

De invloed van klimaatverandering op de afvoerregimes binnen een hellend dekzandgebied in Twente

M.J. ATTEMA

S1838253

29-04-2020

University of Twente-

In opdracht van Waterschap Vechtstromen

CE faculty

Begeleiders:

R.P. van Denderen

R.S. de Graaf

B. Worm

J. van der Scheer

Samenvatting

De studie in dit rapport onderzoekt de invloed van klimaatverandering op de afvoerregimes in een hellend dekzandgebied in Twente. Door klimaatverandering worden enkele processen in Nederland die onderdeel zijn van het neerslagafvoerproces versterkt. Het rapport gaat specifiek in op de verandering in neerslag en verdamping. De hellende dekzandgebieden zijn kwetsbaar voor droge omstandigheden en daarom wil Waterschap Vechtstromen de gevolgen van klimaatverandering in kaart brengen. Om dit te bewerkstelligen is er een achtergrondstudie gedaan naar de invloed van verdamping op het neerslagafvoerproces. Hierbij zijn verschillende methodes vergeleken en is er een methode geselecteerd voor gebruik bij de modellering van het neerslagafvoerproces.

Het neerslagafvoerproces is uitgevoerd met behulp van een model studie. Hierbij is het WALRUS-model gebruikt die geoptimaliseerd is voor gebruik in laagland en gebruiksvriendelijk van aard is (Brauer, Torfs, Teuling, & Uijlenhoet, 2016). Om vast te stellen of de schaal waarop de modellering plaatsvond ook effect heeft op de accuraatheid van het model is het studiegebied opgedeeld. Hierbij zijn voor elk deelgebied specifieke kenmerken vastgesteld en toegepast. Deze kenmerken zijn geanalyseerd op de invloed die ze hebben op het model en dus het neerslagafvoerproces.

Echter is gebleken dat er te weinig data voor het studiegebied beschikbaar is en die data ook niet geheel betrouwbaar is voor het accuraat weergeven van het neerslagafvoerproces. Dit heeft gevolgen voor het in kaart brengen van de gevolgen van klimaatverandering op een hellend dekzandgebied in Twente. Er kan dus niet met zekerheid worden gezegd wat de precieze invloed van klimaatverandering is. Wel is een relatie gevonden tussen een toename in neerslag en een bijhorende toename in afvoer in het studiegebied.

Voorwoord

Deze scriptie is een beschrijving van het in kaart brengen van het neerslagafvoerproces voor een hellend dekzandgebied in Twente. Deze scriptie is wat anders gelopen dan velen hadden verwacht door de huidige maatregelen rondom Covid-19. Deze kwamen zeer ongelukkig uit in het uitvoeren van deze scriptie. Daarbij wil ik mijn begeleiders nadrukkelijk bedanken voor het geduld en middelen om deze scriptie tot een goed einde te brengen. Daarnaast wil ook dhr. M. Punt bedanken voor het proef lezen van deze scriptie. Als laatste wil ik ook God en mijn familie bedanken die me hebben gesteund in dit proces.

Inhoudsopgave

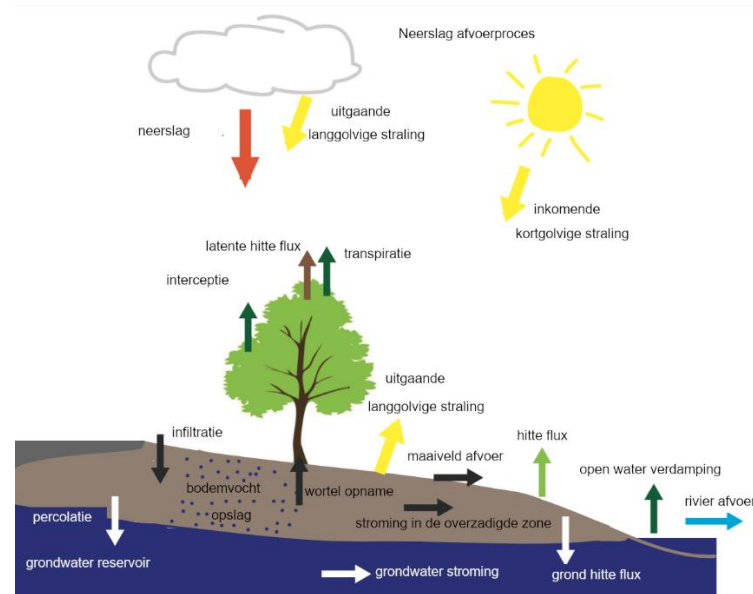
Samenvatting	1
Voorwoord	1
Inhoudsopgave.....	2
1. Introductie	3
1.1 Theoretische achtergrond.....	3
1.2 Probleem beschrijving.....	4
1.3 Onderzoeksgat	4
1.4 Onderzoeksdoel	5
1.5 Methodologie.....	5
1.6 Leeswijzer.....	5
2. Systeembeschrijving	6
2.1 Ligging van het studiegebied	6
2.2 Fysische geografische kenmerken	6
2.3 Grondwaterspiegel en kwel	6
2.4 Reliëf	7
3. Methode.....	8
3.1 De modelbeschrijving.....	8
3.2 Uitwerking van de scenario's	12
4. Resultaten	14
4.1 Resultaten van de vergelijking van verdampingsmethodes	14
4.2 De individuele deelgebieden	16
4.3 Klimaatverandering weergegeven in afvoeren.....	18
5. Discussie	19
5.1 Het neerslagafvoermodel	19
5.2 Klimaatverandering meetgegevens	19
6. Conclusie	20
Bibliografie	21
Appendix	23

1. Introductie

Klimaatverandering zal invloed hebben op watersystemen, dit door de mondiale stijging van de gemiddelde temperatuur. Bepaalde regio's zullen meer aan de gevolgen van klimaatverandering onderhevig zijn dan andere gebieden. Om een beeld te krijgen van de gevolgen van klimaatverandering op het weer en het lokale klimaat heeft het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI) een aantal scenario's ontwikkeld.

De gevolgen van klimaatverandering, mocht het ernstigste scenario W_h werkelijkheid worden, kunnen als volgt beschreven worden. Winters zullen warmer en natter worden en de zomers warmer en droger. Alhoewel de zomers droger zijn, zal de regen in intensiteit toenemen (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, 2014). Een toename in de intensiteit van neerslag en een daling in dagen met neerslag leidt tot een grotere kans op wateroverlast. De totale hoeveelheid neerslag in de zomer zal dalen en daarmee de kans op droogte vergroten (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, 2014). Daarentegen heeft de zware regenval tot gevolg dat de bovenste lagen van de bodem mogelijk onderhevig zijn aan erosie. Hierdoor spoelen grondstoffen in de bodem weg en vermindert de opbrengst van de grond (Verweij, Wiele, Moorselaar, & Grinten, 2010).

De toename in intensiteit van regenval en een afname in regelmaat van regenval, zullen mogelijk zorgen voor problemen wat betreft het waterbeheer in Nederland. Hierbij is het van belang de toename of afname in afvoer onder invloed van klimaatverandering in beeld te brengen. De individuele factoren die een rol spelen in het neerslagafvoerproces worden in kaart gebracht.



Figuur 1, Neerslagafvoerproces (Berghuijs, 2016)

1.1 Theoretische achtergrond

Het neerslagafvoerproces is het proces waarbij water als neerslag het gebied binnenkomt en als afvoer het gebied verlaat. Het neerslagafvoerproces wordt in Figuur 1 weergegeven. Water wordt afgevoerd door middel van het afwateringsstelsel, welke op verschillende manieren bereikt kan worden. Water kan het afwateringsstelsel bereiken door oppervlakkige stroming, stroming in de onverzadigde zone en grondwaterstroming. Water verlaat ook het gebied door middel van inzijging en evapotranspiratie. Naast neerslag komt water ook door middel van kwel het gebied binnen.

1.1.1 Afvoerstromen in het neerslagafvoerproces

Oppervlakkige stroming of maaiveldafvoer ontstaat doorgaans wanneer de bodem verzadigt met water is. Oppervlakkige stroming kan ook optreden als de intensiteit van een bui groter is dan de infiltratiecapaciteit van de bodem. Deze vorm van afvoer wil men zoveel mogelijk voorkomen omdat dit schade aan het maaiveld tot gevolg heeft. (Verweij, Wiele, Moorselaar, & Grinten, 2010).

De onverzadigde zone bestaat uit het gebied tussen het maaiveld en de grondwaterspiegel (Nimmo, 2009). Stroming in de onverzadigde zone (bruin in Figuur 1) bestaat uit stroming door poriën, drainage en gangen gemaakt door dieren. Hierbij is stroming door poriën stroming vanaf het maaiveld naar het grondwater. Stroming door drainage en gangen is de stroming naar het afwateringstelsel.

De grondwaterstand staat in direct verband met de grondwaterstroming (van Bakel, et al., 2013). Hoe hoger de grondwaterstand, des te meer grondwaterstroming plaats vindt. Hierin zit ook een hoogtecomponent waarin grondwater van een hoger naar een lager potentiaal stroomt.

1.1.2 Invloeden op de afvoerstromen

De voornaamste bijdrage aan de afvoer is de neerslag. Neerslag is de verzamelterm voor dauw, hagel, mist, regen, rijp en sneeuw. De neerslag wordt gemeten door middel van een pluviometer, hierbij staat elke mm neerslag gelijk aan één liter water per vierkante meter.

Naast neerslag komt water het gebied binnen door middel van kwel en verlaat water het gebied door inzijging. Kwel is het proces waarbij water uit de diepere grondwaterlagen omhoog komt. Inzijging is het omgekeerde proces.

Evapotranspiratie is de combinatie van de verdamping en de transpiratie (Figuur 1). Transpiratie is verdamping uit vegetatie en is erg afhankelijk van de groeistoestand van de vegetatie. De verdampingscomponent is de verdamping uit de onverzadigde zone. De evapotranspiratie is afhankelijk van de zonnestraling, luchtdruk, luchtvochtigheid, windsnelheid en luchttemperatuur. Deze factoren maken dat de evapotranspiratie voornamelijk in de winter een kleine bijdrage levert en in de zomer een grote bijdrage (Schuurmans & Droogers, 2010).

1.2 Probleem beschrijving

Een toename in neerslag en evapotranspiratie in de toekomst door klimaatverandering heeft invloed op het neerslagafvoerproces. De invloed van deze toename in neerslag en evapotranspiratie is te onderzoeken door eerst de referentie situatie in kaart te brengen. Deze situatie wordt in kaart gebracht met behulp van een model. Hierin is het van belang zowel de individuele factoren in kaart te brengen, als de invloed van die factoren. Een van deze factoren is de evapotranspiratie, deze kan niet direct worden gemeten en wordt dus berekend. De evapotranspiratie kan op verscheidene manieren met meerdere vergelijkingen worden berekend. Het is hier van belang de juiste vergelijking voor deze studie te kiezen. De individuele factoren zijn de neerslag, kwel en inzijging, evapotranspiratie, grondwaterstand en het afwateringstelsel.

1.3 Onderzoeksgat

Deze studie bouwt verder op de studie die Hehenkamp (2019) heeft uitgevoerd naar de invloed van knijpstuwen op de piekwaterafvoer en de continue waterafvoer. Hierbij is er een model gemaakt van het watersysteem en zijn er knijpstuwen in dit model geplaatst. In dit model (Hehenkamp 2019) is de referentiesituatie vergeleken met een situatie met knijpstuwen, hieruit is gebleken dat de knijpstuwen het gewenste effect hebben (onder het gewenste effect wordt het afvlakken van de afvoerpieken verstaan). In de huidige studie zal dit model worden uitgebreid door het in kaart brengen van het neerslagafvoerproces. Het neerslagafvoerproces wordt in kaart gebracht voor hetzelfde studiegebied, onderzocht door Hehenkamp (2019).

1.4 Onderzoeksdoel

Het doel van het onderzoek is het in kaart brengen van het neerslagafvoerproces voor een hellend dekzandgebied in Twente, zodanig dat hiermee de effecten van klimaatverandering onderzocht kunnen worden. De hoofdonderzoeksvraag is als volgt:

Hoe beïnvloedt klimaatverandering de afvoerregimes binnen een hellend dekzandgebied in Twente?

De deelvragen bij dit onderzoek zijn.

1. Welke evapotranspiratievergelijking kan het best worden gebruikt in het studiegebied in een zomersituatie?
2. Welke factoren hebben de meeste invloed in het neerslagafvoerproces?
3. Wat is de invloed van het ruimtelijke schaalniveau op de afvoerregimes?

1.5 Methodologie

Het WALRUS-model wordt gebruikt voor modelleren van het neerslagafvoerproces. Het modelleren binnen WALRUS is simpel en kan goed omgaan met een gebrek aan data van het te onderzoeken gebied.

1. Welke evapotranspiratievergelijking kan het best worden gebruikt in het studiegebied in een zomersituatie?

Het model gebruikt de potentiële evapotranspiratie om neerslagafvoerproces uit te voeren. Aangezien klimaatverandering een directe invloed heeft op de potentiële evapotranspiratie is het van belang deze component zorgvuldig te onderzoeken. De data voor het berekenen van de potentiële evapotranspiratie wordt verkregen van het KNMI. De verschillende vergelijkingen worden vergeleken door middel van een literatuurstudie en door het model. Hiermee kan de meest optimale (gerelateerd aan de gemeten afvoer) vergelijking voor het studiegebied worden bepaald.

2. Welke factoren hebben de meeste invloed in het neerslagafvoerproces?

De neerslag en evapotranspiratie zijn directe factoren die invloed hebben op het neerslagafvoerproces. Deze factoren zijn aan verandering onderhevig door klimaatverandering. Naast deze factoren zijn er ook factoren die niet direct door klimaatverandering worden beïnvloed. Het doel van deze onderzoeksvraag is het kwantificeren van de invloed van deze factoren.

3. Wat is de invloed van het ruimtelijke schaalniveau op de afvoerregimes?

Het studiegebied (2. Systeembeschrijving) kan als een groot geheel worden beschouwd en zo worden gemodelleerd. Dit laat echter de grote diversiteit in bodemstructuur, grondwaterstand en slootdimensies buiten beschouwing. Het is van belang dat de invloed van deze verscaling in beeld wordt gebracht. Het studiegebied is opgedeeld in kleinere deelgebieden aan de hand van de afvoervlakken in het studiegebied. Hierdoor kan voor elk deelgebied de individuele kenmerken worden gebruikt. De afvoer van het totale gebied wordt vergeleken met de afvoer van de deelgebieden. Hiernaast wordt ook de afvoer van de deelgebieden met elkaar vergeleken.

1.6 Leeswijzer

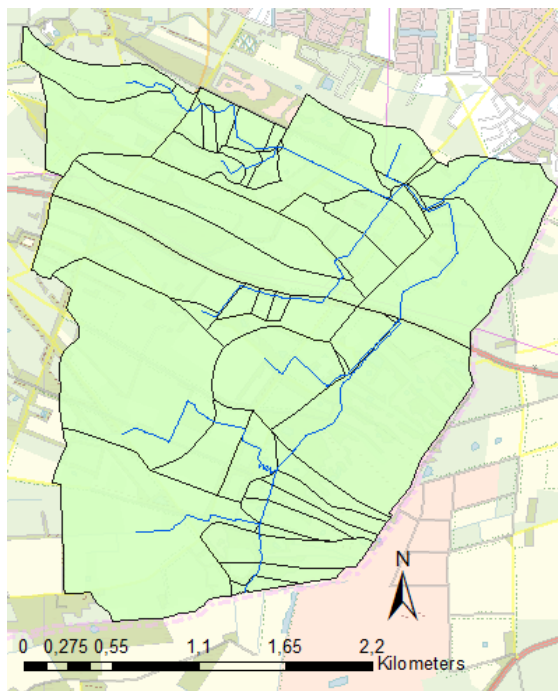
Hoofdstuk 2 is een systeembeschrijving van het studiegebied. De ruimtelijke factoren die van invloed op het neerslagafvoerproces zijn worden hier toegelicht. Hoofdstuk 3 gaat in op het model en het modelleringproces, tevens ook de opstelling van het onderzoek. Hoofdstuk 4 beschrijft de resultaten van de onderzoekopstelling. Hoofdstuk 5 brengt de resultaten ter discussie en Hoofdstuk 6 concludeert het verslag.

2. Systeembeschrijving

Dit Hoofdstuk gaat in op de beschrijving van het systeem. Het systeem bestaat uit alle processen binnen het studiegebied die ruimtelijk weergegeven worden.

2.1 Ligging van het studiegebied

Het beheergebied van Waterschap Vechtstromen beslaat het gebied dat te zien is in Appendix A. Het beheergebied beslaat meerdere provincies en meerdere regio's binnen deze provincies. Het studiegebied is gelegen ten zuidoosten van de stad Enschede en ten zuiden van de stad Glanerbrug, lichtblauw in Appendix A. Het studiegebied is 802 hectare groot (Waterschap Vechtstromen, 2020) en is hydrografisch geïsoleerd van de omgeving. Het dekzandlandschap waar het studiegebied voor een deel uit bestaat is kenmerkend voor een deel van de regio Twente. Hierdoor kan opgedane kennis breder worden toegepast.



Figuur 2, Studiegebied (groen), afwateringstelsel (blouw)

Het studiegebied is onderdeel van het stroomgebied van de Glanerbeek, welke een onderdeel is van het stroomgebied van de Dinkel. Het studiegebied is opgedeeld in kleinere deelgebieden aan de hand van de hoofdwaterlopen (Figuur 2). Hierdoor is de

diversiteit in het landschap beter weer te geven en een specifieke analyse mogelijk.

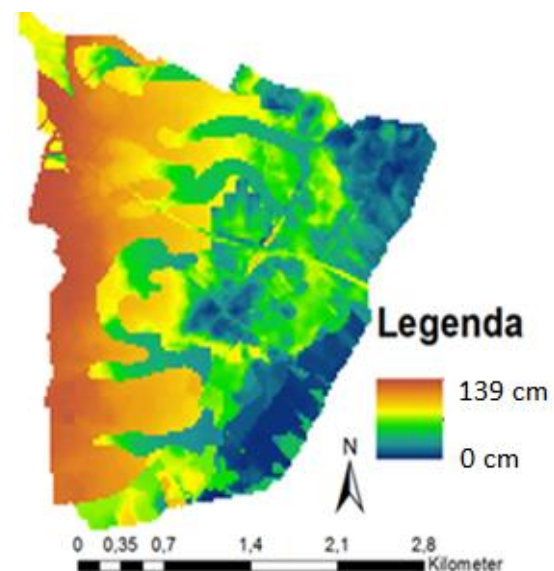
2.2 Fysische geografische kenmerken

Het gehele studiegebied bestaat uit een dekzandlaag. Hiervan is 52% een dekzandlaag en 47% een dunne gemengde dekzandlaag (Waterschap Vechtstromen, 2020). Onder deze dekzandlaag bevindt zich een kleilaag. De infiltratiecapaciteit van de bodem is hierdoor beperkt. Alhoewel water snel kan infiltreren in de dekzandlaag, is de kleilaag de beperkende factor.

Het gebied wordt gekenmerkt door vier landschappen. Een stuwwal-kleileemlandschap in het westen van het studiegebied. Een rivier- en beekdallandschap welke ruwweg de vorm van het afwateringstelsel aanneemt. Het dekzandlandschap bevindt zich in het oosten van het studiegebied. Als laatste het hoogveen welke een zeer klein onderdeel uitmaakt van het studiegebied (Appendix B).

2.3 Grondwaterspiegel en kwel

De grondwaterspiegel is afhankelijk van de fysische geografische eigenschappen van het gebied(Figuur 3). Het westen van het



Figuur 3, Lage grondwaterstand (GLG), weergegeven in cm onder het maaiveld.(GLG_2010 layer (Waterschap Vechtstromen, 2020)

studiegebied wordt gekenmerkt door lage grondwaterstanden van meer dan één meter onder het maaiveld. Dit komt overeen met de stuwwal die in het westen van het studiegebied is gelegen. De grondwaterstand in het oosten van het studiegebied is veel hoger, dit komt overeen met het Aamsveen.

Duidelijk is ook het afwateringsstelsel te onderscheiden door een gemiddeld hogere

grondwaterstand. Hierdoor zou een verband kunnen liggen tussen de aanwezigheid van watergangen en een hogere grondwaterstand.

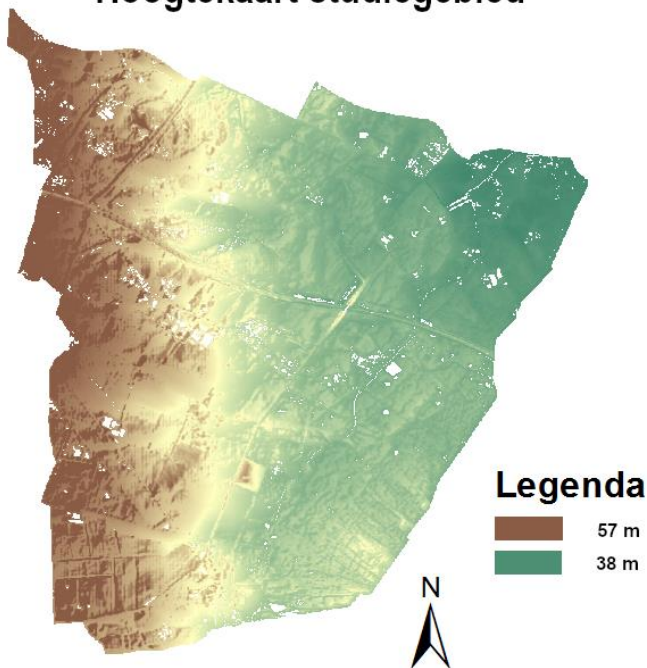
De kwel in het studiegebied toont grote overeenkomsten met de ligging van het afwateringsstelsel en het Aamsveen. Kwel vindt in de zomer alleen plaats in de watergangen (Appendix C).

2.4 Reliëf

Het studiegebied is gelegen op de flank van een stuwwal, die ten westen van het studiegebied ligt. Het westelijke deel van het studiegebied heeft een hogere elevatie dan het oostelijke deel van het studiegebied heeft (Figuur 4).

De stuwwal is ook de hydrologische grens voor de westkant van het gebied. Hierdoor stromen alle watervoerende eenheden af in een oostelijke richting. Het westelijke deel van het gebied zal dus eerder een watertekort krijgen dan het oostelijke deel van het gebied. Het hoogteverschil tussen het hoogste en laagste punt binnen het studiegebied is 19 meter.

Hoogtekaart studiegebied



Figuur 4, Absolute hoogte in meter boven NAP

3. Methode

Met een model kan het neerslagafvoerproces in beeld gebracht worden. Met dit model is het mogelijk de factoren te bepalen die de meeste invloed op het proces hebben. Het model kan na deze stappen uitgevoerd te hebben toegepast worden voor de gevolgen van klimaatverandering op de afvoerregimes.

3.1 De modelbeschrijving

Het model wordt gebruikt voor het modeleren van het neerslagafvoerproces in het studiegebied. Het model wordt gebruikt om voor een periode van tien jaar de afvoerregimes te simuleren. Met behulp van deze referentie-afvoerregimes is het mogelijk enkele scenario's uit te voeren.

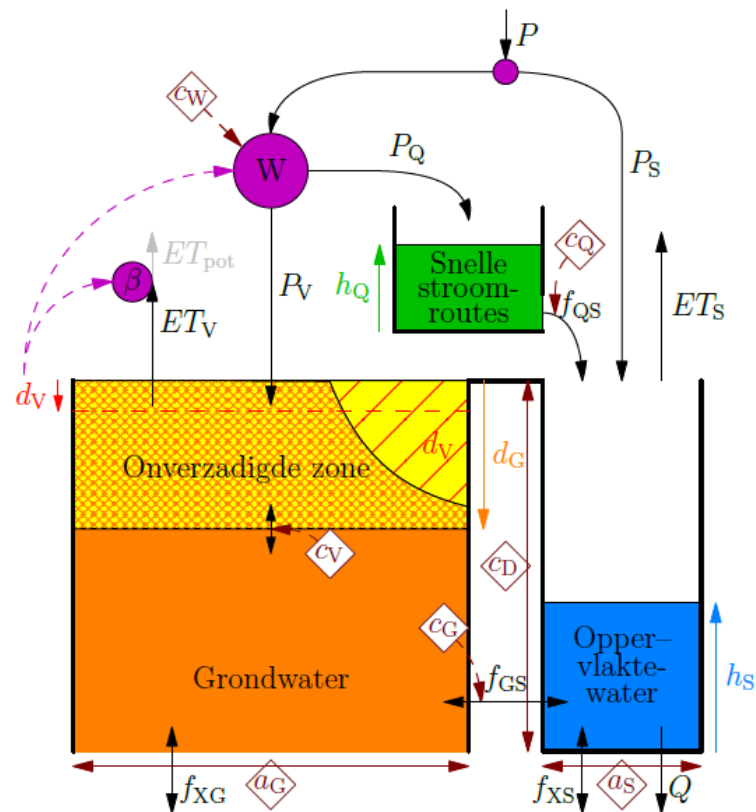
3.1.1 De modelwerking

WALRUS maakt gebruik van drie verschillende reservoirs om het neerslagafvoerproces weer te geven (te observeren in Figuur 5). De verschillende reservoirs staan met elkaar in verbinding door middel van fluxen waarmee de onderlinge waterstromen worden weergegeven.

De neerslag P komt als eerste op het maaiveld terecht. Hierbij gaat een deel van het water naar de snelle stroomroutes en een ander deel naar de onverzadigde zone. De hoeveelheid water die naar de verschillende zones stroomt is afhankelijk van de potentiële verdamping ET_{pot} en de natheid W van de bodem.

De onverzadigde zone en het grondwater zijn samen één reservoir. De natheid van de onverzadigde zone wordt bepaald met behulp van het watertekort d_v . Met behulp van deze parameter wordt de hoeveelheid droge poriën bepaald. Het grondwaterreservoir staat in een directe verbinding met het oppervlaktewater. Hierdoor heeft het oppervlaktewater zowel een drainerende als een infiltrerende werking. Het grondwater ondervindt ook een wisselwerking met de diepere onderlagen door middel van kwel en

inzijging bepaald. De snelle stroomroutes bestaat uit de samenvoeging van al het water dat niet door de poriën naar de onverzadigde zone infiltreert. Dit is de waterafvoer door drainage, gangen gemaakt door dieren, plassen op het land en maaiveldafvoer (Brauer, Torfs, Teuling, & Uijlenhoet, 2017).



Figuur 5, WALRUS-model schematisatie, (Brauer, Torfs, Teuling, & Uijlenhoet, 2017)

3.1.2 Randvoorwaarden voor het model

Het WALRUS-model moet gevoed worden met een aantal gegevens: de tijd waarover het model loopt en de inputreeksen. De inputreeksen bestaan uit de neerslag, potentiële evapotranspiratie, de afvoer en de grondwaterflux. Het model beschrijft een periode van 1 februari 2010 tot 1 februari 2020.

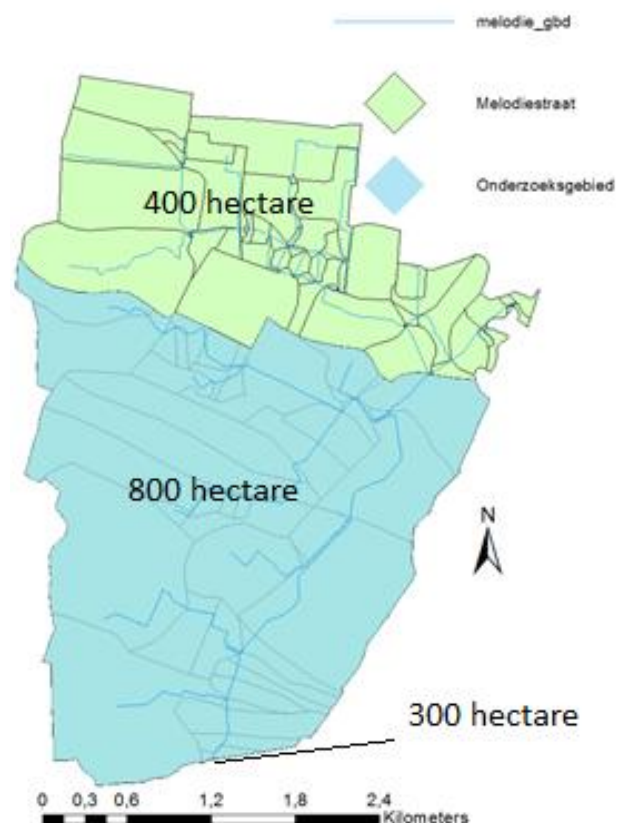
De neerslag en potentiële evapotranspiratie zijn bepaald met behulp van de gegevens van meetstation Twenthe. Meetstation Twenthe is het dichtstbijzijnde meetstation van het KNMI bij het studiegebied. Echter is het meetstation hemelsbreed 10 km verwijderd van het studiegebied en kunnen de meetgegevens niet geheel representatief zijn (Droogers, 2009). De neerslag en evapotranspiratie zijn beide weergegeven in mm per tijdseenheid.

De gemeten afvoer van het studiegebied wordt gebruikt voor de kalibratie van het model. De afvoer van het studiegebied wordt gemeten door twee nabijgelegen meetstations, Melodiestraat en Aamsveen. Meetstation Melodiestraat meet echter een groter deel van het stroomgebied dan alleen het studiegebied (Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.). Meetpunt Aamsveen meet de afvoer die vanuit Duitsland het studiegebied binnenkomt. Echter is deze dataset verre van compleet en kan om deze reden niet gebruikt worden. Dus kunnen alleen de afvoerreeksen van Meetstation Melodiestraat worden gebruikt.

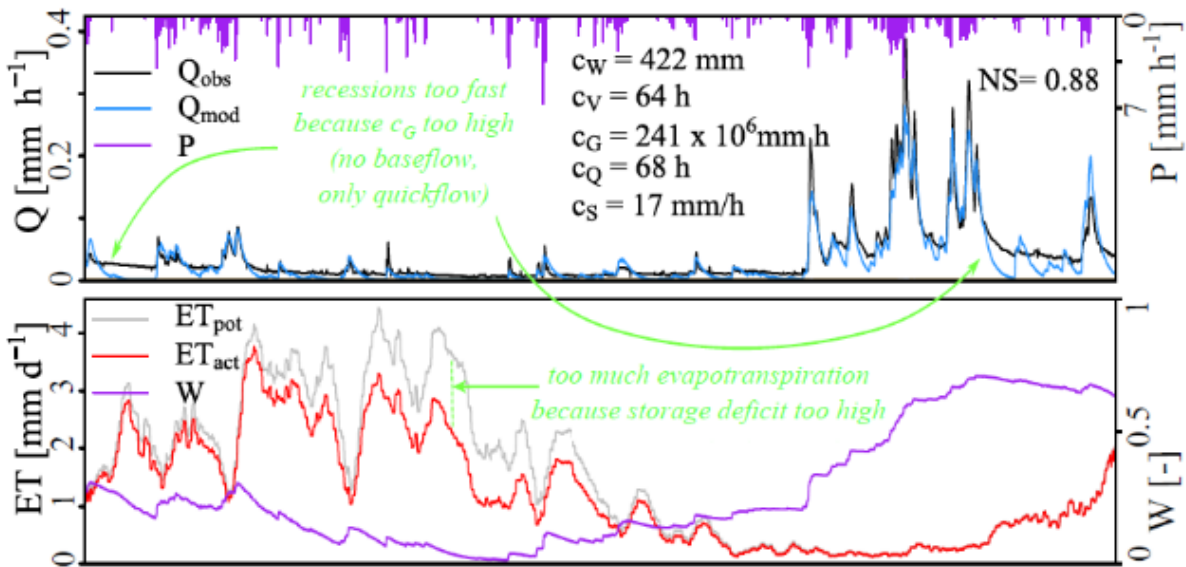
Meetstation Melodiestraat bestaat uit een stuw en een vistrapinstallatie. Waarbij het meeste water over de vistrap stroomde. De vistrap was echter in maart 2020 buiten werking. Het WALRUS-model gebruikt geen ruimtelijke factoren in het model en gebruikt de afvoer in mm per uur. Hierdoor is het mogelijk de afvoer die gemeten wordt bij meetstation Melodiestraat te gebruiken. Het gebied waarvan de afvoer wordt gemeten bij meetstation Melodiestraat bestaat uit een Duits en Nederlands deel. Het Duitse deel is

geschat op 300 hectare en het Nederlandse deel is gemeten op 1200 hectare, met een totaal van 1500 hectare. De afvoer wordt hierbij gelijkmatig verdeelt over het gehele gebied.

De kwel en inzijing zijn ook invoerparameters voor het model. De kwel en inzijing worden direct toegevoegd of afgehaald van het grondwaterreservoir. De mate van kwel en inzijing wisselt door het jaar heen. Dit is vooral van toepassing op de kwel welke in de zomer in mindere mate voorkomt dan in de winter. Er is een gemiddelde zomer- en winter kwel beschikbaar. Om deze toch te gebruiken voor de rest van het jaar worden deze ingedeeld aan de hand van het hydrologisch jaar. Hierbij loopt de zomerperiode van 1 april tot 1 oktober en alles daarbuiten wordt als de winterperiode beschouwd.



Figuur 6, Stroomgebied meetpunt Melodiestraat



Figuur 7, Handmatige kalibratie (Brauer, Torfs, Teuling, & Uijlenhoet, 2017)

3.1.3 De aanvullende parameters

In Tabel 1 staan de aanvullende parameters voor het model. De parameters waarbij een X staat bij kalibratie worden verder toegelicht in sectie 3.1.4 (Appendix F).

	Eenheid	kalibratie
Watergangdiepte	c_D	-
Openwateroppervlak	a_s	-
Bodemsoort	St	-
Maximale afvoer	c_S	-
Grondwaterstand	d_{G0}	-
Constante natheidsindex	c_W	X
Ontspanningstijd onverzadigde zone	c_V	X
Grondwaterreservoir constante	c_G	X
Constante snelle afvoer	c_Q	X

Tabel 1, Aanvullende parameters

3.1.4 Kalibratie van het model

De aanvullende parameters beschreven in Tabel 1 zijn in twee categorieën op te delen. De eerste set parameters bestaat uit parameters die bepaald worden door kenmerken uit het studiegebied. Het tweede deel bestaat uit parameters die alleen verkregen worden door kalibratie (Mede door het ontbreken van meetgegevens van het studiegebied en de ambiguïteit van de parameters).

De c_W is de constante voor de natheidsindex. Deze parameter bepaalt de vochtigheid van het gebied en dient als drempelwaarde voor de snelle afvoer.

De c_V is de constante voor de ontspanningstijd van de onverzadigde zone. Dit is de snelheid waarmee het systeem zich in een nieuw evenwicht bevindt.

De c_G is de constante voor het grondwaterreservoir. Deze waarde is de som van alle weerstanden bij het infiltreren en draineren van water.

De c_Q is de constante voor de snelle afvoer. De mate waarin de snelle afvoer wordt gebruikt binnen het model.

Het bepalen van de initiële parameterwaarden is gedaan aan de hand van de gegevens van Royal Haskoning (2017). Hierbij is voor alle stroomgebieden in Waterschap Vechtstromen het neerslagafvoerproces in kaart gebracht. Veel gegevens die bij deze studie zijn bepaald zijn ook toepasbaar op dit studiegebied. Alhoewel hierbij nog steeds de kanttekening staat dat de bandbreedte van de gegevens zeer groot is, omdat een deel van het stroomgebied in Duitsland ligt en daar minder over bekend is (van den Tillaart & Aalders, september 2017).

Een tweede kanttekening zijn de neerslaggegevens. De neerslaggegevens die voor het neerslagafvoerproces zijn gebruikt door Royal Haskoning zijn afkomstig van de Nationale Regenradar. Hierdoor is de ruimtelijke verdeling van de neerslag beter meegenomen dan bij het gebruiken van één neerslagstation (van den Tillaart & Aalders, september 2017).

De kalibratie van het model wordt gedaan door middel van het HydroPSO package die meegeleverd is met het model (Zambrano-Bigiarni & Rojas, 2020). Dit is een particle swarm optimalisatie techniek. De particle swarm optimalisatie maakt gebruik van verschillende deeltjes die de lokale beste oplossing opzoeken, maar ook gestuurd worden richting een betere oplossing.

Hierbij wordt de beste oplossing telkens veranderd nadat een beter resultaat gevonden is (Zambrano-Bigiarni & Rojas, 2020). De hoeveelheid iteraties die het proces ondergaat kan worden verhoogd en verlaagd naarmate er naar een beter resultaat gestreefd wordt.

Het eerste deel van het kalibratieproces is handmatig. Hierbij werd er gebruik gemaakt van het toegelichte proces in Figuur 7. Het kalibratieproces is zeer tijdsintensief en door een handmatige kalibratie te combineren kan een beter bereik worden geselecteerd waarin de automatische kalibratie met behulp van de 'Particle swarm' analyse haar werk kan doen.

3.2 Uitwerking van de scenario's

De volgende drie scenario's zullen worden behandeld. In het eerste scenario wordt de invloed van verschillende methodes om de potentiële evapotranspiratie te berekenen bepaald. In het tweede scenario wordt de invloed van schaalverkleining onderzocht. Hierbij wordt ook de invloed van de parameters onderzocht. Het derde scenario beschrijft de invloed van klimaatverandering.

3.2.1 Vergelijking van verdampingsmethodes

De potentiële evapotranspiratie is de snelheid waarmee water in de ondergrond en een specifieke vegetatie kan verdampen (Zotarelli, Dukes, Romero, Migliaccio, & Morgan). De potentiële evapotranspiratie kan op verscheidene manieren worden berekend. Het KNMI gebruikt hierbij de vergelijking van Makkink. Internationaal wordt de methode van Penman-Monteith gebruikt, alhoewel deze ook gebruikt wordt in combinatie met de methode van Thom-Oliver (Appendix D).

In het eerste scenario wordt de invloed van elke methode bepaald op de afvoer van het studiegebied. Hierbij worden de volgende drie verschillende vergelijkingen vergeleken:

		Grondwaterstand	Slootdiepte	Bodem	Max afvoer
<i>Makkink</i>	referentie	X	X	X	X
<i>Penman-Monteith</i>	Casus 1	-	-	-	-
<i>Thom-Oliver + Penman-Monteith (TOPM)</i>	Casus 2	-	X	X	X
	Casus 3	X	-	X	X
De bovengenoemde methodes worden vergeleken op basis van de afvoeren. Hierdoor is het mogelijk langdurige effecten van de verschillende methodes te bepalen. Als voorbeeld, de TOPM-methode verschilt veel in de wintersituatie (Appendix D). Een langdurig effect kan zijn dat een verschil in wintersituatie gevolgen heeft voor de zomersituatie. De methode die wordt gebruikt om de evapotranspiratie te berekenen is de methode die de gemeten afvoer het best simuleert. Deze methode	Casus 4	X	X	-	X
	Casus 5	X	X	X	-

wordt toegepast voor gebruik in scenario twee.

3.2.2 De individuele deelgebieden

In Hoofdstuk 2 is toegelicht dat het studiegebied is opgedeeld in kleinere deelgebieden. Hierdoor is het mogelijk de resultaten van schaalverkleining te onderzoeken. Het eerste deel focust zich op de schaalverkleining het tweede deel focust op de invloed van een verschil in parameters op de afvoer.

In Tabel 2 staan de verschillende casussen die worden uitgevoerd om de invloed van de individuele parameters te bepalen. De parameters benoemd in Tabel 2 verschillen onderling per deelgebied in verband met de schaalverkleining. De invloed van deze parameter op de schaalverkleining wordt onderzocht door de parameter gelijk te houden over alle deelgebieden. In het geval van de tweede casus is dat de grondwaterstand. Dit houdt in dat de grondwaterstand gelijk is voor alle individuele deelgebieden. De overige parameters verschillen nog wel onderling per deelgebied.

Tabel 2, Toelichting scenario 2 (Het onderzoeken van de invloed van de schaalverkleining). De X staat voor een individueel verschil tussen die parameter en de - voor een parameter die gelijk is voor alle deelgebieden.

3.2.3 Gevolgen van klimaatverandering

De invloed van klimaatverandering kan worden bepaald door middel van de gegevens van het KNMI. Het KNMI heeft vier scenario's opgesteld voor het jaar 2050 gerangschikt van een lage impact van klimaatverandering tot een grote invloed. Hierbij is het van belang de gevolgen van deze scenario's door te berekenen in de afvoer en het effect van deze scenario's te bepalen.

	G_L +1°C	G_H +1°C	W_L +2°C	W_H +2°C
Temperatuur	+1.0°C	+1.4°C	2.0°C	2.3°C
Neerslag	+ 4%	+ 2.5%	+ 5.5%	+ 5%
Zonnestraling	+0.6%	+1.6%	-0.8%	+1.2%

Tabel 3, Effecten van klimaatverandering in 2050 op de parameters in het model (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, 2014).

De factoren die invloed op het model hebben en door middel van klimaatverandering gaan veranderen zijn de neerslag, temperatuur en zonnestraling. De verandering in neerslag kan direct worden opgenomen in het model. De temperatuur en zonnestraling vertalen zich in een gewijzigde potentiële evapotranspiratie. De effecten van klimaatverandering worden toegepast op de meetreeksen van het model. De effecten van klimaatverandering op het neerslag-afvoerproces worden weergegeven in de afvoeren.

In Tabel 3 staan de gevolgen van klimaatverandering voor het neerslag-afvoerproces uitgewerkt. De G_L staat voor de lage inschatting en de G_H voor een hoge inschatting bij de desbetreffende temperatuur stijging. De neerslag en temperatuurstijging zijn gelijk genomen voor het hele jaar en niet seizoensafhankelijk in deze casus.

4. Resultaten

In dit Hoofdstuk worden de resultaten besproken van het model zoals dat is beschreven in Hoofdstuk 3. De eerste paragraaf (4.1) beschrijft de verschillen tussen de drie manieren om de evapotranspiratie te berekenen. Vervolgens wordt de meest optimale methode gebruikt voor het berekenen (4.2) van de afvoer van de individuele deelgebieden. De deelgebieden worden met elkaar vergeleken om de invloed van de lokale parameters te achterhalen. Als laatste (4.3) is de invloed van klimaatverandering op de afvoer bepaald.

4.1 Resultaten van de vergelijking van verdampingsmethodes

De resultaten van het gebruik van verschillende methodes voor het berekenen van de potentiële evapotranspiratie op de afvoer worden hier toegelicht. De totale afvoer van het studiegebied volgens de verschillende methodes staat beschreven in Tabel 4. Deze afvoer is de sommatie van de simulatie over tien jaar.

De afvoer Melodiestraat is de gemeten afvoer bij meetpunt Melodiestraat. De methode wordt gekozen op basis van de totale afvoer

	Afvoer in m ³
Afvoer Melodiestraat	3.9*10 ⁶
Makkink	2.1*10 ⁶
Penman-Monteith	1.9*10 ⁶
Thom-Oliver + Penman-Monteith	2.5*10 ⁶

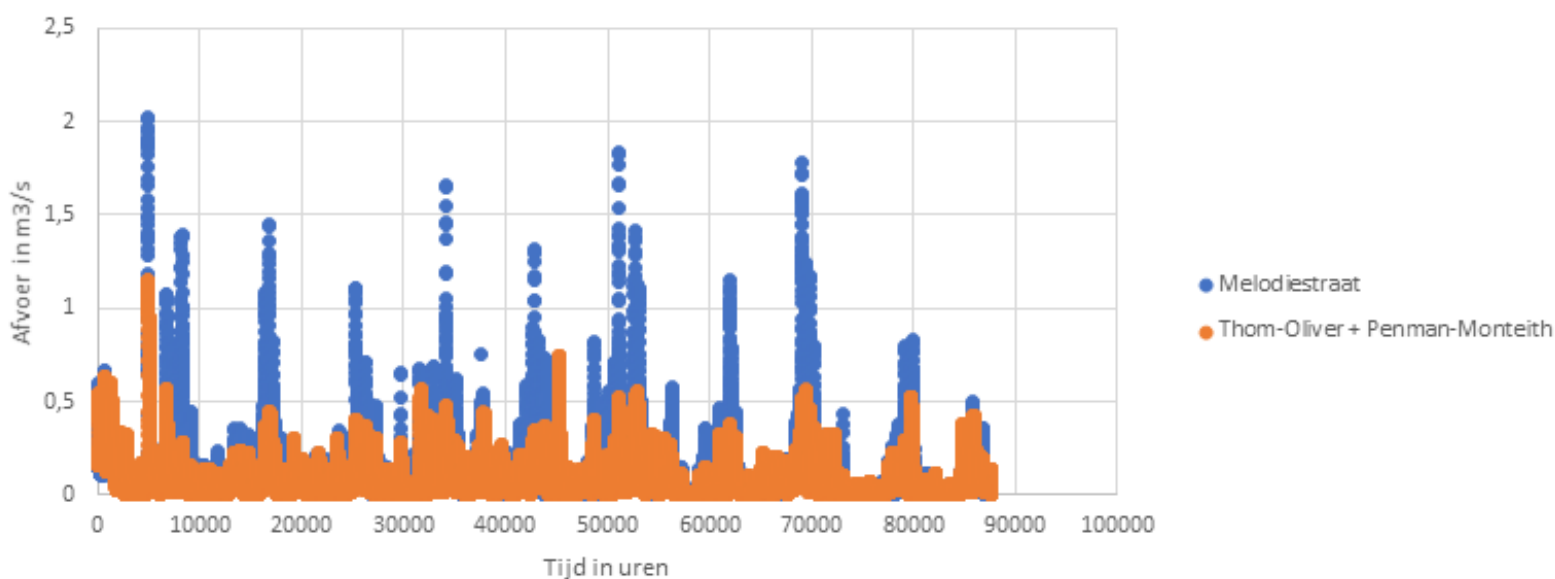
Tabel 4, Corresponderende afvoer over 10 jaar bij de evapotranspiratie methode

die het beste de gemeten afvoer beschrijft. Aangezien de totale afvoer van de TOPM-methode de gemeten afvoer het best benaderd, zal deze gebruikt worden.

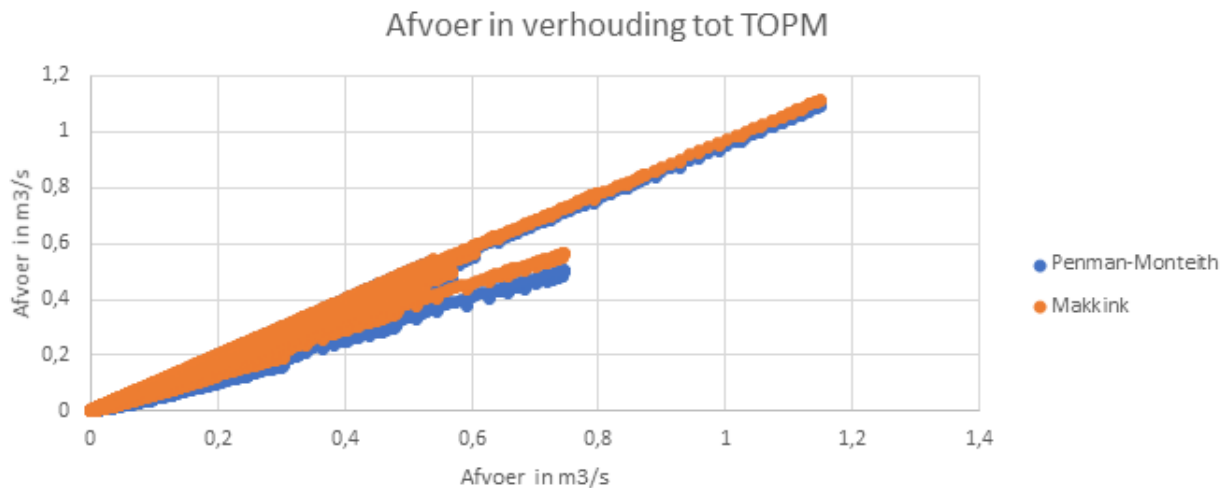
Echter komt de totale afvoer bepaald met behulp van de TOPM-methode nog steeds niet in de buurt van de gemeten afvoer. De grootste afwijking is de onderschatting van de pieken (Figuur 8) Hoofdstuk 5 zal hier verder op ingaan.

Het onderlinge verschil tussen de Makkink, Penman-Monteith en TOPM-methodes is te zien in Figuur 9. In dit figuur is te zien dat Makkink de waarden hoger inschat dan de Penman-Monteith methode. Deze conclusie volgt ook uit Tabel 4. Gemiddeld is de afwijking van Makkink ten opzichte van de TOPM-methode 15%. De afwijking van Penman-Monteith ten opzichte van TOPM is 22%.

De gemeten afvoer in verhouding tot de gesimuleerde afvoer over de tijd

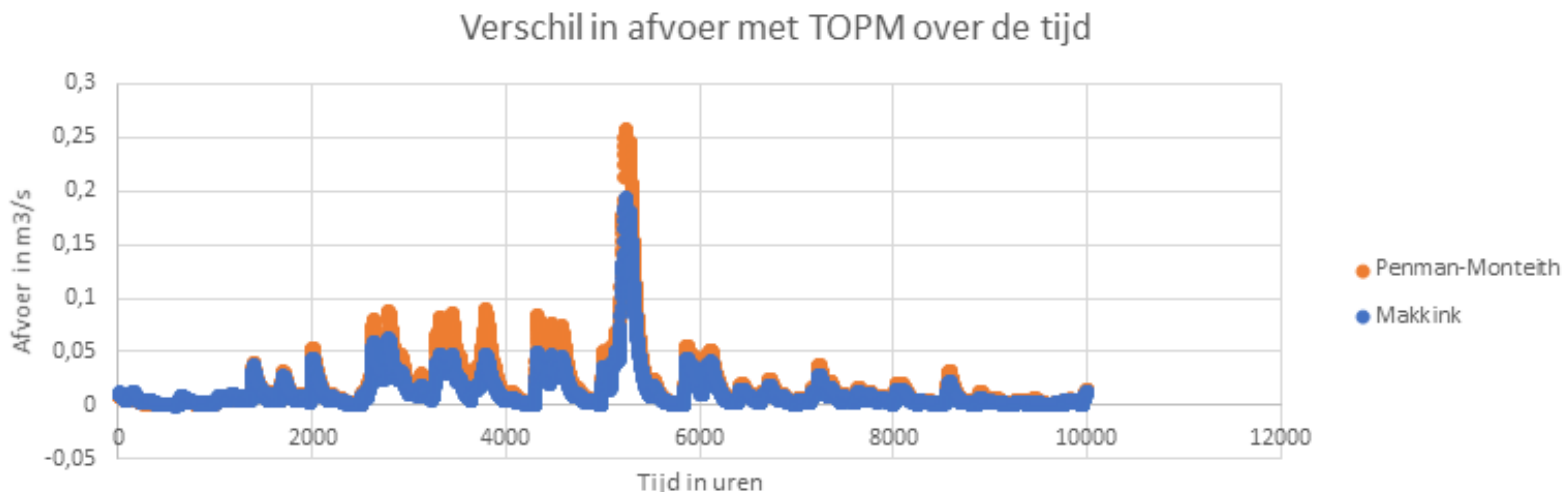


Figuur 8, De gemeten afvoer in verhouding tot de gesimuleerde afvoer over de tijd

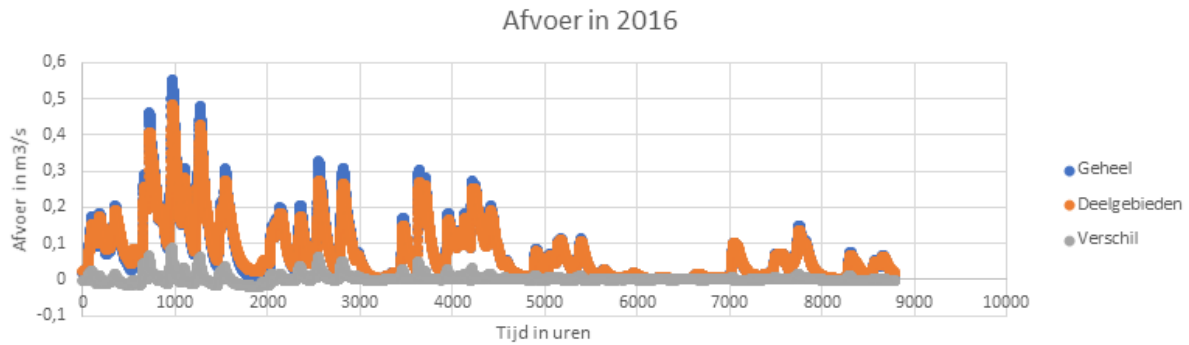


Figuur 9, Afvoer vergelijking tussen de verschillende methodes voor potentiële evapotranspiratie

Het vergelijken van de langdurige effecten van het gebruik van de verschillende methodes is te zien in Figuur 10. Het beschrijft het verschil in afvoer tussen de TOPM-methode en de Makkink en Penman-Monteith methode. Een grotere waarde staat voor een groter verschil tussen de gesimuleerde afvoeren. Hierin is te zien dat het gebruik van andere methode voor het bepalen van de potentiële evapotranspiratie geen doorlopende effecten heeft. Hiermee wordt bedoeld dat het verschil in afvoer niet oploopt in de tijd. Alhoewel het verschil in totale afvoer blijft bestaan.



Figuur 10, Het verschil in afvoer tussen TOPM, Penman-Monteith en Makkink



Figuur 11, Afvoer voor het gehele gebied, de deelgebieden en het verschil ertussen voor het jaar 2016

4.2 De individuele deelgebieden

De invloed van de schaalverkleining op de meting is te zien in Tabel 5. Hierbij is te zien dat een model waarbij het studiegebied als geheel wordt genomen dichterbij de gemeten afvoer zit. Het verschil is echter beperkt ten opzichte van de totale afwijking.

	Afvoer in m ³
Studiegebied als geheel	2.5*10 ⁶
Individuele deelgebieden	2.4*10 ⁶
Gemeten afvoer	3.9*10 ⁶

Tabel 5, Totale afvoer over 10 jaar, individueel tegenover geheel

In Figuur 11 wordt het jaar 2016 afgebeeld. Hier is het verschil tussen het studiegebied als geheel en in deelgebieden te zien. Het simuleren van het studiegebied als geheel levert hogere pieken op, maar ook diepere uitzakkingen in de afvoer. Om er achter te komen welke parameters hier invloed op hebben uitgeoefend worden de resultaten van de casussen in de komende secties toegelicht.

4.2.1 Toelichting casussen

De casussen in scenario twee zijn zo opgesteld om de invloed van een aantal parameters op het neerslagafvoerproces te bepalen. Dit betreft de grondwaterstand, slootdiepte, maximale afvoer en de bodemsoort. De variatie tussen de deelgebieden is groot (appendix G). De casussen worden in de komende alinea's toegelicht.

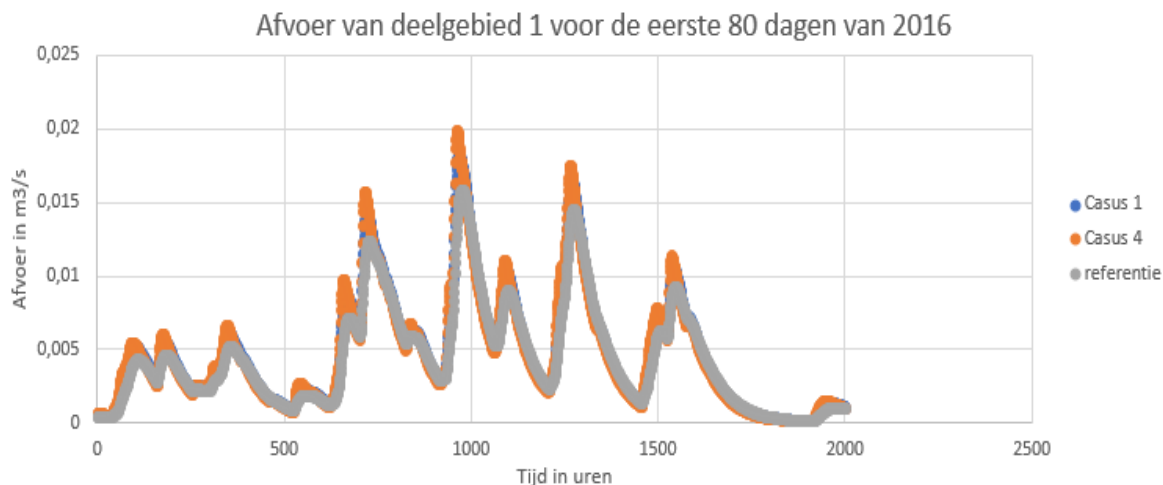
	Gemiddelde verschil	Bereik van het verschil
Casus 1	5%	0 tot 18%
Casus 2	0%	0 tot 4%
Casus 3	0%	-3% tot 3%
Casus 4	3%	0 tot 15%
Casus 5	1%	0 tot 4%

Tabel 6, Resultaten casussen

De invloed van de parameters gemeten in casus 2, 3 en 5 respectievelijk is minimaal. Deze casussen gaan over de variatie in initiële grondwaterstand, slootdiepte en bodemsoort. Hieruit kan geconcludeerd worden dat schaalverkleining voor deze parameters een miniem effect heeft op de afvoerregimes.

Casus 4 heeft niet een heel groot gemiddeld verschil tussen de deelgebieden, maar kent wel een groot bereik. Het gelijk stellen van de parameter voor de maximale afvoer in de sloten heeft een grote invloed op sloten waarbij de maximale afvoer kleiner is dan het gemiddelde van het studiegebied. In deze gevallen wordt de afvoer van het deelgebied tot 15% overschat.

De eerste casus beschrijft een situatie waarin alle parameters die in casus 2 tot 5 individueel worden getest samen worden genomen. De resultaten hiervan liggen in lijn met de resultaten van casus 4. De verschillen in uitkomsten tussen casus 1 en casus 4 kunnen worden verklaard door de geringe invloed van de parameters in casus 2, 3 en 5. In Tabel 7 worden enkele deelgebieden uitgelicht waarbij de casus 1 en 4 in verband staan.



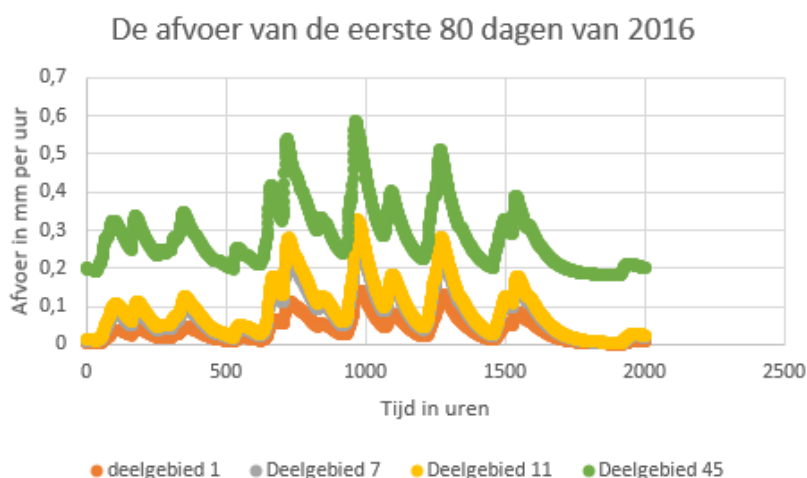
Figuur 12, Afvoer van deelgebied 1 voor de eerste 80 dagen van 2016 in m3/s

	Casus 1	Casus 4
Deelgebied 1	18%	14%
Deelgebied 7	7%	4%
Deelgebied 12	11%	7%
Deelgebied 26	1%	0%

Tabel 7, Verband Casus 1 en 4. De waarden zijn het verschil in afvoer ten opzichte van de referentie situatie.

Het vergelijken van de afvoergrafieken voor deelgebied 1 levert voor de eerste tachtig dagen van 2016 geen opmerkelijke resultaten. Een verandering in piekhoogte is verwacht aangezien de totale afvoer van de referentie-afvoer verschilt (Figuur 12).

4.2.2 Afvoeren zonder ruimtelijk element
Echter is dit nog geen verklaring voor het grote verschil tussen de afvoeren per simulatie (Appendix G). In de volgende figuren moet worden opgemerkt dat het ruimtelijke



Figuur 13, Afvoer voor de eerste 80 dagen van 2016 voor verschillende deelgebieden in mm per uur

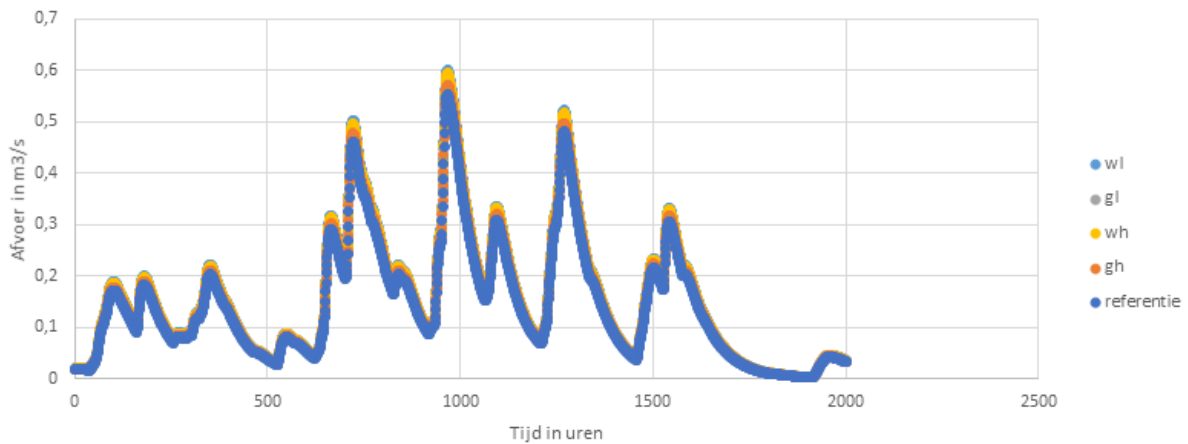
aspect niet is meegenomen. De afvoeren zijn weergegeven in mm per uur. Het opmerkelijke is dat het verschil niet kan worden verklaard door de parameters in sectie 4.2.1 (Tabel 8). De oorzaak voor het grote verschil voor deelgebied 5 moet door een variatie in een andere parameter worden verklaard. Figuur 13 is een visuele weergave van het verschil in afvoer.

Deelgebied	Afvoer t.o.v. studiegebied	Casus 1	Casus 4
1	-53%	18%	14%
7	-4%	7%	4%
11	41%	5%	2%
45	400%	0%	0%

Tabel 8, Afvoeren voor deelgebieden t.o.v. studiegebied als geheel

Uit Figuur 13 kan worden opgemerkt daar voor deelgebied 45 sprake is van een continue afvoer. In de meetreeksen zijn er twee onderdelen die verschillen per deelgebied. De potentiële evapotranspiratie en de kwel en of inzijing variëren. Aangezien de potentiële evapotranspiratie niet kan bijdragen aan de afvoer, is de kwel en of inzijing verantwoordelijk voor het grote individuele verschil.

Afvoer voor eerste 80 dagen in 2016 geschaald naar klimaatscenario



Figuur 14, verloop van de afvoer voor de klimaatscenario's gextrapoleerd op 2016

Deelgebied	Kwel winter mm per uur	Kwel zomer mm per uur
1	-0.04 mm	-0.06 mm
7	0.02 mm	-0.05 mm
11	0.03 mm	-0.02 mm
45	0.18 mm	0.11 mm

Tabel 9, Kwel in uitgelichte deelgebieden voor de winter en zomer. Positieve waarden geven kwel aan, negatieve waarden representeren inzijging.

Het grote verschil in afvoer in Figuur 13 kan worden verklaard door de hoeveelheid kwel. In deelgebied 45 (Tabel 9) is de hoeveelheid kwel significant meer ten opzichte van de andere deelgebieden. Dit resulteert in een vaste basisafvoer (Figuur 13). Er treedt veel kwel in het gebied op omdat in deelgebied 45 een deel van het hoofd-afwateringstelsel ligt. De invloed van deze grote afvoer op het totaal is niet groot omdat het deelgebied met 0.7 hectare een klein onderdeel uitmaakt van het totale studiegebied.

4.3 Klimaatverandering weergegeven in afvoeren

Het doorrekenen van de verschillende scenario's van het KNMI geeft aan dat er een lichte stijging van de afvoer wordt verwacht.

	Totale afvoer in m ³
referentie	2.5*10 ⁶
G _L +1°C	2.6*10 ⁶
G _H +1°C	2.5*10 ⁶
W _L +2°C	2.7*10 ⁶
W _H +2°C	2.6*10 ⁶

Tabel 10, Totale afvoer over 10 jaar corresponderend met de klimaatscenario's

De lage inschattingen (G_L en W_L) leveren een kleinere stijging in potentiële evapotranspiratie op. Hierdoor is de afvoer groter bij een lagere inschatting dan bij een hogere inschatting (Tabel 10). De afvoerpieken nemen toe naarmate de neerslag toeneemt (Figuur 14). De toename in potentiële evapotranspiratie heeft in geringere mate invloed op de afvoeren. De toename in afvoer voor het G_L scenario is 6% corresponderend met een toename in neerslag van 4%.

5. Discussie

In dit Hoofdstuk worden keuzes voor de aanpak van het neerslagafvoerproces toegelicht. Punten van verbetering worden ook aangedragen en hoe deze het resultaat kunnen verbeteren

5.1 Het neerslagafvoermodel

De gemeten afvoer komt ondanks uitgebreide kalibratie niet overeen met de gesimuleerde afvoer. Hiervoor zijn enkele verklaringen te geven, zowel in de data als het model.

1. Betrouwbaarheid meetgegevens
2. Onzekerheid kwel en inzijging
3. Ontoereikendheid WALRUS- model

Het eerste punt is de betrouwbaarheid van de data gebruikt voor het model. In de dataset van de gemeten afvoeren miste data voor enkele periodes. De afvoer wordt gemeten met behulp van de waterstanden, bij een hoge afvoer levert dit onbetrouwbare data op door het verdrinken van de stuw. De stuw bestaat voor een deel uit een vistrap welke zeer lastig te meten is. In deze studie zijn de neerslagcijfers van het KNMI gebruikt. De keuze is hiervoor gemaakt omdat deze ook de gegevens voor de potentiële evapotranspiratie ter beschikking stelt. Echter kan men voor een beter ruimtelijk beeld de neerslagcijfers van de Nationale Regen Radar gebruiken (van den Tillaart & Aalders, september 2017).

De kwel en inzijging blijken een groot effect op het neerslagafvoerproces te hebben zoals in Hoofdstuk 4 wordt geconcludeerd. De kwel en inzijging zijn alleen bekend voor een winter en zomer situatie er is geen onderzoek naar de invloed van dit gegeven gedaan. De data voor de kwel en inzijging is modelmatig verkregen, door verder onderzoek is het mogelijk een accurater model te krijgen. In dit model is geen onderscheid gemaakt tussen kwel naar de verzadigde zone en kwel naar de watergangen.

Een tweede parameter die in mindere mate invloed op het neerslagafvoerproces heeft is de maximale sloot afvoer. In dit onderzoek zijn deze geschat aan de hand van de door Hehenkamp (2019) verstrekte gegevens. Het in beeld brengen van de maximale slootafvoer levert een accurater neerslag afvoermodel op voor het studiegebied. Echter is het berekenen van de maximale slootafvoer een zeer tijdrovend proces. Het koppelen van het neerslagafvoerproces aan een hydraulisch model lost dit probleem op.

Alhoewel het WALRUS-model toegespitst is op het simuleren van laaglandgebieden hoeft het niet toereikend te zijn voor het studiegebied. Het studiegebied kenmerkt zich door diepe afwaterende eenheden, wat ook terug te zien is in de gemiddelde slootdiepte. Het gevolg hiervan op het model, samen met de inzijging in veel gebieden, is dat de grondwaterstand zich onder bodemniveau bevindt. Dit heeft wederom gevolgen voor de hoeveelheid infiltratie die kan plaatsvinden, waardoor de totale afvoer afneemt.

5.2 Klimaatverandering meetgegevens

De seizoensvariatie van de neerslag, temperatuur en zonneconstante is niet meegenomen in het neerslagafvoerproces. Het implementeren van deze variatie over de seizoenen geeft een beter beeld bij de potentiële veranderingen in de winter en zomer. Aangezien de gemiddelde neerslag voor de zomer zal dalen en in de winter zal stijgen.

Hieruit komen de volgende adviezen:

1. Gebruik Neerslagcijfers Nationale Regenradar.
2. Invloed seizoensvariatie kwel en inzijging.
3. Onderscheid maken tussen kwel naar het afwateringstelsel en de verzadigde zone.
4. Seizoensvariatie aanbrengen in berekening klimaatverandering.

6. Conclusie

De resultaten van deze studie laten zien dat de toename in neerslag directe gevolgen heeft voor de afvoer in het studiegebied. Dit is in mindere mate het geval voor de potentiële evapotranspiratie in het studiegebied. De conclusie uit de eerste onderzoeksvraag is het gebruik van de methode van Thom-Oliver in combinatie met Penman-Monteith. Dit kan worden geconcludeerd uit de literatuurstudie en het model. De betere simulatie van de piekafvoer is vooral merkbaar in de winter. Het resultaat van de tweede onderzoeksvraag is dat de kwel en inzijging de grootste invloed op het neerslagafvoerproces hebben. Aangezien deze sterk kunnen verschillen over een studiegebied is het van belang deze factor zorgvuldig te overwegen. De invloed van het schaalniveau op de totale afvoer is klein, afgezien van het feit dat het beter in staat is de afvoercurves te simuleren. Echter is de variatie tussen de deelgebieden groot, waardoor er beter recht wordt gedaan tussen de verschillende omstandigheden in de deelgebieden. Dus het werken met deelgebieden (een schaalverkleining) levert een beter beeld op van het neerslagafvoerproces.

Concluderend, de invloed van de kwel en inzijging is zeer groot in het model, nader onderzoek naar deze factor is wenselijk. Hierdoor is het niet met zekerheid te zeggen wat de absolute invloed van klimaatverandering voor een hellend dekzandgebied in Twente is. Daarentegen is de relatieve verandering in afvoer door klimaatverandering wel aanzienlijk. Alhoewel er veel onzekerheden blijven die nader moeten worden toegelicht.

Bibliografie

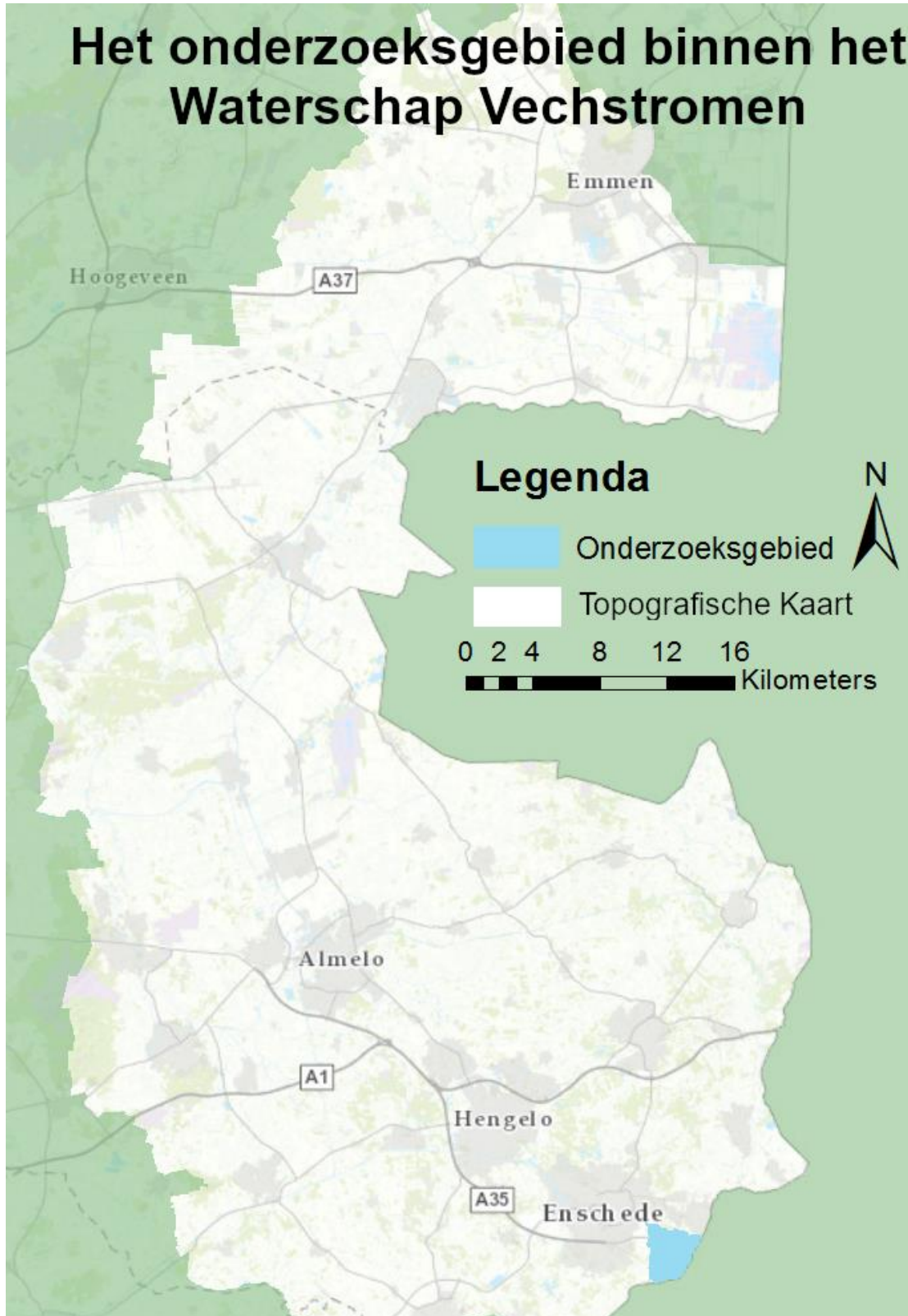
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56*. Rome: FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Berghuijs, W. (2016). *Bringing structure to catchment-scale hydrological diversity around the world*. Bristol: Department of Civil-Engineering University of Bristol.
- Bijlsma, R., Jansen, A., Wallis de Vries, M., & Witte, J. (2011). *Hoogveen en klimaatverandering in Nederland*. Wageningen: Alterra, Wageningen UR.
- Brauer, C., Torfs, P., Teuling, R., & Uijlenhoet, R. (2016). De Wageningen Lowland Runoff Simulator (WALRUS): een snel neerslag-afvoermodel speciaal voor laaglandstroomgebieden. *Stromingen* 25; nummer 1.
- Brauer, C., Torfs, P., Teuling, R., & Uijlenhoet, R. (2017). *The Wageningen Lowland Runoff Simulator WALRUS 1.10 User Manual*. Wageningen: Wageningen University.
- De Bruin. (1988). *van Penman naar Makkink: een nieuwe berekeningswijze voor de klimatologische verdampingsgetallen*. KNMI.
- de Bruin, H., & Stricker, J. (2000). Evaporation of grass under non-restricted soil moisture conditions. *Hydrological Sciences Journal*, 391-406.
- Droogers, P. (2009). *Verbetering bepaling acutele verdamping voor het strategisch waterbeheer*. Utrecht: Stowa.
- Fox, R., McDonald, A., Pritchard, P., & Mitchell, J. (2016). *Fluid Mechanics*. Wiley.
- Irmak, S., & Haman, D. (2017). *Evapotranspiration: Potential or Reference?* Florida: IFAS Extension University of Florida.
- Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut. (2014). *KNMI'14 Climate Change Scenarios*. The Netherlands: Ministerie van infrastructuur en milieu.
- Koster, E. (1992). Duin- en dekzandvorming in 'koude woestijnen'. *Grondboor & Hamer*, nr. 46; 81-92.
- Mangala, O., Toppo, P., & Ghoshal, S. (2016). Study of Infiltration Capacity of Different Soils. *International Journal of Trend in Research and Development*, Volume 3(2).
- Nimmo, J. (2009). *Vadose water*. Elsevier (Volume 1), 766-777.
- schuurmans, J., & Droogers, P. (2010). *Penman-monteith referentieverdamping*. Amersfoort: STOWA.
- Spek, T., Kiljan, B., Moorman, J., Geertsema, W., & Steingröver, E. (2010). *Klimaatverandering op de hoge zandgronden: effecten en adaptatie: betekenis van klimaatverandering voor het landelijk gebied in de provincie Gelderland: een uitwerking voor de gebiedsontwikkeling in Baalse Beek en Blauwe Bron*. Provincie Gelderland.
- ten Cate, J. (1979). *Geomorfologische Kartering Streekplan Twente*. Wageningen: Stichting voor bodemkartering.
- United Nations University. (2020, 02 25). *Evapotranspiration in forest and fields*. Opgehaald van

- archive.unu.edu:
<http://archive.unu.edu/unupress/unupbooks/80635e/80635E0d.htm>
- van Bakel, J., Bardoel, B., Boland, B., Entzinger, N., Menger, I., & van Rens, C. (2013). *Water vasthouden aan de bron - Praktijkonderzoek om wateroverlast te verminderen door bovenstrooms water vast te houden*. Noord-Brabant: Waterschap De Dommel, Waterschap Aa en Maas, Waterschap Brabantse Delta, Provincie Noord-Brabant.
- van den Tillaart, S., & Aalders, P. (september 2017). *HGK Vechtstromen versie 1.0*. Nijmegen: HaskoningDHV Nederland B.V.
- Varma, M., kumer, M., Marechal, J., Ruiz, L., Sekhar, M., & Braun, J. (januari 2009). Estimation of evapotranspiration in an experimental watershed in a deciduous forest of south India. *Asia-Pacific Journal of the Atmospheric Sciences*, 175-191.
- Verweij, W., Wiele, J., Moorselaar, L., & Grinten, E. (2010). *Impact of climate change on water*. Bilthoven: National Institute for Public Health and the Environment.
- Wassink, W. (1999). *Beekdallandschappen Een morfologisch onderzoek in de zandgebieden van Nederland*. Agricultural University.
- Waterschap Vechtsromen. (2020, 01). GIS data fysisch geografisch landschap in Overijssel. Almelo, Overijssel, Nederland.
- Waterschap Vechtstromen. (2020). *GIS data*. Almelo.
- Zambrano-Bigiarni, M., & Rojas, R. (2020). *hydroPSO: Particle Swarm Optimisation, with Focus on Environmental Models*. doi:10.5281/zenodo.1287350
- Zotarelli, L., Dukes, M., Romero, C., Migliaccio, K., & Morgan, K. (sd). *Step by Step Calculation of the Penman-Monteith Evapotranspiration (FAO-56 Method)*. University of Florida.

Appendix

Appendix A

Het studiegebied binnen het beheergebied van Waterschap Vechtstromen.

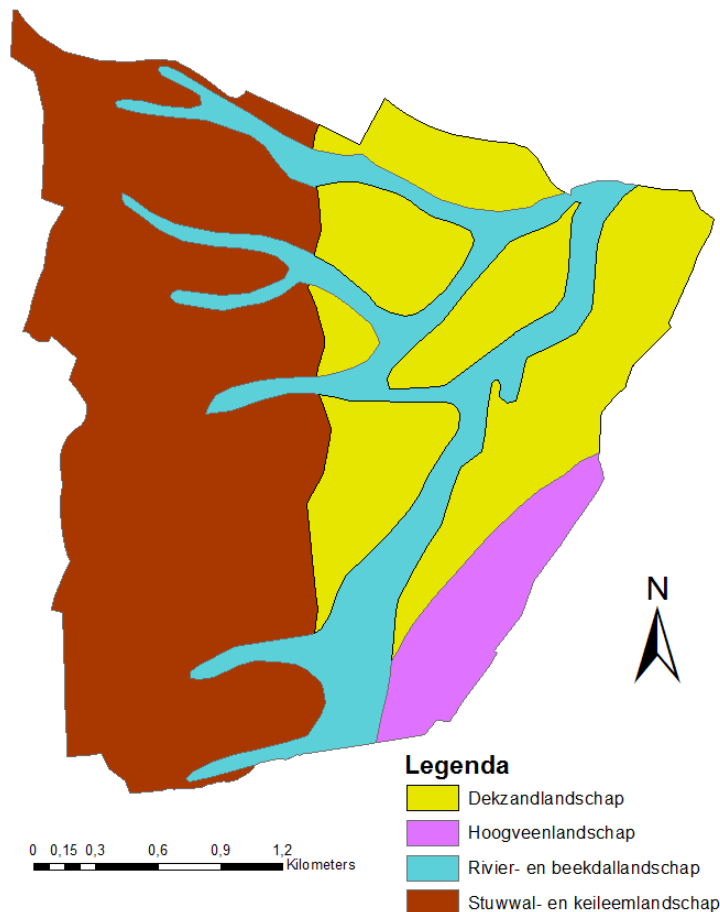


Figuur 15, Het studiegebied binnen het beheergebied van Waterschap Vechtstromen.,

Appendix B

Fysische geografische eigenschappen van het studiegebied

De ondergrond in het gebied bestaat voornamelijk uit stuwwal- en kleileemlandschap, gevolgd door rivier- en beekdallandschap, dekzandlandschap en als laatste hoogveenlandschap. Zie Figuur 16 voor een verdeling van de verschillende bodemtypes in het gebied. Het gebied wordt gekenmerkt door een dekzandlaag die welke voor 52% uit een dekzandlaag bestaat en voor 47% uit een dunne gemengde dekzandlaag (Waterschap Vechtstromen, 2020). Hierdoor is de infiltratiecapaciteit van de bodem beperkt, alhoewel water snel kan infiltreren in de dekzandlaag is de klei-leeg onder de dekzandlaag de beperkende factor.



Figuur 16, Fysisch geografische eigenschappen studiegebied

periode van droogte kort is, compleet herstellen. Treden er meerdere periodes van droogte op, dan kan de samenstelling van de vegetatie veranderen en zullen er meer bomen en struiken gaan groeien (Bijlsma, Jansen, Wallis de Vries, & Witte, 2011). Het Hoogveenlandschap beslaat een gebied van 50 hectare en dat is goed voor 6% van het studiegebied.

Dekzandlandschap

Het dekzandlandschap bestaat uit zand dat in het Weichselien in een koude fase van de laatste ijstijd is aangevoerd (Koster, 1992). De dekzandlaag in het studiegebied beslaat een gebied van 229 hectare en neemt daarmee 29% van het studiegebied voor zijn rekening (Waterschap Vechtstromen, 2020). De infiltratiecapaciteit voor deze laag is vrij hoog en dat heeft tot gevolg dat neerslag snel zal infiltreren, waardoor oppervlakkige afstroom minder snel zal optreden (Mangala,

Hoogveen

Hoogveen is een landschapstype dat wordt gekenmerkt door natte- en voedselarme omstandigheden, en is daardoor zeer kwetsbaar voor stikstof (Bijlsma, Jansen, Wallis de Vries, & Witte, 2011). Het hebben van deze kenmerken heeft tot gevolg dat het gebied kwetsbaar is voor wisselende weersomstandigheden.

Klimaatverandering heeft tot gevolg dat de voedselrijkdom van de bodem toe neemt en dus een bedreiging vormt voor het hoogveen (Spek, Kiljan, Moorman, Geertsema, & Steingröver, 2010).

Het Aamsveen, het hoogveen gelegen in het studiegebied, bestaat voornamelijk uit droge-, vochtige heiden en hoogveenbossen. Hoogveenlandschap is gevoelig voor droogte omdat het door neerslag wordt gevoed. De bestendigheid van het hoogveen tegen de droogte is afhankelijk van de intensiteit en duur van de droogte en kan, indien de

Toppo, & Ghoshal, 2016). De grondwaterstand ligt in de hogere dekzandlagen laag, omdat veel water door de ondiepe grondwaterstromen het gebied verlaat (Wassink, 1999).

Rivier- en beekdallandschap

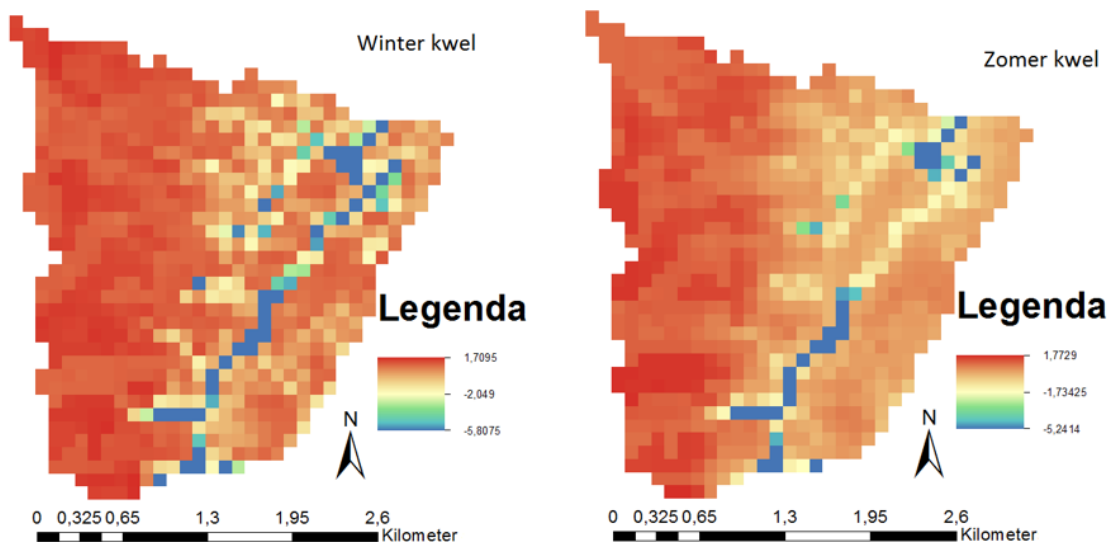
De samenstelling van het beekdallandschap bestaat eveneens uit een laag dekzand die in het Weicheslien is afgezet. Alhoewel de samenstelling van de ondergrond gelijk is, zijn er wel enkele verschillen ten opzichte van de grondwaterstand, de voornaamste reden hiervoor is het reliëf. De grondwaterstand ligt in het beekdal gebied hoger dan in de omliggende hoger gelegen dekzandlandschap (Wassink, 1999). Doordat de bodem voornamelijk uit dekzand bestaat beschikt deze bodem ook over een snelle infiltratie van water in de bodem (Mangala, Toppo, & Ghoshal, 2016).

Stuwwal- en kleileemlandschap

De stuwwal die in het westen van het gebied loopt is niet een stuwwal maar een hoge grondmorene wat inhoudt dat deze opgebouwd is door materiaal wat de gletsjer heeft meegevoerd en in mindere mate door lokaal materiaal (ten Cate, 1979). De bovenkant van deze hoge grondmorene bestaat uit een dekzandlaag. (Waterschap Vechtstromen, 2020) De bovenste laag hiervan wordt gekenmerkt door dekzand en een oud bouwlanddek. In de regio Twente worden de beekdalen begeleid door dekzandruggen (Wassink, 1999) welke een deel uitmaken van de stuwwal / morene. Het landschap, gekarakteriseerd door de stuwwal, neemt met een oppervlak van 383 hectare 47% van het gebied voor zijn rekening (Waterschap Vechtstromen, 2020).

Appendix C

Optredende kwel in het studiegebied. Positief betekent dat er inzijing optreedt, negatief betekent dat er kwel plaatsvindt. De eenheden zijn in mm per dag.



Figuur 17, Kwel in het studiegebied in een winter- en zomersituatie.

Appendix D

Toelichting evapotranspiratie

De evapotranspiratie wordt niet gemeten en zal dus worden berekend met behulp van de gemeten data bij het meetstation Twenthe. Het berekenen van de evapotranspiratie zelf is niet mogelijk, wel is het mogelijk om de referentie-evapotranspiratie te bepalen voor het gebied. De referentie-evapotranspiratie is de snelheid waarmee water in de ondergrond van een specifieke vegetatie kan verdampen (Zotarelli, Dukes, Romero, Migliaccio, & Morgan). De Referentie-evapotranspiratie wordt door de KNMI met behulp van de formule van Makkink bepaald. Internationaal wordt echter de formule van Penman-Monteith als de standaard gezien. Beide formules leveren in de winter geen betrouwbare gegevens op en in de winter wordt de Thom-Oliver formule gebruikt (Schuurmans & Droogers, 2010). De Thom-Oliver formule is gebaseerd op de Penman-Monteith formule.

Makkink

De formule van Makkink wordt sinds 1987 door het KNMI gebruikt voor het bepalen van de referentieverdamping. Deze formule heeft weinig meteorologische invoergegevens en ook een beperkte hoeveelheid empirische gegevens. De meteorologische invoergegevens zijn de globale straling en de temperatuur. Deze formule kan alleen voor de zomerperiode worden gebruikt omdat dan de straling de drijvende kracht is voor de verdamping, wat niet het geval is in de winter (Schuurmans & Droogers, 2010). Hierdoor wordt afgeraden de formule van Makkink voor een winterperiode te gebruiken. De formule van Makkink ziet er als volgt uit:

$$\lambda * \rho * ET_0 = 0.65 * \frac{s}{s + \gamma} * R_s$$

(Schuurmans & Droogers, 2010)

λ = Verdampingswarmte van water [J/Kg]

ρ = Soortelijk gewicht van water [Kg/m³]

ET_0 = Referentie-evapotranspiratie [mm/uur]

s = Helling van de dampspanningscurve [kPa/°C]

γ = Relatie tussen partiële waterdampdruk en de luchttemperatuur [kPa/°C]

R_s = Globalestraling [J/m²/uur]

De uitwerking van de verdere deelformules staat in Appendix E

Penman-Monteith

De Penman-Monteith vergelijking maakt gebruik van de netto straling, temperatuur, wind en luchtvochtigheid. Het gebruik van meerdere factoren in het gebied zorgt ervoor dat de evapotranspiratie goed voor gras kan worden gemodelleerd (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998). Deze formule is aangepast zodat deze in tijdstappen van een uur werkt.

$$ET_0 = \frac{0.408s(R_n - G) + \gamma \frac{37}{T_{hr} + 273} * u_2(e^o(T_{hr}) - e_a)}{s + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

(Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998)

ET_0 = Referentie-evapotranspiratie [mm/uur]

R_n = De netto zonnestraling [MJ/m²/uur]

G = Dichtheid van de warmteflux in de ondergrond [MJ/m²/h]

T_{hr} = Gemiddelde luchttemperatuur per uur [°C]

s = Helling van de dampspanningscurve [kPa/°C]

γ = De relatie tussen partiële waterdampdruk en de luchttemperatuur [kPa/°C]

$e^o(T_{hr})$ = Maximale waterdampdruk voor een gegeven temperatuur [kPa]

e_a = Actuele waterdampdruk [kPa]

u_2 = Gemiddelde windsnelheid per uur op 2 meter hoogte [m/s]

Een aantal parameters uit deze vergelijking zijn hetzelfde als de parameters die voor de vergelijking van Makkink worden gebruikt. Hier wordt niet dezelfde formule voor gebruikt, want het KNMI hanteert andere formules. De T_{hr} is voorhanden bij het KNMI en kan direct worden toegepast voor het bepalen van de referentie evapotranspiratie. De overige parameters zijn bepaald met behulp van de formules in sectie 10.1 en 10.2.

Thom-Oliver

Omdat zowel de Makkink als de Penman-Monteith vergelijking niet toereikend zijn in een winterperiode, wordt er gebruik gemaakt van de Thom-Oliver vergelijking (Schuermans & Droogers, 2010). De Penman-Monteith vergelijking is zodanig aangepast dat de Thom-Oliver vergelijking er als volgt uitziet (de Bruin & Stricker, 2000).

$$\lambda * ET_0 = \frac{s(R_n - G) + m * \gamma(1 + 0.54u_2) * (e^o(T_{hr}) - e_a)}{s + \gamma(1 + n)}$$

(de Bruin & Stricker, 2000)

ET_0 = Referentie-evapotranspiratie [mm/uur]

λ = Verdampingswarmte van water [J/Kg]

s = Helling van de dampspanningscurve [kPa/°C]

m = Factor voor ruwheidslengte [1.2 -]

n = Verhouding tussen de luchtweerstand en de oppervlakteweerstand [1.2 -]

γ = De relatie tussen partiële waterdampdruk en de luchttemperatuur [kPa/°C]

$e^o(T_{hr})$ = Maximale waterdampdruk voor een gegeven temperatuur [kPa]

e_a = Actuele waterdampdruk [kPa]

u_2 = Gemiddelde windsnelheid per uur op 2 meter hoogte [m/s]

Makkink en Penman-Monteith

De Makkink-vergelijking is simpeler, is makkelijker uit te voeren en wordt voor 32 meetstations van het KNMI in Nederland bepaald. De belangrijkste term in de Makkink vergelijking is de straling, bij de Penman-Monteith komt hier ook de aerodynamische term bij (Schuurmans & Droogers, 2010). Het bepalen van de vergelijking die gebruikt wordt voor het model is nodig om de juiste methode te kiezen voor het neerslagafvoerproces.

De constante in de formule van Makkink is bepaald voor het klimaat in de jaren '70 en '80. Met het oog op het huidige klimaat en klimaatverandering is de vraag of deze nog wel toereikend is. De formule van Penman-Monteith is gemaakt voor een referentiegewas. Dit kan worden omgerekend met behulp van vermenigvuldigingsfactoren. Deze vermenigvuldigingsfactoren laten zaken zoals vochtgehalte, hellingshoek en hellingsrichting buiten beschouwing (Schuurmans & Droogers, 2010).

De Thom-Oliver vergelijking wordt gebruikt voor de winterperiode en dus is het nodig de parameters van de Penman-Monteith vergelijking te berekenen. Een bijkomend voordeel is dat de Penman-Monteith vergelijking nauwkeuriger is dan de Makkink vergelijking. De Makkink vergelijking geeft voor niet al te droge dagen een beter resultaat (Droogers, 2009). Deze studie focust op de droge periodes, dus kan niet van dit voordeel van de Makkink vergelijking gebruik gemaakt worden. Over het algemeen geeft de Penman-Monteith vergelijking een betere schatting van de referentieverdamping. Dus wordt de Penman-Monteith vergelijking aanbevolen om te gebruiken boven de Makkink vergelijking (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998).

De Makkink en Penman-Monteith formules werken alleen in de zomerperiode. De drijvende factor voor de verdamping in de zomer is de straling. Dit is niet het geval in de winter waardoor de straling component in mindere mate invloed heeft op de berekening. De fysische basis voor het gebruik van beide formules ontbreekt in de winter (De Bruin, 1988). De verdamping volgens Makkink wordt echter wel door het KNMI verstrekt (Schuurmans & Droogers, 2010).

De specifieke Referentie evapotranspiratie

De referentie evapotranspiratie is de optredende evapotranspiratie voor een grasland in perfecte condities (Irmak & Haman, 2017). Een bebost gebied kent echter een veel grotere evapotranspiratie dan een landbouwgebied (Varma, et al., januari 2009). Om de invloed van het gebied mee te nemen is het nodig de referentie evapotranspiratie om te rekenen. Hiervoor gelden de volgende waarden voor de vergelijking van Makkink (**Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**). Deze gewasfactoren zijn voor Makkink, maar omdat de evapotranspiratie voor hetzelfde referentiegewas is bepaald, een gras, voldoen deze ook voor de evapotranspiratie volgens Penman-Monteith.

	Jansma	Roelsma	toegepast
Grasland	0.7	1.0	1.0
Bouwland	0.6	0.9	0.9
Loofbos		1.2	1.2
Loofbos (met heide)	0.8		1.1
Naaldbos	0.9	1.2	1.2

Tabel 11, Gewasfactoren voor Makkink (Droogers, 2009)

Het studiegebied is een wisselend terrein tussen bouwland, natuur en weidegebied, dus is de referentie evapotranspiratie niet geheel toereikend voor het gehele studiegebied. Het dominante gewas binnen een afwateringseenheid dient als referentie voor de afwateringseenheid, zodat er één gewas per afwateringseenheid wordt doorgerekend. De gewasfactoren of gewas specifieke karakteristieken worden toegepast op de potentiële evapotranspiratie.

$$ET_c = K_c ET_o$$

ET_c = Gewas specifieke evapotranspiratie [mm/uur]

K_c = Gewas specifieke karakteristieken [-]

ET_o = Referentie evapotranspiratie [mm/uur]

De vermenigvuldigingsfactor K_c is afhankelijk van de planthoogte, windsnelheid, vochtigheidsfactor, klimaat en de groeistaat (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998). Bij ieder gewas schommelt de K_c rond de één afhankelijk van de seizoenen en in de groeistaat van het gewas. Maïs is een gewas dat wordt verbouwd in het studiegebied. Afhankelijk van de periode van inzaaien heeft het een wisselende K_c van onder de één de eerste paar maanden, naar boven de één in een verder groeistadium (Droogers, 2009). De evapotranspiratie van een bos is afhankelijk van de compositie en de leeftijd van het bos (United Nations University, 2020).

Appendix E

Dit is een toelichting bij appendix D.

Makkink

De verdampingswarmte is de specifieke hoeveelheid energie die 1 Kg water nodig heeft om te verdampen bij een gegeven temperatuur.

$$\lambda = (2501 - 2.375 * T) * 1000$$

λ = Verdampingswarmte van water [J/Kg]

T = Temperatuur [°C]

De vergelijking die het KNMI gebruikt voor de psychrometrische constante is alleen afhankelijk van de temperatuur. In de formule die door de FAO wordt gebruikt zit ook een hoogtecomponent. Het hoogtecomponent wordt door de KNMI buiten beschouwing gelaten door het geringe reliëf in Nederland.

$$\gamma = 0.0646 + 0.00006 * T$$

γ = Relatie tussen partiële waterdampdruk en de luchttemperatuur [kPa/°C]

T = Temperatuur [°C]

De helling van de dampspanningscurve is temperatuursafhankelijk. Het KNMI gebruikt hier een andere formule dan de FAO. De helling van de dampspanningscurve volgens de vergelijking van het KNMI valt lager uit dan de helling van de dampspanningscurve van de FAO. De vergelijking die door het KNMI voor Makkink wordt gebruikt zal ook voor Makkink worden gebruikt, alhoewel het verschil miniem is.

$$s = \frac{7.5 * 237.3}{(237.3 + T)^2} * \ln(10) * e_s$$

$$e_s = 0.6107 * 10^{\frac{7.5 * T}{237.3 + T}}$$

s = Helling van de dampspanningscurve [kPa/°C]

e_s = Verzadigde dampspanning ten opzichte van water [kPa]

T = Temperatuur [°C]

Penman-Monteith

De s is geheel afhankelijk van de luchttemperatuur, en kent dus voor elke temperatuur vaste waarden. De gemiddelde luchttemperatuur over een uur wordt gebruikt voor het bepalen van de helling van de waterdampdruk curve.

$$s = \frac{4098(0.6108 \exp\left(\frac{17.27T_{hr}}{T_{hr} + 237.3}\right))}{(T_{hr} + 237.3)^2}$$

(Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998)

s = Curve voor relatie tussen temperatuur en de verzadigde water druk [kPa/°C]

T_{hr} = Gemiddelde luchttemperatuur per uur [°C]

De γ (psychrometrische constante) geeft de relatie weer tussen de waterdruk in de lucht en de temperatuur van de lucht. Deze waarde is constant voor elke luchtdruk en wordt dus voornamelijk bepaald door de hoogte van het gebied (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998).

$$\gamma = \frac{C_p P}{\varepsilon \lambda}$$

(Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998)

γ = De relatie tussen partiële waterdampdruk in de lucht en de luchttemperatuur [kPa/°C]

C_p = De benodigde energie om een massa lucht een graad op te warmen [MJ/Kg/°C]

P = Atmosferische druk [kPa]

ε = De ratio tussen het gewicht van waterdamp en droge lucht [-]

λ = De benodigde latente warmte voor de faseverandering van water in waterdamp [MJ/Kg]

De maximale waterdampdruk is de maximale hoeveelheid waterdampdruk die mogelijk is bij een specifieke temperatuur.

$$e^o(T_{hr}) = 0.6108 \text{ EXP} \left(\frac{17.27 T_{hr}}{T_{hr} + 237.3} \right)$$

(Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998)

$e^o(T_{hr})$ = Maximale waterdampdruk voor een gegeven temperatuur [kPa]

T_{hr} = Gemiddelde luchttemperatuur per uur [°C]

De werkelijke waterdampdruk wordt bepaald met de maximale waterdampdruk en de relatieve luchtvochtigheid. De RH_{hr} (luchtvochtigheid) is voorhanden bij het KNMI en kan worden toegepast.

$$e_a = e^o(T_{hr}) \frac{RH_{hr}}{100}$$

(Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998)

e_a = Actuele waterdampdruk [kPa]

RH_{hr} = De luchtvochtigheid [%]

Het KNMI meet de windsnelheden op 10 meter hoogte (Schuurmans & Droogers, 2010), de windsnelheid die in de Penman-Monteith wordt gebruikt is op 2 meter hoogte. Deze windsnelheid kan met de volgende formule worden omgezet.

$$u_2 = u \frac{4.87}{\ln(67.8 * z - 5.42)}$$

u_2 = De gemiddelde windsnelheid op 2 meter hoogte [m/s]

u = De gemiddelde windsnelheid op de gemeten hoogte [m/s]

z = De hoogte van het meetstation boven het maaiveld [m]

De netto zonnestraling is de som van de inkomende kortgolfige- en de uitgaande langgolfige straling. De aarde ontvangt energie door middel van zonnestraling, de straling die het aardoppervlak ontvangt is over het algemeen de kortgolfige straling. Bij het opwarmen van de aarde zendt de

aarde zelf ook straling uit en dat is de kortgolvlige straling (Schuurmans & Droogers, 2010). De inkomende kortgolvlige straling wordt bij dit weerstation door de KNMI gemeten. De netto zonnestraling kan aan de hand van de volgende formule worden bepaald.

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

R_n = De netto zonnestraling [MJ /m²/uur]

R_{ns} = De netto kortgolvlige straling [MJ /m²/uur]

R_{nl} = De netto langgolvlige straling [MJ /m²/uur]

De netto kortgolvlige straling is de som van de inkomende en uitgaande kortgolvlige straling. Een deel van de kortgolvlige straling wordt door de aarde teruggekaatst (Schuurmans & Droogers, 2010). De mate waarin dit gebeurt is afhankelijk van het albedo van het maaiveld. Het albedo is maaiveldafhankelijk en is daarom wordt deze voor het referentiegewas genomen, en is deze 0.23 (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998). De netto kortgolvlige straling kan met behulp van de volgende formule worden bepaald.

$$R_{ns} = (1 - 0.23) * R_s$$

R_{ns} = De netto kortgolvlige straling [MJ /m²/uur]

R_s = De globale straling [MJ /m²/uur]

De globale straling wordt door het KNMI gemeten en is voorhanden

De netto langgolvlige straling wordt niet gemeten in Nederland en is daarom met behulp van de Stefan-Boltzmann wet bepaald. De netto langgolvlige straling is afhankelijk van de temperatuur. Factoren zoals waterdamp, wolken, koolstofdioxide en stof die ook langgolvlige straling uitstralen worden als constante meegenomen in deze berekening (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998).

$$R_{nl} = \sigma * T_{hr,K^4} (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) (1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35)$$

R_{nl} = De netto langgolvlige straling [MJ /m²/uur]

σ = Stefan-Boltzmann constante [2.043 10⁻¹⁰ MJ/ m²/uur]

T_{hr,K^4} = Absolute temperatuur [K⁴]

e_a = Actuele waterdampdruk [kPa]

R_s = De globale straling [MJ /m²/uur]

R_{so} = De onbewolkte globale straling [MJ /m²/uur]

De onbewolkte globale straling wordt niet gemeten en zal met behulp van de extra terrestrische zonnestraling worden bepaald. Hierin worden de troebelheid en waterdampeffecten niet meegenomen (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998).

$$R_{so} = (0.75 + 2 * 10^{-5} * z) R_a$$

R_{so} = De onbewolkte globale straling [MJ /m²/uur]

z = De hoogte van het meetstation boven zeeniveau [m]

R_a = De extra terrestrische straling [MJ /m²/uur]

De extra terrestrische straling is de straling die het aardoppervlak vanuit de ruimte ontvangt. De straling is afhankelijk van de positie van de aarde in haar baan rond de zon en van de seizoenen.

$$R_a = \frac{12(60)}{\pi} G_{sc} * d_r [(\omega_2 - \omega_1) \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) (\sin(\omega_2) - \sin(\omega_1))]$$

R_a = De extra terrestrische straling [MJ /m²/uur]

G_{sc} = De zonneconstante [0.0820 MJ/m²/uur]

d_r = De inverse relatieve afstand tussen de aarde en de zon [-]

φ = De geografische breedte [rad]

δ = De afbuiging van de zonnestraling [rad]

ω_1 = De zonnehoek aan het begin van de periode [rad]

ω_2 = De zonnehoek aan het einde van de periode [rad]

De inverse relatieve afstand tussen de aarde en de zon

$$d_r = 1 + 0.033 * \cos\left(\frac{2\pi}{365} * J\right)$$

d_r = De inverse relatieve afstand tussen de aarde en de zon [-]

J = Het dag nummer in het jaar [-]

De afbuiging van de zonnestraling

$$\delta = 0.409 * \sin\left(\frac{2\pi}{365} * J - 1.39\right)$$

δ = De afbuiging van de zonnestraling [rad]

J = Het dagnummer in het jaar [-]

De geografische breedte per breedtegraad

$$\varphi = \frac{\pi}{180} * \left(52 + \frac{16}{60}\right)$$

φ = De geografische breedte [rad]

De zonnehoek wordt doormiddel van de tijd van het jaar en de geografische ligging bepaald.

$$\omega = \frac{\pi}{12} * ((t + 0.0667(L_z - L_m) + S_c) - 12)$$

ω = Zonnehoek [rad]

t = De tijd in het midden van het uur [-]

L_z = longitude voor het centrum van de tijdzone waarin het meetstation gelegen is [Graden ten oosten van Greenwich]

L_m = Longitude voor het meetpunt [Graden ten oosten van Greenwich]

S_c = De seizoen correctie voor de zonnetijd [uur]

De correctie voor de seizoenen wordt als volgt bepaald

$$S_c = 0.1645 \sin(2b) - 0.1255 \cos(b) - 0.025 \sin(b)$$

$$b = \frac{2\pi(J - 81)}{364}$$

J = Het dag nummer in het jaar [-]

Hiermee kunnen de zonnehoeken aan het begin en einde van de periode worden bepaald

$$\omega_1 = \omega - \frac{\pi}{24}$$

$$\omega_2 = \omega + \frac{\pi}{24}$$

ω_1 = De zonnehoek aan het begin van de periode [rad]

ω_2 = De zonnehoek aan het einde van de periode [rad]

ω = Zonnehoek [rad]

Appendix F

Manning

De maximale afvoer binnen de watergang kan voor iedere watergang worden bepaald met behulp van de vergelijking van Manning. Met deze vergelijking kan het debiet van elke watergang worden berekend. Het debiet van de watergangen wordt gebruikt bij het bepalen van de maximale waterafvoer binnen de watergang.

$$Q = \frac{1}{n} A R_h^{2/3} S_b^{1/2}$$

(Fox, McDonald, Pritchard, & Mitchell, 2016)

Q = De afvoer [m^3/s]

n = De Manning coëfficiënt [$\text{s}/\text{m}^{1/3}$]

A = Oppervlak van de dwarsdoorsnede [m^2]

R_h = Hydraulische radius [-]

S_b = Helling [m/m]

De watergangen worden weergegeven als trapezia. Om het oppervlak van de dwarsdoorsnede voor elke trapezia te berekenen wordt de volgende formule gebruikt.

$$A = y(b + y \cot \alpha)$$

(Fox, McDonald, Pritchard, & Mitchell, 2016)

De hydraulische radius kan met de volgende vergelijking worden berekend. De hydraulische radius van de watergang geeft aan hoe makkelijk water door de watergang stroomt. Het bestaat uit de dwarsdoorsnede van het oppervlak gedeeld door de lengte van de wanden die contact hebben met het water.

$$R_h = \frac{y(b + y \cot \alpha)}{b + \frac{2y}{\sin \alpha}}$$

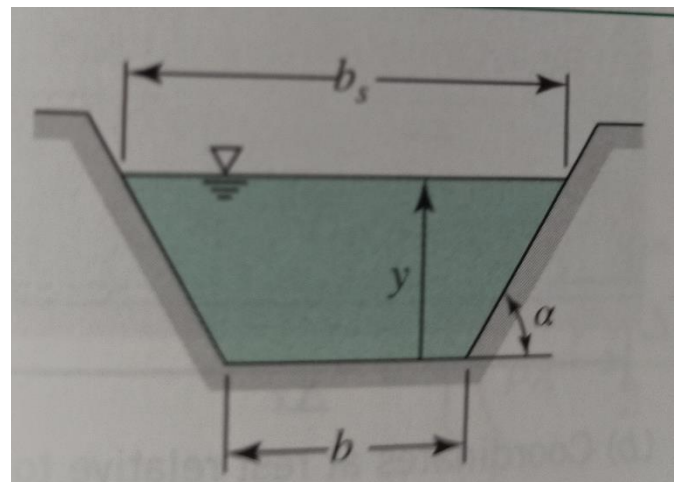
(Fox, McDonald, Pritchard, & Mitchell, 2016)

R_h = Hydraulische radius [-]

y = Slootdiepte [m]

b = Breedte van de bodem [m]

α = Hoek tussen diepte en breedte



Figuur 18, Schematische weergave slootdimensies, (Fox, McDonald, Pritchard, & Mitchell, 2016)

Appendix G

Onderstaande tabel beschrijft de resultaten van de verschillende casussen uitgevoerd voor het bepalen van de individuele invloed van de grondwaterstand, slootdiepte, maximale afvoer en ondergrond. A* is de grootte van de afvoer ten opzichte van de afvoer als het studiegebied als een geheel wordt beschouwd.

deelgebied	A*	1	2	3	4	5
1	-53%	18%	3%	-2%	14%	0%
2	234%	0%	0%	0%	0%	0%
3	-40%	13%	0%	-1%	12%	0%
4	54%	4%	0%	3%	1%	0%
5	-30%	7%	0%	1%	6%	0%
6	-11%	0%	0%	0%	0%	0%
7	-4%	7%	1%	2%	4%	0%
8	-14%	3%	0%	1%	2%	0%
9	9%	0%	0%	0%	0%	0%
10	-19%	3%	0%	0%	0%	4%
11	41%	5%	0%	2%	2%	0%
12	-16%	11%	0%	-1%	7%	4%
13	32%	6%	0%	0%	4%	2%
14	-53%	17%	0%	-2%	15%	0%
15	-22%	4%	1%	1%	3%	0%
16	-35%	0%	0%	0%	0%	0%
17	146%	2%	0%	1%	0%	0%
18	-2%	3%	0%	1%	2%	0%
19	21%	5%	0%	0%	2%	3%
20	31%	4%	0%	1%	3%	1%
21	9%	5%	0%	0%	2%	3%
22	102%	2%	0%	0%	0%	2%
23	12%	9%	0%	0%	5%	4%
24	78%	2%	0%	0%	1%	1%
25	291%	0%	0%	0%	0%	0%
26	-3%	1%	0%	0%	0%	1%
27	-17%	7%	0%	0%	5%	1%
28	236%	1%	0%	0%	0%	0%
29	233%	0%	0%	0%	0%	0%
30	19%	4%	0%	1%	3%	0%
31	50%	5%	0%	0%	4%	0%
32	-53%	5%	0%	1%	4%	0%
33	-51%	1%	1%	0%	0%	0%
34	89%	1%	0%	0%	0%	1%
35	-52%	9%	4%	1%	4%	0%
36	-55%	17%	2%	-3%	15%	0%
37	47%	4%	0%	1%	2%	0%
38	-55%	9%	0%	0%	8%	0%
39	-40%	8%	0%	1%	7%	0%
40	-33%	4%	0%	0%	0%	4%

41	-49%	15%	1%	-2%	14%	0%
42	120%	3%	0%	1%	1%	1%
43	65%	1%	0%	1%	1%	0%
44	-16%	0%	0%	0%	0%	0%
45	400%	0%	0%	0%	0%	0%
46	-12%	0%	0%	0%	0%	0%
47	-33%	7%	0%	1%	6%	0%
gemiddelde	33%	5%	0%	0%	3%	1%

Tabel 12, Resultaten van de casus 1 tot 5