0.06	400	398	-0.5
13	bouwland	0.02	400	398	-0.5
14	bouwland	0.03	400	400	0.1
15	bouwland	0.12	400	400	-0.1
16	bouwland	0.12	404	400	-1.0
17	bouwland	0.31	402	400	-0.5
18	bouwland	0.14	402	400	-0.4
19	bouwland	0.04	400	400	-0.1
20	bouwland	0.02	400	400	-0.1
21	bouwland	0.12	400	397	-0.9

Tabel 7.23: Gevoeligheid voor gebruikte compartimentdikte bij het aanmaken van de bodemfysische database. De vergelijking is tussen MetaSWAP-resultaten met databases op basis van een respectievelijk een compartimentdikte van 1 cm en van 5 cm, van de gesimuleerde de totale evapotranspiratie in 2003, voor een representatief verloop van de bedekkingsgraad en wortelzonedikte volgens **bouwland en grasland**, bij een ontwateringsdiepte van 1.5 m (test17)

PAWN- eenheid	Vegetatietype	Etot_ metaSWAP_ dz 1cm (mm a⁻¹)	Etot_ metaSWAP_ _dz5cm (mm a⁻¹)	Δ (%)
1	grasland	493.5	495.0	0.3
2	grasland	522.7	526.4	0.7
3	grasland	466.7	468.5	0.4
4	grasland	463.3	467.3	0.9
5	grasland	491.7	493.6	0.4
6	grasland	486.4	485.9	-0.1
7	grasland	371.2	371.4	0.1
8	grasland	394.7	394.3	-0.1
9	grasland	417.3	417.7	0.1
10	grasland	447.1	445.2	-0.4
11	grasland	464.4	463.3	-0.2
12	grasland	445.6	446.0	0.1
13	grasland	424.3	425.3	0.2
14	grasland	383.9	382.1	-0.5
15	grasland	490.4	490.6	0.0
16	grasland	480.8	482.5	0.4
17	grasland	424.0	424.0	0.0
18	grasland	419.8	419.5	-0.1
19	grasland	459.3	460.7	0.3
20	grasland	480.3	477.8	-0.5
21	grasland	460.3	460.9	0.1
1	bouwland	454.3	454.3	0.0
2	bouwland	446.4	447.0	0.1
3	bouwland	452.6	452.7	0.0
4	bouwland	429.7	431.0	0.3
5	bouwland	440.1	441.1	0.2
6	bouwland	449.8	449.6	0.0
7	bouwland	343.3	343.7	0.1
8	bouwland	370.7	370.5	-0.1
9	bouwland	395.9	395.0	-0.2
10	bouwland	416.0	413.4	-0.6
11	bouwland	428.4	431.0	0.6
12	bouwland	416.0	417.4	0.3
13	bouwland	399.7	399.8	0.0
14	bouwland	351.3	349.8	-0.4
15	bouwland	452.3	452.0	-0.1
16	bouwland	450.2	450.6	0.1
17	bouwland	426.6	426.7	0.0
18	bouwland	444.6	444.9	0.1
19	bouwland	418.1	419.1	0.2
20	bouwland	430.3	432.0	0.4
21	bouwland	439.3	439.4	0.0

De validatie van versie V7_2_0 is ook uitgevoerd in combinatie met een bodemfysische database die aangemaakt is met een compartimentdikte van 5 cm in plaats van 1 cm (Tabel 7.23; zie ook §5.4 voor de keuze voor 1 cm). De maximale afwijking (als gevolg van de grovere schematisering) van de totale verdamping bedraagt 0.9% (eenheid 4, grasland). Wanneer alleen gekeken wordt naar eenheden die in de NHI-schematisering voorkomen, dan is de maximale afwijking 0.6%. Dit wordt gezien als een acceptabele 'numerieke' fout.

Voor het kalibreren van de bodemfysische parameters kan gebruik worden gemaakt van schaleringsfactoren, via het bestand USCL_SVAT.INP. Daarbij dient wel beseft te worden dat de gekalibreerde dikte van de 'capillair beïnvloede laag' (zie §6) zijn geldigheid kan verliezen. Hier is onderzocht in hoeverre dat het geval is bij de volgende aanpassingen:

- vochtgehaltes vermenigvuldigd met factor 0.5;
- doorlatendheden vermenigvuldigd met factor 0.1.

Voor de vergelijking tussen SWAP en MetaSWAP is voor de schalering van het vochtgehalte is gebruik gemaakt van de volgende tests:

```
../Tests/Testbank_V7_2_0/SWAP/test17diep_ScGrassA_Rzda_
Ebs_2003_SWAP3226_dz1cm_Xi_theta_0p5
../Tests/Testbank_V7_2_0/MetaSWAP/cali07/test17_ScGrassA_Rzda_
Ebs_cal_1966_dz5cm_5m_Xi_theta_0p5
```

De vergelijking aan de hand van de totale evapotranspiratie is opgenomen in Tabel 7.24. Daaruit blijkt dat er nog steeds een goede overeenstemming is tussen de modellen. Kennelijk heeft de gekalibreerde dikte van de capillaire beïnvloede laag nauwelijks ingeboet aan geldigheid.

Tabel 7.24: Vergelijking tussen SWAP/MetaSWAP van de simulatieresultaten voor 2003 van de totale evapotranspiratie, voor een representatief verloop van de bedekkingsgraad en wortelzonedikte volgens **bouwland**, bij een ontwateringsdiepte van 5.0 m (test17diep), **bij vochtgehalteparameters X 0.5**

PAWN-eenheid	Vegetatie-type	RMSE (m)	Etot_SWAP (mm a ⁻¹)	Etot_metaSWAP (mm a ⁻¹)	Δ (%)
1	bouwland	0.01	433	432	-0.3
2	bouwland	0.01	409	411	0.6
3	bouwland	0.01	424	423	-0.3
4	bouwland	0.01	382	381	-0.4
5	bouwland	0.01	411	408	-0.8
6	bouwland	0.01	401	404	0.8
7	bouwland	0.02	306	305	-0.3
8	bouwland	0.02	316	322	1.8
9	bouwland	0.02	330	339	2.7
10	bouwland	0.01	347	354	2.1
11	bouwland	0.01	377	383	1.5
12	bouwland	0.02	347	357	2.7
13	bouwland	0.02	330	344	4.2
14	bouwland	0.02	292	311	6.5
15	bouwland	0.01	407	409	0.4
16	bouwland	0.01	407	406	-0.3
17	bouwland	0.05	362	365	0.8
18	bouwland	0.01	396	398	0.5
19	bouwland	0.02	352	366	3.9
20	bouwland	0.02	344	362	5.2
21	bouwland	0.03	376	380	1.0

Voor de vergelijking tussen SWAP en MetaSWAP is voor de schalering van de doorlatendheid is gebruik gemaakt van de volgende tests:

```
../Tests/Testbank_V7_2_0/SWAP/test17diep_ScGrassA_RzdA_
Ebs_2003_SWAP3226_dz1cm_Xi_Ksat_0p1
../Tests/Testbank_V7_2_0/MetaSWAP/cali07/test17_ScGrassA_RzdA_
Ebs_cal_1966_dz5cm_5m_Xi_Ksat_0p1
```

De vergelijking aan de hand van de totale evapotranspiratie is opgenomen in Tabel 7.25. Daaruit blijkt dat er nog steeds een redelijke overeenstemming is tussen de modellen. Voor een *quick-scan* kalibratie zal deze rekenwijze voldoen.

Tabel 7.25: Vergelijking tussen SWAP/MetaSWAP van de simulatieresultaten voor 2003 van de totale evapotranspiratie, voor een representatief verloop van de bedekkingsgraad en wortelzonedikte volgens **bouwland**, bij een ontwateringsdiepte van 5.0 m (test17diep), **bij een doorlatendheid X 0.1**

PAWN- eenheid	Vegetatie- type	RMSE (m)	Etot_ SWAP (mm a ⁻¹)	Etot_ metaSWAP (mm a ⁻¹)	Δ (%)
1	bouwland	0.03	476	457	-4.0
2	bouwland	0.00	420	454	8.1
3	bouwland	0.00	478	463	-3.3
4	bouwland	0.00	454	447	-1.7
5	bouwland	0.02	420	437	3.9
6	bouwland	0.02	485	454	-6.4
7	bouwland	0.00	407	374	-8.3
8	bouwland	0.01	418	391	-6.4
9	bouwland	0.00	432	418	-3.2
10	bouwland	0.00	435	438	0.7
11	bouwland	0.00	439	448	2.0
12	bouwland	0.00	451	441	-2.2
13	bouwland	0.00	429	420	-2.2
14	bouwland	0.00	383	368	-3.9
15	bouwland	0.00	497	491	-1.2
16	bouwland	0.00	526	525	-0.2
17	bouwland	0.00	453	430	-4.9
18	bouwland	0.00	454	447	-1.7
19	bouwland	0.00	475	466	-1.9
20	bouwland	0.00	463	475	2.5
21	bouwland	0.14	471	466	-1.0

7.10 Conclusies validatietests (A25, A26)

Het interceptieconcept van MetaSWAP is gekalibreerd aan de hand van beschikbare data uit de literatuur, zoals gerapporteerd in Bijlage 1. De beschikbare data zijn echter zeer beperkt en globaal van karakter. Een validatie van het interceptieconcept is daardoor niet mogelijk. Dat geldt eigenlijk ook voor de gewasfactoren. De gebruikte factoren dateren van veldproeven van meer dan 30 jaar oud. Het is de vraag of die waarden nog wel gelden voor de gewasvariëteiten die momenteel in zwang zijn.

Het feit dat de gebruikte concepten en parameters van de plant-atmosfeerinteracties niet voldoende zijn gevalideerd is op zich niet relevant voor het al of voldoen van MetaSWAP als metamodel van SWAP. Het 'meta'-concept betreft namelijk de vereenvoudigde simulatie van het bodemvocht met behulp van een *quasi steady-state*

oplossing van de *'straight'* Richards-vergelijking. Daar hebben de validatietests zich op gericht.

In de tests die als essentieel worden beschouwd voor het certificeren van nieuwe versies wordt een dynamische bodembedekkingsgraad en wortelzonedikte gecombineerd met de simulaties voor de extreme meteorologische jaren.

De *'essentiële'* test voor het zeer droge jaar 2003 leverde op dat de maximale afwijking van de gesimuleerde evapotranspiratie slechts enkele procenten afwijkt van SWAP, althans wanneer gekeken wordt naar situaties die significant in het NHI (Nationaal Hydrologisch Instrumentarium, www.nhi.nu) voorkomen.

Bij de essentiële test voor het zeer natte jaar 1966 is vooral het dynamische gedrag van de grondwaterstand relevant. Deze test leverde op dat de gesimuleerde grondwaterstanden ten opzichte van SWAP een *RMSE* van maximaal 0.15 m hebben, wanneer gekeken wordt naar de eenheden die in het de NHI-schematisering voorkomen. Of deze simulatie nauwkeurig genoeg is hangt af van de beoogde toepassing van de resultaten.

Uit de tests komt naar voren dat voor simulaties met als doel afvoerstatistieken af te leiden het nodig is om een tijdstap van 0.5d of kleiner te gebruiken. Indien daaraan wordt voldaan, dan blijkt de naar oppervlaktefractie (van het NHI) gewogen maximale afvoer voor 1966 door MetaSWAP slechts 5% af te wijken van de door SWAP berekende waarde.

Uit de tests met bovengrondse afvoer bleek dat, ondanks het zeer simpele infiltratieconcept van MetaSWAP, er een redelijke mate van overeenstemming is met de resultaten van SWAP. Maar gezien de gevoeligheid van andere processen voor deze waterbalanstern (piekafvoer, fosfaatafspoeling) dient toch de nodige terughoudendheid te worden betracht bij het toepassen van MetaSWAP in situaties waar bovengrondse afvoer een cruciale rol speelt. Dat geldt met name wanneer sprake is van extreme regenval op een niet-verzadigde grond. Voor de bovengrondse afvoer van een verzadigde grond, daarentegen, is MetaSWAP wel in staat goede voorspellingen te leveren. Voor het goed simuleren van die situaties is een correcte waterbalanssimulatie tijdens de achterliggende periode bepalend. Uit de validatie van MetaSWAP blijkt dat de verdamping goed wordt gesimuleerd, en dus ook het moment dat de grondkolom verzadigd raakt en dat er bovengrondse afvoer gaat optreden.

Afgezien van de conceptuele beperkingen ten aanzien van infiltratie en bovengrondse afvoer van een niet-verzadigde grond, komen uit bovengenoemde tests geen zwaarwegende tekortkomingen naar voren wat betreft het meta-concept voor de *'straight'* Richards-vergelijking. In situaties waar geen speciale bodemfysische processen een rol spelen is MetaSWAP derhalve geschikt als vervanger van SWAP. Het geringe verlies aan *'nauwkeurigheid'* moet men zien in relatie tot de onzekerheid van de bodemfysische parameters. De huidige bodemfysische parameterisering van de Nederlandse bodem bestaat uit een schematisering in slechts 21 eenheden. De fouten die daarmee worden gemaakt zijn veel groter dan die als gevolg van de vereenvoudigde simulatie met het meta-concept.

Aangezien het meta-concept zich vooralsnog heeft beperkt tot *'straight Richards'*, zijn de volgende speciale proceskenmerken niet gemodelleerd:

- hysteresis;
- preferente stroming (zandgronden);
- bypass flow (kleigronden) ;
- speciale processen bij infiltratie in een droge grond.

Dat deze proceskenmerken tot dusver niet in MetaSWAP zijn opgenomen is niet het gevolg van een generieke beperking van het concept maar van de specifieke ontwikkelfase waarin het model zich nu bevindt.

8 Gevoeligheidsanalyse

8.1 Inleiding (A28)

Kennis van de modelgevoeligheid voor de invoergegevens is belangrijk voor het correct toepassen van een model. Die kennis is ook nodig voor het efficiënt inzetten van de beschikbare tijd en middelen bij het uitvoeren van een modelstudie. In de navolgende beschouwing worden de eerder in dit rapport gepresenteerde resultaten vanuit deze invalshoek gezien. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen:

- parameters die de ruimte- en tijddiscretisatie beschrijven;
- parameters die de eigenschappen van de SVAT-kolom beschrijven.

Het blijkt overigens dat deze indeling ook dwarsverbanden vertoont. Hier wordt als ingang genomen de ruimte- en tijddiscretisatie, omdat die voor MetaSWAP deels anders opgezet is dan voor SWAP. De gevoeligheid voor de parameters die de SVAT-kolom beschrijven zijn niet anders dan voor SWAP, en worden derhalve hier niet besproken. De uitzondering daarop wordt gevormd door de zogenaamde Boesten-parameter voor uitdroging van een kale grond, β_2 . In SWAP wordt de uitdroging van kale grond ook bepaald door de bodemfysische processen; in MetaSWAP is dat vervangen door een reductie op β_2 toe te passen.

8.2 Ruimtelijke en verticale discretisatie (A28)

Wat betreft de ruimtelijke discretisatie in het horizontale vlak geldt: hoe kleiner de ruimtelijke eenheid, hoe meer rekening kan worden gehouden met variaties van landgebruik, maaiveldshoogte, bodemtype, en ligging ten opzichte van ontwateringsmiddelen. De gevoeligheid van MetaSWAP verschilt in dit opzicht niet van SWAP. Wel zal een toepassing van MetaSWAP meer mogelijkheden bieden voor het verfijnen van de eenheden doordat de rekeninspanning van MetaSWAP zoveel lager is.

De verticale discretisatie van MetaSWAP kent twee niveaus:

- de indeling in compartimenten, die in de voorbereidingsfase wordt gebruikt om met de stationaire versie van SWAP de bodemfysische database aan te maken;
- de indeling in aggregatielagen.

De gevoeligheid van MetaSWAP en SWAP voor de verticale indeling in compartimenten is onderzocht in §5.4.1. Daaruit is gebleken dat in situaties met stationaire capillaire opstijging de berekende flux in het model SWAP 2X zo gevoelig is als die in MetaSWAP. Het verschil in gevoeligheid is een gevolg van het feit dat bij de middeling van de doorlatendheid 'tussen' compartimenten in de stationaire versie van SWAP een andere rekenregel wordt gebruikt dan in de niet-stationaire versie.

De gevoeligheid van SWAP blijkt bij een compartimentdikte van 0.025 m gedaald te zijn naar ca. 5%, wanneer een dikte 0.010 m als ijkmaatstaf wordt genomen. Een waarde van 5% vinden wij acceptabel. Uitgaande van de geconstateerde 2X zo lage gevoeligheid voor MetaSWAP, wordt deze waarde bereikt bij een compartimentdikte van 0.050 m. Deze dikte wordt daarom voor MetaSWAP aanbevolen als een goed compromis tussen nauwkeurigheid en efficiëntie.

De eerste aggregatielaag van MetaSWAP betreft de wortelzone. Het model is op een vergelijkbare manier als SWAP gevoelig voor deze dikte, althans voor diktes tot circa 0.60 m. Dit is gebleken uit de validatietests waarbij de wortelzonedikte in de tijd wordt gevarieerd; zie bijvoorbeeld §7.9: uit Tabel 7.22 blijkt dat de rekenresultaten van MetaSWAP ook bij variërende wortelzonedikte die van SWAP zeer goed weet te benaderen. Dat impliceert dat beide modellen vrijwel dezelfde gevoeligheid hebben voor diktes tot 0.60 m. Bij dikkere wortelzones tot bijvoorbeeld 1 m gaan de modellen – en dus ook de gevoeligheid – wat meer uiteenlopen, zoals blijkt uit Tabel 6.3. Maar dat betreft vooral de bodemeenheden 14 (podzolgrond in grof zand) en 20 (klei op grof zand), die een scherpe overgang hebben in de bodemopbouw op respectievelijk een diepte van 0.35 m en 0.60 m. Bij deze bodemsoorten is de combinatie met een wortelzonedikte van 1 m niet logisch in eco-(of agro-)hydrologische zin. De conclusie hieruit is dat bij het opzetten van het model gelet moet worden op de consistentie tussen bodemopbouw en toegekende wortelzonedikte. Maar dat geldt natuurlijk ook voor het model SWAP.

De tweede aggregatielaag van MetaSWAP wordt in het concept van MetaSWAP een speciale rol toebedeeld. Het drukhoogteprofiel in deze laag wordt verondersteld die van de wortelzone te volgen bij uitdroging; dit is het modelmechanisme dat zorgt voor het niet-stationaire deel van de capillaire opstijging in het metamodel (zie ook §2.1). De dikte d_2 van de tweede laag is een van de twee parameters die bepaald moet worden door kalibratie op het 'moedermodel' SWAP.

Voor het kalibreren van de laagdikte d_2 is een systematische gevoeligheidsanalyse uitgevoerd waarvan de resultaten zijn opgenomen in Tabel 6.2. Het betreft de gevoeligheid van het langjarig gemiddelde van de actuele evapotranspiratie. In Tabel 8.1 is deze tabel omgezet naar waarden van de gevoeligheid voor de verandering van de laagdikte d_2 . In de tabel valt ten eerste op dat de gevoeligheid voor een dunne wortelzonedikte (0.30 m) veel groter is dan voor een dikke (1.0 m). Dat komt doordat de evapotranspiratie van een kolom met een dikke wortelzone reeds de potentiële waarde benadert zonder dat er capillaire opstijging plaatsvindt, bij een d_2 van 0.05 m en een grondwaterstand van 5 m –mv (test17diep). Dan valt er nog maar weinig te 'bereiken' door de dikte van d_2 op te voeren. Dit effect ligt ook ten grondslag aan het feit dat de gevoeligheid afneemt bij toenemende d_2 , waarbij de evapotranspiratie steeds dichter bij de potentiële waarde komt.

Ten derde valt op dat er een forse variatie is van de gevoeligheid over de 21 bodemeenheden. De verschillen in gevoeligheid zijn terug te voeren op het vocht bergend vermogen tussen 'veldcapaciteit' en het vochtgehalte zoals dat voorkomt in de ondergrond van een uitdrogend profiel. Het gaat daarbij niet om het 'verwelkingspunt' ($pF=4.2$), want dat is voorbehouden aan de wortelzone, en dan vooral bovenin, maar eerder om waarden tot circa $pF=3$.

Uit Tabel 8.1 blijkt dat het van belang is om parameter d_2 te kalibreren op SWAP. Het is echter ook gebleken dat bij halvering van het vochtbergend vermogen van een bodem er nogal altijd een zeer redelijke overeenstemming is tussen MetaSWAP en SWAP (Tabel 7.24). Er is dus geen nieuwe kalibratie van d_2 nodig als er wordt gesleuteld aan het vochtbergend vermogen

Tabel 8.1: Gevoeligheid van het langjarig gemiddelde (1971-2000) van de actuele evapotranspiratie Tact voor de dikte d2 van de tweede laag van de MetaSWAP schematisering, voor de 21 PAWN eenheden, voor een wortelzonedikte van 0.3 m en 1.0 m, bij een ontwateringsdiepte van 5 m (test17diep). Voor een dikte van 0.05 m zijn de absolute getallen weergegeven (zoals in Tabel 6.2). De gevoeligheidscoëfficiënten zijn in (mm/m).

PAWN-eenheid	Wortel-zone-dikte (m)	d2(m)										
		0.05 (mm)	0.10 (mm/m)	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55
1	0.3	474	254	224	178	142	114	90	70	56	44	34
2	0.3	488	212	166	132	104	84	64	52	24	16	14
3	0.3	446	336	314	258	210	166	132	102	82	62	50
4	0.3	435	370	332	266	214	172	136	108	48	32	28
5	0.3	482	294	218	164	120	86	66	48	20	12	10
6	0.3	478	152	126	110	96	86	72	64	80	50	44
7	0.3	406	178	142	128	116	112	104	96	90	88	84
8	0.3	431	124	112	104	96	90	88	82	80	76	74
9	0.3	435	196	170	154	106	88	82	76	72	68	64
10	0.3	438	200	182	168	128	116	114	112	108	106	100
11	0.3	455	218	198	180	130	108	98	92	86	80	72
12	0.3	437	196	172	158	148	134	124	114	104	96	86
13	0.3	435	154	140	130	104	92	84	78	74	70	66
14	0.3	430	106	96	92	84	82	76	74	72	70	68
15	0.3	459	206	178	156	138	118	106	90	78	70	60
16	0.3	454	222	192	170	150	128	114	98	84	74	62
17	0.3	433	210	174	164	146	160	124	112	100	90	80
18	0.3	434	184	156	134	116	102	218	220	184	152	124
19	0.3	444	218	186	162	144	126	78	62	58	54	52
20	0.3	454	242	210	182	160	136	62	42	40	38	36
21	0.3	446	154	132	116	104	96	88	80	76	70	64
1	1.0	541	10	6	4	2	2	2	2	0	0	0
2	1.0	534	16	12	12	12	10	8	8	8	6	4
3	1.0	540	14	10	8	4	4	2	2	2	0	2
4	1.0	524	26	24	20	20	18	16	16	14	14	14
5	1.0	536	12	12	8	8	8	6	4	6	4	2
6	1.0	530	26	22	16	28	2	12	10	24	-8	12
7	1.0	480	80	72	68	66	62	58	54	48	42	40
8	1.0	494	68	60	56	52	46	44	40	36	34	30
9	1.0	500	58	52	48	42	40	36	32	32	28	26
10	1.0	518	30	30	26	24	22	22	20	18	18	18
11	1.0	525	26	24	22	20	18	18	16	14	14	12
12	1.0	512	46	44	36	36	30	28	26	22	22	22
13	1.0	499	60	52	48	46	40	38	34	32	28	28
14	1.0	487	66	64	58	56	50	48	44	40	36	36
15	1.0	532	30	26	20	18	14	14	10	8	8	6
16	1.0	531	36	28	22	20	16	14	12	10	8	8
17	1.0	516	56	48	42	36	32	30	24	14	24	24
18	1.0	535	38	28	20	16	10	10	6	4	4	2
19	1.0	510	46	40	38	34	30	28	26	24	22	22
20	1.0	518	32	28	24	24	20	20	18	18	18	16
21	1.0	517	42	36	32	28	26	22	20	20	18	16

8.3 Tijddiscretisatie (A28)

MetaSWAP maakt gebruik van twee tijdstappen:

- *dtsw* voor de snelle processen, zoals verdamping en oppervlakkige afstroming;
- *dtgw* voor de 'langzame' processen, te weten stroming van bodem- en grondwater.

In de landelijke toepassing van het NHI wordt vooralsnog voor beide tijdstappen 1 dag gebruikt; in veel regionale toepassingen wordt voor *dtsw* een waarde van 1 uur genomen, in combinatie met uurwaarden voor de neerslag.

8.3.1 Tijdstap voor langzame processen

Het ontwaterings- en afvoerproces is veel dynamischer dan het proces van capillaire opstijging. Daarom mag verwacht worden dat de rekenresultaten voor de afvoersimulatie veel gevoeliger zijn voor de *dtgw*-reken tijdstap dan die van de simulatie van capillaire opstijging. Daarom is wat betreft de invloed van de *dtgw*-tijdstap de aandacht gericht geweest op de gesimuleerde maximale afvoer.

Resultaten van de tijdstap-gevoeligheidsanalyse van de ontwateringsafvoer zijn samengevat in Tabel 7.16 en Tabel 7.17. Daaruit is geconcludeerd dat voor het simuleren van afvoeren in combinatie met dagwaarden voor de neerslag, een tijdstap van maximaal 0.5 d aan te bevelen is. Overigens is het frappant dat het MetaSWAP model een hogere maximale afvoer simuleert bij een kleiner tijdstap dan bij een grote. Als de gevoeligheid het gevolg zou zijn van de percolatie-simulatie, dan zou juist een afname verwacht worden. Dat komt doordat bij kleinere tijdstap het model meer de gelegenheid krijgt om vanuit een stijgende grondwaterstand de percolatie af te laten nemen, via een 'negatieve' terugkoppeling. Kennelijk is een ander proces de oorzaak van de gevoeligheid. Dat blijkt de gesimuleerde infiltratie te zijn: hoe kleiner de tijdstap, hoe groter de gesimuleerde infiltratie. Dit wordt duidelijk uit Tabel 7.20, waarin de gevoeligheid van de oppervlakkige afstroming wordt samengevat. Uit die tabel blijkt dat de oppervlakkige afstroming lager wordt bij kleinere tijdstap, wat gepaard gaat met een grotere infiltratie.

8.3.2 Tijdstap voor snelle processen

De gevoeligheid voor tijdstap *dtsw* die gebruikt wordt voor de simulatie van snelle processen hangt samen met de *sampling* tijdstap van de meteorologische data. Wanneer die data op dagbasis worden aangeleverd, dan mag van het model verwacht worden dat de simulatie niet of nauwelijks gevoelig is voor de tijdstap, zolang de reken-tijdstap korter is of gelijk is aan de tijdstap van de data.

Voor de interceptieverdamping is daaraan reeds voldaan indien de tijdstap gelijk is aan die van de data. Dat komt doordat het model gebruik maakt van een analytische oplossing van de differentiaalvergelijking. Wel dient men erop bedacht zijn dat de parameters van het interceptiemodel afhankelijk zijn van de *sampling* tijdstap, zoals beschreven in Bijlage 1.

De simulatie van oppervlakkige afstroming kan – net als in SWAP – geïmplementeerd worden met een weerstandsrelatie. Het rekenschema is in beide modellen 'expliciet', wat inhoudt dat de afvoer wordt gebaseerd op de toestandsvariabelen aan het begin van de tijdstap. Een dergelijke rekenwijze kan onstabiel worden wanneer de tijdstap uitgedrukt in 'dagen' dezelfde orde van grootte is als de weerstand uitgedrukt in 'dagen'.

8.4 Boesten-parameter (A28)

De gevoeligheid van MetaSWAP voor de Boesten-parameter is samengevat in Tabel 6.4. Een reductie met 20% geeft een reductie van de kalegrondverdamping met circa 10%, onafhankelijk van de bodemsoort. De uitzondering daarop vormt eenheid 7, te weten 'stuifzand'. Dat is ook de enig eenheid waarvoor een waarde is gekalibreerd die significant afwijkt van de standaardwaarde van $0.054 \text{ m}^{1/2}$.

Literatuur

- Boesten, J.J.T.I. & L. Stroosnijder (1986). *Simple model for daily evaporation from fallow tilled soil under spring conditions in a temperate climate*. Neth. J. Agric. Sci., 34, 75-90.
- De Laat, P.J.M. (1980). *Model for unsaturated flow above a shallow water table, applied to a regional subsurface flow problem*. Doctoral thesis, Wageningen UR. Pudoc, Wageningen.
- Kroes, J.G., van Dam, J.C., Groenendijk, P., Hendriks, R.F.A., Jacobs, C.M.J. (2009). *SWAP version 3.2. Theory description and user manual*. Alterra-report 1649, update 02, Augustus 2009. Alterra Wageningen UR, Wageningen.
- Van Walsum, P.E.V. & P. Groenendijk (2006). *Dynamic metamodel for the unsaturated-saturated zone*. In: "Proceedings of MODFLOW and More 2006, Volume II, p. 612-616. International Groundwater Modeling Centre, Colorado School of Mines, Colorado."
- Van Walsum, P.E.V. & P. Groenendijk (2008). *Quasi steady-state simulation of the unsaturated zone in groundwater modeling of lowland regions*. Vadose Zone J. 7:769-781.
- Van Walsum, P.E.V. (2011a). *SIMGRO 7.2.0; User's guide*. Alterra Report 913.2, Alterra Wageningen UR, Wageningen (zie <ftp://ftp.wur.nl/simgro>).
- Van Walsum, P.E.V. (2011b). *SIMGRO 7.2.0; Input and output reference manual*. Alterra Report 913.3. Alterra Wageningen UR, Wageningen (zie <ftp://ftp.wur.nl/simgro>).
- Van Walsum, P.E.V., A.A. Veldhuizen & P. Groenendijk (2011). *SIMGRO 7.2.0; Theory and model implementation*. Alterra Report 913.1. Alterra Wageningen UR, Wageningen (zie <ftp://ftp.wur.nl/simgro>).
- Van Walsum, P.E.V. & A.A. Veldhuizen (2011). *Integration of models using shared state variables: implementation in the regional hydrologic modelling system SIMGRO*. Journal of Hydrology 409 (1-2), p. 363-370.
- Wösten, J.H.M., G.J. Veerman, W.J.M. de Groot & J. Stolte (2001). *Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks*. Vernieuwde uitgave 2001. Alterra-rapport 152. Alterra, Wageningen.

Bijlage 1 Gewasfactoren en interceptiecapaciteit

Implementation proposal

Identifier : crop factors and canopy interception capacity
Contributors : Van Walsum, Veldhuizen
Version : 5h_hr_calib
Date : 19 May 2010

General

To aid the parameterizations, the 'testbench' that is used for calibration on SWAP has been set up for SIMGRO-WOFOST, with data for simulating the 30-year period 1971-2000. The used soil is 'Enkeerdgrond'(PAWN12) and the drainage bas has been set at 1.5 m. This guarantees virtually optimal water supply conditions ($T_{act} \sim T_{pot}$), with one or two exceptions (coniferous forests).

The list of vegetation types that are used in the NHI-model is given in Table B1.

Table B1: List of vegetation types used in NHI-model

Index	Vegetation type
1	Grassland
2	Maize
3	Potatoes
7	Tree nurseries
8	Greenhouses
9	Orchards
11	Deciduous forest
12	Light coniferous forest
13	Wet nature
14	Dry nature
15	Bare soil
18	Urban area
19	Dark coniferous forest

It is a general problem of interception models that they involve more parameters than can usually be calibrated (due to lack of data):

- soil cover & leaf area index;
- crop factor of interception evaporation;
- interception capacity of the canopy.

We have therefore chosen to make an (educated) guess of the crop factors of the interception evaporation. It should be realized that in the used 'sparse Gash' concept the interception capacity is multiplied by the soil cover in the model.

The 'crop factor' of bare soil has in all cases been set to 1.0. The 'crop factor' of ponding water has also been set to 1.0, to take into account that ponding water shielded by vegetation evaporates less than open water. For open water ('inundated bare soil') the factor is set to 1.25.

Forest (vegetation types 11,12, and 19)

For the 'soil cover' of deciduous forest the scheme given in Van Bakel & Van de Nes (1984) is used (0.2 day 1-90; increasing to 1.0 on day 150; remaining 1.0 until day 260; decreasing to 0.2 on day 320, then remaining the same.) For coniferous forest a year-round value of 1.0 is used for the soil cover.

The evapotranspiration terms given by Dolman *et al.* (2000), reproduced in Tabel B2, were used for calibrating the crop factors and interception capacities. The simulated values for the integrated parameters are given in Table B3. For the 'crop factor' of deciduous forest a value of 0.85 was calibrated, which is lower than the value of 1.0 given by Dolman *et al.* For the light coniferous forest a value of 1.0 was calibrated (cf. 1.0 of Dolman *et al.*). A value of 1.15 has been calibrated for dark coniferous forest.

It is thought to be plausible that the crop factor for forest interception evaporation is at least as high as the highest crop factor for crops. Feddes (1987) gives crop factors for the small trees of 'stone fruit' that reach a maximum of 1.7 in summer. For deciduous forest value of 2.2 was calibrated, for light coniferous forest a value of 1.8, for dark coniferous a value of 2.0. The higher value for deciduous forest is thought to be defensible in view of the more 'airy' structure of the canopy.

Given the above assumptions, the remaining parameter is the interception capacity of the covered soil (in the sparse Gash concept). For both deciduous forest and coniferous forest a value of 3.5 mm was calibrated for a time step of 1 day. For light coniferous forest a much lower value 0.75 mm was calibrated.

Especially for dark coniferous forests, it is inevitable that there is some sort of reduction of the evapotranspiration, even for the exceptionally good conditions used for the simulation (*Enkeerdgrond*, drainage base at 1.5 m).

Table B2: Evapotranspiration terms for Dutch forests (Dolman et al., 2000). The investigation period was from 1995-1998. The mean ET-Makkink for these 4 years is 543 mm/yr; for the 30-year period 1971-2000 it is practically the same, 544 mm/yr.

Forest type	E_{ic} (mm/yr)	$T_{act}+Ebs_{act}$ (mm/year)	ET_{act} (mm/yr)
Deciduous	230±45	320±55	550
Light coniferous	245±40	385±30	630
Dark coniferous	333	400	733

Table B3: Simulated evapotranspiration terms for forest, for the 30-year period 1971-2000. For a time step of 1 day the calibrated values of the interception capacity are: 3.5 mm for deciduous forest and dark coniferous forest, and 0.75 mm for light coniferous forest.

Forest type	E_{ic} (mm/yr)	$T_{act}+Ebs_{act}$ (mm/year)	$T_{pot}+Ebs_{act}$ (mm/yr)	ET_{act} (mm/yr)	ET_{pot} (mm/yr)
Deciduous	226	322	323	548	549
Light coniferous	244	396	407	641	651
Dark coniferous	335	388	431	724	767

Tree nurseries (vegetation type 7)

Tree nurseries always have some bare soil in between that is kept free from weeds. That is discounted by setting the soil cover at 0.8X that of deciduous forest. The used crop factor is slightly more than for mature deciduous forest (0.9 vs 0.85), since growth is top priority for young trees. But the vegetation is much less developed than that of forest. So the maximum interception capacity is set at 1.5 mm (cf. 3.5 mm for deciduous forest); this gets multiplied by the soil cover in the 'sparse Gash' model. The crop factor for interception evaporation is set at 1.7.

Orchards (vegetation type 9)

Orchards usually have grass below the trees. So the soil cover is set at 1.0 all year round. The crop factors have been taken from Feddes (1987): "stone fruit". The trees are nowadays of the small type, similar to the trees in nurseries; so the interception capacity is set at the same value of 1.5 mm X [soil cover of deciduous forest]; the latter multiplication is needed because otherwise the soil cover of 1.0 (used in view of the grass underneath) gives a too high interception evaporation. The crop factor for interception evaporation is set at 1.7.

Grassland (vegetation type 1)

The crop factor of grassland in WOFOST has so far been based on the 'day number'; in that sense the modeling method does not differ from the 'simple' model. This method of parameterization does not do justice to the variations that can occur due to weather-dependent variations of the vegetation development. The simulations are not as sensitive as they should be to climatic variations. We therefore revised the parameterization, introducing the leaf area index (LAI) as the key crop variable that determines the hydrologic response.

Literature references on the interception by grassland are extremely scarce. According to Calder (1990) the interception evaporation of grasslands is about 15% of rainfall, compared to 30% for forest. These data are most probably from sites in Great Britain. The reference to Calder is made in Kelliher *et al.* (1993). Dolman *et al.* (2000) also indicate a 30% percentage of the rainfall for the interception evaporation of forest. So it is plausible the Calder figures can be used in the Dutch context, indicating that there is roughly a ratio of 1:2 between grassland interception and forest interception. That would mean an interception evaporation of roughly 120 mm per year, or about 25% of the total evapotranspiration. This 25% has been used for the calibration of the ratio between interception capacity and LAI.

For the interception evaporation a crop factor of 1.15 was assumed, which is somewhat lower than the value of 1.25 that is assumed for arable land crops; the crop factor itself lower than that of arable land crops. In combination with daily rainfall values a storage capacity of 0.065 mm/LAI was calibrated, i.e. roughly one quarter of what is commonly found for arable land crops (The Van Hoyningen parameter *a* is usually set at 0.25 mm/LAI). The vertical orientation of the grass stems makes it logical that the proportionality constant between LAI and interception capacity is much lower for grassland than for arable land crops.

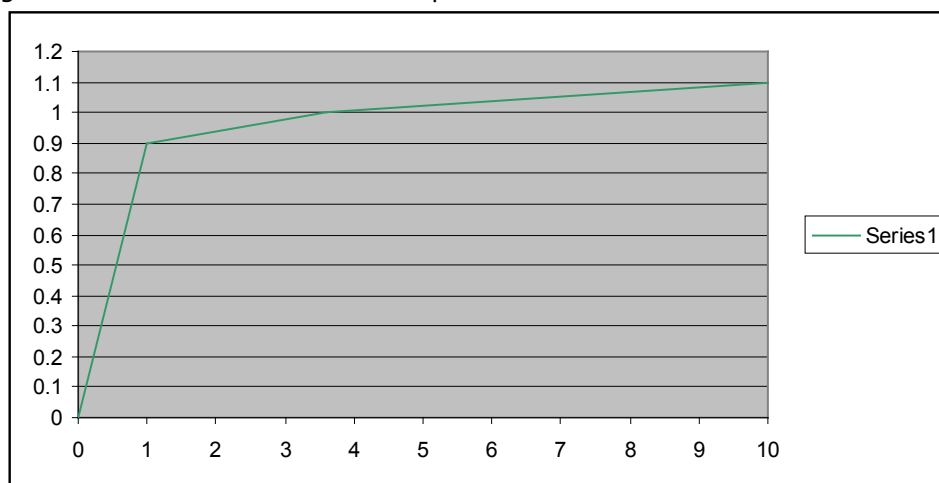


Figure B1: Assumed relationship between leaf area index (x-axis) and crop factor, for grassland

For the dependency of the crop factor on the vegetation development the table given in Feddes (1987) only indicates that outside the summer season the factor is 0.9 instead of 1.0. We made the following assumptions (see also Figure B1):

- the factor 1.0 given by Feddes is the value for average conditions; for hay the simulated long-term average of the leaf area index was found to be about 3.6;
- for a LAI of 1.0 a crop factor of 0.9 is assumed;
- for a LAI of 10 a crop factor of 1.1 is assumed.

With this relationship a 30 year run was made with SIMGRO-WOFOST; the found averages of the evapotranspiration terms are given in Table B5.

The next step was to use this simulation for generating an input file for the 'simple' crop model. It should be realized that due to the cycle of grass growth and mowing (which is not synchronous between the years) the averaging process yields LAI-values that never reach the maximum values that are found within the individual years. It was then thought better to select a representative year with an average yield. However, such an average year does not exist, because the yield variation over the years depends mainly on the discrete number of harvests. The average is somewhere in between. So after all the values averaged per day of the year were used. These were exported to the FACT_SVAT.INP file of SIMGRO, involving:

- soil cover;
- leaf area index (for extra information, to see what the data are based);
- interception capacity of vegetated soil cover;
- crop height;
- root zone depth.

This file was then used for a 30-year simulation. As can be seen from Table B5, the results between WOFOST and the simple model agree very well.

Arable land (vegetation types 2 and 3)

Like has been done for grassland, the parameterization has been revised in order to make the SIMGRO-WOFOST model more (realistically) sensitive to climatic variations. Consistency with the 'simple' crop model is required; so the goal was to obtain a data-set for the 'simple' crop model that produces practically the same results (long-term averages) as when the WOFOST model is used with feedback to the hydrology. For the parameterization we make use of potatoes and maize. The parameters of potatoes are also used for other arable land crop (for the time being). For the growing season we use the period given in Feddes(1987) for the crop factors. For potatoes this is from the second decade of May (t=131.0) until the end of the first decade in September (t=253.0). For Maize this is from the beginning of May (t=121.0) until the end of September (t=273.0).

The crop factor for interception evaporation is set at the value given by Feddes for the transpiration, with a minimum value of 1.25 for the cropped part of the season.

We have assumed a constant ratio between interception capacity and leaf area index, LAI. For the arable land crops an interception capacity of 0.25 mm/LAI is thought to be a defendable value, as it is equal to the Van Hoyningen *a*. This applies to time steps of 1 day. This proportional capacity is entered directly in the crop file of WOFOST, and then subsequently used in the programme for computing the capacities that are fed back to SIMGRO. The actual interception capacity in each year depends on the *actual* leaf area index. Since the simple crop model does not compute actual leaf area index values, there is no other choice than to base the interception capacities of the simple crop model on the *potential* leaf area index values computed by WOFOST. The input file of the simple model contains values for each day of the year, for a representative year.

The daily values of the potential leaf area index for such a year have been obtained by averaging the WOFOST results for the 30 year period. These have then been multiplied by the Van Hoyningen a (0.25 mm/LAI), obtaining the interception capacities for each day of the year. The Van Hoyningen parameterization is based on daily rainfall values.

For the relationship between LAI and the crop factor f we made the following assumptions:

- the value of f should be a non-decreasing function of the LAI;
- the function should be convex, i.e. having second derivative less than or equal to zero.

The tabular function was determined via Linear Programming. The 'unknowns' are the crop factors as a tabular function of the LAI; for this the daily LAI-values of the 30-year simulation were rounded to '0.01', and then mapped to integers in the range of 0 (LAI=0.) to 1000 (LAI=10.0). The model consists of the following equations:

- computation of the potential evapotranspiration for all decades of the 30 years, respectively using Feddes factors and using LAI-dependent factors in WOFOST;
- computation of differences between decade values obtained by the two methods, computation of overestimate/underestimate per decade of the 30 years; minimization of the sum of deviations, with the underestimates having a 2X weight compared to the overestimates;
- additional constraint that the 30-year sum of [potential transpiration X soil cover] is the same for the decade-dependent Feddes factors and for the LAI-dependent ones.

The relationships are shown in Figure B2 and Figure B3. A comparison between the decades values of Feddes and the LAI-method (which is extra output of LP model) is given in Table B4. As can be seen from this table, the method had difficulty in properly following the 'bump' in the Feddes factors at the beginning of the summer season. The FACT_SVAT.INP file for the simple crop model was derived in the same manner as for grassland. The results of the simple model and the WOFOST model are compared in Table B5.

Table B4: Comparison between crop factor values given by Feddes (1987) per decade, compared to values obtained via the piece-wise linear function of the LAI and averaging per decade

Decade	f-maize(Fds)	f-maize(LAI)	f-potatoes(Fds)	f-potatoes(LAI)
13	0.50	0.71		
14	0.70	0.77	0.70	0.66
15	0.80	0.86	0.90	0.88
16	0.90	1.00	1.00	0.98
17	1.00	1.11	1.20	1.12
18	1.20	1.18	1.20	1.17
19	1.30	1.20	1.20	1.16
20	1.30	1.21	1.10	1.14
21	1.20	1.21	1.10	1.13
22	1.20	1.21	1.10	1.12
23	1.20	1.21	1.10	1.10
24	1.20	1.21	1.10	1.04
25	1.20	1.21	0.70	0.93
26	1.20	1.21		
27	1.20	1.21		

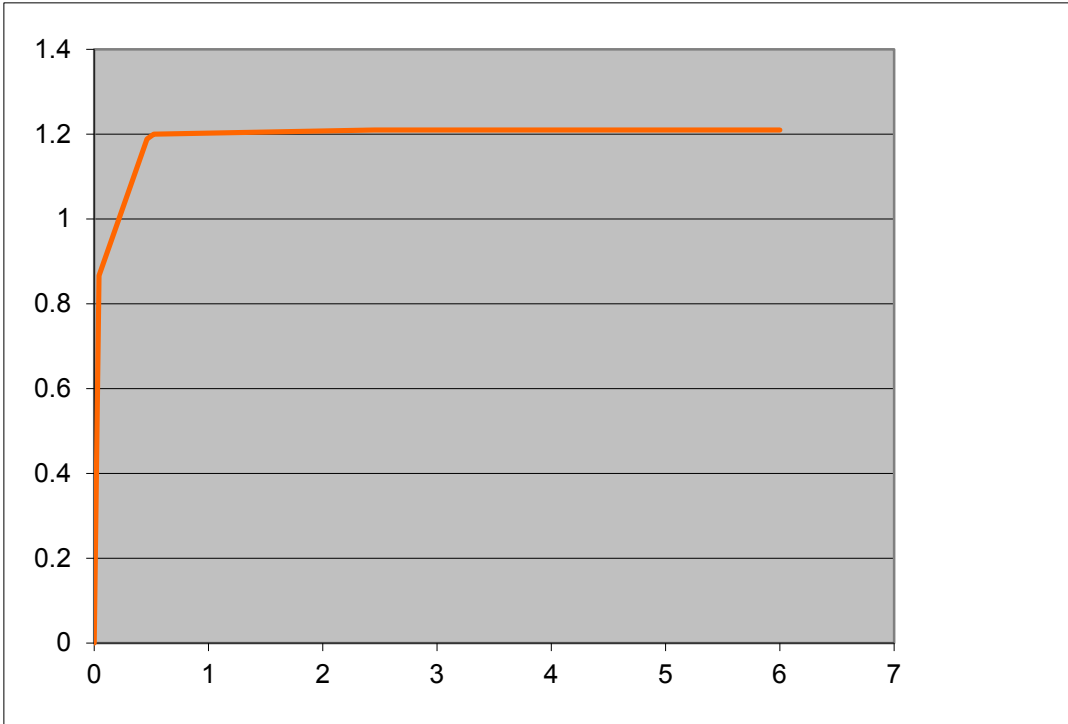


Figure B2: Fitted relationship between LAI (x-axis) and crop factor, for maize

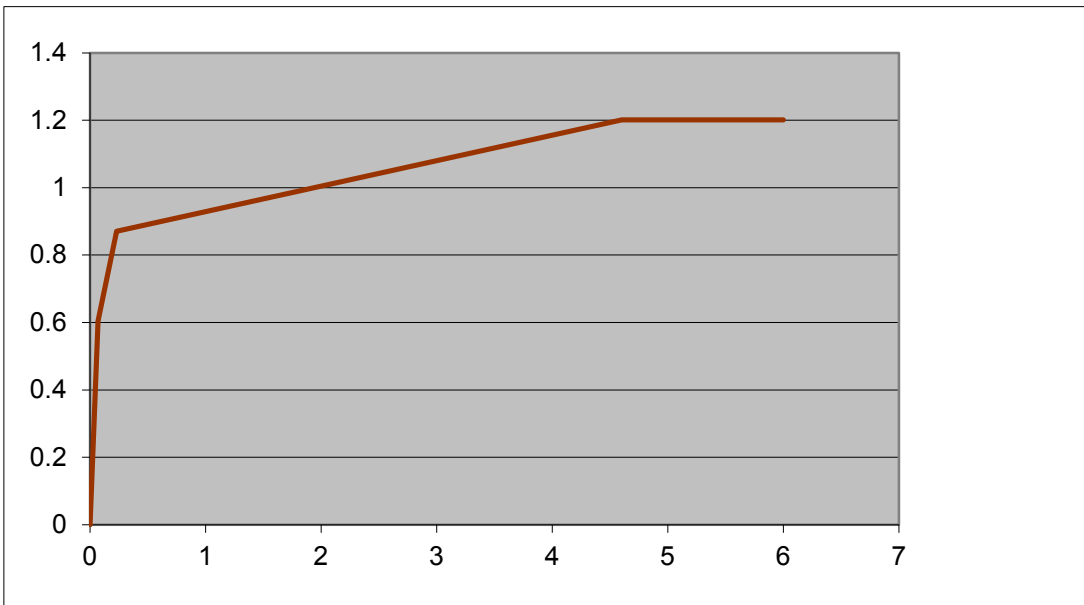


Figure B3: Fitted relationship between LAI (x-axis) and crop factor, for potatoes

Table B5: Comparison between simulated evapotranspiration terms of runs with/without WOFOST, 30 year averages (1971-2000). "wof"= wofost, "simp" = simple model. Values in mm/year.

Crop	$E_{ic, wof}$	$E_{ic, simp}$	$E_{bs, wof}$	$E_{bspo, twof}$	$E_{bs, simp}$	$E_{bspo, tsimp}$	$T_{act, wof}$	$T_{pot, wof}$	$T_{act, simp}$	$T_{pot, simp}$	$ET_{act, wof}$	$ET_{act, simp}$
Grass	126	125	64	110	64	105	314	318	312	317	503	500
Maize	62	62	172	333	171	329	205	205	206	207	438	439
Potatoes	72	73	158	285	157	283	209	216	209	217	439	438

Wet and dry nature areas (vegetation types 13 and 14)

The information on the 'wet' and 'dry' nature areas has been taken from http://www.nhi.nu/referenties/DR12/NHI2008DR12_v2_Gewaskenmerken.pdf, where *permanent nat grasland* is used for wet nature area and *struikheide* for dry nature area. The variation of the LAI according the development stage had previously been converted to a variation over time. These LAI-data have now been converted in the following manner:

- soil cover = $1 - \exp(-kdif*kdir)$, where $kdif=kdir=0.75$ in the mentioned link;
- interception capacity = $LAI*cofab$, where $cofab = 0.00035$ in the mentioned link.

The crop factor for transpiration has been set to 1.0, as had been done previously; the factor for interception evaporation has been set to 1.25. Rooting depth (0.60 m for wet nature areas, 0.40 for dry nature areas) and vegetation height (respectively 0.50 m and 0.30 m) have been taken from the mentioned document, as have the parameters of the Feddes function for transpiration reduction.

Greenhouses (vegetation type 8)

It is assumed that the land surface has been schematized into areas *with* glass cover and areas (in between) *without*. Here we consider the areas with glass cover that is given a 'soil cover' of 1.0. In the model, the 'soil' beneath the greenhouses does not receive any water from above, so the infiltration capacity should be set to zero (file INFI_SVAT.INP). The greenhouse crops are mostly planted in beds of substrate. Water that falls on the glass cover is in most cases first diverted to a storage reservoir; from there it is used as a water supply for the crop (which is supplemented by other means of supply, e.g. tap water and/or groundwater or surface water supply). A storage capacity of 100 mm is common. In the model this storage capacity is simulated via the *interception capacity*. The rate of evapotranspiration of a crop under glass is lower than that of crops in the open air. So we have set the 'crop factor' at 0.8, as a rough guess. This factor is applied to water in interception storage, because the water needed for evapotranspiration is drawn (by priority) from this reservoir. The 'regular' crop factor of rooted vegetation is set to zero, because the water balance of the crop/substrate itself is not simulated in the model.

Bare soil and surface water (vegetation type 15)

We assume that permanent surface water is simulated as inundated bare soil. The 'crop factor' of surface water is therefore specified via the column for 'ponding water' of the 'vegetation type' bare soil; it is given a value of 1.25. The 'crop factor' for bare soil is set to 1.0. The crop factor for rooted vegetation of 'bare soil' is set to zero. The interception capacity of bare soil is modeled via the 'micro storage' on the soil surface (file SVAT2SWNR_ROFF.INP), which is given a nominal value of 1 mm; so the interception capacity is set to zero. The crop factor of interception evaporation is therefore also set to zero.

Urban areas (vegetation type 18)

We assume that urban areas have been schematized into paved areas and green areas (mostly grass). Here we give parameters for the paved part. It is given a 'soil cover' of 1.0. Paved areas are not 100% impervious: some infiltration is possible. An infiltration capacity of 1 mm/d are assumed. The storage on the paved areas is assumed to be 1 mm, which is modelled via the interception capacity. Weeds often manage to nestle themselves via the interstices of the paving material. For this reason we give the paved part of urban areas a nominal rooting depth, of e.g. 0.1 m. Not only weeds withdraw water; some paving materials are porous, thus drawing water via capillary action. There is enough reason to assume a non-zero crop factor for paved areas; a value of 0.2 is used in the form of a rough guess.

Hourly precipitation data

Interception is a 'fast' process. It is therefore physically better based to use precipitation data for short time intervals instead of the daily averages. As can be seen

from comparing Table B6 and B7, the use of hourly precipitation data instead of daily ones leads to the simulation of *lower* interception evaporation totals. The effect of the time-step shortening is twofold, in contradicting directions:

- a shorter time step means that on some days the storage can be 'used' more than once, which *increases* the simulated total interception evaporation;
- the shorter step means that there is less time for the evaporation during the time step itself, which causes the simulation of relatively more percolation from the leaves during heavy squalls, which *decreases* the simulated total interception evaporation. A knock-on effect of this mechanism is that there is more time for the transpiration to be active, which therefore shows an *increase*.

According to Dolman *et al* (2000) it has been observed that directly after a rain shower a temperature drop ensues. That is due to a 'sprint' of the interception evaporation. So the 'crop factor' for interception evaporation can be assumed to be higher than that for the transpiration for *two* reasons: 1) the absence of a stomatal resistance, 2) an energy conversion rate that does not have not be sustained during the whole day. The 'over'-consumption is then compensated by a reduction of the transpiration. In the form a sensitivity analysis, the run with hourly data was repeated with the crop factor for interception set at 3.0, for all vegetations. Such an increase approximately compensates for the effect of the hourly precipitation data on the interception evaporation (Table B8). But especially the vegetations with a year-round soil cover (grassland and dark coniferous forest) show a sharp increase of the total evapotranspiration. That is because the higher factors for the interception leave more time for the transpiration to be active. To remedy this would require a sophisticated model of the energy balance and associated processes.

An alternative approach is to raise the interception capacities. In Table B10 an overview is given of the interception capacities for the different land use types, for daily and for hourly precipitation data. The calibrated values appear to be on the high side, but the land use values for hourly precipitation data seem in a more realistic proportion to each other than the values for the daily data. The simulated evapotranspiration terms are summarized in Table B9

In the course of doing the computational experiments it appeared that the method for simulating the bare soil evaporation produces lower values for hourly precipitation data than for daily ones. This has been compensated by increasing the β_2 parameter by 20%.

*Table B6: Overview of simulated evapotranspiration terms for vegetations used in NHI-model, for near optimal moisture supply conditions. In the ET_{pot} column the potential value (T_{pot}) has been used instead of the actual value for the transpiration (T_{act}), plus the actual soil evaporation (E_{bs}), plus interception evaporation (E_{ic}) and ponding evaporation (E_{pd}). Values in mm/year. Precipitation data: **daily** values.*

Index	Vegetation type	E_{ic}	E_{pd}	E_{bs}	E_{bspot}	T_{act}	T_{pot}	ET_{act}	ET_{pot}
1	Grassland	125	0	64	105	312	317	500	505
2	Maize	62	0	171	329	206	207	439	439
3	Potatoes	73	0	157	283	209	217	438	446
7	Tree nurseries	138	0	110	195	220	220	468	468
9	Orchards	238	0	0	0	467	543	706	782
11	Deciduous forest	226	0	74	125	248	249	548	549
12	Light coniferous f	245	0	0	0	396	407	641	651
13	Wet nature	123	0	85	160	283	284	492	493
14	Dry nature	97	0	113	222	242	242	453	453
15	Bare soil	0	0	251	543	0	0	251	251
18	Urban area	207	1	0	0	75	75	283	283
19	Dark coniferous f	336	0	0	0	388	431	724	767

Table B7: Overview of simulated evapotranspiration for **hourly** precipitation data . Same values for the interception parameters as for Table B6.

Index	Vegetation type	E_{ic}	E_{pd}	E_{bs}	E_{bspot}	T_{act}	T_{pot}	ET_{act}	ET_{pot}
1	Grassland	65	0	75	117	349	355	489	494
2	Maize	38	0	160	334	223	223	421	421
3	Potatoes	44	0	147	287	230	238	420	428
7	Tree nurseries	101	0	109	201	234	234	444	444
9	Orchards	162	0	0	0	525	601	688	763
11	Deciduous forest	191	0	70	127	260	261	521	522
12	Light coniferous f	161	0	0	0	446	453	607	614
13	Wet nature	82	0	92	171	305	306	479	479
14	Dry nature	60	0	117	236	259	259	435	436
15	Bare soil	0	0	218	542	0	0	218	218
18	Urban area	152	2	0	0	84	84	238	238
19	Dark coniferous f	294	0	0	0	415	455	709	749

Table B8: Overview of simulated evapotranspiration for **hourly** precipitation data . Same values for the interception parameters as for Table B6, but with a crop **factor for interception evaporation of 3.0** for all vegetations.

Index	Vegetation type	E_{ic}	E_{pd}	E_{bs}	E_{bspot}	T_{act}	T_{pot}	ET_{act}	ET_{pot}
1	Grassland	109	0	77	122	360	369	546	555
2	Maize	53	0	161	337	232	233	445	446
3	Potatoes	63	0	147	289	239	252	449	462
7	Tree nurseries	126	0	112	207	244	244	482	482
9	Orchards	206	0	0	0	524	635	730	842
11	Deciduous forest	211	0	71	129	272	273	554	555
12	Light coniferous f	203	0	0	0	461	475	664	678
13	Wet nature	123	0	96	180	321	322	540	541
14	Dry nature	91	0	121	243	268	269	480	480
15	Bare soil	0	0	218	542	0	0	218	218
18	Urban area	224	3	0	0	94	94	320	320
19	Dark coniferous f	343	0	0	0	417	493	760	835

Table B9: Overview of simulated evapotranspiration for **hourly** precipitation data . Same values for the interception factor parameters as for Table B6, but with recalibrated interception capacities.

Index	Vegetation type	E_{ic}	E_{pd}	E_{bs}	E_{bspot}	T_{act}	T_{pot}	ET_{act}	ET_{pot}
1	Grassland	123	0	69	105	312	318	505	511
2	Maize	61	0	170	329	206	206	437	438
3	Potatoes	70	0	157	284	209	217	436	444
7	Tree nurseries	136	0	114	195	222	222	471	471
9	Orchards	236	0	0	0	468	544	705	781
11	Deciduous forest	222	0	75	125	250	251	547	548
12	Light coniferous f	245	0	0	0	397	406	642	652
13	Wet nature	123	0	90	160	283	284	497	497
14	Dry nature	96	0	118	223	242	242	456	456
15	Bare soil	0	0	239	542	0	0	239	239
18	Urban area	207	0	0	0	75	75	282	282
19	Dark coniferous f	335	0	0	0	389	431	724	767

Table B10: Overview of used interception capacities, for daily and hourly time intervals.

Index	Vegetation type	Interception capacity for daily time intervals (mm)	Interception capacity for hourly time intervals (mm)
1	Grassland	0.065 * LAI (LAI<9)	0.35*LAI (LAI<9)
2	Maize	0.25*LAI	0.80*LAI
3	Potatoes	0.25*LAI	0.80*LAI
7	Tree nurseries	1.5	3.25
9	Orchards	1.5 (max)	4.0 (max)
11	Deciduous forest	3.5	5.5
12	Light coniferous forest	0.75	2.35
13	Wet nature	0.35*LAI (LAI < 3)	1.0*LAI (LAI<3)
14	Dry nature	0.35*LAI (LAI < 3)	1.2*LAI (LAI<3)
15	Bare soil	0.0	0.0
18	Urban area	1.0	2.25
19	Dark coniferous forest	3.5	5.25

Literature

P.J.T. van Bakel & TH. J. van de Nes (1984). *Herziening van de berekening van de gewasverdamping in het hydrologisch model Gelgam: Rapport van de Ad hoc groep verdamping*. Prov. Gelderland, Arnhem.

Calder, I.R. 1990. *Evaporation in the uplands*. John Wiley & Sons, Chichester, UK.

Dolman, A.J. E. Moors, J. Elbers, W. Snijders & P. Hamaker (2000). *Het waterverbruik van bossen in Nederland*. Brochure uitgegeven door Alterra Wageningen UR, Wageningen

Feddes. R.A. (1987). *Crop factors in relation to Makkink reference-crop evapotranspiration*. In: Hooghart, J.C. (ed), Proceedings and information / Netherlands Organization for Applied Scientific Research, Committee on Hydrological Research No. 39: 33-45.

Kelliher, F.M., R. Leuning & E. D. Schulze, "Evaporation and canopy characteristics of coniferous forests and grasslands," *Oecologia* 95, no. 2 (1993): 153-163.

Bijlage 2 FORCHECK-controle van programmacode

MODFLOW-SIMGRO

De controle met Forcheck van MODFLOW-SIMGRO_V7.1.4 is te vinden op `../S_code/SIMGRO7_Forcheck/SIMGRO_V7_1_4c`.

De *geforcheckte* versie wijkt op de volgende punten af van de 'complete' versie V7.1.4c:

- het MODFLOW hoofdprogramma is vervangen door een dummyversie van *modmain.for*; dit is gedaan om te voorkomen dat ook de gehele MODFLOW code mee wordt genomen in de analyse van Forcheck, hetgeen zou leiden tot zeer lange lijsten van meldingen die geen betrekking hebben op het deel van de code die onder dit project valt;
- de routine *simgro.for* is ontdaan van aanroepen van *sim2swqn** en aanroepen van *sim2sbk**. Deze aanroepen betreffen koppelingen met oppervlaktewatermodellen die niet onder het huidige certificeringstraject vallen.

Er worden geen *errors* gemeld; wel worden *warnings* geproduceerd voor het gebruik van het *pause* statement. Het *pause* statement wordt gebruikt om een veel komende fout van een gebruiker – het nog in Excel open hebben staan van een csv-file – te kunnen herstellen zonder dat een complete herstart nodig is.

De Forcheck test van de versie MODFLOW-SIMGRO_V7.2.0 is te vinden op `../S_code/SIMGRO7_Forcheck/SIMGRO_V7_2_0`.

PreMetaSWAP

De *geforcheckte* versie van PreMSW staat op: `../S_code/SIMGRO7_Forcheck/Premsw`

In het Forcheck-rapport worden 2 warnings (pause statements) en 29 'informative messages' gemeld, m.b.t. onschuldige zaken zoals 'niet gebruikte variabelen'. Dat laatste bleek overigens niet altijd een juiste diagnose te zijn.

PostMetaSWAP

PostMetaSWAP wordt meegeleverd met MODFLOW-SIMGRO. De stand alone versie maakt gebruik van dezelfde routines. De aanroep geschiedt met een zeer kort hoofdprogramma.

Bijlage 3 Versiebeheer van programmacode

Het versiebeheer van de code (inclusief die van PreMetaSWAP) is vastgelegd via SVN in de Deltares repository (<https://repos.deltares.nl/repos/GWSobek>).

De in dit document gerapporteerde berekeningen zijn gedaan met MODFLOW-SIMGRO_V7.1.4 (SVN-revisie 152) met enkele kleine aanpassingen voor V7_1_4c:

- *msw1dfunsa.for*. In SWAP wordt bij de berekening van de infiltratiecapaciteit o.a. gebruik gemaakt van de verzadigde doorlatendheid van het bovenste laagje. Hier was MetaSWAP niet consistent mee. Op regel 935 is deze inconsistentie rechtgezet.
- *msw1top.for*. De methode voor het partitioneren van de verdamping week ten aanzien van de ponding verdamping af van het SWAP model, in regel 311. Bij de kalegrond-verdamping waren er eveneens inconsistenties; deze recht zijn gezet in regel 351-368; zie ook onder A1.
- *simgro.for*: het criterium voor de nog realistisch geachte oscillatie tijdens het iteratieproces stond op 250 m (in regel 3379). Het gaat daarbij om het gebruikte criterium ten aanzien van de MODFLOW head, die per *outer loop* cyclus wordt doorgegeven aan SIMGRO. Er werd van uitgegaan dat als de verandering (ten opzichte van de vorige cyclus) van de MODFLOW potentiaal groter wordt dan 250 m, het iteratieproces aan het ontsporen is. Dat blijkt echter niet altijd het geval te zijn, vooral wanneer gebruik wordt gemaakt van de bodemfysische parameters zonder toevoeging van macro-porieën. Het criterium is veranderd van 250 m naar 500 m.
- *readfile.for*: regel 68, het statement *CALL arsubr* is verplaatst naar regel 61. Dit is nodig omdat anders de invoer van Q-h relaties in termen van $l\ s^{-1}\ ha^{-1}$ niet juist wordt verwerkt. Deze recente geïntroduceerde bug heeft geen gevolgen gehad voor bestaande toepassingen.
- *readtacl.for*: regel 117, in het aanroepen van de routine *index* werden argumenten gebruikt die niet meer worden gedeclareerd. Array *artp* is nu veranderd in *artpnd*, en array *ix* in *ixnd*. Deze recente geïntroduceerde bug heeft geen gevolgen gehad voor bestaande toepassingen.

De gecertificeerde codeversie is opgeslagen als SVN-revisie 350, SIMGRO-versie V7_2_0. De veranderingen ten opzichte van versie 7_1_4c zijn opgenomen in de *Release notes*. Tevens is de 'SWAP-special' voor de plassenverdamping weer ongedaan gemaakt (zie ook §2.1). De *workspace* (Intel Fortran 11.1, Microsoft Visual Studio 2008) en *source code* van de gecertificeerde versie staat onder:

```
../S_code/SIMGRO_IFORT/SIMGRO_V7_2_0/src/modmsw.
```

De gebruikte *compiler settings* van het SIMGRO Fortran-project zijn:

```
/nologo /Oy- /Qparallel /assume:buffered_io /fpp /I"..../msw1"  
/I"..../gw_sobek/Release" /d_lines /Qopenmp_stubs /warn:interfaces /Qfp-  
speculation=safe /module:"Release\\" /object:"Release\\" /traceback /libs:static  
/threads /c
```

De *workspace* (Intel Fortran 11.1, Microsoft Visual Studio 2008) en *source code* van de gebruikte PreMSW code, versie V2_0_11 staat onder:

```
../S_code/SIMGRO_IFORT/SIMGRO_V7_2_0/src/premsw
```


Bijlage 4 Artikel in Proceedings Modflow and More 2006

Dynamic metamodel for the unsaturated-saturated zone

Paul van Walsum, Piet Groenendijk

Alterra, paul.vanwalsum@wur.nl, piet.groenendijk@wur.nl, Wageningen, The Netherlands

ABSTRACT

Well-conceived simulation of the top-system processes (plant-atmosphere interactions, runoff, infiltration, and flow in the unsaturated-saturated zone) is a prerequisite for accurate groundwater modeling. But using the Richards-equation at catchment scale is a cumbersome affair due to the high computational load. An alternative is presented that uses a quasi steady-state conceptualization, in a so-called dynamic metamodel. It makes use of steady-state profiles that have been simulated in a preprocessing stage and have been stored in a database. The operationalization in the metamodel uses the steady states for assembling composite soil moisture profiles that are defined by three state variables: the mean pressure head in the root zone, the pressure head at the top of the subsoil, and the groundwater level. Verifications have shown that it very well reproduces the water balances and groundwater levels of the non-steady version of a Richards-type model.

INTRODUCTION

Plant-atmosphere interactions, runoff, infiltration and flow in the unsaturated-saturated zone not only determine the recharge of a regional groundwater system but also play a crucial role in the dynamics of the groundwater level itself, especially if the groundwater is near to the soil surface. Describing these dynamics in an accurate manner is in the first place needed for simulating the vertical interaction terms and the drainage flow. It is also needed for inverse modeling based on the interpretation of groundwater level measurements. And of course simulation of water quality processes and agro-ecological evaluations of the hydrologic regime require a well-conceived simulation of the top-system processes. Using the Richards-equation at catchment scale has the disadvantage of the high computational load. Modeling systems like MIKE SHE (Refsgaard and Storm, 1995) and MODFLOW (Harbaugh *et al.*, 2000) have an option for simplified two-layer modeling of the top system; but the modeling gap of such an approach with the Richards-type model is very large. With the approach presented here we provide an intermediate alternative. It uses a quasi steady-state conceptualization in a so-called dynamic metamodel.

Steady-state profiles have been used for dynamic soil moisture modeling by Wesseling (1957), Feitsma (1969), Rijtema (1971) and De Laat (1980). De Laat (1980) computerized the Rijtema method and extended it for handling the transitions from capillary rise profiles to percolation profiles. Some drawbacks we see are:

- continuity of the pressure head is preserved at the interface between root zone and subsoil, but this complicates the algorithm for making the transition between capillary rise and percolation profiles;
- embedding in a groundwater model requires the solving of an implicit nonlinear expression;
- the model was only verified using field measurements of water tables; verification using results of a Richards-type model reveals that some amendments are needed for avoiding over-estimation of the capillary rise.

In the alternative method presented here we have strived to keep the algorithm as simple as possible, leading to a transparent code and a high performance ratio (accuracy/effort). For the transition from capillary rise to percolation we use the steady-state profiles as building blocks for assembling composite profiles; the water balance (of the used control boxes) is the only form of continuity taken into consideration for the transition. The recharge is supplied to the groundwater model on a daily basis. The iteration cycle for the coupling to the groundwater model only involves adjustment of the storage coefficient: for each new 'outer loop' of a PCG-solver an update of the storage coefficient is supplied. In the paper we give a short overview of the ideas behind the method and then continue with describing the solution scheme for the unsaturated flow modeling and the coupling to a groundwater model. We conclude with an example of verification with a Richards-type model.

MODELING METHOD

Quasi steady-state principle

To illustrate the basic principles of the quasi steady-state approach an example is given in Figure 1. The example is with a fixed water table and a time step of 10 d (normally we use $\Delta t = 1$ d). At $t = 0$ there is an equilibrium profile ($q_2 = 0$). Then a root zone extraction of $T = 2.15$ mm/d starts to dry the soil out. The key assumption of the quasi-steady state method is that during the drying-out process a steady-state form of the soil moisture profile in the subsoil is maintained. The algorithm is based on a water balance method for the whole profile. This yields for $t = 10$ d a moisture depletion of the root zone by $\Delta S_r = -14$ mm. After the solution has been found separate water balances can be made for the root zone and the subsoil. In the example the average capillary rise of 0.25 mm/d from the groundwater level during the time step is computed as the mean of the flux in the equilibrium profile ($q_2 = 0$) and the flux in the profile at the end of the ten day period (steady-state profile with $q_2 = 0.5$ mm/d). The separate water balances for the root zone and the subsoil are given in Table 1.

As can be seen from the balances, the flux across the bottom of the root zone can exceed the steady-state value. That is also the intention of the method, because in that way an estimate is made of the non-steady flux caused by non-steady gradients which in reality exist and that can be quite substantial. Making such an estimate is what makes the difference between the quasi steady-state method and the purely steady-state methods that are commonly employed in combination with simplified root zone models.

Schematization

For formulating the model two control boxes are defined:

- the root zone;
- the shallow subsoil, extending to a level below the lowest (shallow) groundwater level.

For handling deep groundwater levels (> 5 m below soil surface) a third control box is used, and a different approach is followed (Van Walsum *et al.*, 2004). In the model formulation given here we use the following primary state variables:

- the mean pressure head in the root zone (control box 1), p_1 ;
- the 'virtual' pressure head of the subsoil, seen as an extension of the profile of the subsoil (control box 2), p_2 ;
- the groundwater level h .

A composite moisture profile is constructed from profiles that were generated in a preprocessing stage. If $p_1 = p_2$ then the profile parts fit together and form one continuous one. In situations with the soil drying out we force that $p_1 = p_2$ and thus follow the conventional quasi steady-state approach (with some amendments, as explained subsequently). But in the transition to a percolation situation we allow the root zone to temporarily have a $p_1 > p_2$. An example of such a situation is given in Figure 3, where precipitation has

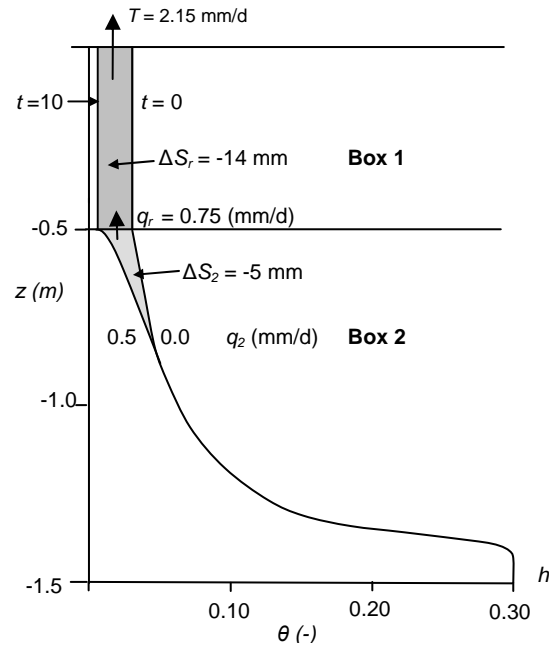


Figure 1. Simplified example for $\Delta t = 10$ d.

Root zone (box 1)		Sub soil (box 2)	
$q_r \Delta t$	+7.5	$q_r \Delta t$	-7.5
$T \Delta t$	-21.5	$q_2 \Delta t$	+2.5
ΔS_r	-14.0	ΔS_2	-5.0

Table 1. Water balance terms (mm) of root zone and shallow subsoil (down to the groundwater level h) for $\Delta t = 10$ d. Symbols used are explained in the text.

caused a sudden increase of the root zone water content. We assume that the infiltrated rainfall is instantaneously spread throughout the root zone, according to the distribution of a steady-state profile.

The moisture flux density at the boundary between the root zone and subsoil (q_r) is in situations with percolation assumed to be determined by the mean pressure head in the root zone (p_r) and the groundwater level (h). The justification for this heuristic computational rule is that the time-convergence is correct.

IMPLEMENTATION

Soil physical metafunctions

In the pre-processing stage metafunctions are derived for the capillary rise /percolation flux density and the storage in the shallow subsoil by making a series of simulations with the steady-state version of a Richards-type model (Kroes and Van Dam (eds.), 2003) The results of computational experiments for different root zone depths, groundwater levels and combinations of top boundary conditions are used in constructing (interpolation on a log-scale for the pressure head) the following metafunctions:

- $s_1(d,p,h)$: total storage of water in the root zone (control box 1), as a function of the root zone thickness d , the mean root zone pressure head p and the groundwater level h (m);
- $s_2(d,p,h)$: total storage of water in the shallow subsoil (control box 2) (m);
- $q(d,p,h)$: moisture flux density of a steady-state soil moisture profile (m/d).

The q -function is used for computing water flows in both control boxes; when used for control box 2 the pressure head in the root zone is a 'virtual' entity that defines the moisture profile section used in the subsoil at a certain moment in time. An example of a moisture flux metafunction is given in Figure 2. Storage metafunctions are also made available for the separate compartments of the original SWAP schematization. These functions are used in the post-processing for computing detailed moisture profiles and fluxes that are used in water quality simulations.

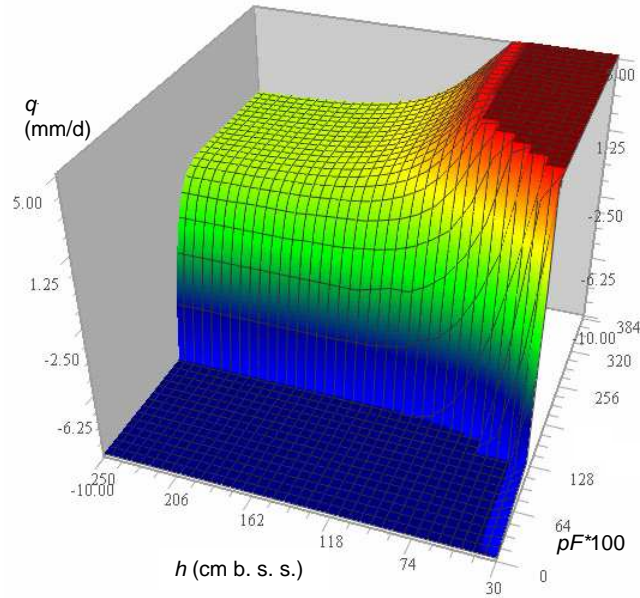


Figure 2. Moisture flux metafunction

Solution scheme

The influence of the upper boundary conditions on the soil column is summarized as the net recharge of the root zone. The update to the new time level j involves the sequential update of three state variables: the root zone pressure heads of the boxes 1 and 2 ($p_{r,j}$ in step 1 and $p_{2,j}$ in step 2) and the groundwater level h_j in step 3. The latter also involves the groundwater model. In the case of a slowly drying out soil, the steps 1 and 2 are combined into a single step in which p_2 is set equal to p_r . Figure 3 provides a numerical example of an update after a precipitation of 40 mm, starting from an equilibrium profile.

For the update of the mean root zone pressure head (and water content) in **step 1** the following water balance is made:

$$S_{r,j}^* = S_{r,j-1} + [R_j + q(p_{r,j}, h_{j-1})] \Delta t \quad (1)$$

where:

Δt = time step (d)

$S_{r,j-1}$ = amount of water stored in the root zone at end of time level $j-1$ (m)

$S_{r,j}^*$ = first estimate of water stored in the root zone at end of time j (m)

R_j = net recharge rate (m/d)

$q(p,h)$ = moisture flux density function (m/d)

$p_{r,j}$ = mean pressure head in the root zone at time j (m)

h_j = groundwater level (m)

The moisture flux density q at the boundary between box 1

and 2 is computed as a function of the pressure head in the root zone and the groundwater level, following the heuristic rule mentioned earlier. As can be seen from the above equation, we use the water level at the beginning of the time step (explicit method) and the mean pressure head at the end of the time step (implicit method). This leads to the first estimate of the new storage $S_{r,j}^*$. The final update is done in step 3 of the solution scheme, in conjunction with the groundwater model. To solve for the new pressure head we first rewrite the balance as:

$$S_{r,j}^* - q(p_{r,j}, h_{j-1}) \Delta t = S_{r,j-1} + R_j \Delta t \quad (2)$$

All the terms on the right-hand side are known when the update is done. That makes it possible to solve for the unknown $S_{r,j}^*$ and $p_{r,j}$ in the following manner. A function is prepared in the form of:

$$\sigma_r(p_r, h) = s_r(p_r, h) - q(p_r, h) \Delta t \quad (3)$$

For a given water level h and a given right-hand side value of Eq. 2, the unknown $p_{r,j}$ can directly be found from an inverse table interpolation of $\sigma_r(p_r, h)$. The solution also yields the new storage $S_{r,j}^*$ and the moisture flux density q . A similar procedure is followed for the update of $p_{2,j}$ in **step 2**. For deep water tables the quasi-steady principle is not valid and the locking of $p_r = p_2$ is let go of. Another amendment is to limit the quasi-steady state capillary rise to the steady-state value belonging to a depth of about 1 m below the root zone. In that way nonrealistic values are avoided.

In **step 3** the new pressure heads are used for constructing a nonlinear groundwater level-storage function for the combined control boxes 1 and 2. The employed iteration method for the storage coefficient uses the net saturated flux of the groundwater model for the update. In combination with the storage function this first yields an adjusted estimate of the new groundwater level and subsequently the storage coefficient (for h_{j-1} to h_j). A smoothing method is used that limits the number of cycles. The water balance error due to slight non-convergence is repaired during the next time step by adjusting the recharge term of the groundwater model. The coupling scheme has been stabilized for situations with small storage coefficients and falling groundwater levels by assuming that the pressure head is dragged along by the phreatic level. So if the model starts from full saturation, an equilibrium profile is left behind after the groundwater level drops down. After the new groundwater level has been determined the values of $S_{r,j}$ and $S_{2,j}$ are finalized by inserting the found h_j in the storage functions. For the embedding in a regional model see Veldhuizen *et al.* (2006) and Van Walsum *et al.* (2004).

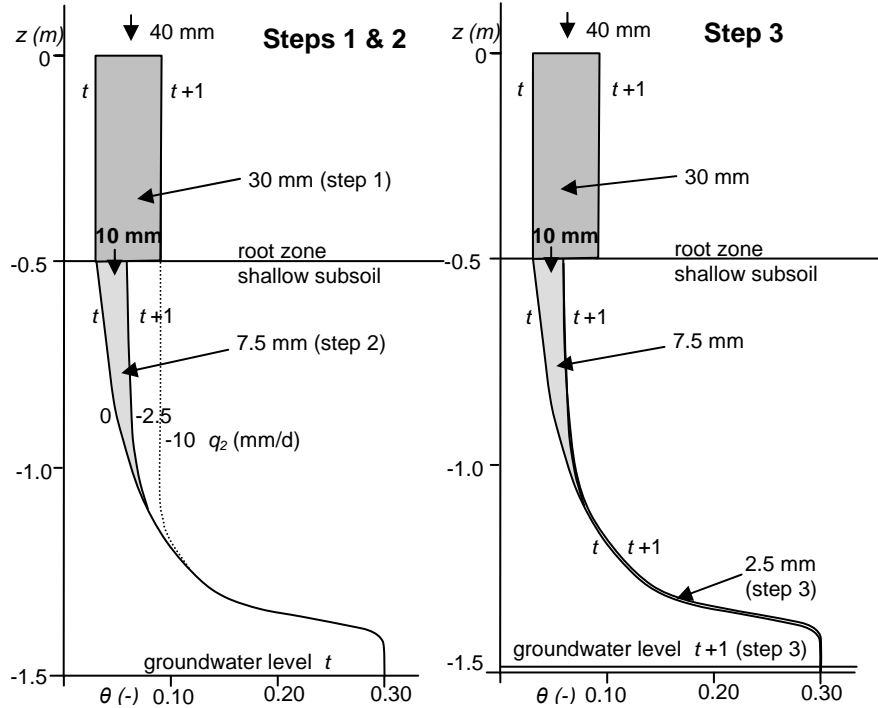


Figure 3. Example of the three-step solution scheme for $\Delta t = 1$ d

MODEL VERIFICATION

Figure 4 is an example of a verification of the groundwater level and moisture flux simulations (for loamy sand) with a Richards-type model. The difference between the year total of the moisture flux at the bottom of the root zone is within 5%. The observed water table deviation between the models is at the transition between a dry and a wet situation: the capillary rise in the quasi-steady state model reacts more directly to precipitation and percolation, because the raising of p_2 ('virtual root zone pressure head of the subsoil') by the percolation directly influences the q_2 -flux from the water table. So the dropping of the water table is halted sooner than in the Richards-type model; in the latter the transition is retarded by non-steady effects. Knowledge of the existence of this modeling bias can be used in the weighting of water table measurements, prior to using the data in a calibration procedure.

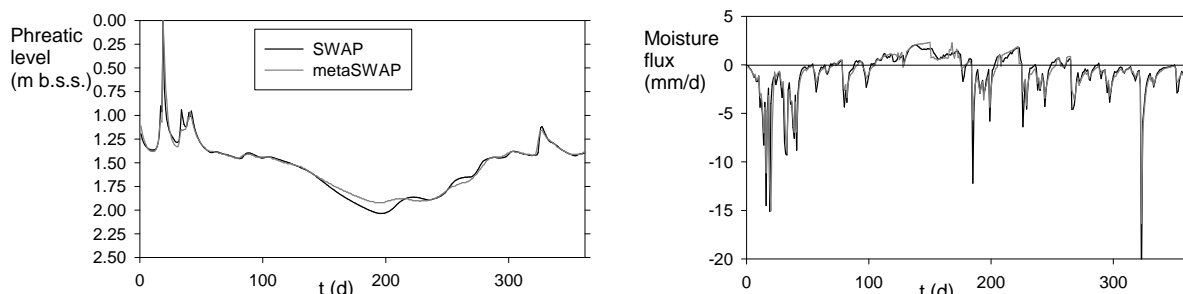


Figure 4. Example of simulation with the dynamic metamodel ('MetaSWAP') verified with the non-steady Richards-type model (SWAP). The plotted moisture flux is for the bottom of the root zone.

PERSPECTIVE

The computation time is about 2.5 milliseconds (on a P4 3.0 GHz) per year using a time step of 1 day. The extra cycles for the storage coefficient roughly double the computation time of the groundwater model. A disaggregation method is available for deriving water contents of separate soil compartments of the SWAP-schematization used in deriving the soil physical metafunctions. This enables nutrient leaching simulations with e.g. ANIMO (Groenendijk *et al.*, 2005) or pesticide leaching studies on catchment scale.

REFERENCES

- De Laat, P.J.M., 1980. Model for unsaturated flow above a shallow water table, applied to a regional subsurface flow problem. Doctoral thesis, Agric. University Wageningen. Pudoc, Wageningen.
- Feitsma, K.S. 1969. Grondverbetering in het noordwestelijk deel van Oostelijk Flevoland. Cultuurtechn. Tijdschr. 9: 86-98.
- Groenendijk, P., L.V. Renaud, and J. Roelsma, 2005. Prediction of Nitrogen and Phosphorus leaching to groundwater and surface waters. Process descriptions of the ANIMO4.0 model. Alterra, Wageningen. Report 983.
- Harbaugh, A.W., Banta, E.R., Hill, M.C., and McDonald, M.G., 2000. MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model -- User guide to modularization concepts and the Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, 121 p.
- Kroes, J.G., J.C. van Dam (eds.). 2003. SWAP 3.0.3 Reference manual. Wageningen, Report 773, Alterra.
- Refsgaard JC and Storm B (1995) MIKE SHE. In: Singh VP (Ed) Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publication, 809-846.
- Rijtema, P.E. 1965. An analysis of actual evapotranspiration. Agricultural Reports 659. PUDOC, Wageningen. 107 pp.
- Van Walsum, P.E.V., A.A. Veldhuizen, P.J.T. van Bakel, F.J.E. van der Bolt, P.E. Dik, P. Groenendijk, E.P. Querner, M.F.R. Smit. 2004. SIMGRO 5.0.2, Theory and model implementation. Wageningen, Alterra. Alterra-Report 913.1. 96 pp.; 28 figs.; 2 tables; 50. refs.
- Veldhuizen, A.A., P.E.V. van Walsum, A. Lourens, P.E. Dik. 2006. Flexible integrated modeling of groundwater, soil water and surface water. Proceedings of MODFLOW 2006. IGWMC, Colorado.
- Wesseling, J. 1957. Enige aspecten van de waterbeheersing in landbouwgronden. Ph. D. thesis. Versl. van Landbouwk. Onderz. 63.5. Pudoc, Wageningen.

Verschenen documenten in de reeks Werkdocumenten van de Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu vanaf 2009

Werkdocumenten zijn verkrijgbaar bij het secretariaat van Unit Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, te Wageningen. T 0317 – 48 54 71; F 0317 – 41 90 00; E info.wnm@wur.nl
De werkdocumenten zijn ook te downloaden via de WOT-website www.wotnatuurenmilieu.wur.nl

2009

- 126** *Kamphorst, D.A.* Keuzes in het internationale biodiversiteitsbeleid; Verkenning van de beleidstheorie achter de internationale aspecten van het Beleidsprogramma Biodiversiteit (2008-2011)
- 127** *Dirkx, G.H.P. & F.J.P. van den Bosch.* Quick scan gebruik Catalogus groenblauwe diensten
- 128** *Loeb, R. & P.F.M. Verdonschot.* Complexiteit van nutriëntenlimitaties in oppervlaktewateren
- 129** *Kruit, J. & P.M. Veer.* Herfotografie van landschappen; Landschapsfoto's van de 'Collectie de Boer' als uitgangspunt voor het in beeld brengen van ontwikkelingen in het landschap in de periode 1976-2008
- 130** *Oenema, O., A. Smit & J.W.H. van der Kolk.* Indicatoren Landelijk Gebied; werkwijze en eerste resultaten
- 131** *Agricola, H.J.A.J. van Strien, J.A. Boone, M.A. Dolman, C.M. Goossen, S. de Vries, N.Y. van der Wulp, L.M.G. Groenemeijer, W.F. Lukey & R.J. van Til.* Achtergrond-document Nulmeting Effectindicatoren Monitor Agenda Vitaal Platteland
- 132** *Jaarrapportage 2008.* WOT-04-001 – Koepel
- 133** *Jaarrapportage 2008.* WOT-04-002 – Onderbouwend Onderzoek
- 134** *Jaarrapportage 2008.* WOT-04-003 – Advisering Natuur & Milieu
- 135** *Jaarrapportage 2008.* WOT-04-005 – M-AVP
- 136** *Jaarrapportage 2008.* WOT-04-006 – Natuurplanbureaufunctie
- 137** *Jaarrapportage 2008.* WOT-04-007 – Milieuplanbureaufunctie
- 138** *Jong de, J.J., J. van Os & R.A. Smidt.* Inventarisatie en beheerskosten van landschapselementen
- 139** *Dirkx, G.H.P., R.W. Verburg & P. van der Wielen.* Tegenkrachten Natuur. Korte verkenning van de weerstand tegen aankopen van landbouwgrond voor natuur
- 140** *Annual reports for 2008; Programme WOT-04*
- 141** *Vullings, L.A.E., C. Blok, G. Vonk, M. van Heusden, A. Huisman, J.M. van Linge, S. Keijzer, J. Oldengarm & J.D. Bulens.* Omgaan met digitale nationale beleidskaarten
- 142** *Vreke, J., A.L. Gerritsen, R.P. Kranendonk, M. Pleijte, P.H. Kersten & F.J.P. van den Bosch.* Maatlat Government – Governance
- 143** *Gerritsen, A.L., R.P. Kranendonk, J. Vreke, F.J.P. van den Bosch & M. Pleijte.* Verdrogingsbestrijding in het tijdperk van het Investeringsbudget Landelijk Gebied. Een verslag van casuonderzoek in de provincies Drenthe, Noord-Brabant en Noord-Holland
- 144** *Luesink, H.H., P.W. Blokland, M.W. Hoogeveen & J.H. Wisman.* Ammoniakemissie uit de landbouw in 2006 en 2007
- 145** *Bakker de, H.C.M. & C.S.A. van Koppen.* Draagvlakonderzoek in de steigers. Een voorstudie naar indicatoren om maatschappelijk draagvlak voor natuur en landschap te meten
- 146** *Goossen, C.M.,* Monitoring recreatiegedrag van Nederlanders in landelijke gebieden. Jaar 2006/2007
- 147** *Hoefs, R.M.A., J. van Os & T.J.A. Gies.* Kavelruil en Landschap. Een korte verkenning naar ruimtelijke effecten van kavelruil
- 148** *Klok, T.L., R. Hille Ris Lambers, P. de Vries, J.E. Tamis & J.W.M. Wijsman.* Quick scan model instruments for marine biodiversity policy
- 149** *Spruijt, J., P. Spoorenberg & R. Schreuder.* Milieueffectiviteit en kosten van maatregelen gewasbescherming
- 150** *Ehlert, P.A.I. (rapporteur).* Advies Bemonstering bodem voor differentiatie van fosfaatgebruiksnormen
- 151** *Wulp van der, N.Y.* Storende elementen in het landschap: welke, waar en voor wie? Bijlage bij WOT-paper 1 – Krassen op het landschap
- 152** *Oltmer, K., K.H.M. van Bommel, J. Clement, J.J. de Jong, D.P. Rudrum & E.P.A.G. Schouwenberg.* Kosten voor habitattypen in Natura 2000-gebieden. Toepassing van de methode Kosteneffectiviteit natuurbelied
- 153** *Adrichem van, M.H.C., F.G. Wortelboer & G.W.W. Wamelink (2010).* MOVE. Model for terrestrial Vegetation. Version 4.0
- 154** *Wamelink, G.W.W., R.M. Winkler & F.G. Wortelboer.* User documentation MOVE4 v 1.0
- 155** *Gies de, T.J.A., L.J.J. Jeurissen, I. Staritsky & A. Bleeker.* Leefomgevingsindicatoren Landelijk gebied. Inventarisatie naar stand van zaken over geurhinder, lichthinder en fijn stof
- 156** *Tamminga, S., A.W. Jongbloed, P. Bikker, L. Sebek, C. van Bruggen & O. Oenema.* Actualisatie excretiecijfers landbouwhuisdieren voor forfaits regeling Meststoffenwet
- 157** *Van der Salm, C., L. M. Boumans, G.B.M. Heuvelink & T.C. van Leeuwen.* Protocol voor validatie van het nutriëntenemissiemodel STONE op meetgegevens uit het Landelijk Meetnet effecten Mestbeleid
- 158** *Bouwma, I.M.* Quickscan Natura 2000 en Programma Beheer. Een vergelijking van Programma Beheer met de soorten en habitats van Natura 2000
- 159** *Gerritsen, A.L., D.A. Kamphorst, T.A. Selnes, M. van Veen, F.J.P. van den Bosch, L. van den Broek, M.E.A. Broekmeyer, J.L.M. Donders, R.J. Fontein, S. van Tol, G.W.W. Wamelink & P. van der Wielen.* Dilemma's en barrières in de praktijk van het natuur- en landschapsbeleid; Achtergronddocument bij Natuurbalans 2009
- 160** *Fontein R.J., T.A. de Boer, B. Breman, C.M. Goossen, R.J.H.G. Henkens, J. Luttik & S. de Vries.* Relatie recreatie en natuur; Achtergronddocument bij Natuurbalans 2009
- 161** *Deneer, J.W. & R. Kruijne. (2010).* Atmosferische depositie van gewasbeschermingsmiddelen. Een verkenning van de literatuur verschenen na 2003
- 162** *Verburg, R.W., M.E. Sanders, G.H.P. Dirkx, B. de Knegt & J.W. Kuhlman.* Natuur, landschap en landelijk gebied. Achtergronddocument bij Natuurbalans 2009
- 163** *Doorn van, A.M. & M.P.C.P. Paulissen.* Natuurgericht milieubeleid voor Natura 2000-gebieden in Europees perspectief: een verkenning
- 164** *Smidt, R.A., J. van Os & I. Staritsky.* Samenstellen van landelijke kaarten met landschapselementen, grondeigendom en beheer. Technisch achtergronddocument bij de opgeleverde bestanden
- 165** *Pouwels, R., R.P.B. Foppen, M.F. Wallis de Vries, R. Jochem, M.J.S.M. Reijnen & A. van Kleunen.* Verkenning LARCH: omgaan met kwaliteit binnen ecologische netwerken

- 166** Born van den, G.J., H.H. Luesink, H.A.C. Verkerk, H.J. Mulder, J.N. Bosma, M.J.C. de Bode & O. Oenema. Protocol voor monitoring landelijke mestmarkt onder een stelsel van gebruiksnormen, versie 2009
- 167** Dijk, T.A. van, J.J.M. Driessen, P.A.I. Ehlert, P.H. Hotsma, M.H.M.M. Montforts, S.F. Plessius & O. Oenema. Protocol beoordeling stoffen Meststoffenwet- Versie 2.1
- 168** Smits, M.J., M.J. Bogaardt, D. Eaton, A. Karbauskas & P. Roza. De vermaatschappelijking van het Gemeenschappelijk Landbouwbeleid. Een inventarisatie van visies in Brussel en diverse EU-lidstaten
- 169** Vreke, J. & I.E. Salverda. Kwaliteit leefomgeving en stedelijk groen
- 170** Hengsdijk, H. & J.W.A. Langeveld. Yield trends and yield gap analysis of major crops in the World
- 171** Horst, M.M.S. ter & J.G. Groenwold. Tool to determine the coefficient of variation of DegT50 values of plant protection products in water-sediment systems for different values of the sorption coefficient
- 172** Boons-Prins, E., P. Leffelaar, L. Bouman & E. Stehfest (2010) Grassland simulation with the LPJmL model
- 173** Smit, A., O. Oenema & J.W.H. van der Kolk. Indicatoren Kwaliteit Landelijk Gebied
- 2010**
- 174** Boer de, S., M.J. Bogaardt, P.H. Kersten, F.H. Kistenkas, M.G.G. Neven & M. van der Zouwen. Zoektocht naar nationale beleidsruimte in de EU-richtlijnen voor het milieu- en natuurbeleid. Een vergelijking van de implementatie van de Vogel- en Habitatrichtlijn, de Kaderrichtlijn Water en de Nitraatrichtlijn in Nederland, Engeland en Noordrijn-Westfalen
- 175** Jaarrapportage 2009. WOT-04-001 – Koepel
- 176** Jaarrapportage 2009. WOT-04-002 – Onderbouwend Onderzoek
- 177** Jaarrapportage 2009. WOT-04-003 – Advisering Natuur & Milieu
- 178** Jaarrapportage 2009. WOT-04-005 – M-AVP
- 179** Jaarrapportage 2009. WOT-04-006 – Natuurplanbureauafunctie
- 180** Jaarrapportage 2009. WOT-04-007 – Milieuplanbureauafunctie
- 181** Annual reports for 2009; Programme WOT-04
- 182** Oenema, O., P. Bikker, J. van Harn, E.A.A. Smolders, L.B. Sebek, M. van den Berg, E. Stehfest & H. Westhoek. Quickscan opbrengsten en efficiëntie in de gangbare en biologische akkerbouw, melkveehouderij, varkenshouderij en pluimveehouderij. Deelstudie van project 'Duurzame Eiwitvoorziening'
- 183** Smits, M.J.W., N.B.P. Polman & J. Westerink. Uitbreidingsmogelijkheden voor groene en blauwe diensten in Nederland; Ervaringen uit het buitenland
- 184** Dirx, G.H.P. (red.). Quick responsefunctie 2009. Verslag van de werkzaamheden
- 185** Kuhlman, J.W., J. Luijt, J. van Dijk, A.D. Schouten & M.J. Voskuilen. Grondprijkaarten 1998-2008
- 186** Slangen, L.H.G., R.A. Jongeneel, N.B.P. Polman, E. Lianouridis, H. Leneman & M.P.W. Sonneveld. Rol en betekenis van commissies voor gebiedsgericht beleid
- 187** Temme, A.J.A.M. & P.H. Verburg. Modelling of intensive and extensive farming in CLUE
- 188** Vreke, J. Financieringsconstructies voor landschap
- 189** Slangen, L.H.G. Economische concepten voor beleidsanalyse van milieu, natuur en landschap
- 190** Knotters, M., G.B.M. Heuvelink, T. Hoogland & D.J.J. Walvoort. A disposition of interpolation techniques
- 191** Hoogeveen, M.W., P.W. Blokland, H. van Kernebeek, H.H. Luesink & J.H. Wisman. Ammoniakemissie uit de landbouw in 1990 en 2005-2008
- 192** Beekman, V., A. Pronk & A. de Smet. De consumptie van dierlijke producten. Ontwikkeling, determinanten, actoren en interventies.
- 193** Polman, N.B.P., L.H.G. Slangen, A.T. de Blaeij, J. Vader & J. van Dijk. Baten van de EHS; De locatie van recreatiebedrijven
- 194** Veeneklaas, F.R. & J. Vader. Demografie in de Natuurverkenning 2011; Bijlage bij WOT-paper 3
- 195** Wascher, D.M., M. van Eupen, C.A. Mûcher & I.R. Geijzendorffer. Biodiversity of European Agricultural landscapes. Enhancing a High Nature Value Farmland Indicator
- 196** Apeldoorn van, R.C., I.M. Bouwma, A.M. van Doorn, H.S.D. Naeff, R.M.A. Hoefs, B.S. Elbersen & B.J.R. van Rooij. Natuurgebieden in Europa: bescherming en financiering
- 197** Brus, D.J., R. Vasat, G. B. M. Heuvelink, M. Knotters, F. de Vries & D. J. J. Walvoort. Towards a Soil Information System with quantified accuracy; A prototype for mapping continuous soil properties
- 198** Groot, A.M.E. & A.L. Gerritsen, m.m.v. M.H. Borgstein, E.J. Bos & P. van der Wielen. Verantwoording van de methodiek Achtergronddocument bij 'Kwalitatieve monitor Systeeminnovaties verduurzaming landbouw'
- 199** Bos, E.J. & M.H. Borgstein. Monitoring Gesloten voer-mest kringlopen. Achtergronddocument bij 'Kwalitatieve monitor Systeeminnovaties verduurzaming landbouw'
- 200** Kennismarkt 27 april 2010; Van onderbouwend onderzoek Wageningen UR naar producten Planbureau voor de Leefomgeving
- 201** Wielen van der, P. Monitoring Integrale duurzame stallen. Achtergronddocument bij 'Kwalitatieve monitor Systeeminnovaties verduurzaming landbouw'
- 202** Groot, A.M.E. & A.L. Gerritsen. Monitoring Functionele agrobiodiversiteit. Achtergronddocument bij 'Kwalitatieve monitor Systeeminnovaties verduurzaming landbouw'
- 203** Jongeneel, R.A. & L. Ge. Farmers' behavior and the provision of public goods: Towards an analytical framework
- 204** Vries, S. de, M.H.G. Custers & J. Boers. Storende elementen in beeld; de impact van menselijke artefacten op de landschapsbeleving nader onderzocht
- 205** Vader, J. J.L.M. Donders & H.W.B. Bredenoord. Zicht op natuur- en landschapsorganisaties; Achtergronddocument bij Natuurverkenning 2011
- 206** Jongeneel, R.A., L.H.G. Slangen & N.B.P. Polman. Groene en blauwe diensten; Een raamwerk voor de analyse van doelen, maatregelen en instrumenten
- 207** Letourneau, A.P., P.H. Verburg & E. Stehfest. Global change of land use systems; IMAGE: a new land allocation module
- 208** Heer, M. de. Het Park van de Toekomst. Achtergronddocument bij Natuurverkenning 2011
- 209** Knotters, M., J. Lahr, A.M. van Oosten-Siedlecka & P.F.M. Verdonschot. Aggregation of ecological indicators for mapping aquatic nature quality. Overview of existing methods and case studies
- 210** Verdonschot, P.F.M. & A.M. van Oosten-Siedlecka. Graadmeters Aquatische natuur. Analyse gegevenskwaliteit Limnodata
- 211** Linderhof, V.G.M. & H. Leneman. Quickscan kosteneffectiviteitsanalyse aquatische natuur

- 212** *Leneman, H., V.G.M. Linderhof & R. Michels.* Mogelijkheden voor het inbrengen van informatie uit de 'KRW database' in de 'KE database'
- 213** *Schrijver, R.A.M., A. Corporaal, W.A. Ozinga & D. Rudrum.* Kosteneffectieve natuur in landbouwgebieden; Methode om effecten van maatregelen voor de verhoging van biodiversiteit in landbouwgebieden te bepalen, een test in twee gebieden in Noordoost-Twente en West-Zeeuws-Vlaanderen
- 214** *Hoogland, T., R.H. Kemmers, D.G. Cirkel & J. Hunink.* Standplaatsfactoren afgeleid van hydrologische model uitkomsten; Methode-ontwikkeling en toetsing in het Drentse Aa-gebied
- 215** *Agricola, H.J., R.M.A. Hoefs, A.M. van Doorn, R.A. Smidt & J. van Os.* Landschappelijke effecten van ontwikkelingen in de landbouw
- 216** *Kramer, H., J. Oldengarm & L.F.S. Roupioz.* Nederland is groener dan kaarten laten zien; Mogelijkheden om 'groen' beter te inventariseren en monitoren met de automatische classificatie van digitale luchtfoto's
- 217** *Raffe, J.K. van, J.J. de Jong & G.W.W. Wamelink (2011).* Scenario's voor de kosten van natuurbeheer en stikstofdepositie; Kostenmodule v 1.0 voor de Natuurplanner
- 218** *Hazeu, G.W., Kramer, H., J. Clement & W.P. Daamen (2011).* Basiskaart Natuur 1990rev
- 219** *Boer, T.A. de.* Waardering en recreatief gebruik van Nationale Landschappen door haar bewoners
- 220** *Leneman, H., A.D. Schouten & R.W. Verburg.* Varianten van natuurbeleid: voorbereidende kostenberekeningen; Achtergronddocument bij Natuurverkenning 2011
- 221** *Knegt, B. de, J. Clement, P.W. Goedhart, H. Sierdsema, Chr. van Swaay & P. Wiersma.* Natuurkwaliteit van het agrarisch gebied
- 2011**
- 222** *Kamphorst, D.A. & M.M.P. van Oorschot.* Kansen en barrières voor verduurzaming van houtketens
- 223** *Salm, C. van der & O.F. Schoumans.* Langetermijneffecten van verminderde fosfaatgiften
- 224** *Bikker, P., M.M. van Krimpen & G.J. Remmelink.* Stikstof-verteerbaarheid in voeders voor landbouwhuisdieren; Berekeningen voor de TAN-excretie
- 225** *M.E. Sanders & A.L. Gerritsen (red.).* Het biodiversiteitsbeleid in Nederland werkt. Achtergronddocument bij Balans van de Leefomgeving 2010
- 226** *Bogaart, P.W., G.A.K. van Voorn & L.M.W. Akkermans.* Evenwichtsanalyse modelcomplexiteit; een verkennende studie
- 227** *Kleunen A. van, K. Koffijberg, P. de Boer, J. Nienhuis, C.J. Camphuysen, H. Schekkerman, K.H. Oosterbeek, M.L. de Jong, B. Ens & C.J. Smit (2010).* Broedsucces van kustbroedvogels in de Waddenzee in 2007 en 2008
- 228** *Salm, C. van der, L.J.M. Boumans, D.J. Brus, B. Kempen & T.C. van Leeuwen.* Validatie van het nutriëntenemissiemodel STONE met meetgegevens uit het Landelijk Meetnet effecten Mestbeleid (LMM) en de Landelijke Steekproef Kaartenheden (LSK).
- 229** *Dijkema, K.S., W.E. van Duin, E.M. Dijkman, A. Nicolai, H. Jongerius, H. Keegstra, L. van Egmond, H.J. Venema & J.J. Jongma.* Vijftig jaar monitoring en beheer van de Friese en Groninger kwelderwerken: 1960-2009
- 230** *Jaarrapportage 2010.* WOT-04-001 – Koepel
- 231** *Jaarrapportage 2010.* WOT-04-002 – Onderbouwend Onderzoek
- 232** *Jaarrapportage 2010.* WOT-04-003 – Advisering Natuur & Milieu
- 233** *Jaarrapportage 2010.* WOT-04-005 – M-AVP
- 234** *Jaarrapportage 2010.* WOT-04-006 – Natuurplanbureaufunctie
- 235** *Jaarrapportage 2010.* WOT-04-007 – Milieuplanbureaufunctie
- 236** *Arnouts, R.C.M. & F.H. Kistenkas.* Nederland op slot door Natura 2000: de discussie ontrafeld; Bijlage bij WOT-paper 7 – De deur klemt
- 237** *Harms, B. & M.M.M. Overbeek.* Bedrijven aan de slag met natuur en landschap; relaties tussen bedrijven en natuurorganisaties. Achtergronddocument bij Natuurverkenning 2011
- 238** *Agricola, H.J. & L.A.E. Vullings.* De stand van het platteland 2010. Monitor Agenda Vitaal Platteland; Rapportage Midterm meting Effectindicatoren
- 239** *Klijn, J.A.* Wisselend getij. Omgang met en beleid voor natuur en landschap in verleden en heden; een essayistische beschouwing. Achtergronddocument bij Natuurverkenning 2011
- 240** *Corporaal, A., T. Denters, H.F. van Dobben, S.M. Hennekens, A. Klimkowska, W.A. Ozinga, J.H.J. Schaminée & R.A.M. Schrijver.* Stenoeciteit van de Nederlandse flora. Een nieuwe parameter op grond van ecologische amplitudo's van de Nederlandse plantensoorten en toepassingsmogelijkheden
- 241** *Wamelink, G.W.W., R. Jochem, J. van der Gref, C. Grashof-Bokdam, R.M.A. Wegman, G.J. Franke & A.H. Prins.* Het plantendispersiemodel DIMO. Ter verbetering van de modellering in de Natuurplanner (werktitel)
- 242** *Klimkowska, A., M.H.C. van Adrichem, J.A.M. Jansen & G.W.W. Wamelink.* Bruikbaarheid van WNK-monitoringgegevens voor EC-rapportage voor Natura 2000-gebieden. Eerste fase
- 243** *Goossen, C.M., R.J. Fontein, J.L.M. Donders & R.C.M. Arnouts.* Mass Movement naar recreatieve gebieden; Overzicht van methoden om bezoekersaantallen te meten
- 244** *Spruijt, J., P.M. Spoorenberg, J.A.J.M. Rovers, J.J. Slabbekoorn, S.A.M. de Kool, M.E.T. Vlaswinkel, B. Heijne, J.A. Hiemstra, F. Nouwens & B.J. van der Sluis.* Milieueffecten van maatregelen gewasbescherming
- 245** *Walker, A.N. & G.B. Woltjer.* Forestry in the Magnet model.
- 246** *Hoefnagel, E.W.J., F.C. Buisman, J.A.E. van Oostenbrugge & B.I. de Vos.* Een duurzame toekomst voor de Nederlandse visserij. Toekomstscenario's 2040
- 247** *Buurma, J.S. & S.R.M. Janssens.* Het koor van adviseurs verdient een dirigent. Over kennisverspreiding rond phytophthora in aardappelen
- 248** *Verburg, R.W., A.L. Gerritsen & W. Nieuwenhuizen.* Natuur meekoppelen in ruimtelijke ontwikkeling: een analyse van sturingsstrategieën voor de Natuurverkenning. Achtergronddocument bij Natuurverkenning 2011
- 249** *Kooten, T. van & C. Klok.* The Mackinson-Daskalov North Sea EcoSpace model as a simulation tool for spatial planning scenarios
- 250** *Bruggen van, C., C.M. Groenestein, B.J. de Haan, M.W. Hoogeveen, J.F.M. Huijsmans, S.M. van der Sluis & G.L. Velthof.* Ammoniakemissie uit dierlijke mest en kunstmest 1990-2008. Berekeningen met het Nationaal Emissiemodel voor Ammoniak (NEMA)
- 251** *Bruggen van, C., C.M. Groenestein, B.J. de Haan, M.W. Hoogeveen, J.F.M. Huijsmans, S.M. van der Sluis & G.L. Velthof.* Ammoniakemissie uit dierlijke mest en kunstmest in 2009. Berekeningen met het Nationaal Emissiemodel voor Ammoniak (NEMA)

- 252** *Randen van, Y., H.L.E. de Groot & L.A.E. Vullings.* Monitor Agenda Vitaal Platteland vastgelegd. Ontwerp en implementatie van een generieke beleidsmonitor
- 253** *Agricola, H.J., R. Reijnen, J.A. Boone, M.A. Dolman, C.M. Goossen, S. de Vries, J. Roos-Klein Lankhorst, L.M.G. Groenemeijer & S.L. Deijl.* Achtergronddocument Midterm meting Effectindicatoren Monitor Agenda Vitaal Platteland
- 254** *Buiteveld, J. S.J. Hiemstra & B. ten Brink.* Modelling global agrobiodiversity. A fuzzy cognitive mapping approach
- 255** *Hal van R., O.G. Bos & R.G. Jak.* Noordzee: systeemodynamiek, klimaatverandering, natuurtypen en benthos. Achtergronddocument bij Natuurverkenning 2011
- 256** *Teal, L.R..* The North Sea fish community: past, present and future. Background document for the 2011 National Nature Outlook
- 257** *Leopold, M.F., R.S.A. van Bemmelen & S.C.V. Geelhoed.* Zeevogels op de Noordzee. Achtergronddocument bij Natuurverkenning 2011
- 258** *Geelhoed, S.C.V. & T. van Polanen Petel.* Zeezoogdieren op de Noordzee. Achtergronddocument bij Natuurverkenning 2011
- 259** *Kuijs, E.K.M. & J. Steenbergen.* Zoet-zoutovergangen in Nederland; stand van zaken en kansen voor de toekomst. Achtergronddocument bij Natuurverkenning 2011
- 260** *Baptist, M.J.* Zachte kustverdediging in Nederland; scenario's voor 2040. Achtergronddocument bij Natuurverkenning 2011
- 261** *Wiersinga, W.A., R. van Hal, R.G. Jak & F.J. Quirijns.* Duurzame kottervisserij op de Noordzee. Achtergronddocument bij Natuurverkenning 2011
- 262** *Wal J.T. van der & W.A. Wiersinga.* Ruimtegebruik op de Noordzee en de trends tot 2040. Achtergronddocument bij Natuurverkenning 2011
- 263** *Wiersinga, W.A. J.T. van der Wal, R.G. Jak & M.J. Baptist.* Vier kijkrichtingen voor de mariene natuur in 2040. Achtergronddocument bij Natuurverkenning 2011
- 264** *Bolman, B.C. & D.G. Goldsborough.* Marine Governance. Achtergronddocument bij Natuurverkenning 2011
- 265** *Bannink, A.* Methane emissions from enteric fermentation in dairy cows, 1990-2008; Background document on the calculation method and uncertainty analysis for the Dutch National Inventory Report on Greenhouse Gas Emissions
- 266** *Wyngaert, I.J.J. van den, P.J. Kuikman, J.P. Lesschen, C.C. Verwer & H.H.J. Vreuls.* LULUCF values under the Kyoto Protocol; Background document in preparation of the National Inventory Report 2011 (reporting year 2009)
- 267** *Helming, J.F.M. & I.J. Terluin.* Scenarios for a cap beyond 2013; implications for EU27 agriculture and the cap budget.
- 268** *Woltjer, G.B.* Meat consumption, production and land use. Model implementation and scenarios.
- 269** *Knegt, B. de, M. van Eupen, A. van Hinsberg, R. Pouwels, M.S.J.M. Reijnen, S. de Vries, W.G.M. van der Bilt & S. van Tol.* Ecologische en recreatieve beoordeling van toekomstscenario's van natuur op het land. Achtergrond-document bij Natuurverkenning 2011.
- 270** *Bos, J.F.F.P., M.J.W. Smits, R.A.M. Schrijver & R.W. van der Meer.* Gebiedsstudies naar effecten van vergroening van het Gemeenschappelijk Landbouwbeleid op bedrijfseconomie en inpassing van agrarisch natuurbeheer.
- 271** *Donders, J., J. Luttik, M. Goossen, F. Veeneklaas, J. Vreke & T. Weijsschede.* Waar gaat dat heen? Recreatiemotieven, landschapskwaliteit en de oudere wandelaar. Achtergronddocument bij Natuurverkenning 2011.
- 272** *Voorn G.A.K. van & D.J.J. Walvoort.* Evaluation of an evaluation list for model complexity.
- 273** *Heide, C.M. van der & F.J. Sijtsma.* Maatschappelijke waardering van ecosysteemdiensten; een handreiking voor publieke besluitvorming. Achtergronddocument bij Natuurverkenning 2011
- 275** *Os, J. van; T.J.A. Gies; H.S.D. Naeff; L.J.J. Jeurissen.* Emissieregistratie van landbouwbedrijven; verbeteringen met behulp van het Geografisch Informatiesysteem Agrarische Bedrijven.
- 276** *Walsum, P.E.V. van & A.A. Veldhuizen.* MetaSWAP_V7_2_0; Rapportage van activiteiten ten behoeve van certificering met Status A.