
Waterbalans model: Het bodemvocht van wadi's in stedelijk gebied tijdens perioden van droogte gebaseerd op KNMI'23 klimaatscenario's

Rapport afstudeeronderzoek

CIE5060-09 MSc Thesis

Auteur:

Feyco Gratama - 4481801

Supervisors:

Dr.ir. A.M.J. Coenders & Dr.ir. A.M. Droste
G. ter Mors & P. Maas

9 Januari 2025



Gemeente Amsterdam
Ingenieursbureau

Dankwoord

Geachte lezer,

Voor u ligt de masterthesis 'Waterbalans model: Het bodemvocht van wadi's in stedelijk gebied tijdens perioden van droogte gebaseerd op KNMI'23 klimaatscenario's'. Dit onderzoek vormde de laatste vereiste voor het behalen van mijn master civiele techniek aan de Technische Universiteit Delft. Binnen de civiele techniek heb ik gekozen voor de richting watermanagement, een specialisatie die elke dag actueler wordt in verband met de gevolgen van klimaatverandering.

Ik wil ten eerste mijn begeleider van Ingenieursbureau Amsterdam, Govert ter Mors, bedanken voor zijn intensieve begeleiding gedurende dit onderzoek. Hij nam altijd de tijd om mij te helpen wanneer ik het idee had dat dit nodig was en daarnaast bespraken we meestal nog andere zaken die los stonden van het onderzoek. Verder wil ik ook mijn tweede begeleider van Ingenieursbureau Amsterdam, Peer Maas, bedanken. Ondanks persoonlijke omstandigheden, heeft Peer Maas op de momenten dat hij tijd had voor mij, raadzaam advies gegeven en konden we goed sparren over de theorie achter het onderzoek. In het bijzonder voor het opzetten van het hydrologisch waterbalans model SWAP, wil ik Klaas Metselaar, professor aan universiteit Wageningen (WUR) bedanken voor de online meetings. Ten slotte wil ik mijn begeleiders van de TU Delft, Miriam Coenders en Arjan Droste, bedanken. De maandelijkse meetings op het begin, maar vooral de wekelijkse-meetings daarna, zorgde ervoor dat er progressie in mijn afstudeeronderzoek kwam en gaven ze altijd waardevolle input en feedback.

Het onderzoek liep van februari 2024 tot januari 2025, waarin ik me heb verdiept in hydrologie, klimaat-scenario's en het modelleren van een waterbalans model. Persoonlijk heb ik deze ervaring als zeer leerzaam en plezierig ervaren, en ik zou niet onwelwillend staan tegenover een toekomstige carrière in dit vakgebied.

Feyco Gratama, 9 Januari 2025

Samenvatting

Amsterdam staat voor uitdagingen door vaker voorkomende perioden van droogte zoals in het jaar 2018 en zware regenval tijdens de zomer, die verergerd worden door klimaatverandering. Om de schade te beperken, zijn als oplossing wadi's ontworpen om regenwater van piekbuien op te vangen, vast te houden en te laten infiltreren in de bodem, en daarnaast spelen ze een belangrijke rol in het stedelijk waterbeheer. Dit onderzoek richt zich op de prestaties van wadi's in stedelijk gebied Amsterdam tijdens toekomstige perioden van droogte, gebaseerd op de KNMI'23 klimaatscenario's. Het doel van dit onderzoek is om te bepalen of stedelijke wadi's, met hun kenmerken zoals een heterogene bodemopbouw, in staat zijn om voldoende bodemvocht, ook wel volumetrisch watergehalte, vast te houden om permanente schade aan vegetatie in de wadi te voorkomen. Hierdoor kan het ontwerp van de wadi zoals de bodemopbouw en de samenstelling van vegetatie, worden geoptimaliseerd zodat het ontwerp van wadi's, klimaatadaptatief wordt.

In totaal zijn vier wadi's, gelegen in Amsterdam Zuid en de Rivierenbuurt, gemodelleerd met behulp van het hydrologisch waterbalans model SWAP (Soil, Water, Atmosphere and Plant). De resultaten laten zien dat wadi's met een specifieke bodemopbouw en diverse vegetatie samenstellingen, beter in staat zijn bodemvocht te behouden hoewel onder extreme droogteperioden het volumetrisch watergehalte in sommige gevallen onder kritieke waarden zoals het aanvulpunt (θ_t) zakt. Dit kan leiden tot permanente vegetatieschade, vooral bij oppervlakkig wortelende planten zoals natuurlijk gras.

Een gevoeligheidsanalyse heeft de invloed van bodemfysische parameters aangetoond, zoals het verzadigd vochtgehalte (θ_s) en de waterdoorlatendheid (K_s), en grondwaterstanden om de betrouwbaarheid van de resultaten te valideren. De analyse toont aan dat subtiele veranderingen in bodemparameters, zoals een hogere waterdoorlatendheid of veranderingen in grondwaterniveaus, een significante invloed hebben op het volumetrisch watergehalte (θ_v) in de bodem. Dit benadrukt het belang van het kalibreren en valideren van de modelresultaten in de werkelijkheid door middel van metingen op locatie.

Het onderzoek concludeert dat bij klimaatscenario '2100Hd' met referentie periode 2018, twee gemodelleerde wadi's het volumetrisch watergehalte (θ_v) te lang ononderbroken onder het aanvulpunt (θ_t) komt, waardoor de vegetatietype: natuurlijk gras permanente schade door droogte zal oplopen. Daarentegen kunnen wadi's een effectieve maatregel zijn tegen droogte, maar hun prestaties zijn sterk afhankelijk van ontwerpkeuzes. Het onderzoek benadrukt het belang van een klimaatadaptatief ontwerp, waarbij de resultaten van dit onderzoek richtinggevend kunnen zijn voor het optimaliseren van het ontwerp van wadi's in toekomstige perioden van droogte.

Inhoudsopgave

Dankwoord	i
Samenvatting	ii
Lijst van figuren	v
Lijst van tabellen	xii
1 Introductie	1
1.1 Probleemstelling	1
1.2 Onderzoeksdoel en vragen	6
2 Onderzoeksgebied	7
2.1 Amsterdam	7
2.2 Data	8
2.2.1 Grondwaterstand	8
2.2.2 Bodemopbouw	10
2.2.3 Vegetatie	11
3 Methodologie	13
3.1 Model SWAP	13
3.2 Meteorologische gegevens	14
3.2.1 Klimaatscenario's KNMI	15
3.2.2 Getransformeerde tijdreeksen	17
3.2.3 Evapotranspiratie	18
3.3 Verdamping vegetatie	20
3.3.1 Vegetatie factoren	20
3.3.2 Bladoppervlakte index & worteldiepte	22
3.4 Staringreeks	24
3.5 Waterretentiecurve: pF-curve	26
4 Resultaten	27
4.1 Evaporatie en transpiratie	27
4.2 Bodemvocht wadi Domenico Scarlattilaan	30
4.3 Bodemvocht wadi Europaplein	39
4.4 Bodemvocht wadi Merwedeplein	41
4.5 Bodemvocht wadi Prinses Irenestraat	43
4.6 Vergelijking resultaten	43
4.6.1 Effect grondwaterstanden	43
4.6.2 Effect bodemopbouw	45
4.6.3 Effect vegetatie	47
4.7 Vegetatieschade	48
4.8 Gevoeligheidsanalyse SWAP	52
4.8.1 Aanpassing bodemfysische parameters	53
4.8.2 Aanpassing grondwaterstanden	56
5 Discussie	60
5.1 Discussie onderzoek	60
5.2 Discussie vergelijkbare onderzoeken	61
6 Conclusie & Aanbeveling	63
6.1 Conclusie	63
6.2 Aanbeveling	64

A	Achtergrond informatie	68
A.1	Grondwaterstanden	68
A.2	Bodemopbouwen	69
A.3	Beplantingsontwerpen	70
A.4	Samengestelde vegetatie factor	71
A.5	Bladoppervlakte-index	73
B	Model resultaten	79
B.1	Model resultaten wadi Domenico Scarlattilaan	79
B.2	Model resultaten wadi Europaplein	80
B.3	Model resultaten wadi Merwedeplein	89
B.4	Model resultaten wadi Prinses Irenestraat	98
C	Resultaten gevoeligheidsanalyse	108

Lijst van figuren

1.1	Neerslagtekort van het jaar 2018 in Nederland. (KNMI, 2018a).	1
1.2	Hoog-Nederland (omlijnd gebied) en Laag-Nederland (wit) (Hendriks et al., 2023).	2
1.3	Voorbeeld van doorsnede van een wadi (Groenblauwenetwerken, 2024).	3
1.4	Natuurvriendelijk wadi in de Rivierenbuurt in Amsterdam-Zuid (Weerproof, 2021).	4
1.5	Verdeling van de zones over het bodemprofiel (Hoogvliet et al., 2021).	5
2.1	De locaties van een zestal wadi's in regio Amsterdam. Uiteindelijk zijn vier wadi's gekozen als onderzoekslocatie: Domenico Scarlattilaan, Europaplein, Merwedeplein en Prinses Irenestraat.	8
2.2	Per onderzoekslocatie, de locatie van de wadi en de gebruikte peilbuis.	9
2.3	Doorsnede van gedetailleerde bodemopbouw en samenstelling (Hofman et al., 2024).	10
2.4	Doorsnede van bodemopbouw van wadi in de Domenico Scarlattilaan (Van de Giessen et al., 2019).	11
2.5	Beplantingsplan van wadi in de Domenico Scarlattilaan (Vivaldi) (Van de Giessen et al., 2019).	12
3.1	Het domein van model SWAP (Kroes et al., 2017).	13
3.2	Locatie KNMI-weerstation Schellingwoude, nummer 223 (Bessembinder et al., 2023). De coördinaten van het station zijn: 52.3831°N, 4.9667°E.	15
3.3	Een schematische weergave van de KNMI 2023 klimaatscenario's. De scenario's lopen tot 2100 (Bessembinder et al., 2023).	16
3.4	Kerncijfers KNMI'23 Klimaatscenario's '2050Hd' en '2100Hd' (Bessembinder et al., 2023).	17
3.5	Getransformeerde tijdreeks van klimaatscenario '2100 Hd' in vergelijking met de waarnemingen in het jaar 2018 van de parameter 'temperatuur' (Bessembinder et al., 2023).	18
3.6	De methode die in SWAP wordt gebruikt om de werkelijke transpiratie van de bodem en de bodemverdamping van gedeeltelijk bedekte bodems af te leiden uit referentie-evapotranspiratie (Kroes et al., 2017). De gekozen mogelijkheid voor dit onderzoek, is rood omcirkeld.	19
4.1	Neerslag, potentiële - en werkelijke evaporatie en transpiratie in [mm/jaar] voor de wadi in de Domenico Scarlattilaan. Voor de waarden van evaporatie (E_{pot}) en E_{act} , is alleen de verdamping van de bodem (E_s) meegenomen. De interceptieverdamping (E_i) van vegetatie is meegenomen bij de waarden van de transpiratie (E_t). Dit komt door het gebruik van de natuurlijk vegetatie factoren K_{tot} .	28
4.2	Neerslag, potentiële - en werkelijke evaporatie en transpiratie in [mm/jaar] voor de wadi op het Europaplein. Voor de waarden van evaporatie (E_{pot} en E_{act}), is alleen de verdamping van de bodem (E_s) meegenomen. De interceptieverdamping (E_i) van vegetatie is meegenomen bij de waarden van de transpiratie (E_t). Dit komt door het gebruik van de natuurlijk vegetatie factoren K_{tot} .	28
4.3	Neerslag, potentiële - en werkelijke evaporatie en transpiratie in [mm/jaar] voor de wadi op het Merwedeplein. Voor de waarden van evaporatie (E_{pot} en E_{act}), is alleen de verdamping van de bodem (E_s) meegenomen. De interceptieverdamping (E_i) van vegetatie is meegenomen bij de waarden van de transpiratie (E_t). Dit komt door het gebruik van de natuurlijk vegetatiefactoren K_{tot} .	29
4.4	Neerslag, potentiële - en werkelijke evaporatie en transpiratie in [mm/jaar] voor de wadi in de Prinses Irenestraat. Voor de waarden van evaporatie (E_{pot} en E_{act}), is alleen de verdamping van de bodem (E_s) meegenomen. De interceptieverdamping (E_i) van vegetatie is meegenomen bij de waarden van de transpiratie (E_t). Dit komt door het gebruik van de natuurlijk vegetatie factoren K_{tot} .	29

4.5	Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi in Domenico Scarlattilaan voor het jaar 2017. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2017. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,mix}$ gebruikt.	30
4.6	Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi in Domenico Scarlattilaan voor het jaar 2018. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,mix}$ toegepast.	31
4.7	Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi in Domenico Scarlattilaan voor de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2050Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018 die aangepast zijn met de kerncijfers voor het klimaatscenario '2050Hd'. Voor de vegetatie is de factor $K_{mix,Domenico}$ toegepast.	32
4.8	Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi in Domenico Scarlattilaan voor de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2100Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018 die aangepast zijn met de kerncijfers voor het klimaatscenario '2100Hd'. Voor de vegetatie is de factor $K_{mix,Domenico}$ toegepast.	33
4.9	Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi in Domenico Scarlattilaan voor de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2100Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018 die aangepast zijn met de kerncijfers voor het klimaatscenario '2100Hd'. Voor de vegetatie is de factor $K_{nat,gras}$ toegepast.	34
4.10	Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi in Domenico Scarlattilaan voor de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2100Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018 die aangepast zijn met de kerncijfers voor het klimaatscenario '2100Hd'. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,struikheide}$ toegepast.	35
4.11	Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi in Domenico Scarlattilaan voor de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2100Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018 die aangepast zijn met de kerncijfers voor het klimaatscenario '2100Hd'. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,loofboom}$ toegepast.	36
4.12	In figuur 4.12a, zijn het aantal dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte(θ_v) van de wadi in de Domenico Scarlattilaan onder het aanvulpunt (θ_t) komt. In figuur 4.12b, zijn het aantal dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt (θ_{wp}) komt.	37
4.13	In figuur 4.13a, zijn het aantal opeenvolgende dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte(θ_v) van de wadi in de Domenico Scarlattilaan onder het aanvulpunt (θ_t) komt. In figuur 4.13b, zijn het aantal opeenvolgende dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt (θ_{wp}) komt.	38
4.14	In figuur 4.14a, zijn het aantal opeenvolgende dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte(θ_v) van de wadi op het Europaplein onder het aanvulpunt (θ_t) komt. In figuur 4.14b, zijn het aantal opeenvolgende dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt (θ_{wp}) komt.	40
4.15	In figuur 4.15a, zijn het aantal opeenvolgende dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte(θ_v) van de wadi op het Merwedeplein onder het aanvulpunt (θ_t) komt. In figuur 4.15b, zijn het aantal opeenvolgende dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt (θ_{wp}) komt.	42
4.16	De grondwaterstanden ten opzichte van de wadi in centimeters. Dit is gegeven voor elke wadi voor het jaar 2018 en verwerkt in de vorm van boxplots. De hoeveelheid gemeten grondwaterstanden verschilt per wadi en heeft invloed op de indeling van de boxplots. .	44
4.17	Een vergelijking tussen de wadi op het Europaplein en de wadi in de Prinses Irenestraat. Hier zijn het aantal dagen dat het volumetrisch watergehalte(θ_v) onder het aanvulpunt (θ_t) komt voor beide wadi's gegeven. Door grotendeels het verschil in grondwaterstanden, zijn de waarden van de wadi in de Prinses Irenestraat significant lager dan de waarden van de wadi op het Europaplein.	45

- 4.18 Een vergelijking tussen de wadi in de Domenico Scarlattilaan en de wadi op het Europaplein. Hier zijn het aantal dagen dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het aanvulpunt (θ_t) komt voor beide wadi's gegeven. Door deels het verschil in bodemopbouw, zijn de waarden van de wadi in de Domenico Scarlattilaan significant lager dan de waarden van de wadi op het Europaplein. 46
- 4.19 In deze vergelijking zijn drie scenario's te zien van de wadi op het Europaplein. Alle drie met klimaatscenario '2100Hd' maar van links naar rechts met respectievelijk de vegetatiefactor: $K_{nat.gras}$, $K_{struikheide}$ en $K_{loofboom}$. Hierdoor is de invloed van de vegetatietype duidelijk zichtbaar op het verloop van het bodemvocht gedurende het referentiejaar 2018. 47
- 4.20 Een vergelijking in de potentiële - en werkelijke transpiratie tussen de vier gemodelleerde wadi's. Elke wadi is gemodelleerd met zijn eigen samengestelde vegetatiefactor: K_{mix} in scenario '2100Hd' met referentieperiode 2018. De waarden van de wadi op het Europaplein zijn significant lager dan voor de andere wadi's. Dit komt doordat er geen bomen zoals loofbomen in de wadi zijn geplant. Deze vegetatietype transpireert tussen 3 en 8 [mm/dag] in vergelijking met 2 tot 4 [mm/dag] voor struikheide en 2 tot 5 [mm/dag] voor natuurlijk gras. Dit verklaart de lagere transpiratie waarden voor de wadi op het Europaplein. 48
- 4.21 Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi op het Europaplein voor het groeiseizoen van de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2100Hd'. Het groeiseizoen loopt gemiddeld van begin april tot en met eind september. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{mix, Europaplein}$ toegepast. Het maximaal aantal opeenvolgende dagen dat $\theta_v < \theta_t$ komt voor de diepte -10.5, -20.5 en -30.5 [cm] t.o.v. de wadi, is respectievelijk 92, 92 en 69 dagen. Dit zorgt ervoor dat er permanente schade aan de vegetatietype: natuurlijk gras ontstaat. 50
- 4.22 Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi op het Merwedeplein voor het groeiseizoen van de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2100Hd'. Het groeiseizoen loopt gemiddeld van begin april tot en met eind september. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{mix, Merwedeplein}$ toegepast. Het maximaal aantal opeenvolgende dagen dat $\theta_v < \theta_t$ komt voor de diepte -10.5, -20.5 en -30.5 [cm] t.o.v. de wadi, is respectievelijk 91, 84 en 30 dagen. Dit zorgt ervoor dat de vegetatietype: natuurlijk gras permanente schade oploopt. 51
- 4.23 De waarden van de staven geven het maximaal aantal opeenvolgende dagen aan waarbij $\theta_v < \theta_t$ voor de wadi op het Europaplein met KNMI'23 klimaatscenario '2050Hd' en '2100Hd' voor referentieperiode 2018. Daarnaast voor de wadi op het Merwedeplein met KNMI'23 klimaatscenario '2100Hd' voor referentieperiode 2018. Voor de wadi op het Europaplein is de vegetatiefactor $K_{mix, Europaplein}$ gebruikt en voor de wadi op het Merwedeplein, de vegetatiefactor $K_{mix, Merwedeplein}$. In beide gevallen is de vegetatiefactor, een samenstelling van vegetatietypen. Door een te lange duur van de ononderbroken periode dat $\theta_v < \theta_t$ op diepte -10.5, -20.5 en -30.5 [cm], heeft de vegetatietype: natuurlijk gras te lang droogte stress ervaren waardoor er uiteindelijk permanente schade is ontstaan. Deze periode duurde bij de wadi op het Europaplein, respectievelijk 62 dagen (9 weken) en 69 dagen (10 weken) en bij de wadi op het Merwedeplein 30 dagen (ongeveer 4,5 week). Deze periode viel in het groeiseizoen, die gemiddeld van begin april tot en met eind september loopt. 52
- 4.24 Voor de gevoeligheidsanalyse zijn de bodemfysische parameters van de bodemlaag Staringreeks B01 aangepast naar de bodemfysische parameters van de bodemlaag Staringreeks B02. Dit is per bodemfysische parameter gedaan, zodat de invloed van de bodemfysische parameter duidelijk te zien is in het aantal dagen dat het volumetrisch watergehalte onder een drempelwaarde valt. Dit is voor drie scenario's van de wadi op het Europaplein gedaan, met telkens een verschillende vegetatietype: natuurlijk gras (figuur 4.24a), struikheide (figuur 4.24b) en loofbomen (figuur 4.24c). 55

4.25	Gevoeligheidsanalyse waar de grondwaterstanden met +10 [cm] en -10 [cm] zijn aangepast ten opzichte van de eerste resultaten. In figuur 4.25a, zijn het aantal dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) van de wadi op het Europaplein, onder het aanvulpunt (θ_t) komt. In figuur 4.25b, zijn het aantal maximaal opeenvolgende dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het aanvulpunt ($\theta_t = 0.20 \text{ [cm}^3/\text{cm}^3]$) komt.	57
4.26	Resultaten van de gevoeligheidsanalyse voor de wadi op het Europaplein met klimaat-scenario '2100Hd', met vegetatietype: natuurlijk gras. De waarden geven het aantal maximaal opeenvolgende dagen aan dat $\theta_v < \theta_t$. In verband met de worteldiepte van natuurlijk gras die tot 28 [cm] gaat, ontstaat er pas permanente schade aan de vegetatie als $\theta_v < \theta_t$ op diepte -10.5, -20.5 en -30.5 [cm] minimaal een periode van 28 dagen (4 weken) duurt. Zoals te zien, komt dit bij de scenario's KSAT B02 en BDENS B02 voor.	59
A.1	Grondwaterstanden t.o.v. de wadi in centimeters voor de wadi in de Domenico Scarlattilaan, van het jaar 2018.	68
A.2	Doorsnede van bodemopbouw van wadi op het Europaplein (Van de Giessen and De Heij, 2021).	69
A.3	Doorsnede van bodemopbouw van wadi op het Merwedeplein.	69
A.4	Doorsnede van bodemopbouw van wadi in de Prinses Irenestraat.	70
A.5	Beplantingsplan van wadi op het Europaplein (Van de Giessen and De Heij, 2021).	70
A.6	Beplantingsplan van wadi op het Merwedeplein (Bout, 2021).	71
B.1	Neerslag, potentiële - en werkelijke evapotranspiratie in [mm/jaar] voor de wadi in de Domenico Scarlattilaan. Zoals beschreven in hoofdstuk 3.2.3, bestaat evapotranspiratie (ET) uit verdamping van de bodem (E_s), interceptie van vegetatie (E_i) en transpiratie van vegetatie door wortels (E_t).	79
B.2	Neerslag, potentiële - en werkelijke evapotranspiratie in [mm/jaar] voor de wadi op het Europaplein. Evapotranspiratie (ET) bestaat uit verdamping van de bodem (E_s), interceptie van vegetatie (E_i) en transpiratie van vegetatie door wortels (E_t).	80
B.3	Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi op het Europaplein voor het jaar 2017. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2017. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,mix}$ gebruikt.	81
B.4	Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi op het Europaplein voor het jaar 2018. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,mix}$ toegepast.	82
B.5	Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi op het Europaplein voor het de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2050Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,mix}$ toegepast.	83
B.6	Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi op het Europaplein voor het de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2100Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,mix}$ toegepast.	84
B.7	Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi op het Europaplein voor het de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2100Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,gras}$ toegepast.	85
B.8	Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi op het Europaplein voor het de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2100Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,struikheide}$ toegepast.	86
B.9	Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi op het Europaplein voor het de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2100Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,loofboom}$ toegepast.	87

B.10 In figuur B.10a, zijn het aantal dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte(θ_v) van de wadi op het Europaplein onder het aanvulpunt (θ_t) komt. In figuur B.10b, zijn het aantal dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt (θ_{wp}) komt.	88
B.11 Neerslag, potentiële - en werkelijke evapotranspiratie in [mm/jaar] voor de wadi op het Merwedeplein. Evapotranspiratie (ET) bestaat uit verdamping van de bodem (E_s), interceptie van vegetatie (E_i) en transpiratie van vegetatie door wortels (E_t).	89
B.12 Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi op het Merwedeplein voor het jaar 2017. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2017. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,mix}$ gebruikt.	90
B.13 Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi op het Merwedeplein voor het jaar 2018. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,mix}$ toegepast.	91
B.14 Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi op het Merwedeplein voor het de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2050Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,mix}$ toegepast.	92
B.15 Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi op het Merwedeplein voor het de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2100Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,mix}$ toegepast.	93
B.16 Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi op het Merwedeplein voor het de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2100Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,gras}$ toegepast.	94
B.17 Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi op het Merwedeplein voor het de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2100Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,struikheide}$ toegepast.	95
B.18 Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi op het Merwedeplein voor het de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2100Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,loofboom}$ toegepast.	96
B.19 In figuur B.19a, zijn het aantal dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte(θ_v) van de wadi op het Merwedeplein onder het aanvulpunt (θ_t) komt. In figuur B.19b, zijn het aantal dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt (θ_{wp}) komt.	97
B.20 Neerslag, potentiële - en werkelijke evapotranspiratie in [mm/jaar] voor de wadi in de Prinses Irenestraat. Evapotranspiratie (ET) bestaat uit verdamping van de bodem (E_s), interceptie van vegetatie (E_i) en transpiratie van vegetatie door wortels (E_t).	98
B.21 Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi in de Prinses Irenestraat voor het jaar 2017. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2017. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,mix}$ gebruikt.	99
B.22 Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi in de Prinses Irenestraat voor het jaar 2018. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,mix}$ toegepast.	100
B.23 Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi in de Prinses Irenestraat voor het de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2050Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,mix}$ toegepast.	101
B.24 Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi in de Prinses Irenestraat voor het de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2100Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,mix}$ toegepast.	102

B.25 Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi in de Prinses Irenestraat voor het de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2100Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,gras}$ toegepast.	103
B.26 Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi in de Prinses Irenestraat voor het de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2100Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,struikheide}$ toegepast.	104
B.27 Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi in de Prinses Irenestraat voor het de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2100Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,loofboom}$ toegepast.	105
B.28 In figuur B.28a, zijn het aantal dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte(θ_v) van de wadi in de Prinses Irenestraat onder het aanvulpunt (θ_t) komt. In figuur B.28b, zijn het aantal dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt (θ_{wp}) komt.	106
B.29 In figuur B.29a, zijn het aantal opeenvolgende dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte(θ_v) van de wadi in de Prinses Irenestraat onder het aanvulpunt (θ_t) komt. In figuur B.29b, zijn het aantal opeenvolgende dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt (θ_{wp}) komt.	107
C.1 Voor de gevoeligheidsanalyse, zijn de bodemfysische parameters van de bodemlaag Staringreeks B01 aangepast naar de bodemfysische parameters van de bodemlaag Staringreeks B02. Dit is per bodemfysische parameter gedaan, zodat de invloed van de bodemfysische parameter duidelijk te zien is in het aantal dagen dat het volumetrisch watergehalte onder een drempelwaarde valt. In dit geval is het verwelkingspunt ($\theta_v < 0.08$) gebruikt als drempelwaarde en daarnaast is de vegetatie: natuurlijk gras gebruikt voor de wadi op het Europaplein.	108
C.2 Voor de gevoeligheidsanalyse, zijn de bodemfysische parameters van de bodemlaag Staringreeks B01 aangepast naar de bodemfysische parameters van de bodemlaag Staringreeks B02. Dit is per bodemfysische parameter gedaan, zodat de invloed van de bodemfysische parameter duidelijk te zien is in het aantal dagen dat het volumetrisch watergehalte onder een drempelwaarde valt. In dit geval is het verwelkingspunt ($\theta_v < 0.08$) gebruikt als drempelwaarde en daarnaast is de vegetatie: natuurlijk gras gebruikt voor de wadi op het Europaplein.	109
C.3 Voor de gevoeligheidsanalyse, zijn de bodemfysische parameters van de bodemlaag Staringreeks B01 aangepast naar de bodemfysische parameters van de bodemlaag Staringreeks B02. Dit is per bodemfysische parameter gedaan, zodat de invloed van de bodemfysische parameter duidelijk te zien is in het aantal dagen dat het volumetrisch watergehalte onder een drempelwaarde valt. In dit geval is het verwelkingspunt ($\theta_v < 0.08$) gebruikt als drempelwaarde en daarnaast is de vegetatie: natuurlijk gras gebruikt voor de wadi op het Europaplein.	110
C.4 Voor de gevoeligheidsanalyse, zijn de bodemfysische parameters van de bodemlaag Staringreeks B01 aangepast naar de bodemfysische parameters van de bodemlaag Staringreeks B02. Dit is per bodemfysische parameter gedaan, zodat de invloed van de bodemfysische parameter duidelijk te zien is in het aantal maximaal opeenvolgende dagen dat het volumetrisch watergehalte onder een drempelwaarde valt. In dit geval is het irrigatiepunt ($\theta_v < 0.20$) gebruikt als drempelwaarde en daarnaast is de vegetatie: struikheide gebruikt voor de wadi op het Europaplein.	111
C.5 Voor de gevoeligheidsanalyse, zijn de bodemfysische parameters van de bodemlaag Staringreeks B01 aangepast naar de bodemfysische parameters van de bodemlaag Staringreeks B02. Dit is per bodemfysische parameter gedaan, zodat de invloed van de bodemfysische parameter duidelijk te zien is in het aantal maximaal opeenvolgende dagen dat het volumetrisch watergehalte onder een drempelwaarde valt. In dit geval is het irrigatiepunt ($\theta_v < 0.20$) gebruikt als drempelwaarde en daarnaast is de vegetatie: loofboom gebruikt voor de wadi op het Europaplein.	112

C.6	Voor de gevoeligheidsanalyse, zijn de bodemfysische parameters van de bodemlaag Staringreeks B01 aangepast naar de bodemfysische parameters van de bodemlaag Staringreeks B02. Dit is per bodemfysische parameter gedaan, zodat de invloed van de bodemfysische parameter duidelijk te zien is in het aantal maximaal opeenvolgende dagen dat het volumetrisch watergehalte onder een drempelwaarde valt. In dit geval is het verwelkingspunt ($\theta_v < 0.08$) gebruikt als drempelwaarde en daarnaast is de vegetatie: gras gebruikt voor de wadi op het Europaplein.	113
C.7	Voor de gevoeligheidsanalyse, zijn de bodemfysische parameters van de bodemlaag Staringreeks B01 aangepast naar de bodemfysische parameters van de bodemlaag Staringreeks B02. Dit is per bodemfysische parameter gedaan, zodat de invloed van de bodemfysische parameter duidelijk te zien is in het aantal maximaal opeenvolgende dagen dat het volumetrisch watergehalte onder een drempelwaarde valt. In dit geval is het verwelkingspunt ($\theta_v < 0.08$) gebruikt als drempelwaarde en daarnaast is de vegetatie: struikheide gebruikt voor de wadi op het Europaplein.	114
C.8	Voor de gevoeligheidsanalyse, zijn de bodemfysische parameters van de bodemlaag Staringreeks B01 aangepast naar de bodemfysische parameters van de bodemlaag Staringreeks B02. Dit is per bodemfysische parameter gedaan, zodat de invloed van de bodemfysische parameter duidelijk te zien is in het aantal maximaal opeenvolgende dagen dat het volumetrisch watergehalte onder een drempelwaarde valt. In dit geval is het verwelkingspunt ($\theta_v < 0.08$) gebruikt als drempelwaarde en daarnaast is de vegetatie: loofboom gebruikt voor de wadi op het Europaplein.	115
C.9	Gevoeligheidsanalyse waar de grondwaterstanden met +10 [cm] en -10 [cm] zijn aangepast ten opzichte van de eerste resultaten. In figuur C.9a, zijn het aantal dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte(θ_v) van de wadi op het Europaplein, onder het aanvulpunt (θ_t) komt. In figuur C.9b, zijn het aantal dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt ($\theta_{wp} = 0.08$ [cm ³ /cm ³]) komt.	116
C.10	Gevoeligheidsanalyse waar de grondwaterstanden met +10 [cm] en -10 [cm] zijn aangepast ten opzichte van de eerste resultaten. In figuur C.10a, zijn het aantal maximaal opeenvolgende dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte(θ_v) van de wadi op het Europaplein, onder het aanvulpunt (θ_t) komt. In figuur C.10b, zijn het aantal maximaal opeenvolgende dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt ($\theta_{wp} = 0.08$ [cm ³ /cm ³]) komt.	117
C.11	Gevoeligheidsanalyse waar de grondwaterstanden met +10 [cm] en -10 [cm] zijn aangepast ten opzichte van de eerste resultaten. In figuur C.11a, zijn het aantal dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte(θ_v) van de wadi op het Europaplein, onder het verwelkingspunt ($\theta_{wp} = 0.08$ [cm ³ /cm ³]) komt. In figuur C.11b, zijn het aantal maximaal opeenvolgende dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt ($\theta_{wp} = 0.08$ [cm ³ /cm ³]) komt.	118
C.12	Gevoeligheidsanalyse waar de grondwaterstanden met +10 [cm] en -10 [cm] zijn aangepast ten opzichte van de eerste resultaten. In figuur C.12a, zijn het aantal dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte(θ_v) van de wadi op het Europaplein, onder het aanvulpunt (θ_t) komt. In figuur C.12b, zijn het aantal dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt ($\theta_{wp} = 0.08$ [cm ³ /cm ³]) komt.	119
C.13	Gevoeligheidsanalyse waar de grondwaterstanden met +10 [cm] en -10 [cm] zijn aangepast ten opzichte van de eerste resultaten. In figuur C.13a, zijn het aantal maximaal opeenvolgende dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte(θ_v) van de wadi op het Europaplein, onder het aanvulpunt (θ_t) komt. In figuur C.13b, zijn het aantal maximaal opeenvolgende dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt ($\theta_{wp} = 0.08$ [cm ³ /cm ³]) komt.	120

Lijst van tabellen

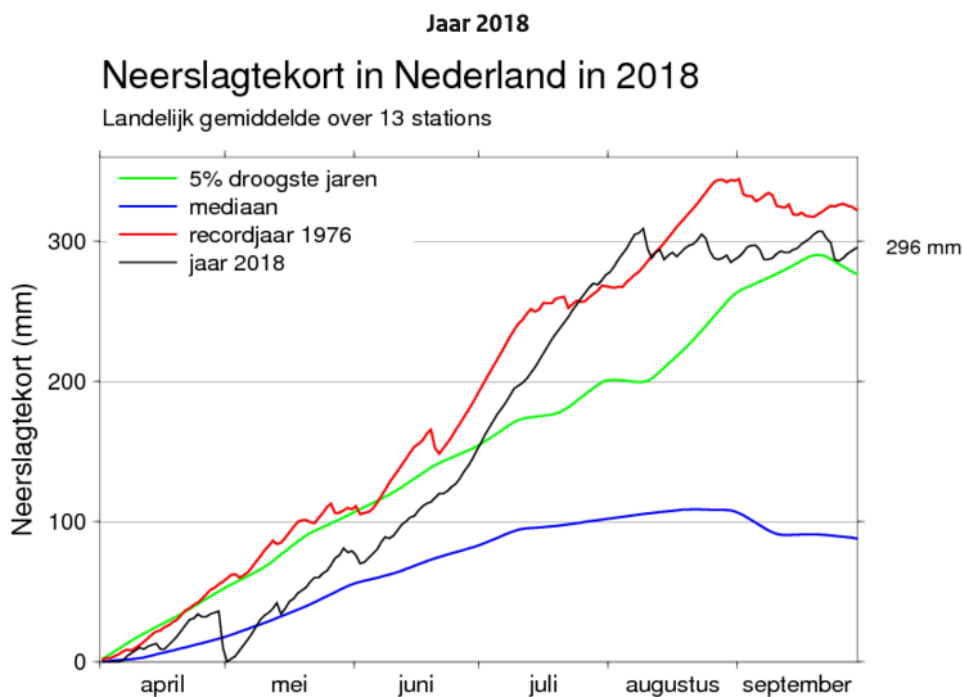
2.1	Overzicht gebruikte actieve peilbuizen per onderzoekslocatie.	9
3.1	K_{tot} voor een referentie grasland en drie vegetatietypen uit het NHI. De hoge waarden in de winter worden veroorzaakt door het aandeel van interceptieverdamping op de totale verdamping.	21
3.2	Samengestelde vegetatie factor $K_{mix,Domenico}$ voor de wadi in de Domenico Scarlatti- aan in verband met de verschillende soorten beplanting.	22
3.3	Bladoppervlakte-index (LAI) voor de natuurlijke vegetatietype: loofboom ($K_{tot,loofboom}$). Het verloop van de bladoppervlakte-index van NHI-vegetatie zijn gebruikt uit het onderzoek van Wageningen University & Research (Dik and Mulder, 2024).	23
3.4	Worteldieptes van de drie natuurlijk vegetatietypen: natuurlijk gras, struikheide en loofbomen. Daarnaast is er per wadi een samengestelde worteldiepte bepaald voor de samengestelde vegetatie ($K_{tot,mix}$). De gekozen worteldieptes van de vegetatie zijn gebaseerd op het rapport van Royal Haskoning (Hulsman et al., 2021).	24
3.5	Veelvoorkomende bodemlagen van wadi's in Amsterdam (Bout, 2021).	25
3.6	Selectie van boven- en ondergronden van de Staringreeks.	25
3.7	Koppeling ontwerp bodemlagen en Staringreeks bodemlagen	25
3.8	Bodemfysische parameters van de corresponderende Staringreeks bodemlagen	26
4.1	Bodemfysische parameters van de bodemlagen 'bomenzand' en 'schimmeldominante humuscompost'	46
4.2	Bodemfysische parameters van de Staringreeks bodemlagen B01 en B02	53
4.3	Voor de gevoeligheidsanalyse zijn de parameters van de eerste bodemlaag (Staringreeks type B01) aangepast naar de parameters van Staringreeks type B02. Dit is apart voor elke bodemfysische parameter gedaan. Als eindresultaat zijn het totaal aantal dagen dat het volumetrisch watergehalte onder het aanvulpunt komt, berekend. Met als reden dat dit een belangrijke drempelwaarde is voor de vegetatie aangezien vanaf dit punt, de vegetatie droogtestress gaat ervaren. Het verschil tussen het eindresultaat met de originele bodemfysische parameter en het eindresultaat met de aangepaste bodemfysische parameter, is in dagen gegeven.	57
4.4	Voor de gevoeligheidsanalyse zijn tevens de grondwaterstanden aangepast. Voor het eerste scenario, zijn de grondwaterstanden met 10 [cm] verhoogd voor het hele jaar. Voor het tweede scenario zijn de grondwaterstanden juist met 10 [cm] verlaagd gedurende het hele jaar. Als eindresultaat zijn wederom het aantal dagen dat het volumetrisch watergehalte onder het aanvulpunt komt gedurende het hele jaar, gebruikt. Met als reden dat dit een belangrijke drempelwaarde is voor de vegetatie aangezien vanaf dit punt, de vegetatie droogtestress gaat ervaren. Het verschil tussen het eindresultaat met de originele bodemfysische parameter en het eindresultaat met de aangepaste bodemfysische parameter, is in dagen gegeven.	58
A.1	Samengestelde vegetatie factor $K_{mix,Europaplein}$ voor de wadi op het Europaplein in verband met de verschillende soorten beplanting.	71
A.2	Samengestelde vegetatie factor $K_{mix,Merwedeplein}$ voor de wadi op het Merwedeplein in verband met de verschillende soorten beplanting.	72
A.3	Samengestelde vegetatie factor $K_{mix,PrinsesIrenestraat}$ voor de wadi in de Prinses Irene- straat in verband met de verschillende soorten beplanting.	72
A.4	Bladoppervlakte-index (LAI) voor de natuurlijk vegetatie: natuurlijk gras ($K_{tot,nat.gras}$). Het verloop van de bladoppervlakte-index van NHI-vegetaties zijn gebruikt uit het onderzoek van Wageningen University & Research (Dik and Mulder, 2024).	73

A.5	Bladoppervlakte-index (LAI) voor de natuurlijk vegetatie: struikheide ($K_{tot, struikheide}$). Het verloop van de bladoppervlakte-index van NHI-vegetaties zijn gebruikt uit het onder- zoek van Wageningen University & Research (Dik and Mulder, 2024).	74
A.6	Bladoppervlakte-index (LAI) voor de samengestelde vegetatie factor: $K_{mix, Domenico}$. . .	75
A.7	Bladoppervlakte-index (LAI) voor de samengestelde vegetatie factor: $K_{mix, Europaplein}$. .	76
A.8	Bladoppervlakte-index (LAI) voor de samengestelde vegetatie factor: $K_{mix, Merwedeplein}$. .	77
A.9	Bladoppervlakte-index (LAI) voor de samengestelde vegetatie factor: $K_{mix, PrinsesIrenestraat}$. .	78

Introductie

1.1. Probleemstelling

In de afgelopen jaren hebben langdurige droge perioden een toenemende bezorgdheid gewekt over de gevolgen van droogte in Nederland. In zowel 2018, 2019, 2020 en 2022 was het langdurig droog. Het jaar 2022 ging de boeken in als zonnigste én droogste jaar sinds vele decennia (Klimaatadaptatie, 2022). Deze meerjarige droogte maakte duidelijk welke negatieve effecten langdurige droogte kan veroorzaken. Vooral in landbouw en natuurgebieden, maar ook in stedelijk gebied traden schades op (Hoogvliet et al., 2021). In de nieuwe KNMI'23 klimaatscenario's, die gebaseerd zijn op het meest recente IPCC-rapport (2021), is dan ook het droogteproblematiek in Nederland en omgeving beter in kaart gebracht en zijn de veranderingen in neerslagextremen in zomerbuien beter onderbouwd (Bessembinder et al., 2023). In droge perioden daalt door het neerslagtekort zowel het bodemvocht als het grondwater op veel locaties in Nederland en ontstaan er watertekorten. In figuur 1.1 is onder andere het neerslagtekort te zien van het droge jaar 2018 in de periode april tot en met oktober. Daarnaast zijn de mediaan en de 5% droogste jaren gegeven die gebaseerd zijn op de periode 1906-2019.



Figuur 1.1: Neerslagtekort van het jaar 2018 in Nederland. (KNMI, 2018a).

De gevolgen van droogte kunnen een negatieve impact hebben op zowel de maatschappij als op het natuurlijke ecosysteem. Droogteschade uit zich in verschillende vormen. Enerzijds is er de direct zichtbare schade zoals het verwelken van vegetatie en anderzijds is er indirecte schade zoals schade aan funderingen en infrastructuur door het dalen van het grondwater (Hoogvliet et al., 2021). Voordat de lange-termijn gevolgen van droogte in kaart zijn gebracht, ging de aandacht vooral uit naar wateroverlast omdat deze klimaatproblematiek directe gevolgen heeft op korte-termijn. Nu de problematiek van droogte steeds zichtbaarder begint te worden, is er afgelopen jaren meer onderzoek gedaan naar droogte.

Nederland kan grofweg worden ingedeeld in twee regio's: de overwegend vrij-afwaterende zandgebieden in Hoog Nederland en de lagere delen van Nederland met veen- en kleibodems in de kustzones en langs de grote rivieren, ook wel Laag-Nederland (Hendriks et al., 2023). De verdeling van Hoog- en Laag-Nederland is weergegeven in figuur 1.2.

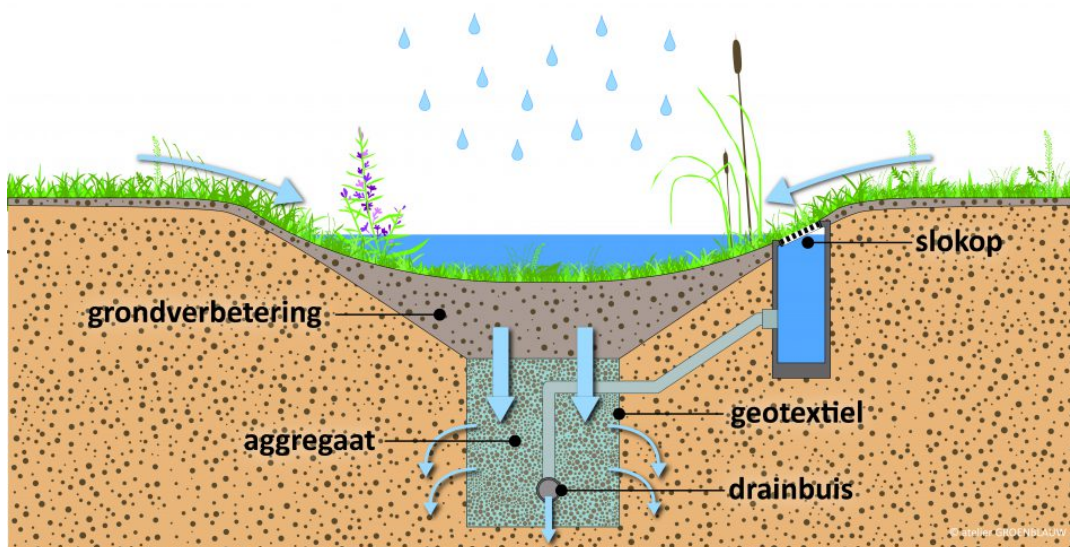


Figuur 1.2: Hoog-Nederland (omlijnd gebied) en Laag-Nederland (wit) (Hendriks et al., 2023)

De gevolgen van droogte zijn verschillend in Hoog-Nederland en in Laag-Nederland. In het landelijk gebied in Hoog-Nederland speelt het uitzakken van het grondwater een grote rol door de zandbodem. Daarentegen blijft de grondwaterstand in stedelijk gebied in Laag-Nederland, juist gemiddeld hoog staan door de veen- en kleibodems. Desondanks heeft de leefomgeving in dit gebied problemen die deels te maken hebben met het niet optimaal functioneren van de bodem. Bovendien is de Metropool-regio Amsterdam een intensief gebruikt stedelijk gebied. Voorbeelden zijn een afnemende kwaliteit van stadsgroen en parken, bodemdaling die schade toebrengt aan gebouwen, bruggen, kaden en wegen, en wateroverlast na hevige regenbuien (Verzandvoort et al., 2020).

In reactie op de groeiende dreiging van droogte worden er in toenemende mate maatregelen genomen om een balans te vinden tussen wateroverschot en watertekort. Een belangrijke strategie is het vasthouden en bergen van water, zodat het beschikbaar is in tijden van droge perioden. In het coalitieakkoord uit 2021 wordt dan ook gesteld dat water en bodem sturend moet zijn bij ruimtelijke planvorming (Hendriks et al., 2023). Maatregelen die genomen kunnen worden tegen droogte zijn bijvoorbeeld infiltratievoorzieningen zoals groenstroken, ondergrondse waterbergingen en wadi's. De laatste infiltratievoorziening is oorspronkelijk een Arabisch woord, maar in Nederland is het een afkorting voor 'Water Afvoer door Drainage en Infiltratie' (Klimaatadaptatie, 2020). Dit zijn essentiële groene infiltratie stroken in het stedelijk waterbeheer, die op een natuurlijke wijze water bergen.

Een wadi fungeert als een natuurlijke buffer tegen droogte en speelt een cruciale rol bij het vasthouden en afvoeren van hemelwater. Vaak worden wadi's geconstrueerd als verlagingen van het maaiveld in groengebieden en wegbermen, waar het hemelwater van het omringende (verharde) oppervlak met flauw talud of via goten naartoe wordt getransporteerd (Mobron, 2020). In figuur 1.3 is een voorbeeld van een mogelijke doorsnede van een wadi gegeven. In de gegeven situatie is de wadi gevuld met regenwater.



Figuur 1.3: Voorbeeld van doorsnede van een wadi (Groenblauwenetwerken, 2024).

Een wadi bestaat meestal uit een toplaag die geschikt is voor de groei van vegetatie waardoor het regenwater uiteindelijk beter kan infiltreren. Deze toplaag bestaat regelmatig uit bodemlagen met organische stof zodat de bodem meer regenwater kan opnemen en vasthouden. In de onderlaag kan een aanvullende berging worden aangebracht waar het water gebufferd wordt en van waaruit het water naar de omringende grond kan infiltreren (Verkade, 2017). Hiervoor wordt goed doorlaatbaar materiaal gebruikt en dit wordt in verschillende vormen toegepast. Vaak zit er infrastructuur onder, aangezien de natuurlijke ondergrond van veen- en kleibodems slecht doorlatend is, zoals infiltratiekratten, granulaatkorrels en drainbuizen. Daarnaast zijn er ook kolken of slokops aan de zijkant die dienen als overstort. Dit is om te voorkomen dat de wadi overstroomt. Als het water zich opbouwt in de wadi en volstroomt, gaat de rest van het water via slokops in een drain en gaat het naar oppervlaktewater, zoals sloten, vijvers of rivieren. Maar het meeste water in de wadi infiltreert naar de ondergrond (Klimaatadaptatie, 2020).

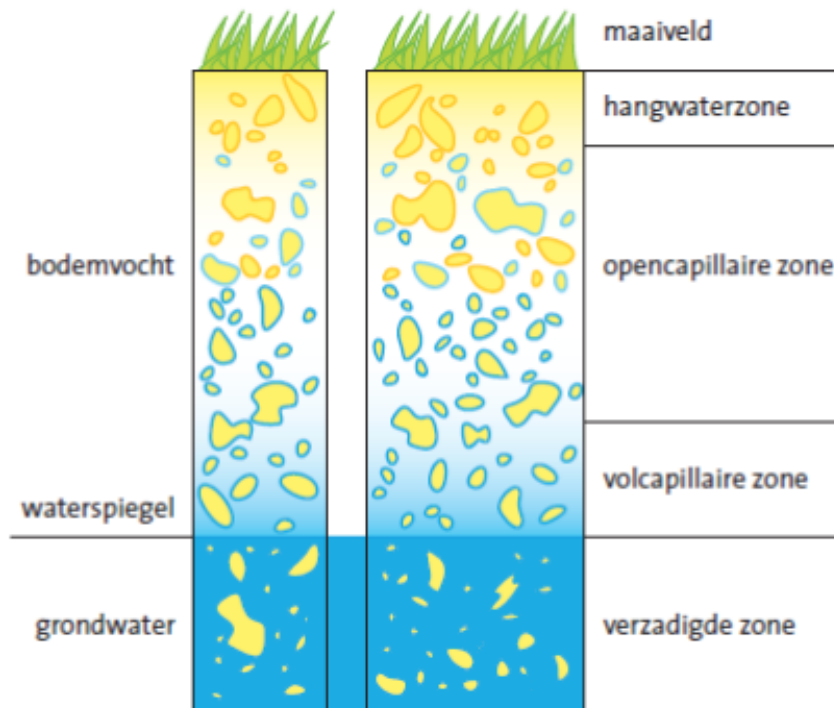
De meeste wadi's worden in stedelijk gebied toegepast en komen in allerlei vormen en maten voor, waardoor ze een flexibele maatregel zijn voor uiteenlopende omstandigheden. Wadi's zagen er in veel gevallen uit als een verdiept gazon of een brede, met gras begroeide greppel. Afgelopen jaren zijn er ook veel beplante wadi's met verschillende soorten vegetatie aangelegd, ook wel natuurvriendelijke wadi's. In figuur 1.4 is een natuurvriendelijke wadi in de Rivierenbuurt in Amsterdam-Zuid gegeven. In deze wadi zijn verschillende soorten vegetatie geplant, die elk hun eigen kenmerken en functies hebben voor de ecologie.



Figuur 1.4: Natuurvriendelijk wadi in de Rivierenbuurt in Amsterdam-Zuid (Weerproof, 2021).

De natuurvriendelijke wadi speelt tevens een rol tegen hittestress. Aangezien vegetatie water verdampt, geeft dit een verkoelende werking voor de omgeving. In stedelijke gebieden wordt het vaak warmer dan in het omliggende buitengebied doordat verharding zoals gebouwen en wegen meer warmte vasthouden. Dit heet ook wel het hitte-eiland effect (UHI). Dit effect neemt verder toe als steden en dorpen steeds meer verstenen (Klimaatadaptatie, 2023). Zo speelt de natuurvriendelijke wadi een grote rol in het tegengaan van de gevolgen van klimaatverandering zoals droogte, wateroverlast én hitte.

Tijdens een periode van droogte, kan er zowel sprake zijn van droogte in bodemvocht als droogte in grondwater. Onder droge omstandigheden vindt er aan het stedelijk oppervlak vooral verdamping door vegetatie plaats, ook wel transpiratie. De hoge luchttemperatuur, zonnestraling en wind zorgen voor een hoge potentiële verdamping (Hoogvliet et al., 2021). Vegetatie haalt haar water voornamelijk uit de onverzadigde zone van de bodem, ook wel bodemvocht. Het water in die zone bestaat voornamelijk uit geïnfiltreerd regenwater dat in de bovengrond is achtergebleven. Dit wordt hangwater genoemd. Het overige water komt uit het grondwater dat via capillaire opstijging de wortels bereikt. Bij capillaire opstijging zuigen de poriën in de bodem zich vol met grondwater. Stijging vindt plaats tot de hoogte waarop de zwaartekracht het wint van de capillaire werking. Door de capillaire nalevering daalt de grondwaterstand en daarmee de capillaire zone. Uiteindelijk kan die zone buiten het bereik van wortels komen te liggen (Hoogvliet et al., 2021). Vanaf het grondwater, begint de verzadigde zone waar alle poriën van de bodem vol zitten met water. Deze zones zijn weergegeven in figuur 1.5 en geven duidelijk aan waar de scheiding ligt tussen bodemvocht en grondwater.



Figuur 1.5: Verdeling van de zones over het bodemprofiel (Hoogvliet et al., 2021).

Vegetatie functioneert optimaal wanneer er zoveel vocht in de bodem voorradig is dat het onbeperkt kan verdampen. Bij een vochttekort en bij hoge temperaturen sluiten de bladeren als noodmaatregel hun huidmondjes om de verdamping en daarmee het fotosynthese proces te remmen. Maar die verdamping kan niet volledig en zonder consequenties worden gestopt. Wanneer het vochttekort te lang duurt, verwelkt de vegetatie uiteindelijk. Bij extreme, langdurige droogte kan daardoor blijvende schade en sterfte optreden (Hoogvliet et al., 2021). Kortom het vochtgehalte van de onverzadigde zone, het totaal van het aanwezige hangwater en het via capillaire werking opgestegen grondwater, is een sleutelfactor in het ontstaan van droogteschade aan groen.

De mate waarin het klimaat zal veranderen, hangt af van de hoeveelheid broeikasgassen die nog zal worden uitgestoten en de gevoeligheid van het klimaatsysteem. In de KNMI'23 klimaatscenario's is ook een 'droog' scenario per uitstootscenario meegenomen. In het 'droog scenario' zullen de winters licht vernatten en de zomers sterk verdrogen (Bessembinder et al., 2023). Als het 'droog' scenario werkelijkheid gaat worden dan wordt de kans op droogteschade van vegetatie alleen maar groter.

Vandaag de dag is de wadi een prominente maatregel tegen droogte, wateroverlast en hitte, en wordt door zowel de Gemeente Amsterdam als Waternet veel toegepast. Aangezien de frequentie van droge perioden steeds groter wordt, is er behoefte aan meer inzicht in de relatie tussen toekomstige droogte en het verloop van bodemvocht in wadi's in het stedelijk gebied van Nederland. Door de kenmerken van wadi's mee te nemen in het onderzoek, zoals de samenstelling van vegetatie die in de wadi is geplant en de heterogene bodemopbouw, kan er een oordeel worden gedaan over de inrichting en functionaliteit van de wadi. Zo kan het ontwerp van de wadi worden geoptimaliseerd zodat het bestendig is tegen klimaatverandering.

1.2. Onderzoeksdoel en vragen

Aangezien vegetatie zijn water voornamelijk uit bodemvocht haalt, wordt de focus gelegd om specifiek naar de onverzadigde zone van de bodem te gaan kijken. Dit in relatie met de wadi in stedelijk gebied als infiltratievoorziening, die als droogte-maatregel wordt toegepast om meer water af te voeren en te bergen in de grond. Met als doel dat er genoeg bodemvocht in de onverzadigde zone is, en de beplanting van de wadi optimaal functioneert en onbeperkt kan verdampen. Om te beoordelen of dit het geval is tijdens perioden van droogte, wordt het bodemvochtgehalte in de onverzadigde zone gesimuleerd aan de hand van de toekomstige KNMI'23-klimaatscenario's. Door rekening te houden met de gevolgen van klimaatverandering zal onder andere het neerslagpatroon in Nederland veranderen, wat resulteert in langere perioden van droogte in de lente en zomer. Op basis hiervan wordt een uitgangspunt geformuleerd voor de toekomstige ontwikkeling van droogte.

Dit onderzoek wordt gebaseerd op een waterbalans model, genaamd SWAP (Soil Water Atmosphere Plant). In het model worden de parameters die invloed hebben op het bodemvocht geïmplementeerd, zoals de meteorologische waarden, de bodemopbouw van de wadi, de samenstelling van de vegetatie en fluctuaties van de grondwaterstanden. Deze factoren zijn cruciaal bij het begrijpen van de capaciteit van wadi's om droogte te weerstaan en hemelwater vast te houden voor gebruik in perioden van droogte. Het doel van het onderzoek is om het bodemvocht van wadi's in Amsterdam in kaart te brengen, met als focus de langdurige perioden van droogte in de toekomst, om schade aan vegetatie te beperken of zelfs te voorkomen. De resultaten kunnen uiteindelijk bijdragen aan het ontwerp van een klimaatadaptieve wadi.

Na het formuleren van het probleem omtrent droogte in stedelijk gebied, is uiteindelijk de volgende onderzoeksvraag naar voren gekomen:

Blijft er voldoende bodemvocht in wadi's beschikbaar in stedelijk gebied tijdens droge perioden gebaseerd op KNMI'23-klimaatscenario's, om permanente schade aan vegetatie te voorkomen?

Deze hoofdvraag wordt door ondersteuning van de volgende deelvragen beantwoord:

1. Wat zijn de verschillen in vegetatie en bodemopbouw tussen de wadi's die als onderzoekslocaties zijn gekozen en wat voor invloed heeft dit op de hydrofysische eigenschappen?
2. Wat is de gevoeligheid van parameters in het model SWAP?
3. Hoe gedraagt het bodemvocht van wadi's zich tijdens droge perioden gebaseerd op lange-termijn klimaatscenario's van het KNMI?

Onderzoeksgebied

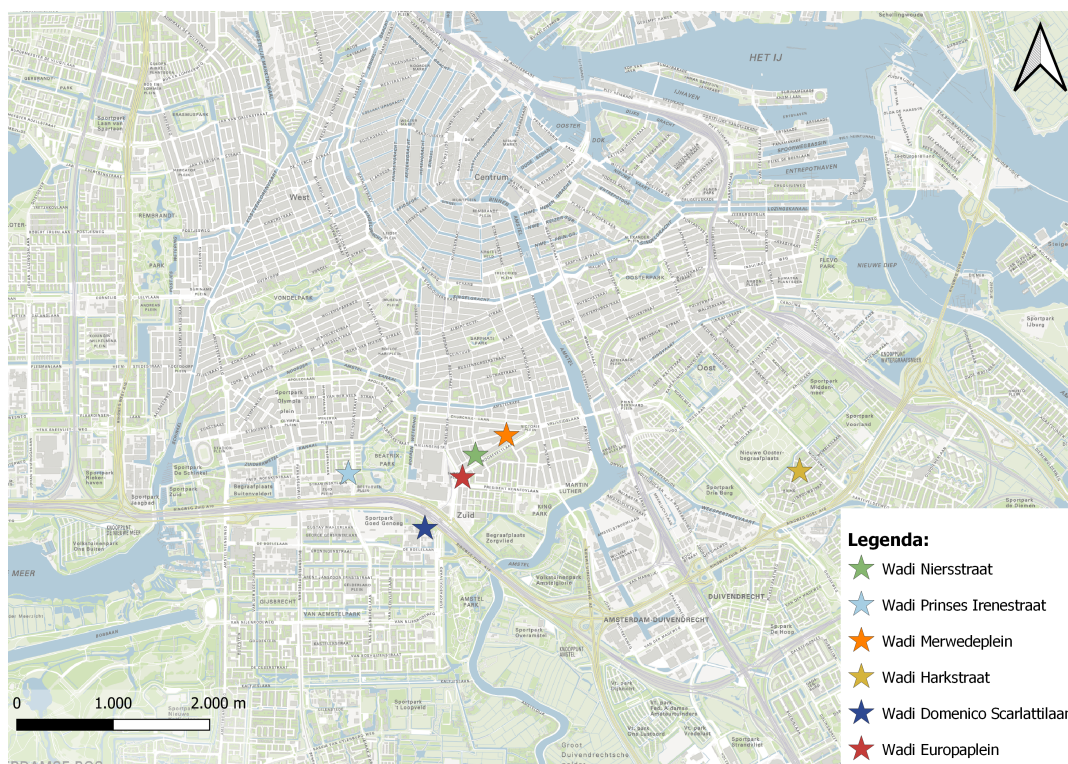
2.1. Amsterdam

Voor dit onderzoek is ervoor gekozen om naar wadi's in stedelijk gebied te kijken, en dan specifiek in de stad Amsterdam. Dit onderzoeksgebied is gekozen aangezien er afgelopen jaren een groot aantal wadi's zijn aangelegd in de stad en Gemeente Amsterdam de behoefte heeft om de functionaliteit van wadi's in kaart te brengen. Daarnaast wil Gemeente Amsterdam nog meer wadi's in de toekomst gaan aanleggen, om zo de stad verder te vergroenen. De focus om het bodemvocht van wadi's te simuleren, is gekomen uit het feit dat dit een cruciale parameter is voor de vegetatie. Tevens blijkt uit literatuurstudies, er een kennishiaat te zijn met betrekking tot bodemvocht in stedelijke gebieden. In het kader van het optimale gebruik van de bodem, probeert Gemeente Amsterdam zoveel mogelijk water te bergen in de ondergrond. Zo wordt de watervoorraad in de bodem gebruikt om perioden van droogte te overbruggen. Door het verloop van bodemvocht te simuleren, kunnen eventuele watertekorten worden opgevangen of droogtebestendige vegetatie worden aangelegd zodat het stedelijk groen niet aan droogte lijdt.

Enkel wadi's die aan onderstaande eisen voldoen zijn meegenomen in dit onderzoek:

- Grondwaterstanden van het droge jaar 2018 door middel van metingen van actieve peilbuizen van Waternet.
- Heterogene bodemopbouw onder de wadi aan de hand van ontwerptekeningen.
- Samenstelling van vegetatietypen in de wadi aan de hand van het beplantingsplan.

Dit is van belang voor de invoergegevens van het model SWAP. Daarnaast is er ook gekeken of de wadi's van elkaar verschillen qua realisatiejaar en locatie. Dit heeft meestal een correlatie met de specifieke bodemopbouw, samenstelling van vegetatietypen en variërende grondwaterstanden. Hier is naar gekeken zodat de dataset, die in het model SWAP wordt toegepast, variërend is en er verschillende resultaten uit het model komen. In figuur 2.1 is het onderzoeksgebied gegeven en de locatie van een zestal wadi's. Uiteindelijk zijn er vier wadi's gekozen als onderzoekslocatie in verband met de beschikbaarheid van informatie over de wadi's.



Figuur 2.1: De locaties van een zestal wadi's in regio Amsterdam. Uiteindelijk zijn vier wadi's gekozen als onderzoekslocatie: Domenico Scarlattilaan, Europaplein, Merwedeplein en Prinses Irenestraat.

2.2. Data

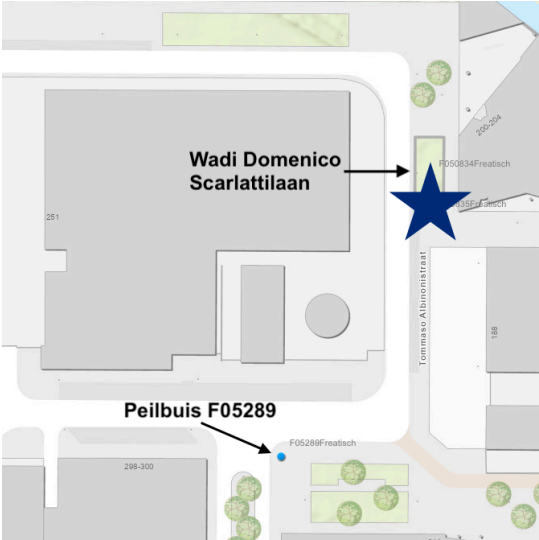
2.2.1. Grondwaterstand

Het eerste onderdeel van de data, zijn de grondwaterstanden van de onderzoekslocaties. Vegetatie haalt zijn water voornamelijk uit de onverzadigde zone en dit bestaat grotendeels uit geïnfiltreerd regenwater dat in de bovengrond is achtergebleven maar ook uit grondwater dat via capillaire werking de wortels van de vegetatie bereikt. Bij capillaire opstijging zuigen de poriën in de bodem zich vol met grondwater (Hoogvliet et al., 2021). Hierdoor heeft de grondwaterstand invloed heeft op het bodemvocht en is deze parameter van belang voor het modelleren van het bodemvocht.

In Amsterdam heeft Waternet een peilbuizen meetnet voor het freatisch grondwater. Deze peilbuizen geven dagelijks een meting van de grondwaterstand in de bovenste bodemlaag of ophooglaag op +/- 0-4 m. onder het maaiveld, oftewel de straathoogte. Per wadi zijn de volgende gegevens meegenomen: locatie van de wadi, wanneer de wadi is gerealiseerd, welke peilbuis er voor de grondwaterstanden gebruikt is, welke jaren de peilbuis metingen heeft gedaan van de grondwaterstanden en de coördinaten van de peilbuizen. Om dit schematisch weer te geven, is er in tabel 2.1 een overzicht te zien van de onderzoekslocaties. Daarnaast is in figuur 2.2 is er voor elke onderzoekslocatie, de wadi met de gebruikte peilbuis aangegeven.

Tabel 2.1: Overzicht gebruikte actieve peilbuizen per onderzoekslocatie.

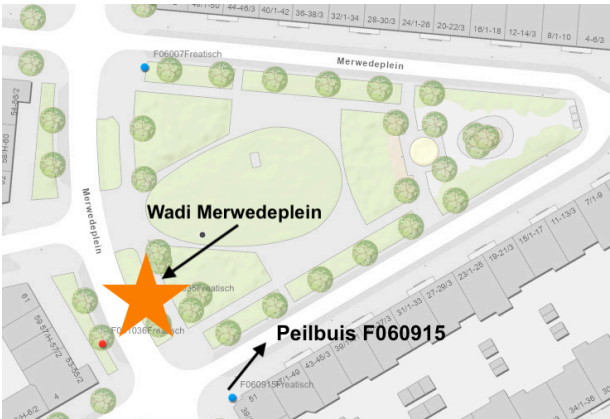
Locatie	Realisatiejaar	Peilbuis	Actieve peilbuis metingen	Coördinaten peilbuis
Domenico Scarlattilaan, Amsterdam Zuid	2022	F05289 Freatisch	2012 - 2024	x-coördinaat: 120925 y-coördinaat: 483244
Europaplein, Rivierenbuurt	2022	F06084 Freatisch	1980 - 2024	x-coördinaat: 121343 y-coördinaat: 483905
Merwedeplein, Rivierenbuurt	2021	F06007 Freatisch	1980 - 2024	x-coördinaat: 121829 y-coördinaat: 484251
Prinses Irenestraat, Amsterdam Zuid	2020	F05296 Freatisch	2013 - 2024	x-coördinaat: 120055 y-coördinaat: 483878



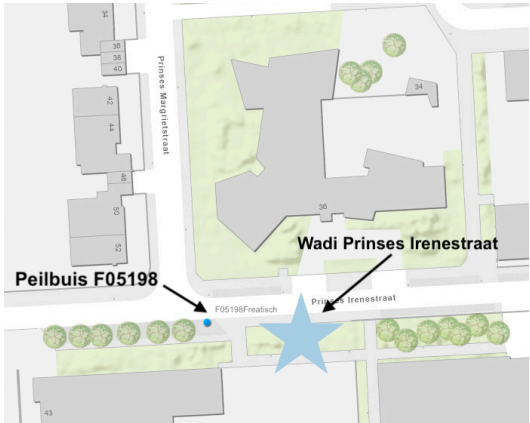
(a) Locatie van de wadi in de Domenico Scarlattilaan en de gebruikte peilbuis voor de grondwaterstanden (Waternet, 2024).



(b) Locatie van de wadi op het Europaplein en de gebruikte peilbuis voor de grondwaterstanden (Waternet, 2024).



(c) Locatie van de wadi op het Merwedeplein en de gebruikte peilbuis voor de grondwaterstanden (Waternet, 2024).



(d) Locatie van de wadi in de Prinses Irenestraat en de gebruikte peilbuis voor de grondwaterstanden (Waternet, 2024).

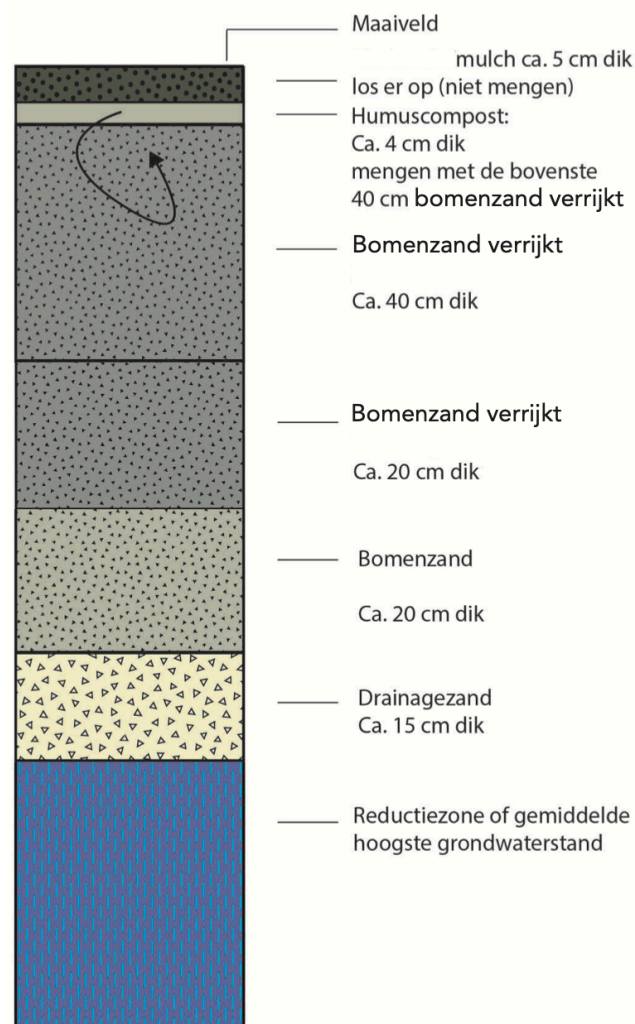
Figuur 2.2: Per onderzoekslocatie, de locatie van de wadi en de gebruikte peilbuis.

Aangezien de focus van het onderzoek op droogte is gelegd, is ervoor gekozen om te kijken naar het droge jaar 2018. Dit is dan ook de periode waar de grondwaterstanden van beschikbaar moeten zijn. Van de hierboven vier gegeven wadi's, worden deze grondwaterstanden uiteindelijk meegenomen in het model SWAP. In bijlage A zijn voor elke onderzoekslocatie, de grondwaterstanden van het jaar 2018 gegeven.

2.2.2. Bodemopbouw

Gemeente Amsterdam heeft in de bovenste laag van de wadi een grondverbetering toegepast. De grond is zo bewerkt, dat het water goed in de bodem kan zakken. De bodemopbouw van een wadi is een belangrijk aspect, aangezien dit invloed heeft op factoren zoals de infiltratiecapaciteit en het waterbergend vermogen. De infiltratiecapaciteit geeft aan met welke snelheid het regenwater in de bodem kan infiltreren. Het waterbergend vermogen geeft daarentegen aan hoeveel water de grond kan vasthouden voordat het verder doorsijpelt naar het grondwater.

De bodem van een wadi heeft een heterogene opbouw en bestaat dus uit verschillende bodemlagen. Voor de gekozen wadi's zijn verschillende bodemopbouwen gebruikt maar grotendeels komen ze met elkaar overeen. De bodemopbouw van een wadi is dan ook meegenomen in het Handboek Groen van Gemeente Amsterdam. Dit is een uitwerking van het Beleidskader Puccinimethode, waar beleidsmatige principes en de beste voorbeelden uit Amsterdam vertaald zijn naar best practice plantlijsten, technische details, voorschriften, eigenschappen en voorbeelden van hoe beplanting toe te passen (Hofman et al., 2024). Hier is een voorbeeld van een samenstelling van een bodemopbouw voor een wadi in detail gegeven. In figuur 2.3 is de bodemopbouw uit het Handboek Groen (Hofman et al., 2024) weergegeven.

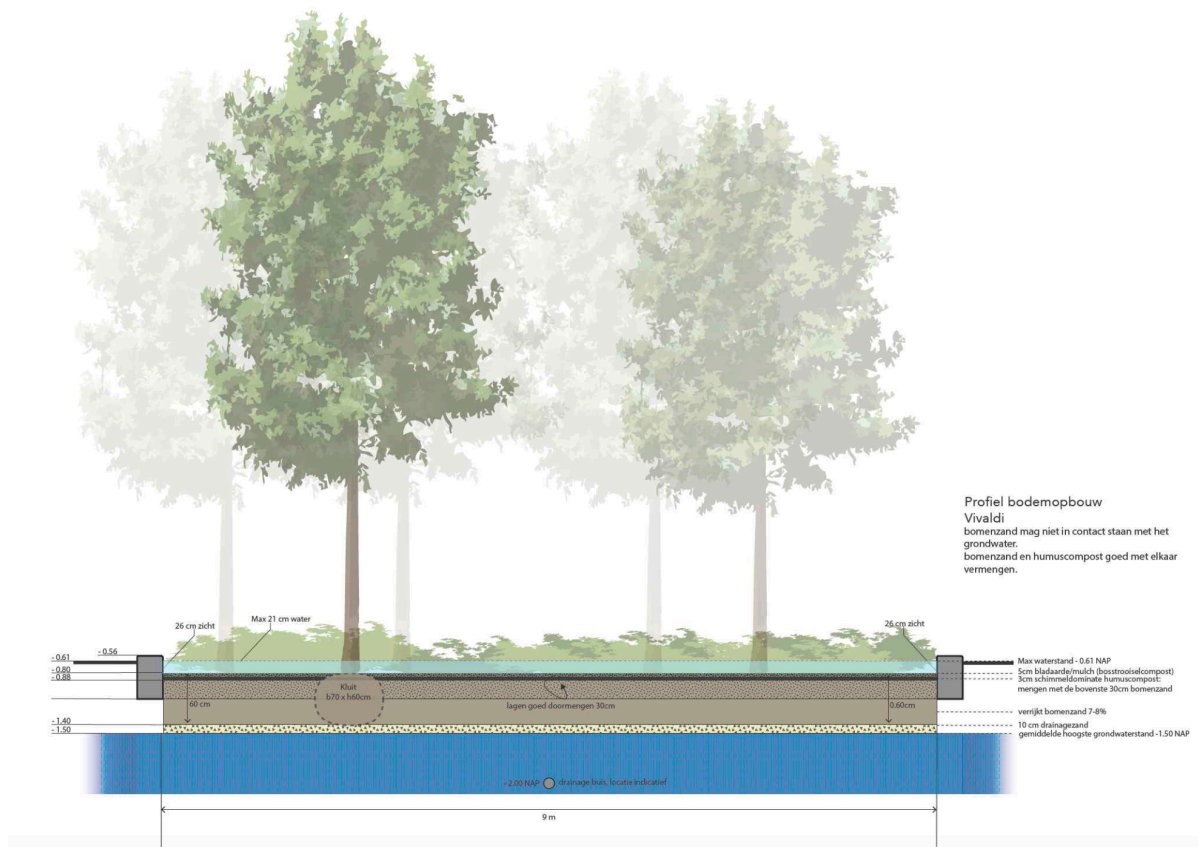


Figuur 2.3: Doorsnede van gedetailleerde bodemopbouw en samenstelling (Hofman et al., 2024).

In figuur 2.3 is te zien dat de bodemopbouw vaak uit de volgende samenstelling bestaat: (schimmeldo-

minante) humuscompost, verrijkt bomenzand en drainage zand. Deze opbouw is samengesteld zodat er een rijke toplaag wordt gecreëerd en dit garandeert een goede ontwikkeling van vaste planten en grassen. Om ervoor te zorgen dat het bomenzand niet in contact staat met het grondwater, wordt er een bufferlaag van drainagezand aangebracht tussen onderzijde grondverbetering en reductiezone (Hofman et al., 2024). De reductiezone bestaat in Amsterdam uit ophoogzand omdat de bovenste en dus jongste laag niet natuurlijk ontstaan is, maar regelmatig wordt aangevuld om te zorgen dat de stad niet wegzakt (Amsterdam, 2023).

In figuur 2.4 is de doorsnede van de bodemopbouw gegeven. Deze bodemopbouw bestaat uit vier heterogene bodemlagen.



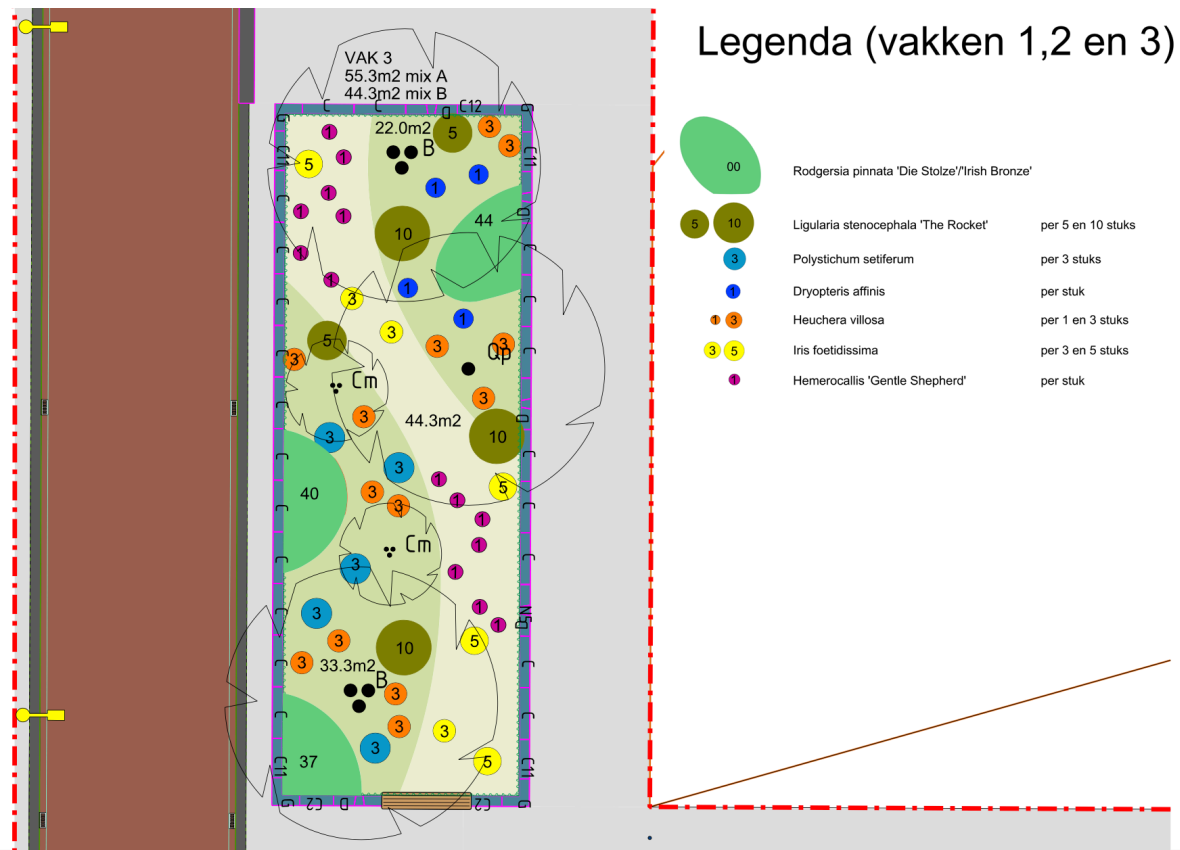
Figuur 2.4: Doorsnede van bodemopbouw van wadi in de Domenico Scarlattilaan (Van de Giessen et al., 2019).

In vergelijking met de gewenste bodemopbouw van Handboek Groen (figuur 2.3), is de bodemopbouw van de wadi in de Domenico Scarlattilaan (figuur 2.4) zo goed als hetzelfde. De bodemopbouwen van de overige drie wadi's die als onderzoekslocaties zijn gebruikt, zijn gegeven in de bijlage A.

2.2.3. Vegetatie

Het laatste onderdeel van de data, is de samenstelling van vegetatietypen in de wadi. Vegetatie heeft invloed op de verdamping van regenwater in de vorm van zowel transpiratie als interceptie van regenwater. Daarnaast heeft vegetatie een positieve invloed op de infiltratiecapaciteit van de bodem (Zhang et al., 2019). Dit positieve effect komt door de wortels van de vegetatie, waardoor er macroporiën in de bodem ontstaan. Door de macroporiën is de totale porositeit van de bodem groter en daarnaast stroomt het water vele malen sneller door deze macroporiën dan door het originele bodemmateriaal. Bij vegetatie met penwortels en wortels die verder in de grond reiken, is dit positieve effect het grootst (Xie et al., 2020). Dit voordeel is ook van toepassing wanneer er meer bodemleven in de grond aanwezig is maar hier wordt niet verder op ingegaan in dit onderzoek.

De vegetatietype die in de wadi wordt aangelegd, moet daarnaast bestand zijn tegen zowel langdurige droogte als tegen langere natte periodes. In het Handboek Groen is er ook per vegetatietype: bomen, heesters, bosplantsoen, kruidachtigen en gras, aangegeven welk sortiment er is voor wadi's. Bovendien wordt hier aangegeven welke typen bestendig zijn tegen droogte of juist nattere perioden (Hofman et al., 2024). In figuur A.5 is de samenstelling van vegetatietypen gegeven voor de wadi in de Domenico Scarlattilaan.



Figuur 2.5: Beplantingsplan van wadi in de Domenico Scarlattilaan (Vivaldi) (Van de Giessen et al., 2019).

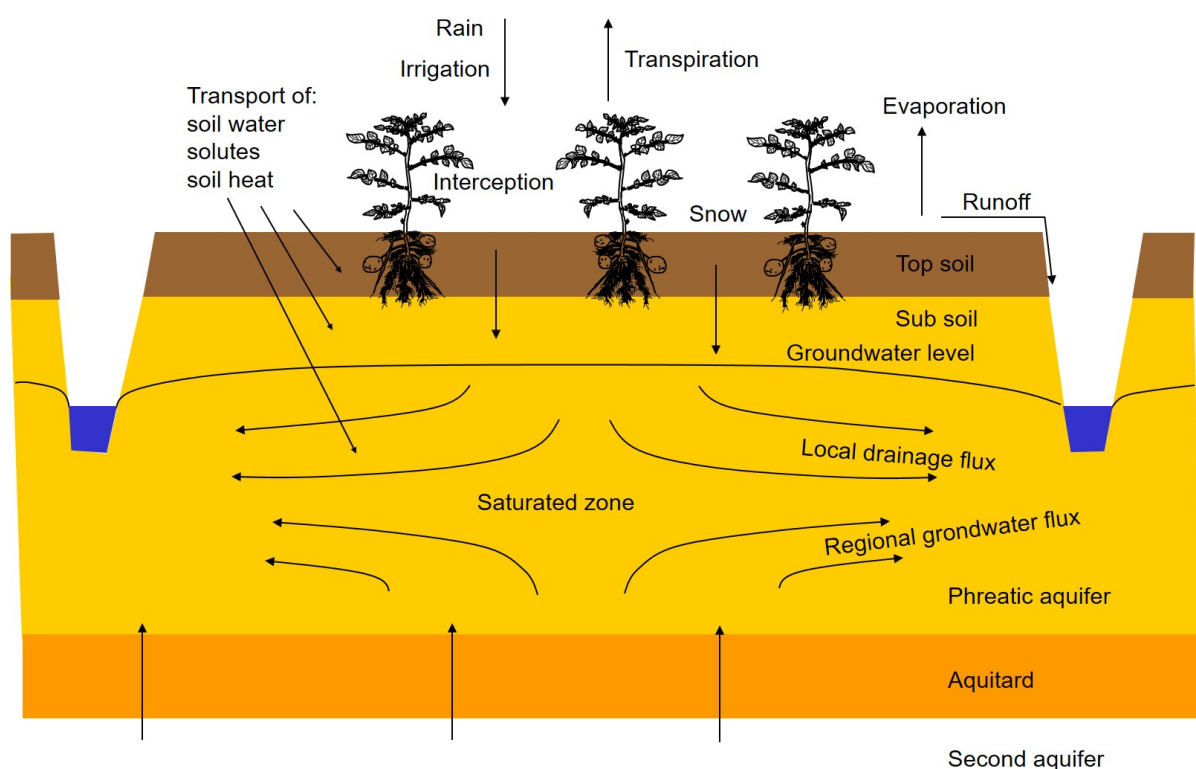
De verschillende vegetatietypen worden uiteindelijk in categorieën opgedeeld. Vervolgens worden per wadi deze categorieën in percentages meegenomen in het model zodat de verschillende vegetatietypen, vertaald kunnen worden in waarden (vegetatie factoren). Dit wordt in hoofdstuk 3.3.1 verder toegelicht.

3

Methodologie

3.1. Model SWAP

Om het bodemvocht van de wadi's te modelleren, is het waterbalans model SWAP (Soil Water Atmosphere and Plant) van Wageningen University & Research gebruikt. SWAP is een bodemhydrologisch model die "het transport van water, opgeloste stoffen en warmte in de onverzadigde zone en verzadigde zone simuleren, in interactie met de ontwikkeling van vegetatie" (Kroes et al., 2017). Het model SWAP beschouwt het domein van vlak boven de kroon van de vegetatie tot aan een vlak in het bovenste grondwater. De processen in dit domein zijn dominant verticaal gericht, vandaar dat SWAP primair een één-dimensionaal model is. In SWAP is het daarnaast mogelijk om afvoer naar drains, sloten en overige oppervlaktewateren na te bootsen, waardoor SWAP ook op perceelschaal kan worden toegepast. In figuur 3.1 is het domein visueel weergegeven:



Figuur 3.1: Het domein van model SWAP (Kroes et al., 2017).

De verdampingsvraag van de atmosfeer wordt berekend met de FAO'56 Penman-Monteith methode en wordt verdeeld over transpiratie van vegetatie en verdamping van het bodemoppervlak. Dit is afhankelijk van de bedekkingsgraad van de vegetatie en de interceptie. Met interceptie wordt het opvangen van een deel van de neerslag door het bladoppervlak van de vegetatie bedoeld waardoor het regenwater niet (direct) het bodemoppervlak bereikt. SWAP berekent de actuele transpiratie, die beïnvloed wordt door droogte-, zuurstof- en zoutstress, en afhankelijk is van de wortelverdeling. De actuele bodemverdamping wordt bepaald door de bodemfysische eigenschappen, evenals de infiltratie van neerslag. Regenwater dat niet tijdig infiltreert, leidt tot tijdelijke plasvorming op het land en, bij overschrijding van een drempelwaarde, tot oppervlakkige afvoer.

De beweging van water in de bodem wordt beschreven door de vergelijking van Richards (Richard, 1931). Voor het gebruik van deze vergelijking, moet van elke bodemlaag de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken bekend zijn. Dit behoort bovendien tot de bodemfysische eigenschappen van de bodemlagen. Hiervoor worden de relaties die zijn beschreven door de theorie van Mualem (Mualem, 1976), in combinatie met de methode van Van Genuchten (Van Genuchten, 1980) gebruikt. Gezamenlijk zijn dit de functies van Mualem-Van Genuchten. Deze methode wordt toegelicht in hoofdstuk 3.4. De ondergrens van de bodemkolom wordt bepaald door een opgelegde drukhoogte (h), bijvoorbeeld een grondwaterstand, een opgelegde waterflux (q) zoals kwel of wegzijging, of een combinatie hiervan. De combinatie is de zogenaamde q - h -relatie.

Vervolgens wordt in SWAP de gewasgroei met een statisch of met een dynamisch gewasmodel gesimuleerd. Bij een dynamisch gewasmodel is de modellering van wateropname door het gewas en de invloed van droogte-, zuurstof- en zoutstress, een belangrijk component. Wanneer de transpiratie vermindert, heeft dit directe consequenties voor de gewasgroei. De berekende transpiratiereductie wordt daarom doorgegeven aan het gewasgroeimodel als invoerparameter. Bij dynamische gewasgroeimodellen wordt de potentiële dagelijkse groei aangepast op basis van de mate van transpiratiereductie, wat resulteert in een berekening van de werkelijke groei. In statische gewasgroeimodellen daarentegen, wordt de gewasontwikkeling vooraf vastgelegd en wordt de actuele groei niet gesimuleerd. Hierdoor heeft de transpiratiereductie geen invloed op de watervraag van het gewas.

3.2. Meteorologische gegevens

De eerste invoergegevens zijn de meteorologische gegevens. De waarden van de parameters temperatuur, zonnestraling, relatieve vochtigheid, windsnelheid en neerslag zijn gebruikt van een KNMI-weerstation. Het KNMI heeft drie weerstations in de omgeving van Amsterdam maar uiteindelijk zijn de waarden van het KNMI-weerstation Schellingwoude (#223) gebruikt, aangezien dit het dichtstbijzijnde KNMI-weerstation voor Amsterdam is. In figuur 3.2 is de locatie van het KNMI-weerstation Schellingwoude te zien. De afstand van dit weerstation tot aan de locatie van de wadi in de Domenico Scarlattilaan, is 7.45 [km].



Figuur 3.2: Locatie KNMI-weerstation Schellingwoude, nummer 223 (Bessembinder et al., 2023). De coördinaten van het station zijn: 52.3831°N, 4.9667°E.

Met als doel om het bodemvocht van wadi's in Amsterdam tijdens de langdurige perioden van droogte in de toekomst in kaart te brengen, zijn er KNMI'23 klimaatscenario's geselecteerd als uitgangspunt. Ten eerste worden de geselecteerde KNMI'23 klimaatscenario's van het KNMI beschreven, zodat het concreet is welke exacte meteorologische gegevens in het model SWAP zijn geïmplementeerd. De bijbehorende kengetallen van de KNMI'23 klimaatscenario's geven een duidelijk beeld hoe de meteorologische gegevens veranderen per klimaatscenario.

3.2.1. Klimaatscenario's KNMI

Wadi's die heden ten dage worden aangelegd, moeten tevens functioneren in toekomstige scenario's en met name onder de omstandigheden van de langere perioden van droogte waar we in Nederland mee te maken gaan krijgen. Met dit als gegeven, is het relevant welke KNMI'23- klimaatscenario's als uitgangspunt worden gekozen voor het onderzoek. De KNMI'23-klimaatscenario's zijn gebaseerd op de laatste inzichten en vervangen de klimaatscenario's uit 2014. Deze scenario's zijn een vertaling van de wereldwijde klimaatprojecties van het IPCC, het klimaatpanel van de Verenigde Naties, naar Nederland. De vier nieuwe scenario's schetsen hoe het toekomstige klimaat in Nederland eruit kan zien. Ze vormen de basis voor onderzoek naar de effecten van klimaatverandering en adaptatie aan die verandering (Bessembinder et al., 2023).

Het KNMI heeft vier nieuwe scenario's voor klimaatverandering rond 2050 en 2100 in Nederland gepresenteerd. De scenario's zijn gebaseerd op de hoeveelheid uitstoot van broeikasgassen en daarmee de wereldwijde opwarming. Daarnaast geeft het de mate van neerslagverandering aan in Nederland. In de vier scenario's, wordt er onderscheid gemaakt tussen een hoog en een laag scenario. De mate waarin ons klimaat namelijk zal veranderen hangt sterk af van de hoeveelheid broeikasgassen die nog worden uitgestoten:

- In het hoge uitstootscenario neemt de uitstoot tot 2080 sterk toe en vakt daarna af. De mondiale opwarming rond 2100 zal dan ongeveer 4,9°C zijn (ten opzichte van eind negentiende eeuw) (Bessembinder et al., 2023).

- In het lage uitstootscenario wordt de uitstoot snel verminderd, in lijn met het Klimaatakkoord van Parijs om de mondiale opwarming tot ruim onder de 2°C te beperken. De mondiale opwarming rond 2100 zal dan ongeveer 1,7°C zijn (Bessembinder et al., 2023).

Ten tweede is er ook een 'nat' en een 'droog' scenario ontwikkeld aangezien de toekomstige opwarming hoe dan ook betekent dat de Nederlandse zomers droger en de winters natter worden. Voor de mate waarin, geven klimaatmodellen verschillende uitkomsten (Bessembinder et al., 2023). Om die te laten zien heeft het KNMI per uitstootscenario de volgende twee varianten:

- Een 'nat' scenario waarin de winters sterk vernatten en de zomers licht verdrogen.
- Een 'droog' scenario waarin de winters licht vernatten en de zomers sterk verdrogen.

De vier KNMI'23 klimaatscenario's zijn weergegeven in figuur 3.3 door middel van een overzicht en beschrijft per klimaatscenario de kenmerken. Hierdoor is het concreet wat de verschillen tussen de scenario's zijn:



Figuur 3.3: Een schematische weergave van de KNMI 2023 klimaatscenario's. De scenario's lopen tot 2100 (Bessembinder et al., 2023).

In verband met de focus op langdurige perioden van droogte, is er één klimaatscenario met het 'droog' scenario geselecteerd, voor het jaar 2050 en voor het jaar 2100, als uitgangspunt. Bovendien zijn de gevolgen van droogte onderbelicht in vergelijking met de klimaatproblematieken wateroverlast, hitte en overstromingsgevaar. Om te bekijken of de wadi's goed presteren tijdens extreme omstandigheden, is het eerste scenario dat wordt meegenomen het scenario 'Hoge uitstoot, droog in 2100 (2100Hd)'. In dit scenario is er sprake van een zeer sterke toename in droogte. De kerncijfers van dit scenario worden toegepast op de meteorologische gegevens van het KNMI-weerstation Schellingwoude zodat de droogte kan worden gemodelleerd voor een lange-termijn scenario.

Om vervolgens een goed beeld te krijgen van hoe het bodemvocht zich in wadi's gedraagt in minder extreme omstandigheden, is er als tweede scenario gekozen om het scenario 'Hoge uitstoot, droog in 2050 (2050 Hd)' te kiezen. Dit is ten eerste een minder extreem scenario in vergelijking met scenario '2100 Hd' en daarnaast is het een scenario dat meer in de levensduur valt van de wadi's die afgelopen

jaren zijn aangelegd en de wadi's die komende jaren worden ontworpen. Deze twee scenario's verschillen dan ook in kerncijfers qua neerslag en verdamping, maar dit geeft juist een duidelijk beeld van het spectrum waar een wadi voor ontworpen moet worden.

De klimaatscenario's '2050 Hd' en '2100 Hd' kunnen worden weergegeven in kerncijfers. Hierdoor is het duidelijk te zien hoe de parameters zoals neerslag, zonnestraling, windsnelheid en temperatuur worden aangepast voor deze potentiële toekomstige scenario's. Als referentieperiode voor de KNMI'23-klimaatscenario's, wordt de periode 1991 - 2020 gebruikt aangezien de klimaatscenario's laten zien hoe het klimaat van Nederland verder zou kunnen veranderen. Hier worden perioden van 30 jaar rond enkele specifieke jaren in de toekomst voor gebruikt. Voor onder andere de jaren 2050 en 2100, berekent het KNMI de gemiddelden en extremen. In de volgende figuur zijn de kerncijfers voor het landelijk gemiddelde van de scenario's '2050 Hd' en '2100 Hd' weergegeven:

Seizoen	Variabele	Indicator	Klimatologie 1991-2020	2050 Hd	2100 Hd
Wereldwijde temperatuurstijging ten opzichte van 1991-2020				1,5°C	4,0°C
Wereldwijde temperatuurstijging ten opzichte van 1850-1900				2,4°C	4,9°C
Jaar	Temperatuur	gemiddelde	10,5°C	+1,6°C	+4,4°C
		gemiddeld dagmaximum	14,1°C	+1,6°C	+4,3°C
		gemiddeld dagminimum	6,9°C	+1,6°C	+4,5°C
	Neerslag	gemiddelde hoeveelheid	851 mm	-2%	-3%
		10-daagse neerslagsom die eens in de 10 jaar wordt overschreden	127 mm ³	0%	+8%
	Vochtigheid	gemiddelde relatieve vochtigheid ²	82%	-1%	-1%
	Zonnestraling	gemiddelde	120 W/m ²	+5,4 W/m ²	+7,1 W/m ²
	Wind	gemiddelde windsnelheid	4,8 m/s	0,0 m/s	-0,1 m/s

Figuur 3.4: Kerncijfers KNMI'23 Klimaatscenario's '2050Hd' en '2100Hd' (Bessembinder et al., 2023).

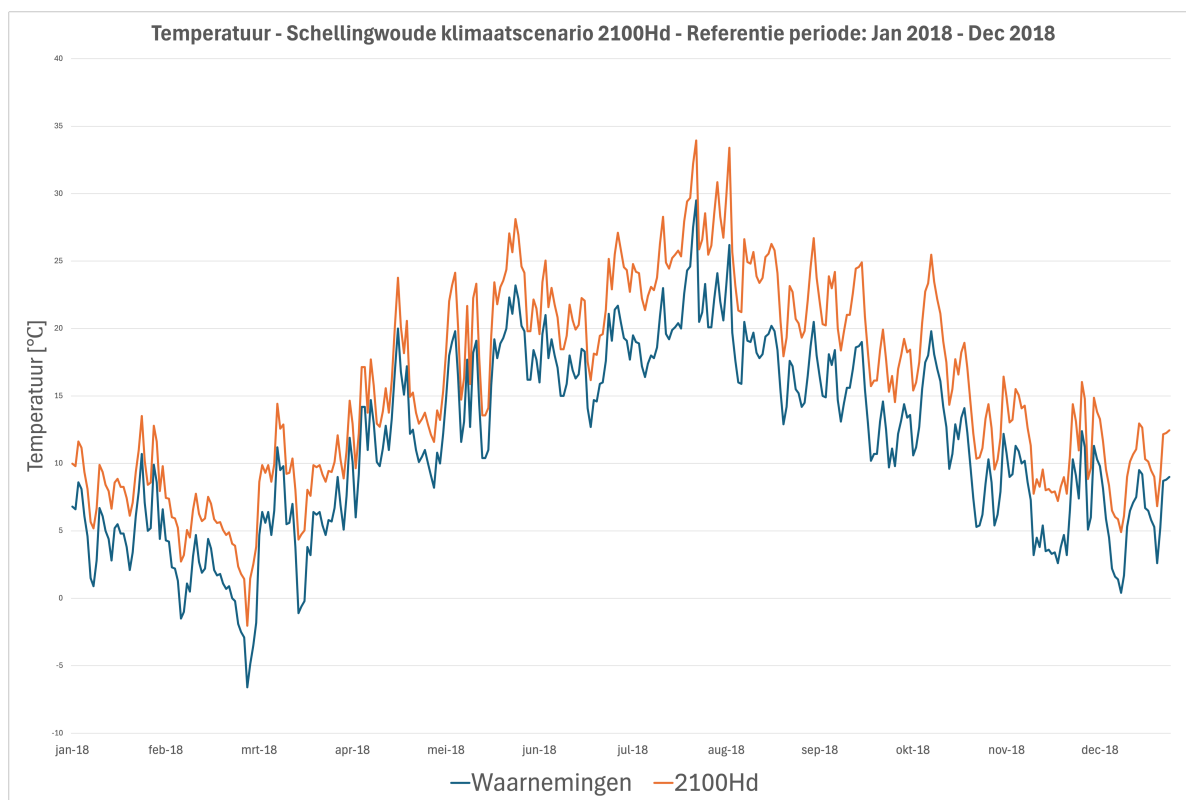
Om een waterbalans model te maken van de wadi's voor een toekomstig scenario, worden er getransformeerde tijdreeksen van de geselecteerde KNMI'23-klimaatscenario's gemaakt. Deze tijdreeksen zijn gemaakt met de meteorologische waarden van het KNMI-weerstation Schellingwoude in Noord-Holland. Deze toekomstige meteorologische waarden worden in de volgende paragraaf beschreven en zijn uiteindelijk in het model geïmplementeerd.

3.2.2. Getransformeerde tijdreeksen

Nu het KNMI'23 klimaatscenario '2050 Hd' en '2100 Hd' als uitgangspunten zijn gekozen, is het mogelijk om van de meteorologische parameters, getransformeerde tijdreeksen te maken zodat deze data gebruikt kan worden als input parameters in het model SWAP. Bij de getransformeerde tijdreeksen, worden de kerncijfers van het KNMI toegepast op de referentieperiode 1991 - 2020. Aangezien voor dit onderzoek naar het droge jaar van 2018 wordt gekeken, zijn de kerncijfers van het KNMI op de waarnemingen van het jaar 2018 toegepast. Van de meteorologische parameters, is het van belang om getransformeerde tijdreeksen te maken zodat de waarden zijn aangepast aan de toekomstige klimaatscenario's van het KNMI. De volgende parameters worden meegenomen op dagelijkse basis voor het berekenen van de referentie evapotranspiratie (hoofdstuk 3.2.3). De gegeven eenheden zijn van toepassing voor het model SWAP:

- Zonnestraling [$\text{kJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$]
- Maximale temperatuur op 2 meter hoogte [$^{\circ}\text{C}$]
- Minimale temperatuur op 2 meter hoogte [$^{\circ}\text{C}$]
- Relatieve vochtigheid [%]
- Windsnelheid op 2 meter hoogte [m s^{-1}]
- Neerslag [mm d^{-1}]

Van alle bovenstaande parameters zijn getransformeerde tijdreeksen gemaakt. In figuur 3.5 is de getransformeerde tijdreeks te zien van de parameter 'temperatuur' zodat het verschil tussen de waarnemingen in het jaar 2018 en het klimaatscenario '2100 Hd' duidelijk zichtbaar is.



Figuur 3.5: Getransformeerde tijdreeks van klimaatscenario '2100 Hd' in vergelijking met de waarnemingen in het jaar 2018 van de parameter 'temperatuur' (Bessembinder et al., 2023).

Om een getransformeerde tijdreeks te maken van de referentie-evapotranspiratie, moet eerst worden bepaald met welke methode deze parameter wordt berekend. In de volgende paragraaf wordt toegelicht uit welke onderdelen evapotranspiratie bestaat en met welke methode en bijbehorende stappen, de referentie-evapotranspiratie, de potentiële evapotranspiratie en uiteindelijk de actuele evapotranspiratie is berekend.

3.2.3. Evapotranspiratie

De term evapotranspiratie (*ET*) wordt gebruikt om twee processen van waterverlies van het landoppervlak naar de atmosfeer te beschrijven: evaporatie en transpiratie. Evaporatie wordt onderverdeeld in interceptie door vegetatie en verdamping van de bodem, en is het proces waarbij (regen)water wordt omgezet in waterdamp. Transpiratie betreft de verdamping van planten door wortels, gevolgd door het verlies van water in dampvorm via de huidmondjes (stomata) van de bladeren.

Verdamping en transpiratie vinden gelijktijdig plaats en beide processen zijn afhankelijk van zonnestraaling, luchttemperatuur, relatieve luchtvochtigheid en windsnelheid (Zotarelli et al., 2010). De snelheid van transpiratie wordt ook beïnvloed door vegetatie eigenschappen en omgevingsfactoren. Verschillende plantensoorten kunnen verschillende transpiratie snelheden hebben. Niet alleen het type vegetatie, maar ook de ontwikkeling van de vegetatie en de omgeving dienen in overweging te worden genomen bij het beoordelen van transpiratie. Bijvoorbeeld, wanneer de vegetatie klein is, gaat het waterverlies voornamelijk via bodemverdamping, omdat slechts een klein deel van het bodemoppervlak door de plant bedekt is. Zodra de vegetatie echter goed ontwikkeld is en de bodem volledig bedekt, wordt transpiratie het belangrijkste proces (Allen et al., 1998).

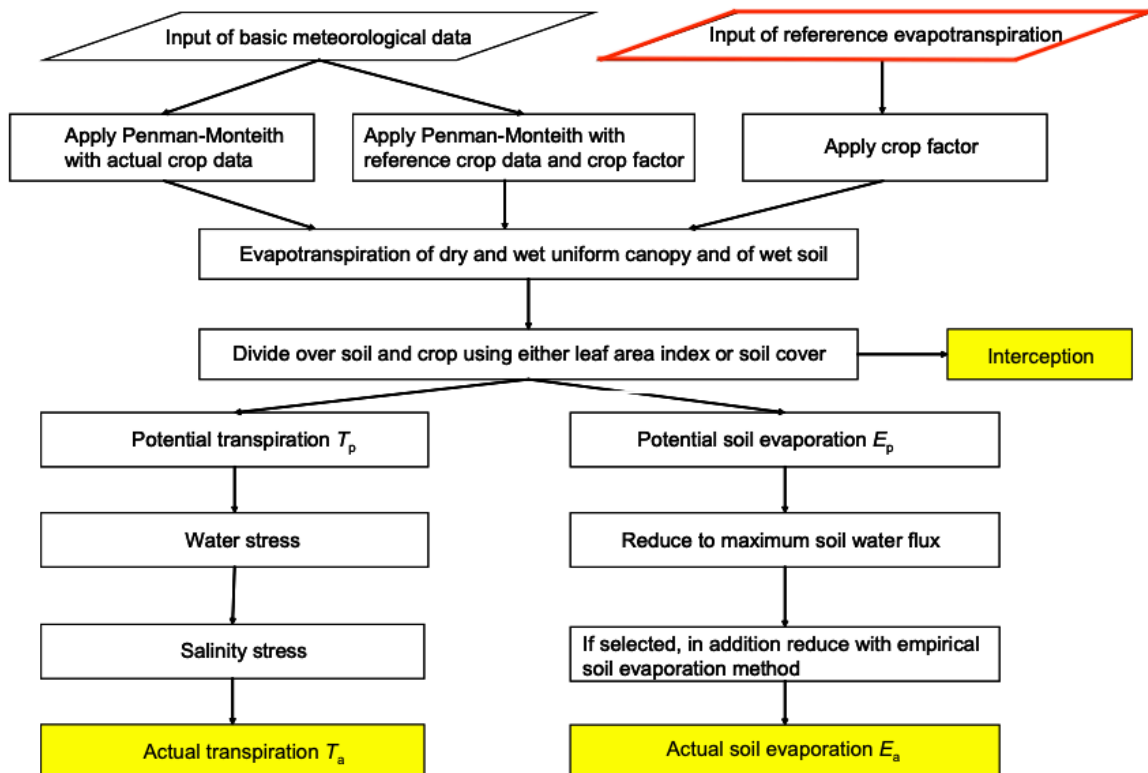
In de afgelopen 60 jaar zijn een groot aantal empirische methoden ontwikkeld om evapotranspiratie te berekenen op basis van verschillende klimaat variabelen. Eén van deze empirische methoden, is de bekende Penman-Monteith vergelijking, welke voor dagelijkse waarden kan worden uitgedrukt. Een

bijgewerkte vergelijking werd aanbevolen door de 'Food and Agriculture Organization' (FAO) (Allen et al., 1998) met de FAO Penman-Monteith-vergelijking, waarbij de Penman-Monteith vergelijking werd vereenvoudigd door het gebruik van enkele veronderstelde constante parameters voor een referentie-gewas bestaande uit kort gemaaid gras. Hierbij wordt aangenomen dat het referentie-gewas een hypothetisch gewas is met een gewashoogte van 0.12 [m], een vaste oppervlakte weerstand van 70 [s m⁻¹], en een albedo waarde van 0.23 [-]. De FAO'56 Penman-Monteith vergelijking ziet er als volgt uit:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34u_2)} \quad (3.1)$$

Waarbij $ET_0 = E_0 * T_0$ = referentie-evapotranspiratie [mm d⁻¹], Δ = helling van de dampdruk-curve [kPa °C⁻¹], R_n = netto straling aan het gewasoppervlak [MJ m⁻² d⁻¹], G = bodemwarmte stroomdichtheid [MJ m⁻² d⁻¹], γ = psychrometrische constante [kPa °C⁻¹] (De psychrometrische constante wordt gebruikt om met behulp van een psychrometer de relatieve luchtvochtigheid vast te stellen (Roest, 2014).), T = gemiddelde dagelijkse luchttemperatuur op 2 meter hoogte [°C], u_2 = windsnelheid op 2 meter hoogte [m s⁻¹], e_s = verzadigde dampdruk [kPa] [°C], e_a = werkelijke dampdruk [kPa].

Nu de FAO Penman-Monteith methode is toegepast om de referentie-evapotranspiratie te berekenen, moet vervolgens de potentiële evapotranspiratie berekend worden. In het model SWAP zijn er twee mogelijkheden om de potentiële evapotranspiratie te berekenen, die uiteindelijk tot de actuele evapotranspiratie leiden. In figuur 3.6 is te zien dat mogelijkheid 1: input van basis meteorologische data ('input of basic meteorological data') is en mogelijkheid 2: input van referentie-evapotranspiratie ('input of reference evapotranspiration'). In figuur 3.6 zijn de twee mogelijkheden met bijbehorende vervolgstappen weergegeven.



Figuur 3.6: De methode die in SWAP wordt gebruikt om de werkelijke transpiratie van de bodem en de bodemverdamping van gedeeltelijk bedekte bodems af te leiden uit referentie-evapotranspiratie (Kroes et al., 2017). De gekozen mogelijkheid voor dit onderzoek, is rood omcirkeld.

Aangezien de hierboven beschreven FAO Penman-Monteith methode is gebruikt, is ervoor gekozen voor de tweede mogelijkheid: input van referentie-evapotranspiratie. In figuur 3.6 is de keuze rood omcirkeld en zijn de bijbehorende stappen gegeven. De volgende stap is om van de referentie-evapotranspiratie naar de potentiële evapotranspiratie te gaan. De potentiële evapotranspiratie is de snelheid waarmee evapotranspiratie optreedt in een gebied dat homogeen bedekt is met vegetatie dat beschikt over een ongelimiteerde hoeveelheid water. De potentiële evapotranspiratie wordt sterk beïnvloed door een aantal vegetatie eigenschappen (Terink et al., 2012). Vandaar dat de referentie-evapotranspiratie (ET_0) met gewasfactoren (K_c) wordt omgerekend tot de voor het betreffende gewas geldige potentiële evapotranspiratie (ET_{pot}). De volgende vergelijking geeft dit weer:

$$ET_{pot} = K_c * ET_0 \quad (3.2)$$

Deze wordt vervolgens gesplitst in potentiële evaporatie en potentiële transpiratie (Janssen et al., 2013). Dit wordt berekend met behulp van de Leaf Area Index (LAI), oftewel het totale bladoppervlak dat blootstaat aan inkomende lichtenergie, gedeeld door het grondoppervlak. In hoofdstuk 3.3 worden de vegetatie factoren (K_c) en Leaf Area Index (LAI) verder toegelicht.

Ten slotte wordt de actuele evapotranspiratie berekend met als basis de potentiële evapotranspiratie. Vegetatie kan op verschillende manieren stress ondervinden waardoor de actuele evapotranspiratie lager is dan de potentiële evapotranspiratie. Dit kan zijn door te weinig water of door teveel water (Terink et al., 2012). Vandaar dat in vergelijking 3.3 een stress factor (K_s) is meegenomen:

$$ET_{act} = K_s * ET_{pot} \quad (3.3)$$

3.3. Verdamping vegetatie

De verdamping van het aardoppervlak bestaat uit twee termen: **evaporatie en transpiratie van planten** (E_t). Evaporatie kan weer onderverdeeld worden in de interceptie van neerslagwater door planten (E_i) en de verdamping van de bodem (E_s). Samen vormt dit de totale evapotranspiratie (ET_{tot}). Per definitie maakt de interceptieverdamping (E_i) geen deel uit van de referentie gewasverdamping, omdat deze gedefinieerd is voor een droog gewas (Bartholomeus and Witte, 2013). De referentie gewasverdamping geldt voor een hypothetisch referentie-gewas bestaande uit kort gemaaid gras, maar kan omgerekend worden naar de potentiële verdamping van een gewas door de referentie evapotranspiratie te vermenigvuldigen met een gewasfactor (K_c). Het idee achter deze methode is dat effecten van het weer op de verdamping gescheiden kunnen worden van effecten door de eigenschappen van het gewas en zijn groeistadia (Bos-Burgering et al., 2020). Daarbij worden steeds optimale groeiomstandigheden verondersteld.

In Nederland worden regelmatig de gewasfactoren van Feddes (1987) in combinatie met de verdamping volgens Makkink gebruikt (Bos-Burgering et al., 2020). De gewasfactoren van Feddes zijn afgeleid op basis van waterbalansonderzoeken, met name door middel van veldexperimenten met berekening waarbij extra water werd toegevoegd om de potentiële verdamping van het gewas te bepalen. Een belangrijk aspect van berekening is echter dat het ook leidt tot interceptie. Feddes (1987) benadrukt daarnaast dat de door hem gepresenteerde gewasfactoren gemiddelden zijn, gebaseerd op een reeks van gemiddelde, droge en natte jaren, die niet gelijkmatig verdeeld zijn. Het gebruik van deze empirisch vastgestelde gewasfactoren zorgt ervoor dat er impliciet rekening wordt gehouden met het gecombineerde effect van bodemverdamping (E_s), transpiratie (E_t) en interceptieverdamping (E_i).

3.3.1. Vegetatie factoren

Aangezien in dit onderzoek naar de beplanting van een wadi wordt gekeken, worden natuurlijke vegetatie factoren in plaats van gewasfactoren gebruikt. Daarnaast is de referentie evapotranspiratie

volgens de FAO Penman-Monteith methode berekend in plaats van de methode van Makkink die het KNMI gebruikt. Het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium (NHI) heeft vegetatie bestanden die gebruikt worden voor de berekening van verdamping van begroeid oppervlak (Bartholomeus and Witte, 2013). Onder deze vegetatie bestanden vallen K_c waarden voor referentie grasland en vijf natuurlijke vegetatietypen: natuurlijk grasland, struikheide, loofbomen, licht naaldbout en donker naaldbout. Voor de K_c waarden zijn twee benaderingen gebruikt:

1. K_c waarden zoals deze afgeleid worden uit metingen inclusief de interceptieterm (E_i). Deze zijn equivalent aan de K-waarden voor de Makkink-verdamping volgens Feddes (1987). Deze K-waarde corrigeert impliciet voor E_s , E_t en E_i , ofwel de totale verdamping (ET_{tot}), en wordt K_{tot} genoemd.
2. K_c waarden volgens de internationale definitie van de FAO (Allen et al., 1998), welke alleen corrigeert voor transpiratie (E_t). Deze worden aangeduid met K_t .

Er moet worden erkend dat de vegetatie factoren slechts een indicatie bieden van de mogelijke variaties tussen verschillende natuurlijke vegetatietypen. Binnen een specifiek vegetatietype kan in werkelijkheid echter nog aanzienlijke variabiliteit voorkomen. Om de potentiële verdamping van vegetatie in het model SWAP te berekenen, zijn de empirische vegetatie factoren (K_{tot}) vermenigvuldigd met de referentie evapotranspiratie volgens Feddes (1987). Hier volstaat het eenvoudige gewasgroeimodel van SWAP zodat een goede bovenrandvoorwaarde voor de bodemvochtbeweging kan worden berekend. In het eenvoudige gewasgroeimodel wordt de vegetatie factor als een functie van de fenologische gewasontwikkeling (development stage: DVS) berekend.

In tabel 3.1 zijn de vegetatie factoren K_{tot} voor een referentie grasland en de drie natuurlijke vegetatietypen: natuurlijk grasland, struikheide en loofbomen gegeven.

Tabel 3.1: K_{tot} voor een referentie grasland en drie vegetatietypen uit het NHI. De hoge waarden in de winter worden veroorzaakt door het aandeel van interceptieverdamping op de totale verdamping.

Maand	Referentie grasland $K_{tot,ref.gras}$	Natuurlijk grasland $K_{tot,nat.gras}$	Struikheide $K_{tot,struikheide}$	Loofboom $K_{tot,loofboom}$
1	1.50	1.60	1.37	1.74
2	1.18	1.30	1.18	1.22
3	1.09	1.17	1.10	0.96
4	1.03	1.09	1.05	0.83
5	1.02	1.06	1.04	0.82
6	1.02	1.05	1.03	0.85
7	1.01	1.06	1.03	0.88
8	1.02	1.07	1.05	0.94
9	1.04	1.12	1.08	1.10
10	1.10	1.24	1.15	1.53
11	1.41	1.52	1.31	2.33
12	1.68	1.76	1.47	2.25

Naast de vegetatie factoren voor drie natuurlijke vegetatietypen, is er ook nog een vegetatie factor toegepast voor een samenstelling van vegetatie. Aangezien een wadi met verschillende vegetatietypen is beplant, wordt deze vegetatie berekend door middel van wegingen. Zo kunnen deze wegingen toegepast worden om zowel de samengestelde vegetatie factor als de bladoppervlakte index (LAI) en de wortel diepte te berekenen. In tabel 3.2 is te zien welke wegingen zijn meegenomen voor de wadi in de Domenico Scarlatti laan. De overige samengestelde vegetatie factoren, staan in bijlage A.4.

Tabel 3.2: Samengestelde vegetatie factor $K_{mix,Domenico}$ voor de wadi in de Domenico Scarlattilaan in verband met de verschillende soorten beplanting.

Maand	Weging natuurlijk grasland [%]	Weging struikheide [%]	Weging loofboom [%]	Samengestelde vegetatie factor $K_{mix,Domenico}$ [-]
1	39.5	50.5	10.0	1.498
2	39.5	50.5	10.0	1.231
3	39.5	50.5	10.0	1.114
4	39.5	50.5	10.0	1.044
5	39.5	50.5	10.0	1.026
6	39.5	50.5	10.0	1.020
7	39.5	50.5	10.0	1.027
8	39.5	50.5	10.0	1.047
9	39.5	50.5	10.0	1.098
10	39.5	50.5	10.0	1.224
11	39.5	50.5	10.0	1.495
12	39.5	50.5	10.0	1.662

3.3.2. Bladoppervlakte index & worteldiepte

De wegingen die zijn gebruikt zoals in tabel 3.2, zijn tevens gebruikt om de bladoppervlakte index en worteldiepte te berekenen van de samengestelde vegetatie. Hiervoor zijn eerst de bladoppervlakte-index en worteldiepte van belang voor de drie natuurlijke vegetatietypen: natuurlijk grasland, struikheide en loofbomen.

De bladoppervlakte-index, ook wel Leaf Area Index (LAI), heeft een directe relatie met de maximale interceptiecapaciteit en daarnaast met de bodembedekkingsgraad van de vegetatie. Het verloop van de bladoppervlakte index verschilt per vegetatie en gedurende het jaar. Dit komt door verschillende factoren die samenhangen met de groeicyclus van planten, seizoensgebonden klimaatvariaties, en de specifieke eigenschappen van verschillende vegetatietypen. De verlopen van de drie natuurlijke vegetatietypen: natuurlijk grasland, struikheide en loofbomen zijn meegenomen in het model SWAP. Als illustratie is voor de natuurlijke vegetatietype: loofbomen, de bladoppervlakte-index gegeven in tabel 3.3. De gegeven indeling met parameters zijn van toepassing voor het model SWAP. De bladoppervlakte-index van de overige twee vegetatietypen, staan in bijlage A.

Tabel 3.3: Bladoppervlakte-index (LAI) voor de natuurlijke vegetatietype: loofboom ($K_{tot, loofboom}$). Het verloop van de bladoppervlakte-index van NHI-vegetatie zijn gebruikt uit het onderzoek van Wageningen University & Research (Dik and Mulder, 2024).

Maand [-]	Dag: DNR [-]	DeVelopment Stage: DVS [0 - 2]	Leaf Area Index: LAI [-]
Januari	1	0.000	0.75
	16	0.087	0.75
Februari	32	0.174	0.75
	46	0.261	0.75
Maart	60	0.348	0.75
	75	0.435	0.75
April	91	0.522	0.75
	106	0.609	0.75
Mei	121	0.696	0.75
	136	0.783	1.50
Juni	152	0.870	8.75
	167	0.957	8.75
Juli	182	1.043	8.75
	197	1.130	8.75
Augustus	213	1.217	8.75
	228	1.304	8.75
September	244	1.391	8.75
	259	1.478	8.75
Oktober	274	1.565	3.50
	290	1.652	2.50
November	305	1.739	1.25
	320	1.826	0.75
December	335	1.913	0.75
	365	2.000	0.75

Vervolgens moeten de waarden van de worteldiepte in het model SWAP worden meegenomen. De worteldiepte bepaalt tot welke diepte de vegetatietype zijn water uit de bodem kan halen. Dit is van belang voor het bepalen of de vegetatie schade oploopt door droogte. Het bodemvocht kan variëren op verschillende dieptes. Zolang in de diepere bodemlagen nog voldoende water beschikbaar is, kan de vegetatie voldoende transpireren om géén permanente schade op te lopen door droogtestress. Gras wortelt minder diep dan struiken, en struiken weer minder dan bomen. Bij droogte zal daarom de verdamping van gras eerder afnemen dan de verdamping van struiken en bomen (Hulsman et al., 2021). De verschillende worteldieptes die zijn toegepast in het model SWAP, zijn in tabel 3.4 weergegeven. De worteldiepte van loofbomen is bepaald door middel van de gemiddelde hoogste grondwaterstand (GHG) per wadi.

Tabel 3.4: Worteldieptes van de drie natuurlijk vegetatietypen: natuurlijk gras, struikheide en loofbomen. Daarnaast is er per wadi een samengestelde worteldiepte bepaald voor de samengestelde vegetatie ($K_{tot,mix}$). De gekozen worteldieptes van de vegetatie zijn gebaseerd op het rapport van Royal Haskoning (Hulsman et al., 2021).

Vegetatietype [-]	Vegetatie factor [-]	Worteldiepte [cm]
Natuurlijk gras	$K_{tot,nat.gras}$	28
Struikheide	$K_{tot,struikheide}$	40
Loofboom	$K_{tot,loofboom}$	Tot aan GHG
Mix, Domenico Scarlatillaan	$K_{tot,mix,Domenico}$	37.8
Mix, Europaplein	$K_{tot,mix,Europaplein}$	34.0
Mix, Merwedeplein	$K_{tot,mix,Merwedeplein}$	38.5
Mix, Prinses Irenestraat	$K_{tot,mix,Prinses}$	31.9

3.4. Staringreeks

Voor de monitoring van transport van water worden gedetailleerde modellen, in dit geval het model SWAP, gebruikt die beschrijven hoe het transport in en door de bodems verloopt. Voor het gebruik van het model SWAP, is het wel noodzakelijk om invoergegevens te hebben van bodemfysische karakteristieken van de bodem. Hiervoor is de Staringreeks (Heinen et al., 2020) gebruikt.

De Staringreeks geeft een gemiddelde beschrijving voor de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van bodemlagen. In de Staringreeks worden 18 bovengronden en 18 ondergronden onderscheiden. De Staringreeks beschrijft per bodemlaag wat het “gemiddelde” watervasthoudend vermogen en de “gemiddelde” doorlatendheid voor de betreffende bodemlaag is. De verdeling van Staringreeks bodemlagen, gebeurt via het siltgehalte (lutum) of het kleigehalte (leem), het organische stofgehalte en de mediaan van de zandfractie volgens een klassenindeling grotendeels zoals gebruikt bij de bodemclassificatie (Heinen et al., 2020).

Het model SWAP maakt gebruik van de methode Mualem-Van Genuchten. Voor deze methode worden de parameters van de Staringreeks toegepast. De waterretentiekarakteristiek volgens Van Genuchten wordt geschreven als (Heinen et al., 2020):

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad (3.4)$$

Daarnaast de waterdoorlatendheidskarakteristiek volgens Mualem (vergelijking 3.5), onder de voorwaarde dat $m = 1 - 1/n$. Voor de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken is een set van zes parameters ($\theta_r, \theta_s, \alpha, n, \lambda, K_s$) nodig die zodoende voor elke bodemlaag door de Staringreeks wordt verkregen (Heinen et al., 2020).

$$K(h) = K_s \frac{((1 + |\alpha h|^n)^m - |\alpha h|^{n-1})^2}{(1 + |\alpha h|^n)^{m(\lambda+2)}} \quad (3.5)$$

In hoofdstuk 2.2.2 is het ontwerp van de bodemopbouw van de wadi in de Domenico Scarlatillaan gegeven (figuur 2.4). De overige bodemopbouwen zijn weergegeven in bijlage A. Deze ontwerpen zijn afkomstig van Gemeente Amsterdam. De bodemopbouwen moeten per bodemlaag gekoppeld worden met een Staringreeks bodemlaag, zodat de bijbehorende parameters in het model SWAP toegepast kunnen worden. Deze koppeling is op basis van de bodemstructuur, het percentage in zand, silt (leem), klei (lutum) en organische stofgehalte, gedaan. In tabel 3.5 worden de bodemstructuren van de veelvoorkomende bodemlagen van wadi's in Amsterdam gegeven:

Ontwerp bodemlaag	Organische stofgehalte [%]	Zand [%]	Silt [%]	Klei [%]	Droge bulkdichtheid [mg/cm^3]
Bladaarde/mulch	75.0	10.0	10.0	5.0	600
Schimmeldominante humuscompost	75.0	10.0	10.0	5.0	500
Bomenzand	8.0	90.0	10.0	0.0	1500
Drainagezand	0.0	97.0	2.0	1.0	1700
Ophoogzand	0.0	100.0	0.0	0.0	1600

Tabel 3.5: Veelvoorkomende bodemlagen van wadi's in Amsterdam (Bout, 2021).

Om de veelvoorkomende bodemlagen van wadi's te koppelen aan de Staringreeks lagen, zijn ook de Staringreeks bodemstructuren van belang. In tabel 3.6 wordt een selectie van boven- en ondergronden van de Staringreeks gegeven met bijbehorende bodemstructuren. Vervolgens wordt in tabel 3.7 de corresponderende bodemlagen van de Staringreeks gegeven die uiteindelijk zijn toegepast in het model SWAP:

Staringreeks grond	Organische stofgehalte [%]	Zand [%]	Silt (Leem) [%]	Klei (Lutum) [%]	Mediaan zandfractie M50 [μm]
B01	0-15	90-100	0-10	0	105-210
B05	0-15	85-100	0	0	210-2000
B06	0-15	50-100	0-50	0	50-2000
B16	25-100	0-67	0	0-8	-
O05	0-3	97-100	0	0	210-2000

Tabel 3.6: Selectie van boven- en ondergronden van de Staringreeks.

Ontwerp bodemlaag	Omschrijving Staringreeks bodemlaag	Staringreeks grond
Bladaarde/mulch	Zandig veen en veen	B16
Schimmeldominante humuscompost	Zandig veen en veen	B16
Bomenzand	Leemarm, zeer fijn tot matig fijn zand	B01
Drainagezand	Keileem	B06
Ophoogzand	Grofzand	O05

Tabel 3.7: Koppeling ontwerp bodemlagen en Staringreeks bodemlagen

Van de corresponderende Staringreeks bodemlagen, zijn de volgende bodemfysische parameters van belang voor het model SWAP:

- Residueel vochtgehalte: θ_r [cm^3/cm^3]. Zijnde de asymptotische waarde voor θ aan het droge uiteinde van de pF-curve waar $d\theta/dh \rightarrow 0$ (Heinen et al., 2020). Voor alle bodemlagen is $\theta_r = 0.01$ [cm^3/cm^3], behalve voor Staringreeks B02. Dan is $\theta_r = 0.02$ [cm^3/cm^3].
- Verzadigd vochtgehalte: θ_s [cm^3/cm^3]. Dit is het vochtgehalte bij drukhoogte $h = 0$.
- Vormparameter: α [cm^{-1}]. Deze wordt berekend door $m = 1 - 1/n$.
- Vormparameter: n [-]. Stelt de steilheid van de retentiekarakteristiek voor bij kleine θ . Een grotere n geeft een steilere grafiek bij kleine θ en daarmee een platter plateau.
- Vormparameter: λ [-]. Dit is de exponent van de hydraulische conductiviteit.
- Verzadigd waterdoorlatendheid: K_s [cm/d].

Staring- reeks grond	Verzadigd vochtgehalte θ_s [cm ³ /cm ³]	Vorm- parameter α [cm ⁻¹]	Vorm- parameter n [-]	Vorm- parameter λ [-]	Verzadigd water- doorlatend- heid K_s [cm/d]
B01	0.427	0.0217	1.735	0.981	31.23
B05	0.381	0.0428	1.808	0.024	63.65
B06	0.385	0.0209	1.242	-1.200	104.10
B16	0.786	0.0211	1.279	-1.221	12.36
O05	0.337	0.0303	2.888	0.074	17.42

Tabel 3.8: Bodemfysische parameters van de corresponderende Staringreeks bodemlagen

3.5. Waterretentiecurve: pF-curve

Om te bepalen wanneer een vegetatie stress ervaart door droogte, is de waterretentiecurve van toepassing. De waterretentiecurve, ook wel de pF-curve genoemd, beschrijft de relatie tussen het vochtgehalte van de bodem en de zuigspanning waarmee water in de bodem wordt vastgehouden. Deze curve wordt vaak uitgedrukt in termen van de pF-waarde. Dit is de logaritme van de zuigspanning in centimeters waterkolom. De pF-curve geeft inzicht in hoe gemakkelijk of moeilijk water beschikbaar is voor vegetatie.

In een waterretentiecurve worden een viertal karakteristieke vochttoestanden onderscheiden (Hoving and Booi, 2022):

1. pF = 0.0: Een zeer natte volledig verzadigde bodem.
2. pF = 2.0: Veldcapaciteit, de situatie waarbij geen water meer uit de wortelzone lekt.
3. pF = 2.7: Aanvulpunt, de vegetatie laat een vochttekort zien.
4. pF = 4.2: Verwelkingspunt, situatie waarbij geen bodemvocht meer voor de plant beschikbaar is.

Op basis van de bovenstaande pF-waarden worden de onderstaande vochttrajecten onderscheiden:

1. pF = 0.0–2.0: Overmaat aan bodemvocht.
2. pF = 2.0–2.7: Gemakkelijk beschikbaar bodemvocht.
3. pF = 2.7–4.2: Bodemvocht is beperkend.
4. >pF = 4.2: Geen bodemvocht meer beschikbaar

De definitieve waarden die zijn gebruikt voor de veldcapaciteit, aanvulpunt en verwelkingspunt, zijn gebaseerd op de bodemkalibraties van Sensoterra (Sensoterra, 2023). De waarden van een bodemlaag met de bodemstructuur, zand = 89 [%], silt = 10 [%], klei = 1 [%] en organisch stofgehalte = 7.7 [%], is gebruikt. Deze drie waarden zijn verwerkt in de resultaten. De bijbehorende waarden zijn:

- Veldcapaciteit: 0.31 [cm³/cm³]
- Aanvulpunt: 0.20 [cm³/cm³]
- Verwelkingspunt: 0.08 [cm³/cm³]

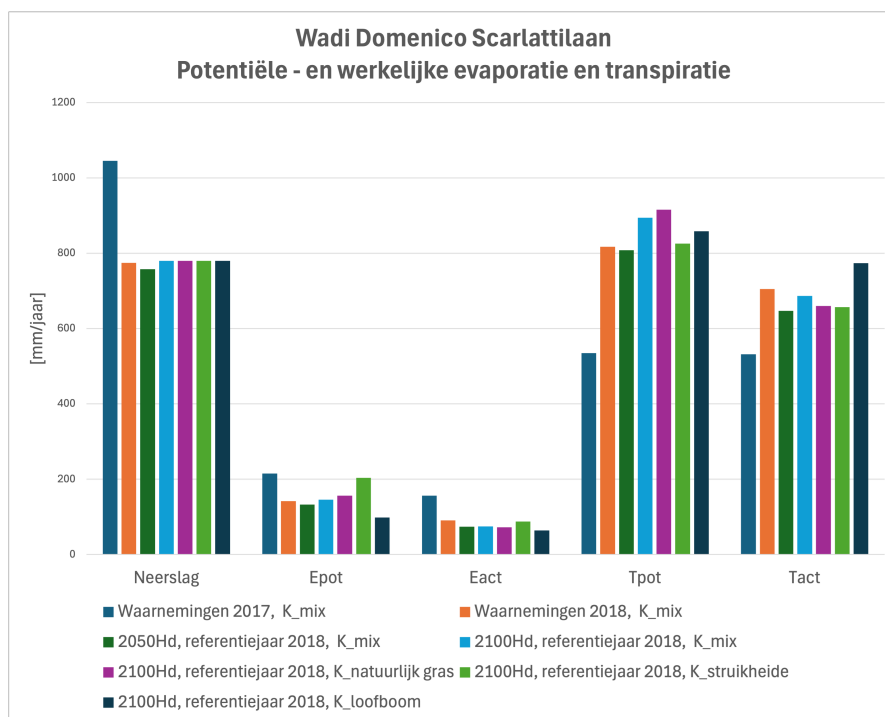
4

Resultaten

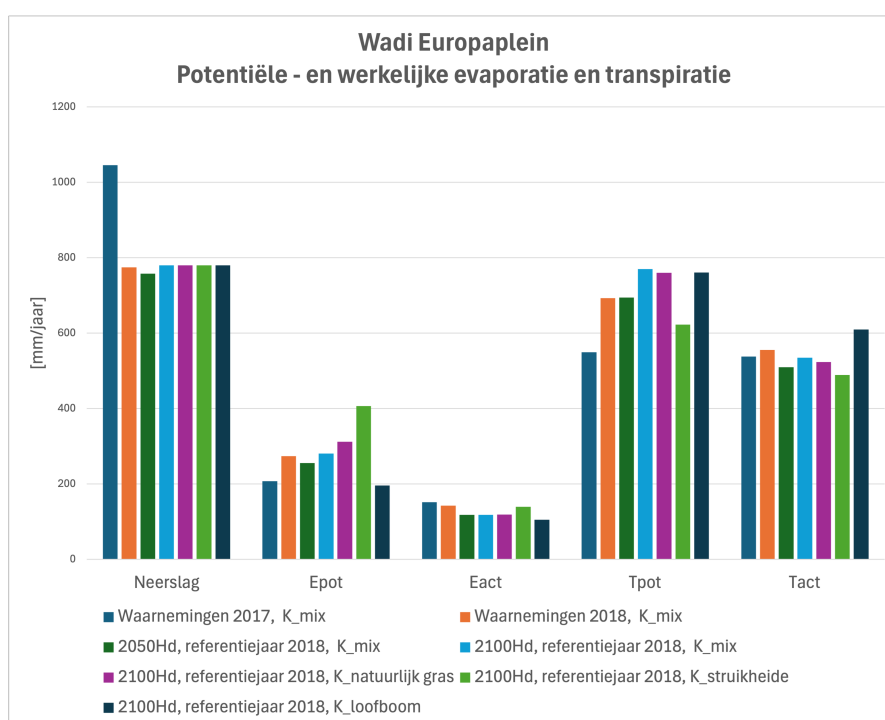
Voor elke wadi zijn er zeven verschillende resultaten gemodelleerd met het model SWAP. Per resultaat zijn de meteorologische omstandigheden van het jaar 2017, 2018 of KNMI'23 klimaatscenario's gebruikt en met verschillende vegetatie factoren toegepast. In hoofdstuk 4.1 worden per wadi voor alle scenario's de potentiële - en actuele evaporatie en transpiratie gegeven, in combinatie met de bijbehorende neerslag. In hoofdstuk 4.2, 4.3, 4.4 en 4.5 worden per wadi, de zeven verschillende scenario's met als resultaat het volumetrisch watergehalte op diverse dieptes gegeven. Daarnaast wordt er per wadi een overzicht gegeven hoeveel dagen het volumetrisch watergehalte onder een specifieke drempelwaarde valt. Alleen voor de wadi in de Domenico Scarlatti laan wordt hier een uitgebreide analyse bij gegeven. Deze resultaten worden onderling vergeleken met elkaar in hoofdstuk 4.6 en geanalyseerd. Voor de analyse is een verdeling gemaakt in verschillen tussen grondwaterstanden, bodemopbouw en samenstellingen van vegetatietypen. Vervolgens wordt in hoofdstuk 4.7 gekeken per scenario of dit geleid heeft tot permanente schade aan de vegetatie. Ten slotte wordt in hoofdstuk 4.8, een gevoeligheidsanalyse gegeven die een indicatie geeft over de robuustheid van de resultaten door middel van het aanpassen van de heterogene bodemopbouw.

4.1. Evaporatie en transpiratie

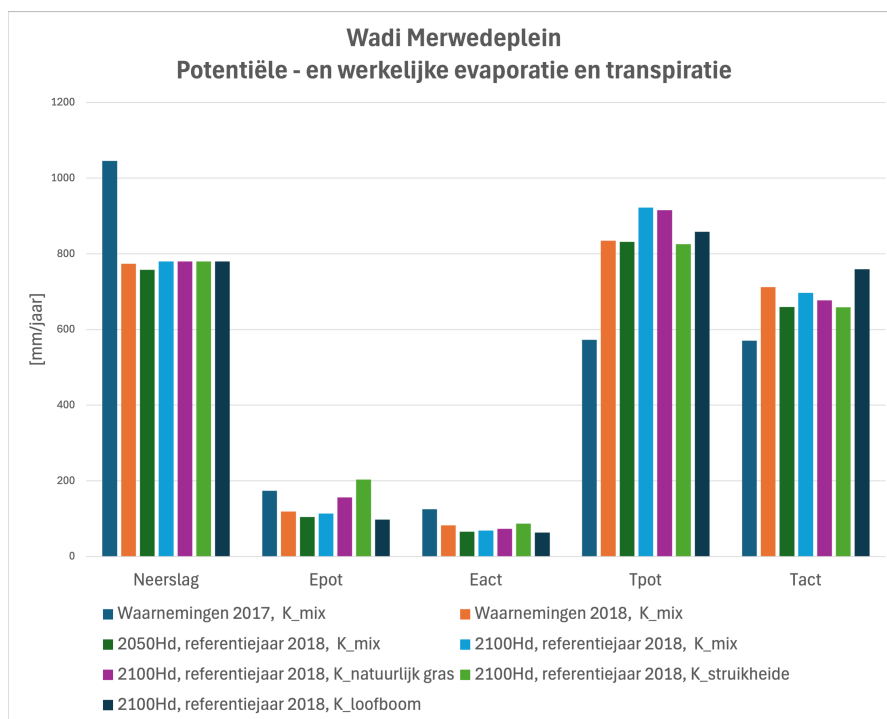
In bijlage B is per wadi voor alle scenario's de potentiële - en actuele evapotranspiratie gegeven (B.1, B.2, B.11, en B.20). Deze waarden zijn weer onderverdeeld in potentiële - en actuele verdamping (evaporatie) en transpiratie. Dit is per wadi weergegeven in de figuren 4.1, 4.2, 4.3, en 4.4. Om een gedeelte van de waterbalans in kaart te brengen, is de neerslag per jaar gegeven. Dit geeft een duidelijk beeld van de meteorologische omstandigheden waar de wadi's mee te maken hebben gehad. Als er in een jaar een neerslagtekort is voorgekomen, zijn er verschillen tussen potentiële en werkelijke evapotranspiratie ontstaan. Hierdoor komen er perioden voor, waarbij het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder een drempelwaarde (θ_t) komt en de vegetatie droogte stress gaat ervaren. Bij een vochttekort en bij hoge temperaturen sluiten de bladeren als noodmaatregel hun huidmondjes om de verdamping en daarmee het fotosynthese proces te remmen (Hoogvliet et al., 2021). Als gevolg hiervan, neemt de transpiratie van vegetatie af en dit is terug te zien in de werkelijke transpiratie waarden. De verschillen in waarden tussen de wadi's, zijn beschreven in hoofdstuk 4.6.



Figuur 4.1: Neerslag, potentiële - en werkelijke evaporatie en transpiratie in [mm/jaar] voor de wadi in de Domenico Scarlattilaan. Voor de waarden van evaporatie (E_{pot} en E_{act}), is alleen de verdamping van de bodem (E_s) meegenomen. De interceptieverdamping (E_i) van vegetatie is meegenomen bij de waarden van de transpiratie (E_t). Dit komt door het gebruik van de natuurlijk vegetatie factoren K_{tot} .

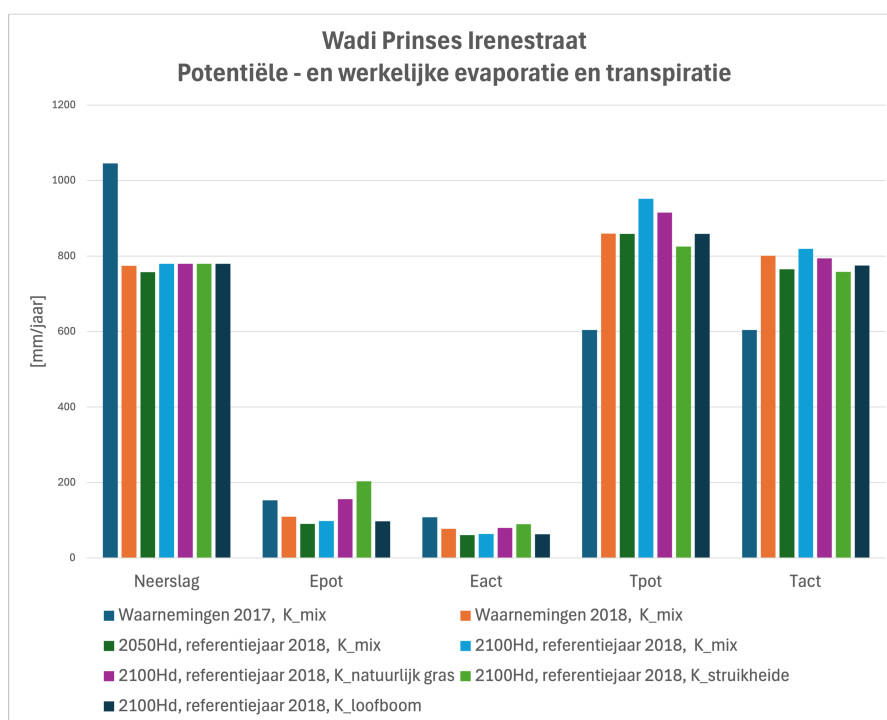


Figuur 4.2: Neerslag, potentiële - en werkelijke evaporatie en transpiratie in [mm/jaar] voor de wadi op het Europaplein. Voor de waarden van evaporatie (E_{pot} en E_{act}), is alleen de verdamping van de bodem (E_s) meegenomen. De interceptieverdamping (E_i) van vegetatie is meegenomen bij de waarden van de transpiratie (E_t). Dit komt door het gebruik van de natuurlijk vegetatie factoren K_{tot} .



Figuur 4.3: Neerslag, potentiële - en werkelijke evaporatie en transpiratie in [mm/jaar] voor de wadi op het Merwedeplein.

Voor de waarden van evaporatie (E_{pot} en E_{act}), is alleen de verdamping van de bodem (E_s) meegenomen. De interceptieverdamping (E_i) van vegetatie is meegenomen bij de waarden van de transpiratie (E_t). Dit komt door het gebruik van de natuurlijk vegetatiefactoren K_{tot} .



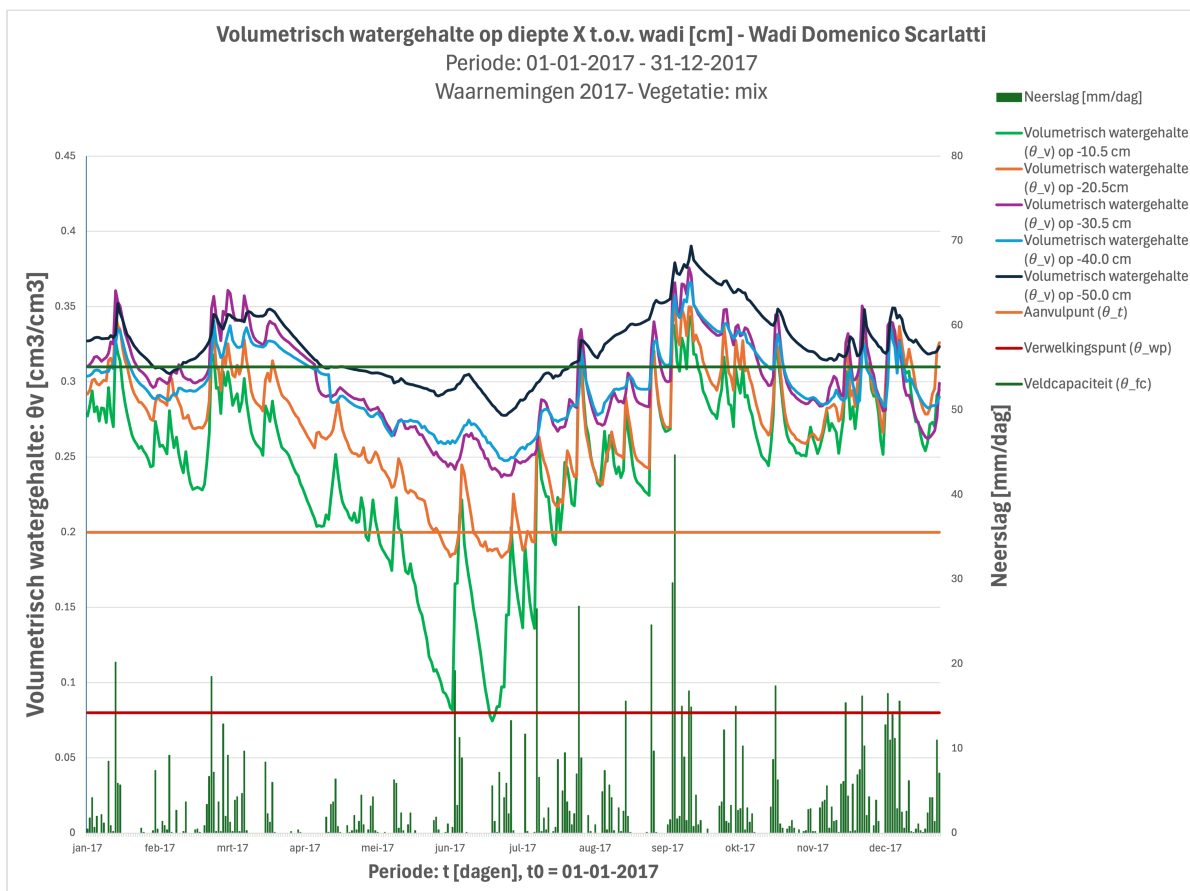
Figuur 4.4: Neerslag, potentiële - en werkelijke evaporatie en transpiratie in [mm/jaar] voor de wadi in de Prinses Irenestraat.

Voor de waarden van evaporatie (E_{pot} en E_{act}), is alleen de verdamping van de bodem (E_s) meegenomen. De interceptieverdamping (E_i) van vegetatie is meegenomen bij de waarden van de transpiratie (E_t). Dit komt door het gebruik van de natuurlijk vegetatie factoren K_{tot} .

In enkele scenario's zoals bij de wadi in de Domenico Scarlattilaan met klimaatscenario '2100Hd' en vegetatie factor $K_{tot,loofboom}$, is te zien dat de neerslag kleiner is dan de werkelijke evapotranspiratie ($ET_{act} = E_{s,act} + E_{i,act} + E_{t,act}$). Dit komt voor in situaties waarbij het grondwaterpeil hoog genoeg staat waardoor het wortelstelsel van de vegetatie in de capillaire zone valt. Hierdoor kan de vegetatie grondwater gebruiken om te transpireren. Vooral voor vegetatie met een grote worteldiepte zoals de vegetatietype: loofbomen is dit van toepassing (Hoogvliet et al., 2021). Daarnaast gebeurt dit in stedelijke gebieden met goed doorlatende bodems en een stabiel grondwaterniveau.

4.2. Bodemvocht wadi Domenico Scarlattilaan

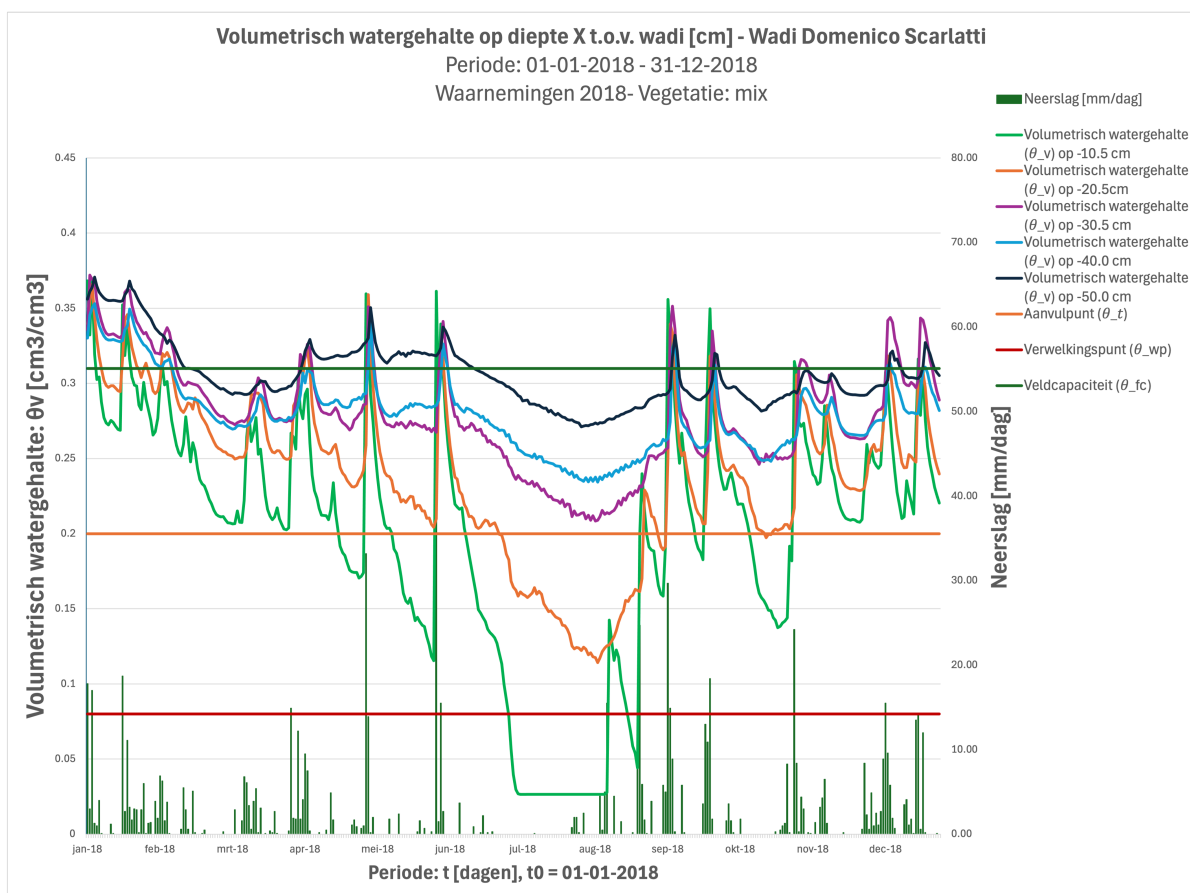
Voor de eerste resultaten omtrent het volumetrisch watergehalte, ook wel het bodemvocht, is de wadi op de Domenico Scarlattilaan in Amsterdam Zuid gebruikt. In deze straat zijn meerdere wadi's aangelegd in het jaar 2019 en 2020. Voor het modelleren, is de wadi in vak 3 (zie bijlage A) gebruikt omdat deze wadi rechthoekig is en geen verloop heeft. De bodemopbouw is heterogeen, zoals beschreven in hoofdstuk 2.2.2, en bestaat uit vier verschillende bodemlagen. In de volgende figuren zijn zeven resultaten te zien voor respectievelijk de waarnemingen in 2017, waarnemingen in 2018, referentieperiode 2018 met KNMI'23 klimaatscenario 2050Hd en referentieperiode 2018 met KNMI'23 klimaatscenario 2100Hd. Voor de referentieperiode 2018 met KNMI'23 klimaatscenario 2100Hd, zijn vier resultaten gegeven. Voor elk resultaat is een andere vegetatie factor gebruikt: $K_{mix,Domenico}$, $K_{nat.gras}$, $K_{struikheide}$ en $K_{loofboom}$. Voor alle zeven resultaten zijn de vegetatie factoren K_{tot} gebruikt van het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium (Bartholomeus and Witte, 2013). Voor de gemixte vegetatie factor $K_{mix,Domenico}$, zijn wegingen gebruikt om de samenstelling van verschillende vegetatietypen in de wadi te simuleren. Dit is beschreven in hoofdstuk 3.3.



Figuur 4.5: Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi in Domenico Scarlattilaan voor het jaar 2017. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2017. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,mix}$ gebruikt.

Het jaar 2017 was een relatief nat jaar met een totale neerslag van 1045.5 [mm/jaar], volgens de metingen van KNMI-neerslagstation Schellingwoude. Echter waren de maanden mei en juni opvallend droge maanden en tevens zeer warme maanden (KNMI, 2018b). Dit is evengoed waarneembaar, gezien de daling in het volumetrisch watergehalte (θ_v) vanaf de maand mei. Bovendien komt in deze maand en in de maand juni, het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het aanvulpunt ($\theta_t = 0.20$ [cm³/cm³]) en raakt het zelfs het verwelkingspunt ($\theta_{wp} = 0.08$ [cm³/cm³]) aan. Dit komt in de maand juli wederom voor. Bovendien geldt dit alleen voor het volumetrisch watergehalte (θ_v) op een diepte van -10.5 [cm] van de wadi.

De bovenste lagen van de bodem droger sneller uit als gevolg van verdamping van de bodem (E_s). Verdamping aan het bodemoppervlak speelt een cruciale rol in het bepalen van het vochtgehalte in deze lagen. Ondiepe bodems staan dicht bij het oppervlak, waardoor ze sterker worden blootgesteld aan zonlicht en wind, wat het vochtverlies versnelt (Yang et al., 2021). Diepere bodemlagen verliezen voornamelijk vocht door transpiratie van planten (E_t), terwijl de ondiepe lagen voornamelijk vocht verliezen door directe verdamping (E_s). Gedurende de rest van het jaar blijft het volumetrisch watergehalte op peil, tussen de veldcapaciteit (θ_{fc}) en het aanvulpunt (θ_t).



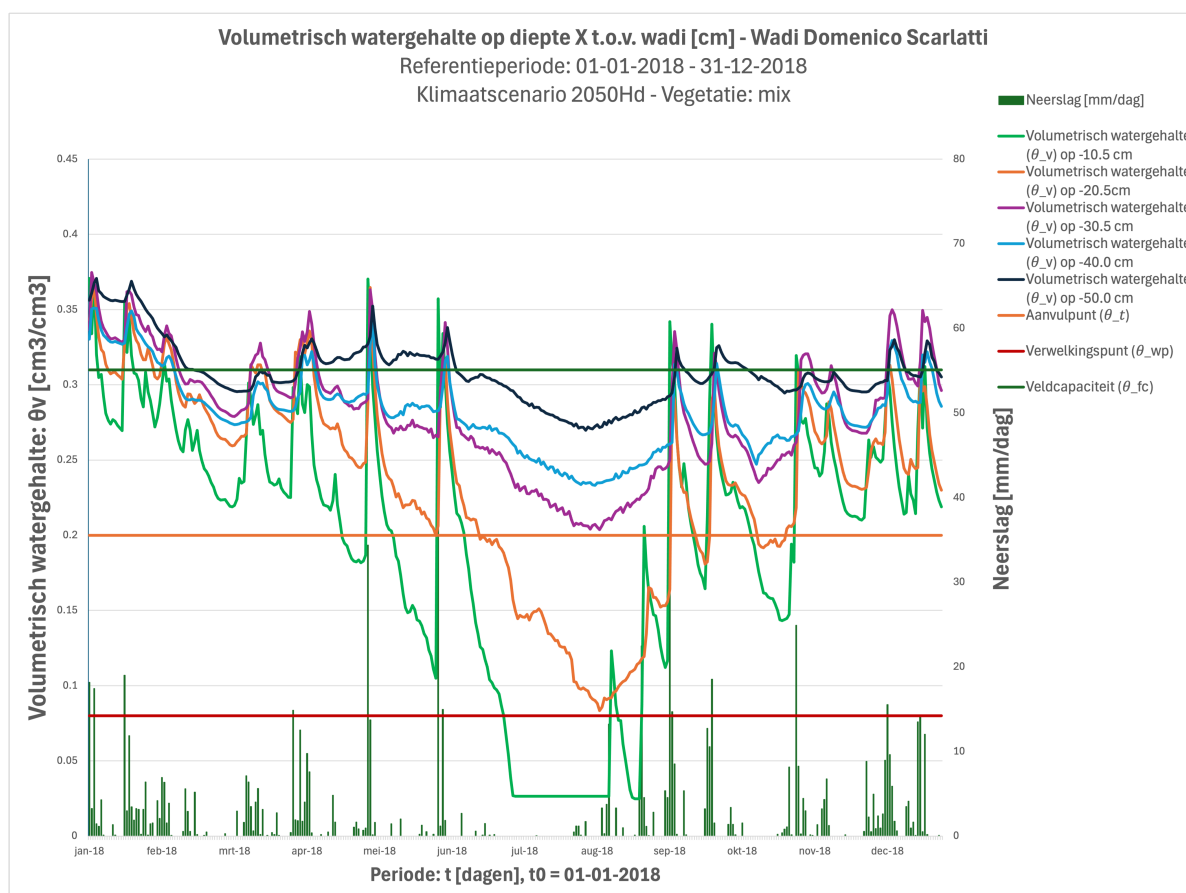
Figuur 4.6: Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi in Domenico Scarlattilaan voor het jaar 2018. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,mix}$ toegepast.

Het jaar 2018 staat bekend als een droog jaar en dit is duidelijk terug te zien in het volumetrisch watergehalte (θ_v). Voornamelijk de ondiepe bodemlagen, op zowel -10.5 [cm] als -20.5 [cm] van de wadi, valt het volumetrisch watergehalte gedurende langere tijd onder het aanvulpunt (θ_t). Zoals al eerder vermeld, staan ondiepe bodems dicht bij het oppervlak waardoor ze sterker worden blootgesteld aan zonlicht en wind en daardoor het vochtverlies versnelt wordt. Op diepte -10.5 [cm] van de wadi, komt het volumetrisch watergehalte (θ_v) in de maanden juli en augustus zelfs onder het verwelkingspunt (θ_{wp}). Het deel waarbij de groene lijn zich horizontaal voortbeweegt, is de minimale waarde van het

volumetrisch watergehalte (θ_v), ook wel het residueel vochtgehalte van de bodem. Dit is beschreven in hoofdstuk 3.4.

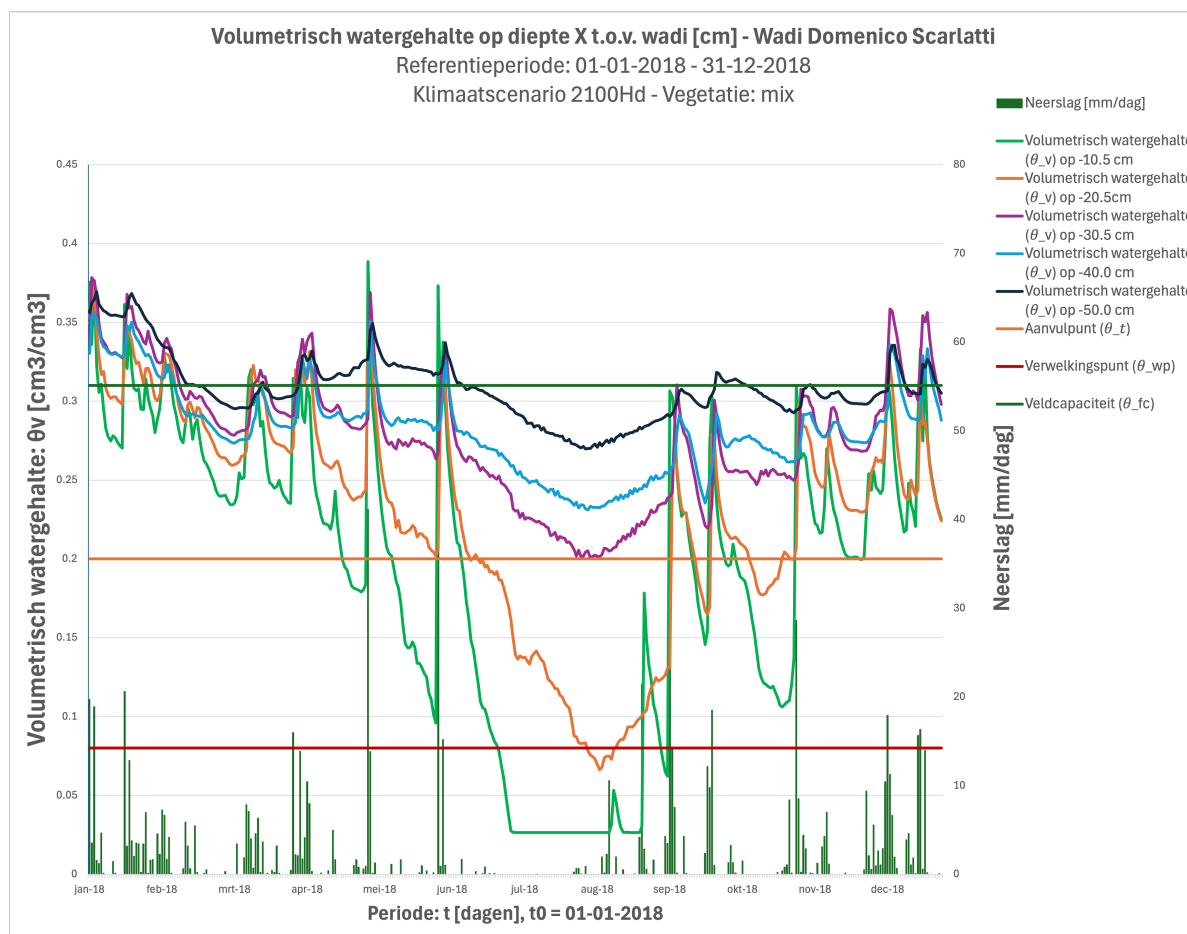
Als het volumetrisch watergehalte (θ_v) het residueel vochtgehalte van de bodem heeft bereikt, is te zien dat θ_v nauwelijks tot niet reageert op de eerste dagen met kortdurende neerslag. Wanneer de bovengrond uitgedroogd is, wordt de infiltratiecapaciteit van de bodem vaak beperkt door de lage vochtigheid. Dit leidt ertoe dat het water eerst wordt gebruikt om de oppervlakteporiën te vullen. In deze fase treedt er weinig verandering op in het volumetrisch watergehalte, omdat de meeste neerslag wordt geabsorbeerd door de droge bodem zonder significant door te dringen naar diepere lagen of de meetbare vochtigheid te beïnvloeden (Zhu et al., 2018).

De duur van de periode onder het aanvulpunt of zelfs onder het verwelkingspunt is van belang voor het bepalen of de vegetatie permanente schade oploopt. Hier wordt verder op ingegaan in hoofdstuk 4.7.



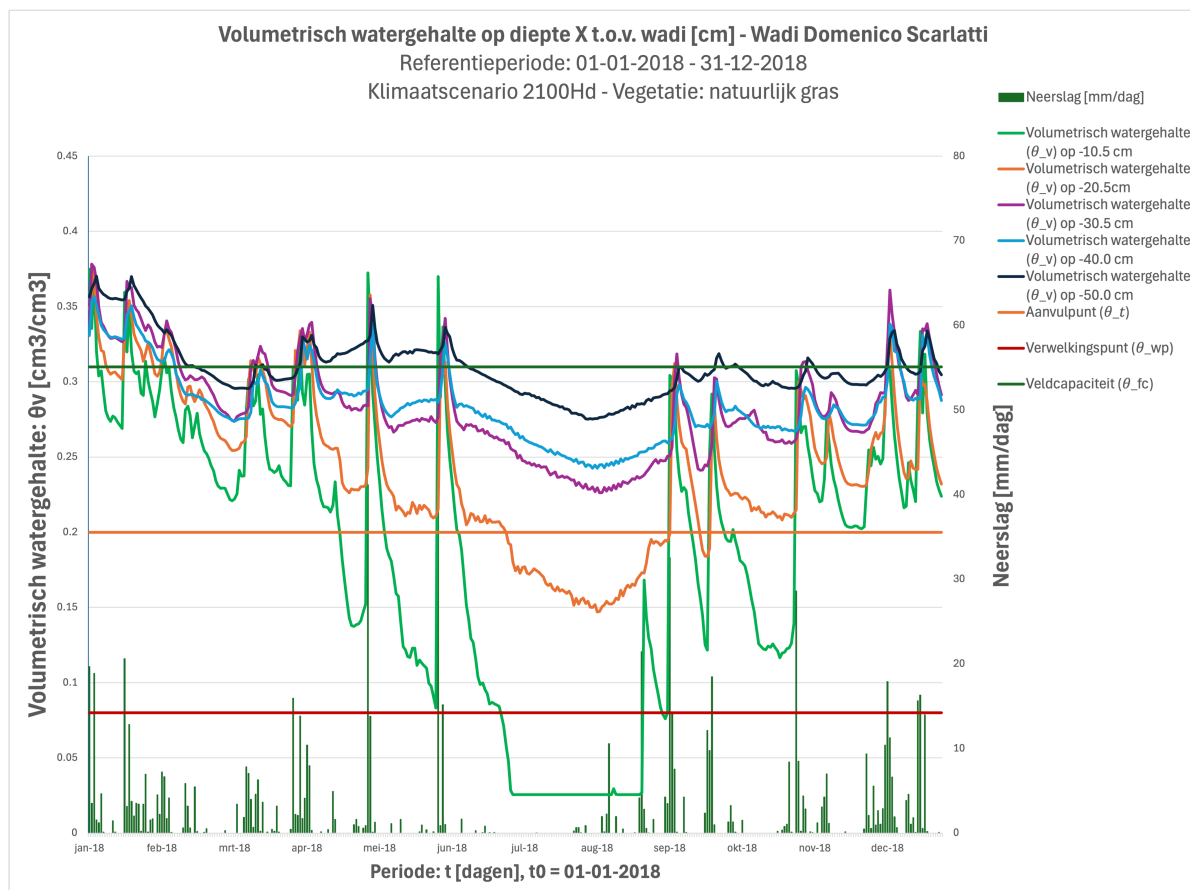
Figuur 4.7: Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi in Domenico Scarlattilaan voor de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatsscenario '2050Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018 die aangepast zijn met de kerncijfers voor het klimaatsscenario '2050Hd'. Voor de vegetatie is de factor $K_{mix,Domenico}$ toegepast.

Het profiel van het volumetrisch watergehalte van de referentieperiode 2018 met KNMI'23 klimaatsscenario 2050 'hoge uitstoot, droog scenario', is vergelijkbaar met het resultaat van de waarnemingen in 2018 (figuur 4.6). Echter zijn de extremen wel groter en van langere duur. Dit is verklaarbaar door onder andere de totale hoeveelheid regen die minder is maar komt voornamelijk door de gemiddeld hogere temperaturen ten opzichte van de waarnemingen in 2018.



Figuur 4.8: Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi in Domenico Scarlattilaan voor de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatsscenario '2100Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018 die aangepast zijn met de kerncijfers voor het klimaatsscenario '2100Hd'. Voor de vegetatie is factor $K_{mix,Domenico}$ toegepast.

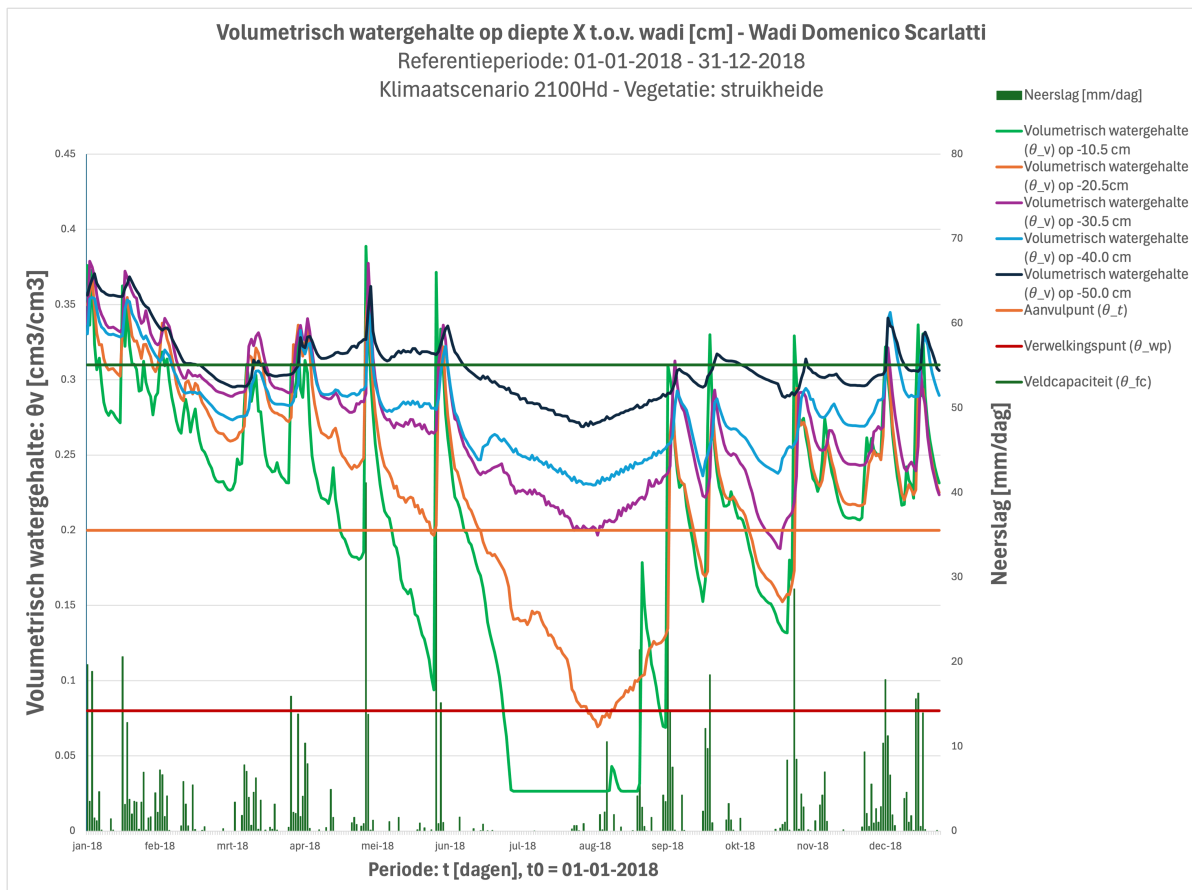
Het klimaatsscenario '2100Hd' dat toegepast is voor de resultaten van figuur 4.8, is een worst-case scenario. Het jaar 2018 staat al beschreven als extreem droog jaar en op deze waarnemingen zijn ook nog extreme kerncijfers op toegepast. Deze kerncijfers zijn gegeven in figuur 3.4. Het profiel van het volumetrisch watergehalte van de referentieperiode 2018 met KNMI'23 klimaatsscenario 2100 'hoge uitstoot, droog scenario', is vergelijkbaar met het resultaat van de referentieperiode 2018 met het KNMI'23 klimaatsscenario '2050Hd' (figuur 4.6). Echter zijn de extremen wel nog groter en van langere duur. Dit is natuurlijk verklaarbaar door onder andere de gemiddeld hogere temperaturen waardoor de potentiële verdamping nog groter is ten opzichte van de referentieperiode 2018 met het KNMI'23 klimaatsscenario '2050Hd'.



Figuur 4.9: Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi in Domenico Scarlattilaan voor de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2100Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018 die aangepast zijn met de kerncijfers voor het klimaatscenario '2100Hd'. Voor de vegetatie is de factor $K_{nat.gras}$ toegepast.

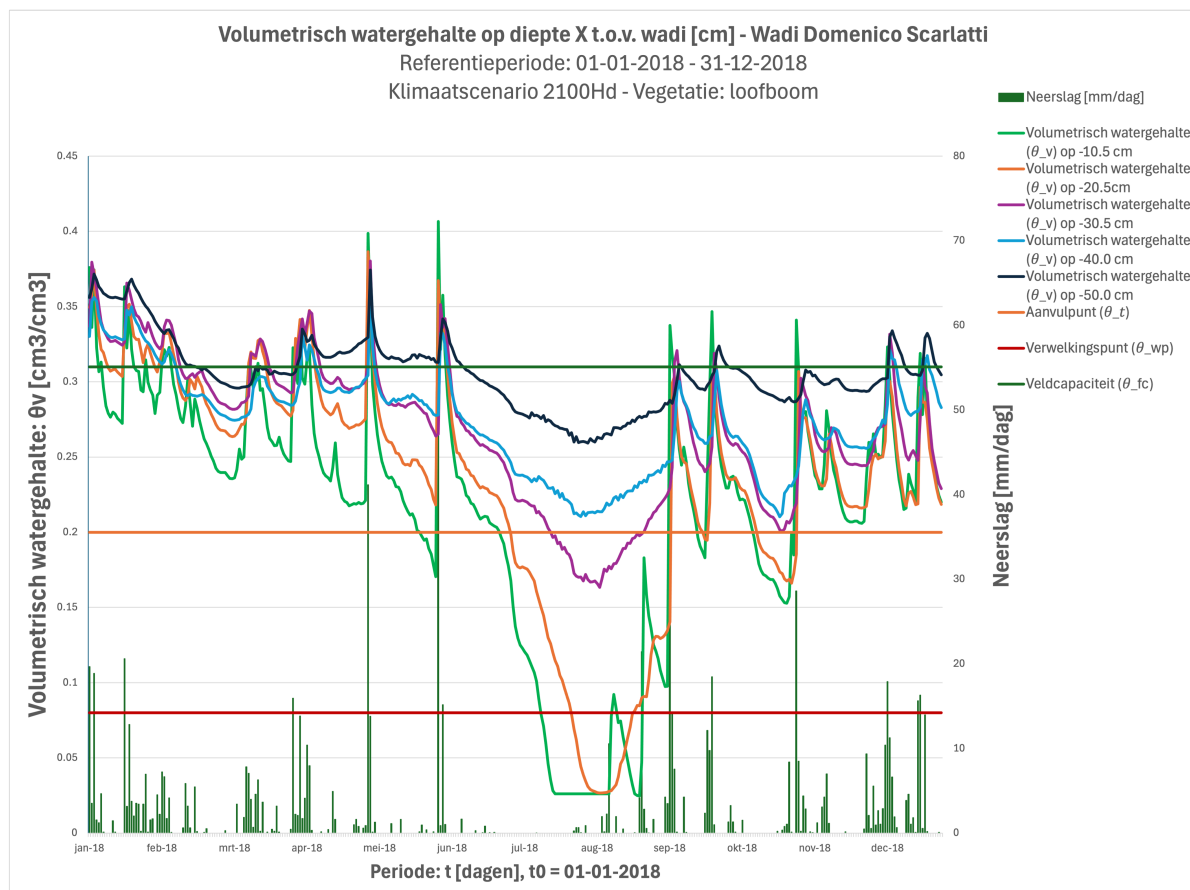
Voor de eerste vier resultaten, is de vegetatie factor $K_{mix,Domenico}$ toegepast. Voor het resultaat van figuur 4.9, is een vegetatie factor toegepast voor alleen natuurlijk gras ($K_{nat.gras}$). Door het aanpassen van de vegetatie factor, is het mogelijk om de invloed van verschillende vegetatietypen op het bodemvocht te onderzoeken. Voor de resultaten met het klimaatscenario '2100Hd' zijn uiteindelijk drie verschillende vegetatie factoren toegepast: $K_{nat.gras}$, $K_{struikheide}$ en $K_{loofboom}$.

Gekeken naar het resultaat van figuur 4.9, is te zien dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) op diepte -10.5 [cm] van de wadi voor een lange periode op het residueel vochtgehalte blijft hangen. Dit wordt veroorzaakt door zowel de blootstelling aan zonnestraling en wind, als de korte worteldiepte van natuurlijk gras waardoor vooral het bodemvocht van de ondiepe bodemlagen gebruikt wordt voor transpiratie (E_t). De worteldiepte van natuurlijk gras is ingesteld op 28 [cm] en is besproken in hoofdstuk 3.3.2. Daarnaast is te zien dat θ_v nauwelijks tot niet reageert op de neerslag in de maand juli en augustus, als het volumetrisch watergehalte (θ_v) het residueel vochtgehalte van de bodem heeft bereikt. Zoals al eerder vermeld, wordt de infiltratiecapaciteit van de bodem vaak beperkt door de lage vochtigheid, wanneer de bovengrond uitgedroogd is. Dit fenomeen is beschreven in de tweede alinea onder figuur 4.6 en is tevens vergelijkbaar met het resultaat van figuur 4.6.



Figuur 4.10: Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi in Domenico Scarlattilaan voor de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2100Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018 die aangepast zijn met de kerncijfers voor het klimaatscenario '2100Hd'. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot, struikheide}$ toegepast.

Voor het resultaat van figuur 4.10, is een vegetatie factor toegepast voor alleen struikheide ($K_{tot, struikheide}$). Voor struikheide is een worteldiepte van 40 [cm] toegepast (Hulsman et al., 2021). Een duidelijk verschil met het resultaat van figuur 4.9 voor natuurlijk gras, is dat het volumetrisch watergehalte op grotere diepte daalt tijdens perioden van droogte. Door een diepere worteldiepte in vergelijking met natuurlijk gras, wordt er meer bodemvocht uit de diepe bodemlagen gebruikt voor transpiratie (E_t). Dit is vooral voor de diepte -20.5 en -30.5 [cm] te zien.



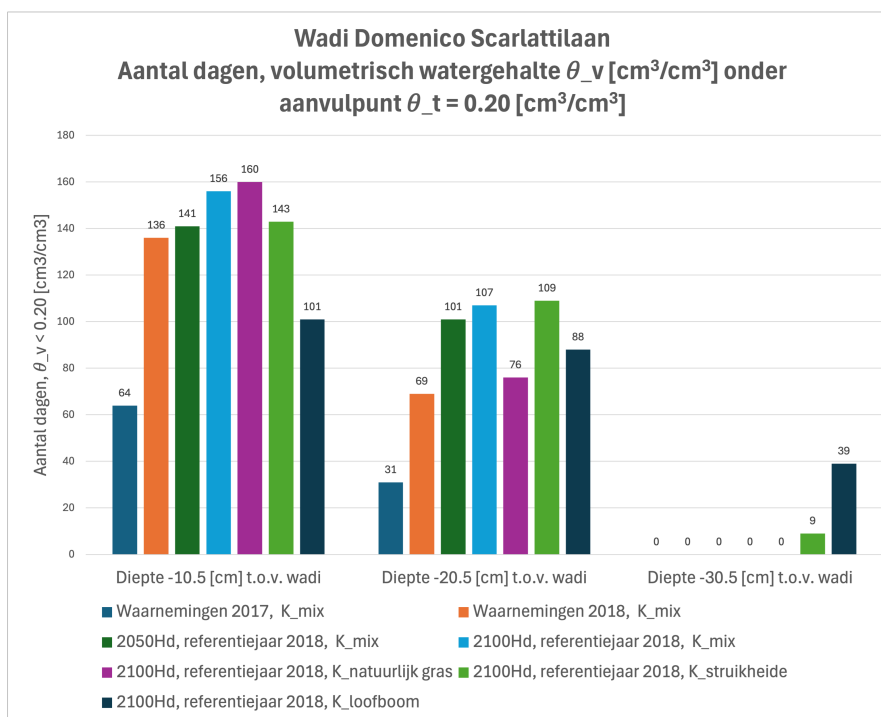
Figuur 4.11: Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi in Domenico Scarlattilaan voor de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2100Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018 die aangepast zijn met de kerncijfers voor het klimaatscenario '2100Hd'. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,loofboom}$ toegepast.

Voor het resultaat van figuur 4.11, is een vegetatie factor toegepast voor alleen loofbomen ($K_{tot,loofboom}$). Voor loofbomen is een worteldiepte toegepast die tot aan de gemiddelde hoogste grondwaterstand (GHG) komt. Dit is natuurlijk afhankelijk van de locatie en verschilt zodoende per wadi. Voor de wadi in de Domenico Scarlattilaan, is een worteldiepte van 65 [cm] toegepast. Een duidelijk verschil met het resultaat van figuur 4.9 voor natuurlijk gras, is dat het volumetrisch watergehalte op grotere diepte daalt tijdens perioden van droogte. Door een diepere worteldiepte in vergelijking met zowel natuurlijk gras als struikheide, wordt er meer bodemvocht uit de diepe bodemlagen gebruikt voor transpiratie (E_t). Dit is vooral voor de diepte op -20.5, -30.5 en -40.0 [cm] te zien. Het volumetrisch watergehalte op -20.5 [cm] daalt zelfs tot onder het verwelkingspunt (θ_{wp}).

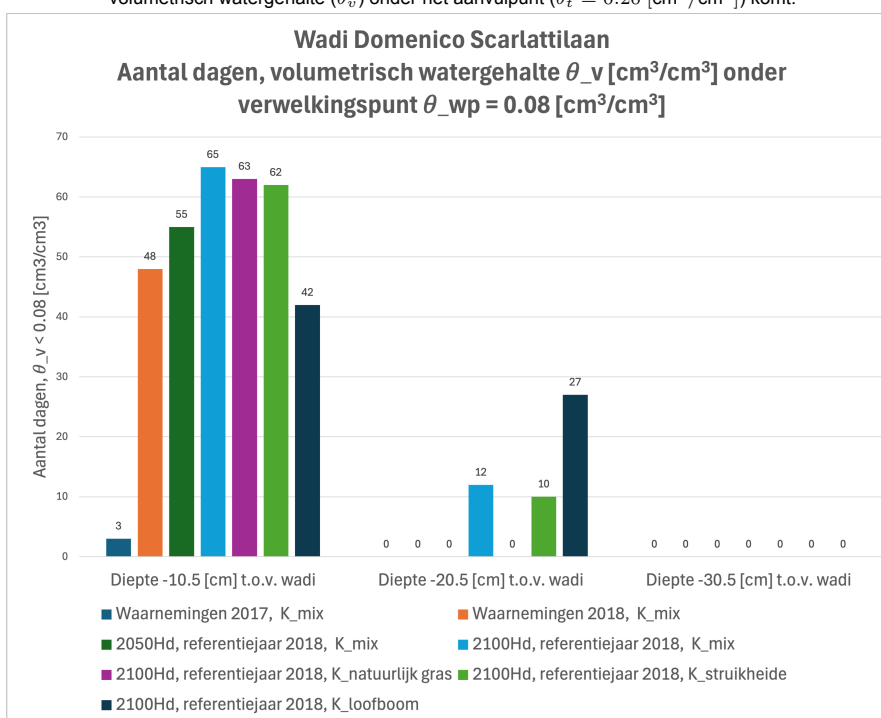
Ondanks dat het volumetrisch watergehalte van de ondiepere bodemlagen tot onder het verwelkingspunt (θ_{wp}) komt, zijn loofbomen en andere diepgewortelde vegetatie in staat om langdurig te overleven in omstandigheden van waterstress. Dit komt dankzij hun uitgebreide wortelsystemen waardoor ze toegang bieden tot diepere waterbronnen (Taiwo et al., 2020). Hier wordt verder op ingegaan in hoofdstuk 4.7.

Om de verschillen tussen de scenario's schematisch weer te geven, zijn in figuur 4.12 voor de wadi in de Domenico Scarlattilaan de volgende waarden gegeven:

1. Het totaal aantal dagen dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) per diepte onder het aanvulpunt ($\theta_t = 0.20$ [cm³/cm³]) komt.
2. Het totaal aantal dagen dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) per diepte onder het verwelkingspunt ($\theta_{wp} = 0.08$ [cm³/cm³]) komt.



(a) Voor de wadi in de Domenico Scarlattilaan, het aantal dagen per diepte t.o.v. de wadi dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het aanvulpunt ($\theta_t = 0.20$ [cm³/cm³]) komt.



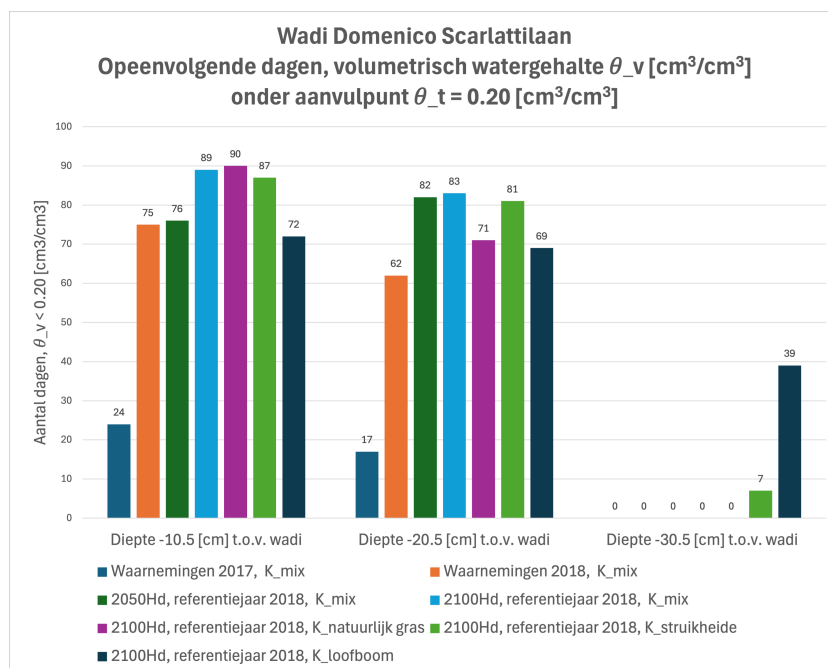
(b) Voor de wadi in de Domenico Scarlattilaan, het aantal dagen per diepte t.o.v. de wadi dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt ($\theta_{wp} = 0.08$ [cm³/cm³]) komt.

Figuur 4.12: In figuur 4.12a, zijn het aantal dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) van de wadi in de Domenico Scarlattilaan onder het aanvulpunt (θ_t) komt. In figuur 4.12b, zijn het aantal dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt (θ_{wp}) komt.

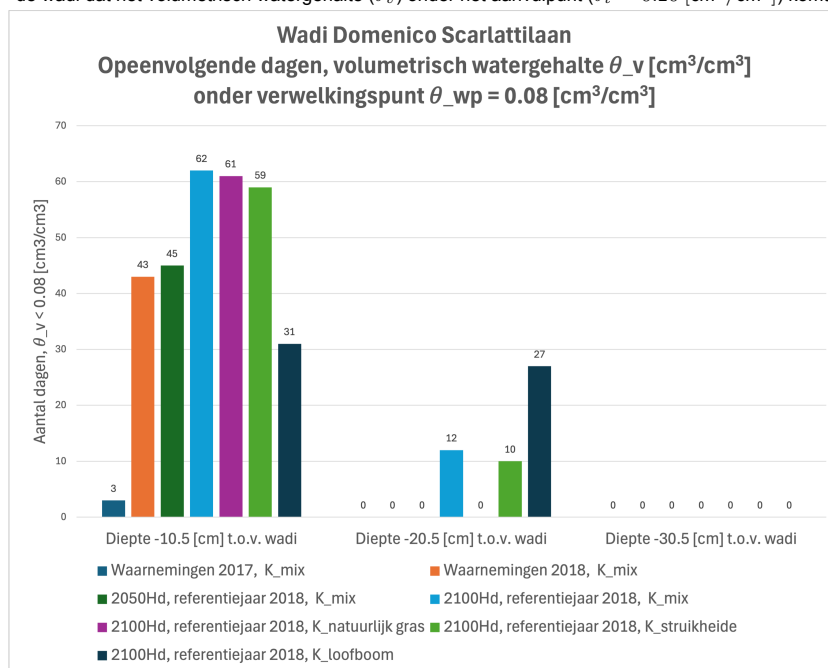
Daarnaast zijn in figuur 4.13 de volgende waarden gegeven:

1. Het aantal opeenvolgende dagen dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) per diepte onder het aanvulpunt ($\theta_t = 0.20$ [cm³/cm³]) komt.

2. Het aantal opeenvolgende dagen dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) per diepte onder het verwelkingspunt ($\theta_{wp} = 0.08 \text{ [cm}^3/\text{cm}^3]$) komt.



(a) Voor de wadi in de Domenico Scarlattilaan, het maximaal opeenvolgende dagen per diepte t.o.v. de wadi dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het aanvulpunt ($\theta_t = 0.20 \text{ [cm}^3/\text{cm}^3]$) komt.



(b) Voor de wadi in de Domenico Scarlattilaan, het maximaal opeenvolgende dagen per diepte t.o.v. de wadi dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt ($\theta_{wp} = 0.08 \text{ [cm}^3/\text{cm}^3]$) komt.

Figuur 4.13: In figuur 4.13a, zijn het aantal opeenvolgende dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) van de wadi in de Domenico Scarlattilaan onder het aanvulpunt (θ_t) komt. In figuur 4.13b, zijn het aantal opeenvolgende dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt (θ_{wp}) komt.

4.3. Bodemvocht wadi Europaplein

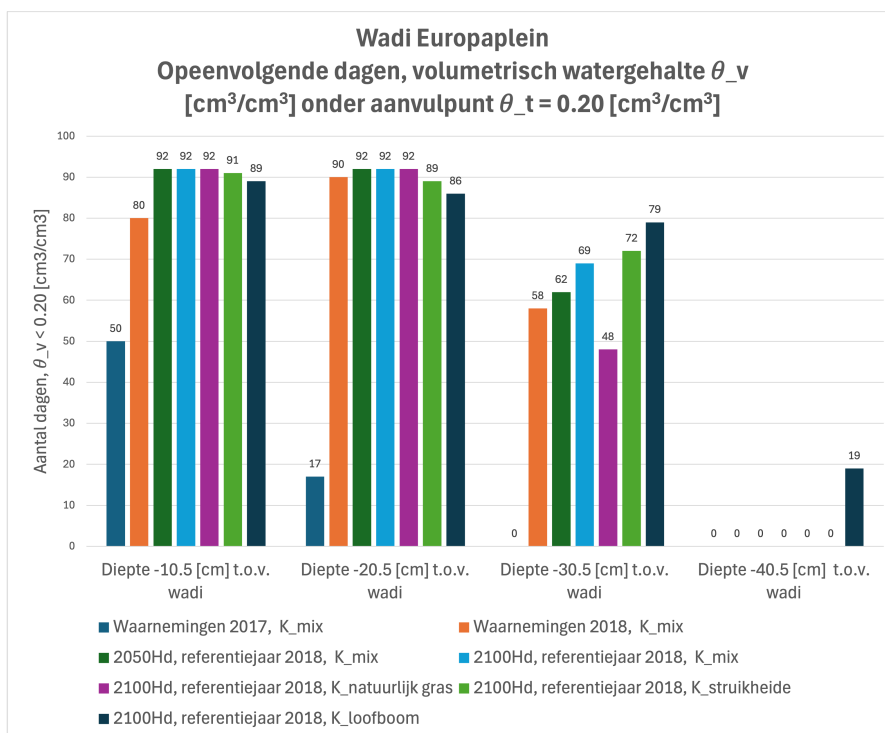
De model resultaten van het volumetrisch watergehalte (θ_v) van alle scenario's van de wadi op het Europaplein, zijn in bijlage B.2 te vinden. Met deze waarden kunnen de effecten van de (klimaat)scenario's en de gebruikte vegetatie factoren verklaard worden. Dit is voor de wadi in de Domenico Scarlattilaan gedaan en dit is beschreven in hoofdstuk 4.2.

Om de verschillen in resultaten tussen de scenario's schematisch weer te geven, zijn er twee drempelwaarden die van belang zijn. Ten eerste het aanvulpunt: vanaf dit punt begint de vegetatie droogte stress te ervaren aangezien er te weinig vocht in de bodem zit waardoor de vegetatie niet optimaal kan transpireren. Ten tweede het verwelkingspunt: vanaf dit punt kan de vegetatie helemaal geen water meer uit de bodem trekken omdat de zuigspanning van de bodem te hoog is. De duur van deze periode is van belang zodat er een indicatie kan worden gegeven of er schade aan de vegetatie ontstaat. In staafdiagrammen zijn het totaal aantal dagen dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) per diepte onder het aanvulpunt ($\theta_t = 0.20 \text{ [cm}^3/\text{cm}^3\text{]}$) komt, gegeven. Daarnaast zijn ook het totaal aantal dagen dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) per diepte onder het verwelkingspunt ($\theta_{wp} = 0.08 \text{ [cm}^3/\text{cm}^3\text{]}$) komt, gegeven. Deze twee waarden zijn in figuur B.10 voor de wadi op het Europaplein, in staafdiagrammen gegeven en staan in bijlage B.2.

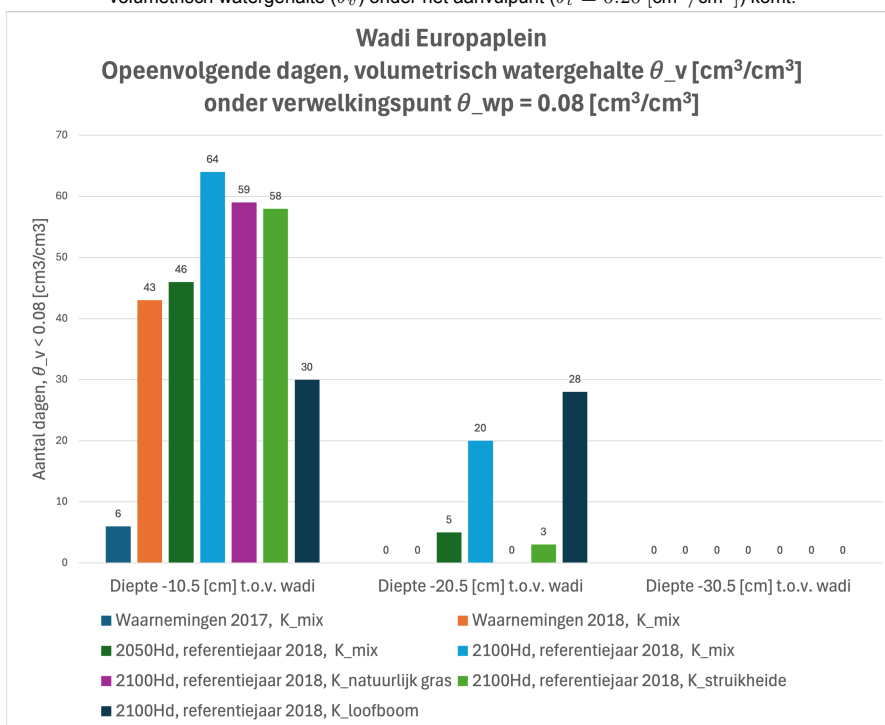
Vervolgens zijn in figuur 4.14 de volgende waarden gegeven:

1. Het aantal opeenvolgende dagen dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) per diepte onder het aanvulpunt ($\theta_t = 0.20 \text{ [cm}^3/\text{cm}^3\text{]}$) komt.
2. Het aantal opeenvolgende dagen dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) per diepte onder het verwelkingspunt ($\theta_{wp} = 0.08 \text{ [cm}^3/\text{cm}^3\text{]}$) komt.

De duur van het aantal maximaal opeenvolgende dagen dat het volumetrisch watergehalte onder een bepaalde drempelwaarde komt, is van belang voor het bepalen of een vegetatietype in een ononderbroken periode te lang droogte stress heeft ervaren.



(a) Voor de wadi op de Europaplein, het maximaal opeenvolgende dagen per diepte t.o.v. de wadi dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het aanvulpunt ($\theta_t = 0.20$ [cm³/cm³]) komt.



(b) Voor de wadi op de Europaplein, het maximaal opeenvolgende dagen per diepte t.o.v. de wadi dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt ($\theta_{wp} = 0.08$ [cm³/cm³]) komt.

Figuur 4.14: In figuur 4.14a, zijn het aantal opeenvolgende dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) van de wadi op het Europaplein onder het aanvulpunt (θ_t) komt. In figuur 4.14b, zijn het aantal opeenvolgende dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt (θ_{wp}) komt.

De verschillen in waarden van de figuren 4.14, laten zien dat hoe groter de worteldiepte van de vegetatietype is, hoe langer het volumetrisch watergehalte onder het aanvulpunt (θ_t) of zelfs het verwel-

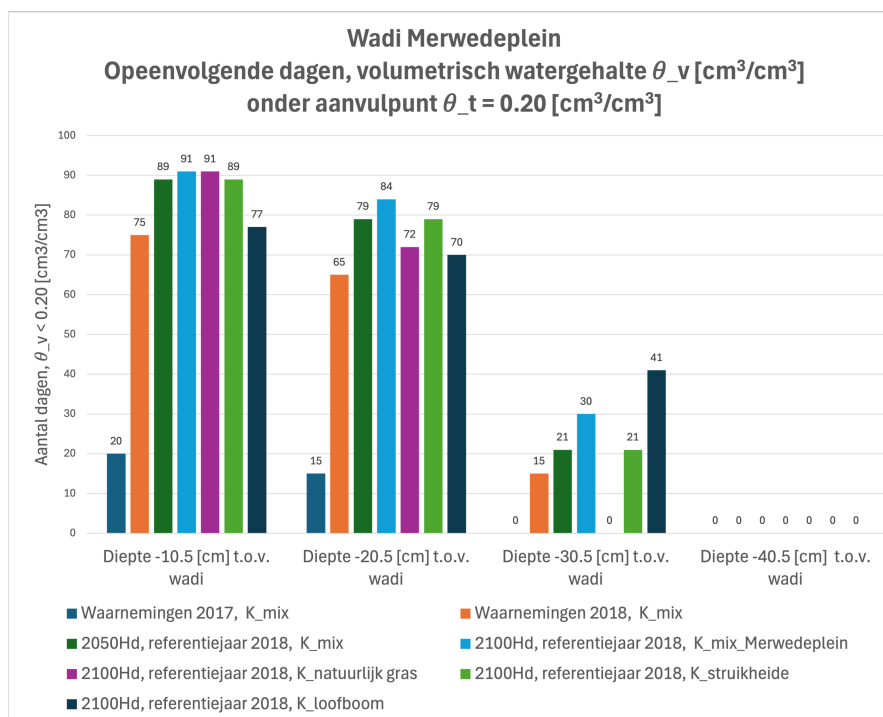
kingspunt (θ_{wp}) komt op grotere diepte (vanaf -30.5 [cm] en dieper). Zoals al eerder vermeld, komt dit doordat de vegetatie zoals struikheide maar vooral loofbomen, meer bodemvocht uit de diepere bodemlagen gebruikt voor transpiratie (E_t). Door een dieper wortelstelsel kan de vegetatie op verschillende bodemdieptes zijn vocht halen, waardoor ook het volumetrisch watergehalte op een diepte van -10.5 [cm] minder lang onder het aanvulpunt komt. Dit verschil is duidelijk te zien in figuur B.10a tussen de vegetatietypen: natuurlijk gras en loofbomen. Aangezien natuurlijk gras een ondiep wortelstelsel heeft, wordt het vocht alleen uit de ondiepe bodemlagen getrokken. Naast het verklaren van de verschillen tussen de scenario's van één wadi, kunnen deze waarden ten slotte gebruikt worden om de verschillen in resultaten tussen de verschillende wadi's te vergelijken. Dit is beschreven in hoofdstuk 4.6.

4.4. Bodemvocht wadi Merwedeplein

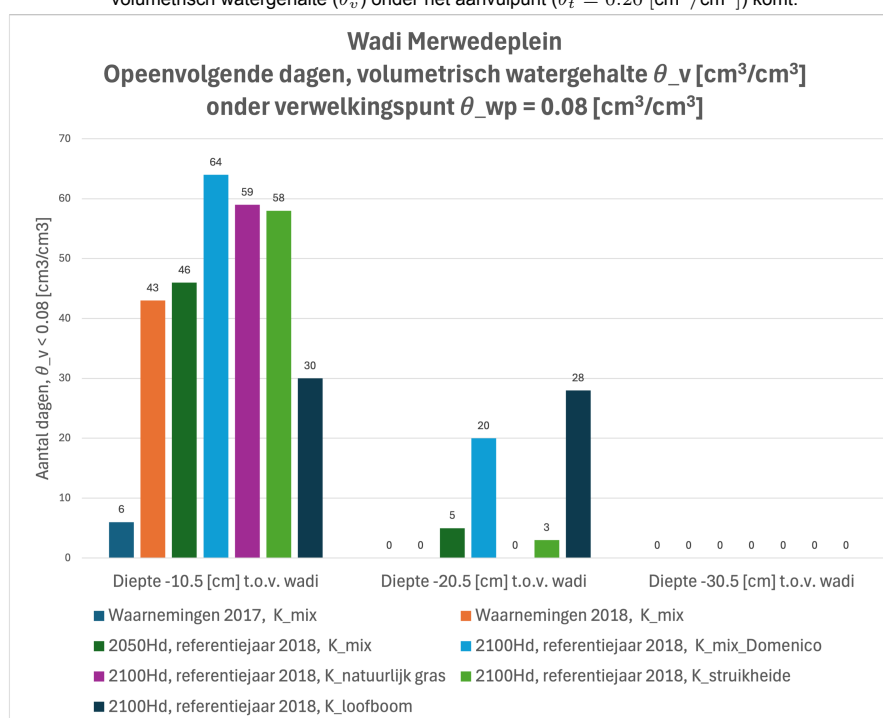
De model resultaten van het volumetrisch watergehalte (θ_v) van alle scenario's van de wadi op het Merwedeplein, zijn in bijlage B.3 te vinden.

Net zoals bij de andere wadi's, zijn de verschillen in resultaten tussen de scenario's in staafdiagrammen weergegeven. Dit is te zien in bijlage B.3 waar het totaal aantal dagen dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) per diepte onder het aanvulpunt ($\theta_t = 0.20$ [cm³/cm³]) komt, is gegeven. En daarnaast ook het totaal aantal dagen dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) per diepte onder het verwelkingspunt ($\theta_{wp} = 0.08$ [cm³/cm³]) komt. Deze waarden zijn in figuur B.19 gegeven.

Vervolgens zijn het aantal maximaal opeenvolgende dagen dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) per diepte onder het aanvulpunt ($\theta_t = 0.20$ [cm³/cm³]) komt en onder het verwelkingspunt ($\theta_{wp} = 0.08$ [cm³/cm³]), in figuur 4.15 gegeven. Dit is voor de wadi op het Merwedeplein.



(a) Voor de wadi op de Merwedeplein, het maximaal opeenvolgende dagen per diepte t.o.v. de wadi dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het aanvulpunt ($\theta_t = 0.20$ [cm^3/cm^3]) komt.



(b) Voor de wadi op de Merwedeplein, het maximaal opeenvolgende dagen per diepte t.o.v. de wadi dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt ($\theta_{wp} = 0.08$ [cm^3/cm^3]) komt.

Figuur 4.15: In figuur 4.15a, zijn het aantal opeenvolgende dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) van de wadi op het Merwedeplein onder het aanvulpunt (θ_t) komt. In figuur 4.15b, zijn het aantal opeenvolgende dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt (θ_{wp}) komt.

Zoals vermeld bij de vorige twee wadi's, zijn de effecten van de (klimaat)scenario's en de gebruikte vegetatie factoren met de bovenstaande waarden uit de staafdiagrammen beschreven. Dit is voor zowel de wadi in de Domenico Scarlattilaan gedaan (hoofdstuk 4.2), als voor de wadi op het Europaplein

(hoofdstuk 4.3). Ten slotte kunnen deze waarden gebruikt worden om de verschillen in resultaten tussen de wadi's te vergelijken. Dit is beschreven in hoofdstuk 4.6.

4.5. Bodemvocht wadi Prinses Irenestraat

De model resultaten van het volumetrisch watergehalte (θ_v) van alle scenario's van de wadi in de Prinses Irenestraat, zijn in bijlage B.4 te vinden.

Net zoals bij de andere drie wadi's, zijn de verschillen in resultaten tussen de scenario's in staafdiagrammen weergegeven. Dit is te zien in bijlage B.4, in figuur B.28 en B.29 voor de wadi in de Prinses Irenestraat en hier zijn de volgende waarden gegeven:

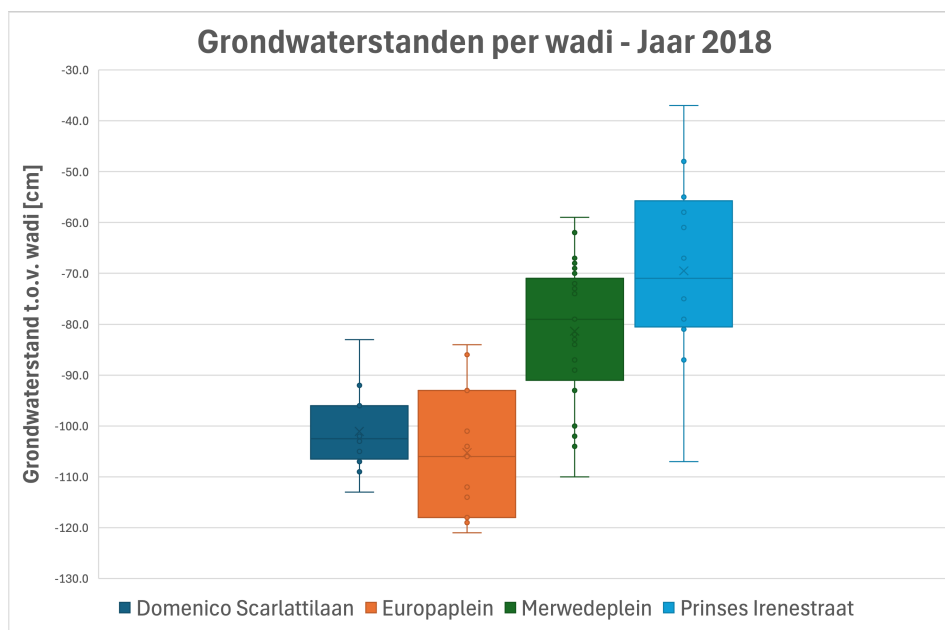
1. Het totaal aantal dagen dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) per diepte onder het aanvulpunt ($\theta_t = 0.20 \text{ [cm}^3/\text{cm}^3\text{]}$) komt.
2. Het totaal aantal dagen dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) per diepte onder het verwelkingspunt ($\theta_{wp} = 0.08 \text{ [cm}^3/\text{cm}^3\text{]}$) komt.
3. Het aantal opeenvolgende dagen dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) per diepte onder het aanvulpunt ($\theta_t = 0.20 \text{ [cm}^3/\text{cm}^3\text{]}$) komt.
4. Het aantal opeenvolgende dagen dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) per diepte onder het verwelkingspunt ($\theta_{wp} = 0.08 \text{ [cm}^3/\text{cm}^3\text{]}$) komt.

4.6. Vergelijking resultaten

Voor de vier wadi's die gemodelleerd zijn, zijn per wadi in totaal zeven resultaten gegeven voor verschillende scenario's. Zoals eerder vermeld in dit hoofdstuk, verschillen deze zeven resultaten in meteorologische waarden en/of vegetatie factoren. In dit hoofdstuk worden de resultaten van één wadi onderling of tussen de verschillende wadi's geanalyseerd. Gedurende de analyse, is er gekeken welk kenmerk van de wadi hier invloed op heeft gehad. Hierbij worden de grondwaterstanden, heterogene bodemopbouwen met onder andere de bijbehorende waterdoorlatendheid (K_s -waarde) en samenstellingen van vegetatietypen ($K_{tot,mix}$) meegenomen.

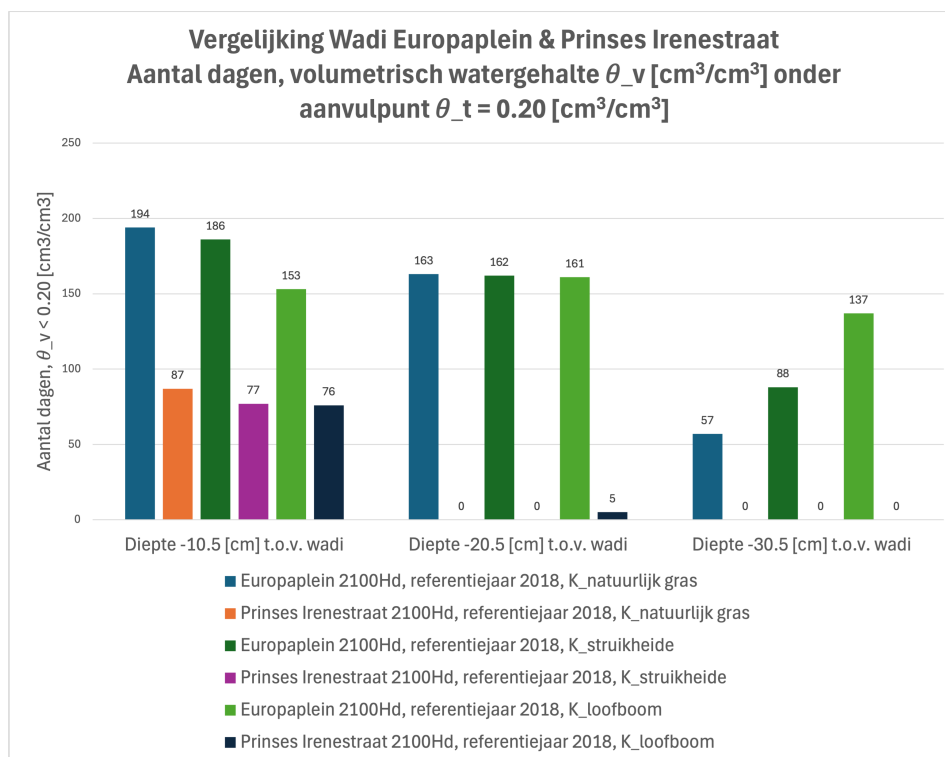
4.6.1. Effect grondwaterstanden

Voor het analyseren van het effect van de grondwaterstanden, is er gekeken naar de scenario's met de vegetatie factoren $K_{nat.gras}$, $K_{struikheide}$ en $K_{loofboom}$. Hierdoor is de worteldiepte gelijk en kan dit als constante worden genomen. De grondwaterstanden verschillen natuurlijk wel per onderzoekslocatie. Waarbij de grondwaterstanden van de wadi in de Domenico Scarlattilaan in het jaar 2018 tussen de waarden -83.0 en -113.0 [cm] t.o.v. de wadi vielen, was de range van de wadi op het Europaplein tussen -84.0 en -121.0 [cm] t.o.v. de wadi. Voor het jaar 2018 was de gemiddelde grondwaterstand in de Domenico Scarlattilaan -101.1 [cm] t.o.v. de wadi en voor het Europaplein, -105.3 [cm] t.o.v. de wadi. Deze ranges zijn in figuur 4.16 duidelijk weergegeven in de vorm van boxplots.



Figuur 4.16: De grondwaterstanden ten opzichte van de wadi in centimeters. Dit is gegeven voor elke wadi voor het jaar 2018 en verwerkt in de vorm van boxplots. De hoeveelheid gemeten grondwaterstanden verschilt per wadi en heeft invloed op de indeling van de boxplots.

Zoals te zien in figuur 4.16, is de range van de grondwaterstanden van de wadi op het Merwedeplein en van de wadi in de Prinses Irenestraat groter. Dit betekent dat het grondwaterpeil van beide wadi's gedurende het jaar 2018 wisselvalliger is geweest. De grondwaterstanden van de wadi op het Merwedeplein in het jaar 2018, liggen tussen de waarden -59.0 en -110.0 [cm] t.o.v. de wadi. De range van de wadi in de Prinses Irenestraat, ligt tussen -37.0 en -107.0 [cm] t.o.v. de wadi. Met name de grondwaterstanden van de wadi in de Prinses Irenestraat, zijn relatief hoog t.o.v. de wadi gekomen. Dit is dan ook duidelijk terug te zien in de resultaten van figuur 4.17. Hier zijn het aantal dagen dat $\theta_v < \theta_t$ voor de wadi op het Europaplein en de wadi in de Prinses Irenestraat vergeleken. Door de hoge grondwaterstanden, is het volumetrisch watergehalte alleen op diepte -10.5 [cm] onder het aan-vulpunt gekomen. Daarnaast is dit vergeleken met de andere wadi's, in totaal aanzienlijk minder dagen voorgekomen. Bovendien gekeken naar het aantal dagen dat het volumetrisch watergehalte onder het verwelkingspunt is gekomen, zijn de waarden verwaarloosbaar vergeleken met de overige drie wadi's. Zoals verwacht, geeft dit aan dat de grondwaterstanden een grote invloed hebben op het volumetrisch watergehalte.



Figuur 4.17: Een vergelijking tussen de wadi op het Europaplein en de wadi in de Prinses Irenestraat. Hier zijn het aantal dagen dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het aanvulpunt (θ_t) komt voor beide wadi's gegeven. Door grotendeels het verschil in grondwaterstanden, zijn de waarden van de wadi in de Prinses Irenestraat significant lager dan de waarden van de wadi op het Europaplein.

De invloed van de grondwaterstanden is daarnaast ook duidelijk te zien in figuur 4.18. Hier worden de waarden van het totaal aantal dagen dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het aanvulpunt ($\theta_t = 0.20$) komt, gegeven en deze verschillen behoorlijk van elkaar. Als gevolg van de lagere grondwaterstanden, zijn het totaal aantal dagen dat $\theta_v < \theta_t$, behoorlijk hoger voor de wadi op het Europaplein dan de wadi in de Domenico Scarlatti. Vegetatie haalt haar water voornamelijk uit de onverzadigde zone van de bodem. Het water in die zone bestaat uit geïnfiltreerd regenwater, ook wel hangwater, dat in de bovengrond is achtergebleven en uit grondwater dat via capillaire opstijging de wortels bereikt. Door de gemiddeld lagere grondwaterstand, bereikt minder grondwater de wortels van de vegetatie. Bij capillaire opstijging zuigen de poriën in de bodem zich vol met grondwater. Uiteindelijk kan die zone buiten het bereik van wortels komen te liggen (Hoogvliet et al., 2021). Dit is vooral van belang tijdens periode van droogte omdat de vegetatie zijn water niet meer uit de hangwaterzone kan halen. In hoofdstuk 4.8 wordt er nog verder ingegaan op de invloed van de grondwaterstanden, door middel van een gevoeligheidsanalyse.

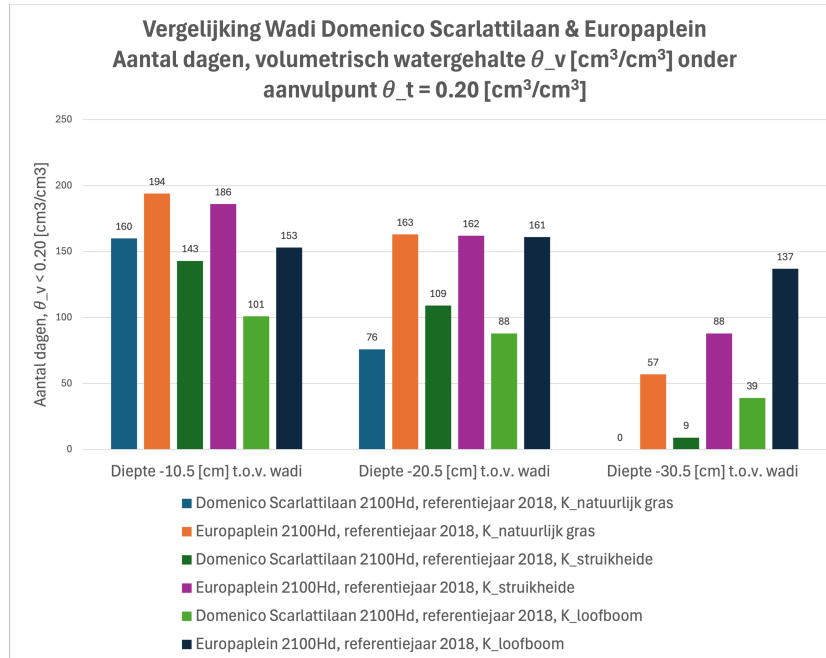
4.6.2. Effect bodemopbouw

Gekeken naar de bodemopbouw van de wadi, zijn vooral de waarden van de waterdoorlatendheid (K-waarde) en het verzadigde vochtgehalte (θ_s) van belang. Deze waarden zijn in tabel 4.1 gegeven. De waarde voor de waterdoorlatendheid geeft aan met welke snelheid de neerslag de grond infiltreert, ook wel de infiltratiecapaciteit [cm/d]. Voor de bodemlaag met schimmeldominante humuscompost, zijn deze waarden enigszins lager dan voor de bodemlaag met bomenzand. Hierdoor duurt het langer voordat het regenwater in de bodem trekt. Echter is de waarde van het verzadigde vochtgehalte (θ_s [cm³/cm³]) wel behoorlijk hoger. Door de capaciteit van het hogere verzadigde vochtgehalte, kan deze bodemlaag meer regenwater tot zich nemen. Dit komt door de hogere porositeit, waardoor er meer ruimte is om regenwater te bergen. Als het verzadigde vochtgehalte bereikt wordt, is er meer bodemvocht beschikbaar voor de vegetatie. Hierdoor kan een langere periode van droogte overbrugd worden, zonder dat de vegetatie te weinig bodemvocht ter beschikking heeft.

Tabel 4.1: Bodemfysische parameters van de bodemlagen 'bomenzand' en 'schimmeldominante humuscompost'

Staringreeks bodemlaag	Verzadigd water-doorlatendheid K_s [cm/d]	Verzadigd vochtgehalte θ_s [cm ³ /cm ³]
Bomenzand	31.23	0.427
Schimmeldominante humuscompost	12.36	0.786

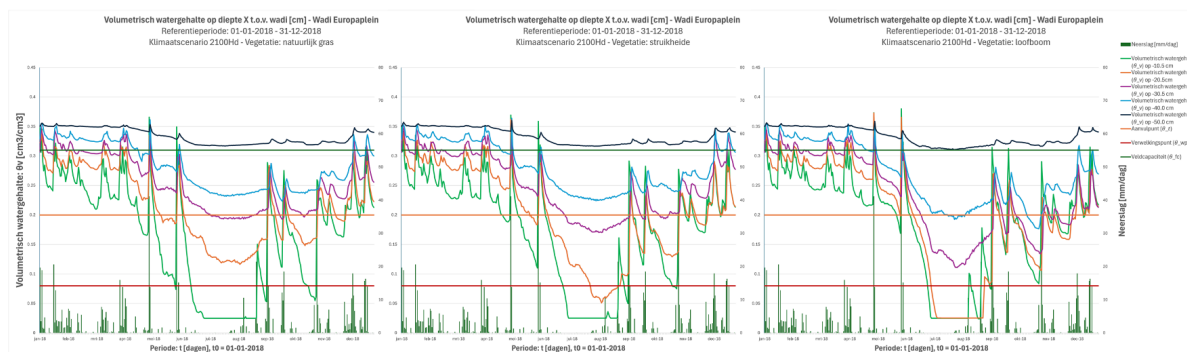
De bodemlaag met schimmeldominante humuscompost, is toegepast in de eerste bodemlaag van zowel de wadi in de Domenico Scarlattilaan als de wadi in de Prinses Irenestraat. In de wadi op het Europaplein en op het Merwedeplein, ontbreekt deze laag en is de eerste bodemlaag meteen bomenzand. Bomenzand heeft een hogere waterdoorlatendheid en een lager verzadigd vochtgehalte dan de bodemlaag met schimmeldominante humuscompost. Dit heeft als gevolg dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) van de ondiepere bodemlagen van de wadi met alleen bomenzand, eerder daalt naar het aanvulpunt (θ_t). Dit gebeurt als er een langere periode geen neerslag valt. Dit kenmerk is zodoende terug te zien in bijvoorbeeld de waarden van figuur 4.18. Voor de diepte -10.5 en -20.5 [cm] is te zien dat het aantal dagen dat $\theta_v < \theta_t$, behoorlijk lager liggen voor de wadi in de Domenico Scarlattilaan dan de wadi op het Europaplein. Deze waarden zijn natuurlijk beïnvloedt door zowel de verschillen in bodemlagen als de verschillen in de grondwaterstanden. Al heeft het verschil tussen de eerste bodemlagen meer invloed op het volumetrisch watergehalte (θ_v) in de ondiepere bodemlagen (diepte van -10.5 en -20.5 [cm]) en de grondwaterstanden meer op het volumetrisch watergehalte (θ_v) in de diepere bodemlagen (vanaf -30.5 [cm]). Hoeveel invloed de grondwaterstanden hebben op het volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes, is geanalyseerd in hoofdstuk 4.8.



Figuur 4.18: Een vergelijking tussen de wadi in de Domenico Scarlattilaan en de wadi op het Europaplein. Hier zijn het aantal dagen dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het aanvulpunt (θ_t) komt voor beide wadi's gegeven. Door deels het verschil in bodemopbouw, zijn de waarden van de wadi in de Domenico Scarlattilaan significant lager dan de waarden van de wadi op het Europaplein.

4.6.3. Effect vegetatie

Het laatste kenmerk van de wadi, is de vegetatie die in de wadi zijn geplant. Om hier de invloed van te analyseren, zijn ten eerste drie resultaten van de wadi op het Europaplein gebruikt. De scenario's die hierin zijn meegenomen zijn alle drie het referentie jaar 2018 met klimaatscenario '2100Hd' en op-eenvolgend de vegetatiefactoren: $K_{nat.gras}$, $K_{struikheide}$ en $K_{loofboom}$. Deze drie scenario's zijn naast elkaar in figuur 4.19 weergegeven. Hierdoor is het mogelijk om aan te duiden wat de invloed van de verschillende vegetatietypen is.

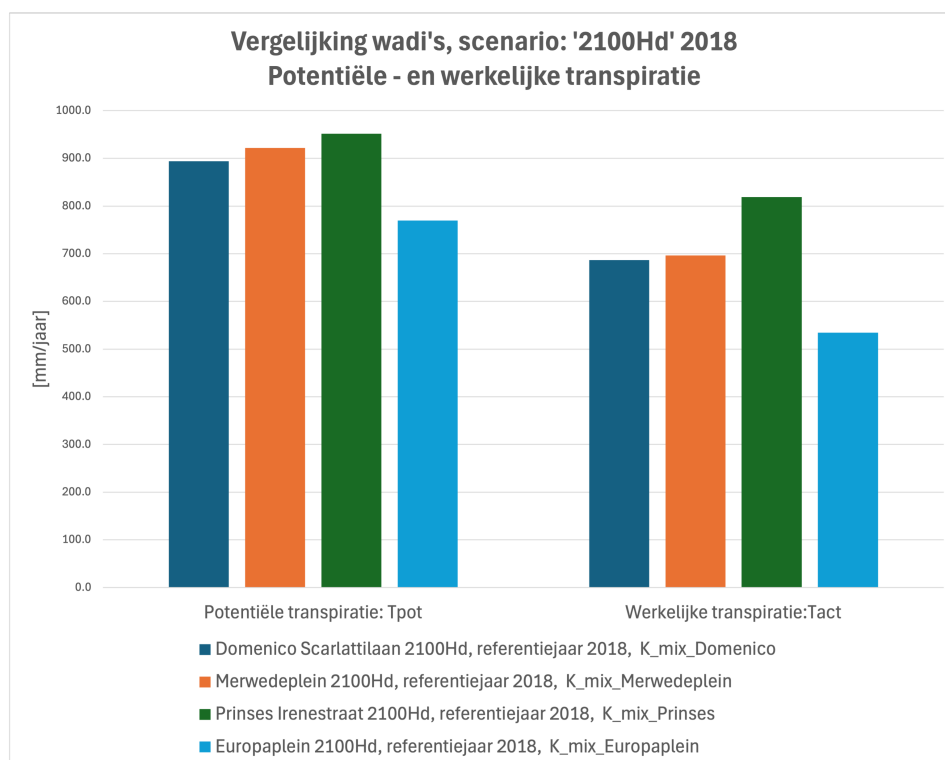


Figuur 4.19: In deze vergelijking zijn drie scenario's te zien van de wadi op het Europaplein. Alle drie met klimaatscenario '2100Hd' maar van links naar rechts met respectievelijk de vegetatiefactor: $K_{nat.gras}$, $K_{struikheide}$ en $K_{loofboom}$. Hierdoor is de invloed van de vegetatietype duidelijk zichtbaar op het verloop van het bodemvocht gedurende het referentie jaar 2018.

In bovenstaande figuur is duidelijk zichtbaar dat hoe dieper het wortelstelsel van de vegetatie is, hoe meer bodemvocht er van de diepere bodemlagen (diepte van -20.5 en -30.5 [cm], respectievelijk oranje - en paarse lijn) wordt gebruikt. Hierdoor daalt het volumetrisch watergehalte (θ_v) op deze dieptes tot ruim onder het aanvulpunt. Daarentegen wordt het gebruikte bodemvocht wel verdeeld over meerdere dieptes waardoor bijvoorbeeld het volumetrisch watergehalte op een diepte van -10.5 [cm], minder lang onder het verwelkingspunt komt. Dit is vooral zichtbaar bij het scenario met vegetatietype: loofbomen.

Aangezien er in de werkelijkheid meerdere vegetatietypen in de wadi zijn geplant en niet maar één vegetatietype zoals hierboven was beschreven, wordt er ten slotte gekeken naar een aantal scenario's met een samenstelling van vegetatietypen door middel van een samengestelde vegetatiefactor. Om deze scenario's te analyseren, zijn de vier wadi's met het klimaatscenario '2100Hd' en vegetatie factor K_{mix} vergeleken. Hierdoor zijn de meteorologische waarden constant en zullen de verschillen in resultaten komen door de samenstelling van vegetatietypen. Echter moet er rekening worden gehouden dat de verschillen ook door de samenstelling van de bodemopbouw en de verschillen in grondwaterstanden komen. In figuur 4.1, 4.2, 4.3 en 4.4 zijn de waarden voor de potentiële - en werkelijke evaporatie en transpiratie gegeven. Hier is een duidelijk verschil in transpiratie te zien. Zowel de waarden voor potentiële transpiratie als werkelijke transpiratie, zijn behoorlijk hoger voor de wadi in de Domenico Scarlattilaan dan de wadi op het Europaplein. Respectievelijk, 894.2 tegen 769.5 [mm/jaar] en 686.4 tegen 534.2 [mm/jaar]. Dit komt doordat er bij de samengestelde vegetatiefactor, loofbomen in de wadi van de Domenico Scarlattilaan zijn meegenomen en niet in de wadi op het Europaplein. Deze waarden zijn weergegeven in figuur 4.20.

Loofbomen en andere diepgewortelde vegetatie, hebben over het algemeen een hogere transpiratiesnelheid vanwege hun grotere bladoppervlakte en intensieve fotosynthese. De transpiratie kan variëren tussen 3 en 8 [mm/dag], afhankelijk van de soort bomen, bodemvocht en klimaat (Monteith, 2000). In vergelijking met natuurlijk gras, varieert de transpiratie tussen 2 tot 5 [mm/dag] (Allen et al., 1998). Voor struikheide zijn de waarden vergelijkbaar of zelf iets lager vergeleken natuurlijk gras, tussen 2 tot 4 [mm/dag] in gematigde klimaten (Henry and Jefferies, 2003). Dit is ook terug te zien in de waarden van de transpiratie van de wadi op het Merwedeplein en de wadi in de Prinses Irenestraat. Beide waarden voor de potentiële transpiratie liggen significant hoger dan de waarden van de wadi op het Europaplein, respectievelijk 921.9 en 951.9 [mm/jaar]. Wederom zijn deze waarden gegeven in figuur 4.20.



Figuur 4.20: Een vergelijking in de potentiële - en werkelijke transpiratie tussen de vier gemodelleerde wadi's. Elke wadi is gemodelleerd met zijn eigen samengestelde vegetatiefactor: K_{mix} in scenario '2100Hd' met referentieperiode 2018. De waarden van de wadi op het Europaplein zijn significant lager dan voor de andere wadi's. Dit komt doordat er geen bomen zoals loofbomen in de wadi zijn geplant. Deze vegetatietype transpireert tussen 3 en 8 $[mm/dag]$ in vergelijking met 2 tot 4 $[mm/dag]$ voor struikheide en 2 tot 5 $[mm/dag]$ voor natuurlijk gras. Dit verklaart de lagere transpiratie waarden voor de wadi op het Europaplein.

4.7. Vegetatieschade

De waarden die zijn gegeven in de staafdiagrammen in figuur 4.13a, 4.14a, 4.15a en B.29a zijn van groot belang aangezien de duur van de periode dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder een bepaalde drempelwaarde (θ_t) komt, gebruikt kan worden om een indicatie te geven of de vegetatie (permanente) schade oploopt. Dit was al even kort aangekaart bij het resultaat van figuur 4.6. Hieronder wordt voor de natuurlijke vegetatietypen die gebruikt zijn in het model SWAP, per vegetatietype aangegeven hoe er met droogte wordt omgegaan en of de vegetatie droogte resistent is. Daarnaast wordt een indicatie gegeven hoe lang de vegetatietype droogte stress kan weerstaan voordat het permanente schade oploopt.

Natuurlijk gras heeft het vermogen om periodes van droogte te overleven, hoewel het gevoelig is voor uitdroging en vaak vergeeft wanneer het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het aanvulpunt ($\theta_t = 0.20 [cm^3/cm^3]$) zakt. Dit komt voornamelijk doordat natuurlijk gras een beperkte worteldiepte heeft. Ondanks bovengrondse uitdroging, is een belangrijk kenmerk van gras dat het wortelstelsel vaak blijft leven. Dit komt doordat veel grassoorten, vooral natuurlijke of inheemse grassen, in een rusttoestand gaan als ze worden blootgesteld aan droogte. Deze toestand wordt gekenmerkt als dormantie en tijdens deze periode sluiten de stomata van de plant (Taiwo et al., 2020). Dit zorgt ervoor dat het waternutverlies minimaliseert, en de groei stopt om energie te besparen.

Het gras vergeeft omdat het de productie van chlorofyl vermindert, wat zorgt voor de groene kleur en betrokken is bij de fotosynthese (Taiwo et al., 2020). Dit geeft het gras de mogelijkheid om na regenval snel te herstellen. Onder normale omstandigheden kan gras meerdere weken (2 - 6 weken) aan droogte blootgesteld worden zonder onherstelbare schade. Zodra het weer toegang heeft tot water,

absorberen de wortels snel vocht, en binnen een paar dagen wordt de groei hervat en herstelt het gras zijn groene kleur.

Struiken hebben vaak diepere wortels, waardoor ze langer toegang hebben tot water in diepere bodemlagen. De diepere wortels dragen bij aan hun vermogen om droogte te weerstaan, zelfs wanneer het bodemvocht in de bovenste lagen beperkt is (Taiwo et al., 2020). Dit kan hen helpen om droogte gedurende enkele weken tot zelfs een paar maanden te overleven, hoewel hun groei vertraagt. Echter zullen struiken na langdurige blootstelling aan droogte, uiteindelijk bladverlies of groeiremming ervaren. Doorgaans kunnen struiken 3 tot 8 weken aan droogtestress overleven zonder permanente schade, maar naarmate de droogte voortduurt, treedt er uiteindelijk schade op aan de bladeren of stengels (Han and Singh, 2023).

Zoals vermeld bij het resultaat van figuur 4.11, kunnen loofbomen en andere diepgewortelde vegetatie langdurig overleven in omstandigheden van waterstress. Dankzij hun diepe wortelstelsel kunnen ze waterbronnen bereiken die ontoegankelijk zijn voor oppervlakkig gewortelde planten. Uiteindelijk zullen bomen echter ook symptomen van uitdroging vertonen, zoals bladvergeling, taksterfte of afsterven van het bovenste bladerdek. Afhankelijk van de boomsoort kan droogtestress gedurende enkele maanden tot een heel groeiseizoen (3 - 6 maanden) overleefd worden zonder ernstige schade. Echter na langdurige periodes van droogte en herhaalde blootstelling, kunnen onherstelbare symptomen optreden en uiteindelijk fataal zijn (Taiwo et al., 2020).

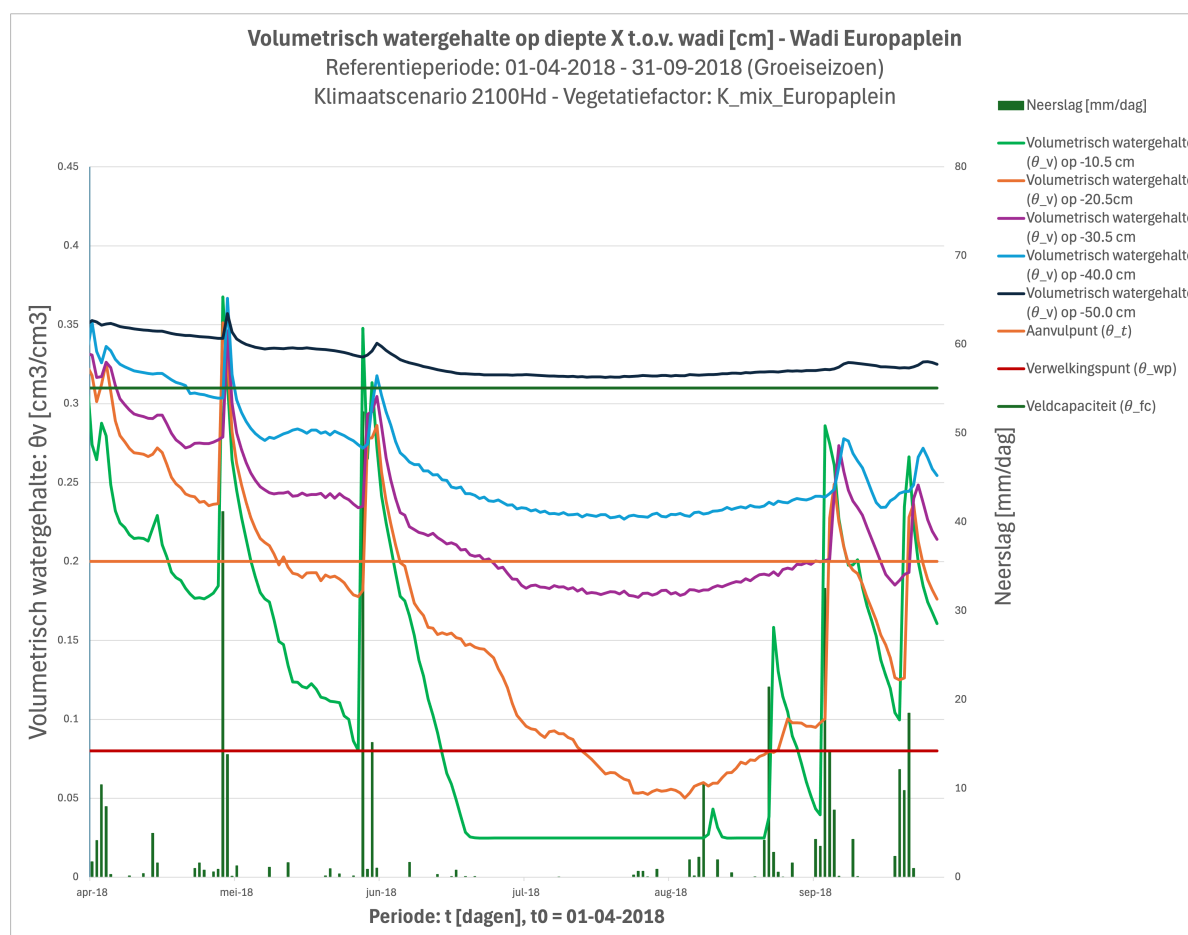
Naar aanleiding van de hierboven gegeven indicaties hoe lang een bepaalde vegetatietype een periode van droogtestress kan overleven zonder dat het definitieve schade oploopt, wordt de ononderbroken periode bedoeld dat het volumetrisch watergehalte onder het aanvulpunt komt ($\theta_v < \theta_t$). Dit moet per vegetatietype bekeken worden voor alle dieptes tot aan de worteldiepte. Voor de wadi in de Domenico Scarlattilaan, zijn bijvoorbeeld het maximaal aantal opeenvolgende dagen voor scenario '2100Hd' met vegetatie factor $K_{mix,Domenico}$ dat $\theta_v < \theta_t$ gegeven (figuur 4.13a). Hier is te zien dat voor diepte -10.5 [cm] en -20.5 [cm] onder de wadi, respectievelijk 76 en 82 dagen is. Echter is te zien dat op diepte -30.5 [cm], het volumetrisch watergehalte nooit onder het aanvulpunt komt. Met een worteldiepte van 28 [cm] (Hulsman et al., 2021), heeft het natuurlijk gras nog zeker toegang tot water op -30.5 [cm] diepte door middel van capillaire werking. Dit betekent dat, hoewel de bovenste lagen (tot -20.5 [cm]) droog zijn, de wortels in de diepere lagen nog voldoende vocht kunnen opnemen. Hierdoor vertonen mogelijk de bovengrondse delen van het natuurlijk gras tekenen van droogtestress, zoals vergeling of groeivertraging, desalniettemin is de kans op permanente schade gering zolang de diepere wortels toegang tot water behouden (Taiwo et al., 2020). Kortom, de conclusie kan worden getrokken dat alle drie de vegetatietypen: natuurlijk gras, struikheide en loofbomen in de wadi in de Domenico Scarlattilaan aan géén permanente schade oploopt op korte termijn.

Na het analyseren van alle gemodelleerde scenario's per wadi zoals hierboven beschreven, springen er vijf scenario's uit. De eerste vier scenario's zijn van de wadi op het Europaplein. Dit zijn de volgende vier scenario's:

1. Waarnemingen 2018 met vegetatie factor: $K_{mix,Europaplein}$
2. Klimaatscenario '2050Hd' met vegetatie factor: $K_{mix,Europaplein}$
3. Klimaatscenario '2100Hd' met vegetatie factor: $K_{mix,Europaplein}$
4. Klimaatscenario '2100Hd' met vegetatie factor: $K_{nat.gras}$

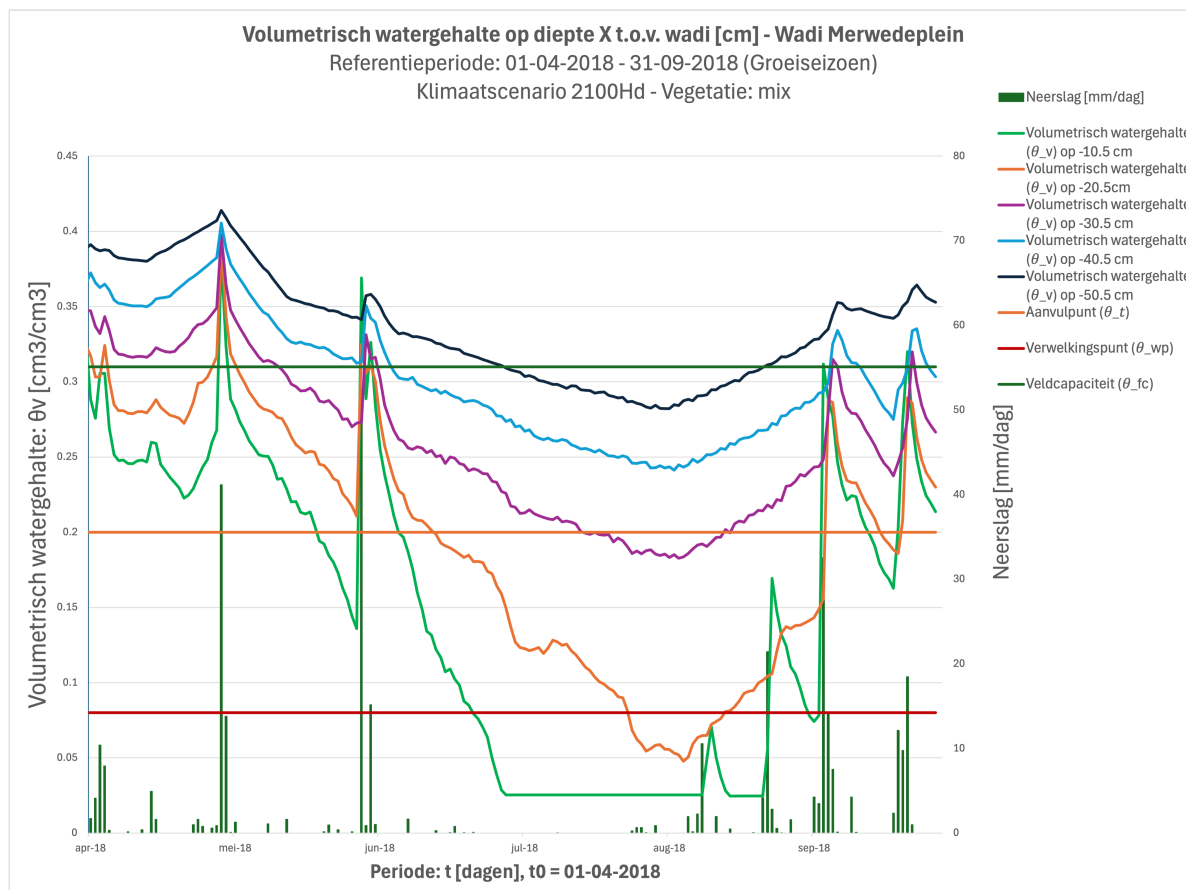
Voor het scenario met klimaatscenario '2100Hd' met referentieperiode 2018 en vegetatie factor: $K_{mix,Europaplein}$, is als vegetatie factor een samenstelling van vegetatietypen: natuurlijk gras en struikheide gebruikt met een gemiddelde worteldiepte van 34.0 [cm]. Deze samenstelling is toegepast om zo de werkelijke samenstelling van de vegetatie in de wadi, zo realistisch mogelijk te modelleren. Voor dit specifieke scenario van de wadi op het Europaplein, zijn het maximaal aantal opeenvolgende dagen dat $\theta_v < \theta_t$ voor de diepte -10.5, -20.5 en -30.5 [cm] t.o.v. de wadi, respectievelijk 92, 92 en 69 dagen. Dit betekent dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) voor in ieder geval 69 dagen onder het aanvulpunt is gekomen voor een diepte tot -30.5 [cm] t.o.v. de wadi. Aangezien natuurlijk gras een worteldiepte heeft van 28 centimeter en onder normale omstandigheden gemiddeld 4 weken aan droogte blootgesteld kan worden zonder onherstelbare schade, is een droogte stress periode van 69 dagen (ongeveer 10 weken)

te lang. Hieruit kan worden geconcludeerd dat er permanente schade aan de vegetatietype: natuurlijk gras is ontstaan. De overige vegetatietype: struikheide, zal in dit scenario géén permanente schade ondervinden omdat de bijbehorende worteldiepte groter is en daardoor water uit de diepere bodemlagen kan halen. Deze periode van droogte stress is te zien in figuur 4.21. Dit is hetzelfde geval voor de andere drie scenario's. Hier duurt de periode van droogte stress ook te lang waardoor de vegetatietype: natuurlijk gras permanente schade oploopt.



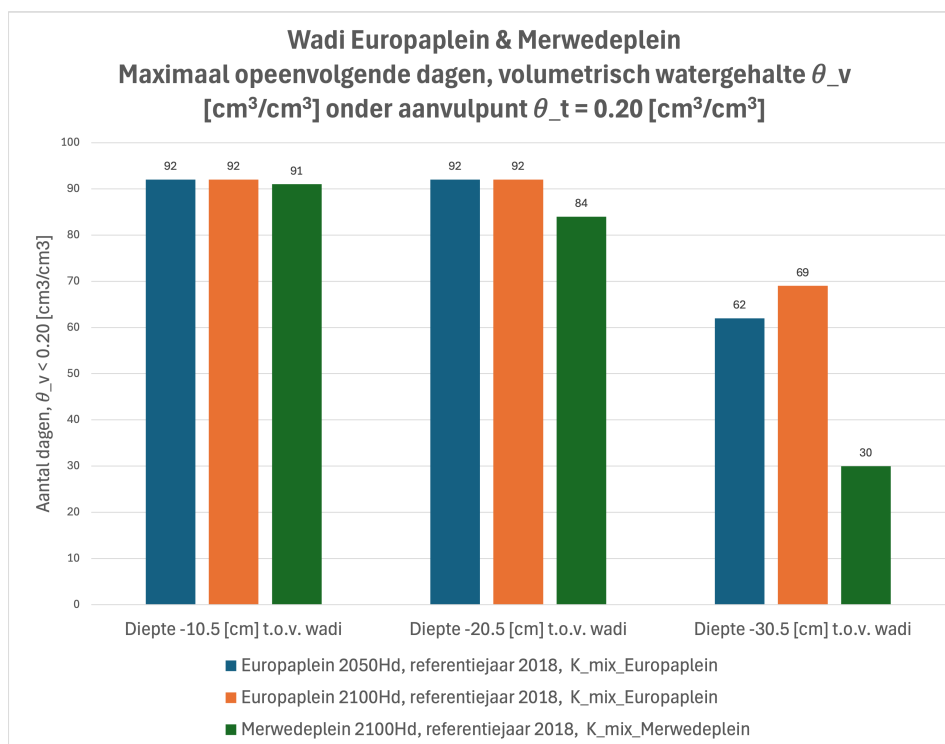
Figuur 4.21: Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi op het Europaplein voor het groeiseizoen van de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2100Hd'. Het groeiseizoen loopt gemiddeld van begin april tot en met eind september. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{mix, Europaplein}$ toegepast. Het maximaal aantal opeenvolgende dagen dat $\theta_v < \theta_t$ komt voor de diepte -10.5, -20.5 en -30.5 [cm] t.o.v. de wadi, is respectievelijk 92, 92 en 69 dagen. Dit zorgt ervoor dat er permanente schade aan de vegetatietype: natuurlijk gras ontstaat.

Het laatste scenario is van de wadi op het Merwedeplein met klimaatscenario '2100Hd' met referentieperiode 2018, maar dan met vegetatie factor: $K_{mix, Merwedeplein}$. Voor dit scenario is als vegetatie factor een samenstelling van vegetatietypen gebruikt met een gemiddelde worteldiepte van 38.5 [cm]. Deze samenstelling is toegepast om zo de werkelijke samenstelling van de vegetatie in de wadi zo realistisch mogelijk te modelleren. Voor dit specifieke scenario van de wadi op het Merwedeplein, zijn het maximaal aantal opeenvolgende dagen dat $\theta_v < \theta_t$ voor de diepte -10.5, -20.5 en -30.5 [cm] t.o.v. de wadi, respectievelijk 91, 84 en 30 dagen. Dit betekent dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) voor in ieder geval 30 dagen onder het aanvulpunt is gekomen voor een diepte tot -30.5 [cm] t.o.v. de wadi. Een droogte stress periode van 30 dagen (meer dan 4 weken) is hoogst waarschijnlijk te lang voor natuurlijk gras waardoor de conclusie kan worden getrokken dat er permanente schade is ontstaan. Deze periode van droogte stress is te zien in figuur 4.21



Figuur 4.22: Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi op het Merwedeplein voor het groeiseizoen van de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2100Hd'. Het groeiseizoen loopt gemiddeld van begin april tot en met eind september. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{mix, Merwedeplein}$ toegepast. Het maximaal aantal opeenvolgende dagen dat $\theta_v < \theta_t$ komt voor de diepte -10.5, -20.5 en -30.5 [cm] t.o.v. de wadi, is respectievelijk 91, 84 en 30 dagen. Dit zorgt ervoor dat de vegetatietype: natuurlijk gras permanente schade oploopt.

Al met al zijn er twee wadi's met in totaal drie scenario's in combinatie met een samenstelling van vegetatietypen als vegetatie factor én een KNMI'23 klimaatscenario, waarbij de ononderbroken periode dat $\theta_v < \theta_t$ te lang heeft geduurd. Hierdoor is er permanente schade ontstaan aan een deel van de vegetatie. Deze drie scenario's zijn weergegeven in figuur 4.23.



Figuur 4.23: De waarden van de staven geven het maximaal aantal opeenvolgende dagen aan waarbij $\theta_v < \theta_t$ voor de wadi op het Europaplein met KNMI'23 klimaatscenario '2050Hd' en '2100Hd' voor referentieperiode 2018. Daarnaast voor de wadi op het Merwedeplein met KNMI'23 klimaatscenario '2100Hd' voor referentieperiode 2018. Voor de wadi op het Europaplein is de vegetatiefactor $K_{mix, Europaplein}$ gebruikt en voor de wadi op het Merwedeplein, de vegetatiefactor $K_{mix, Merwedeplein}$. In beide gevallen is de vegetatiefactor, een samenstelling van vegetatietypen. Door een te lange duur van de ononderbroken periode dat $\theta_v < \theta_t$ op diepte -10.5, -20.5 en -30.5 [cm], heeft de vegetatietype: natuurlijk gras te lang droogte stress ervaren waardoor er uiteindelijk permanente schade is ontstaan. Deze periode duurde bij de wadi op het Europaplein, respectievelijk 62 dagen (9 weken) en 69 dagen (10 weken) en bij de wadi op het Merwedeplein 30 dagen (ongeveer 4,5 week). Deze periode viel in het groeiseizoen, die gemiddeld van begin april tot en met eind september loopt.

4.8. Gevoeligheidsanalyse SWAP

Het SWAP model wordt in Nederland en daarbuiten gezien als de standaard voor het nauwkeurig model leren van onder andere de actuele verdamping (Droogers, 2009). In dit onderzoek is het model gebruikt om zowel de actuele verdamping te berekenen met als eindresultaat het verloop van het volumetrisch watergehalte in de bodem. Om te achterhalen wat de gevoeligheid is van de invoerparameters van SWAP, is er een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Dit moet de volgende vraag beantwoorden: Hoe gevoelig zijn verschillende directe parameters binnen SWAP om het volumetrisch watergehalte (θ_v) te beïnvloeden?

Om toch de mogelijkheid te hebben om tijdens een kalibratie het volumetrisch watergehalte te sturen, is het van belang om te weten welke parameters hiervoor gebruikt kunnen worden. Het is noodzakelijk om onderscheid te maken tussen directe en indirecte parameters. Er zijn uiteraard veel parameters die uiteindelijk invloed hebben op het volumetrisch watergehalte (neerslag, drainage, gewasfactoren, bladoppervlakte index (LAI), worteldiepte etc.), maar deze zijn niet bodemvocht specifiek. Daarom zijn het geen directe parameters en dus niet geschikt om het volumetrisch watergehalte te sturen. In totaal zijn er 6 directe parameters die geschikt zijn om te gebruiken voor kalibratie en sturing van het volumetrisch watergehalte:

- Verzadigd vochtgehalte: θ_s [cm³/cm³] (OSAT)
- Vormparameter: n [-] (NPAR)
- Hydraulische conductiviteit/ waterdoorlatendheid: K_s [cm/d] (KSAT)
- Exponent in de hydraulische geleidbaarheidsfunctie: λ [-] (LEXP)
- Droge bulkdichtheid: ρ [mg/cm³] (BDENS)

- Grondwaterstanden: gwl [cm] (GWLEVEL)

Voor deze gevoeligheidsanalyse is alleen de wadi op het Europaplein gebruikt. Deze wadi heeft namelijk als bovenste bodemlaag meteen bomenzand (Staringreeks type B01) van 49 centimeter dik. Door deze laag aan te passen, zijn de invloeden van de bodemfysische parameters goed te zien. Daarnaast waren er bij deze wadi, vier scenario's waarbij de vegetatietype: natuurlijk gras permanente schade zal oplopen. Door de gevoeligheidsanalyse, kan worden bepaald of dit ook ter sprake is als de bovenste bodemlaag aangepast wordt.

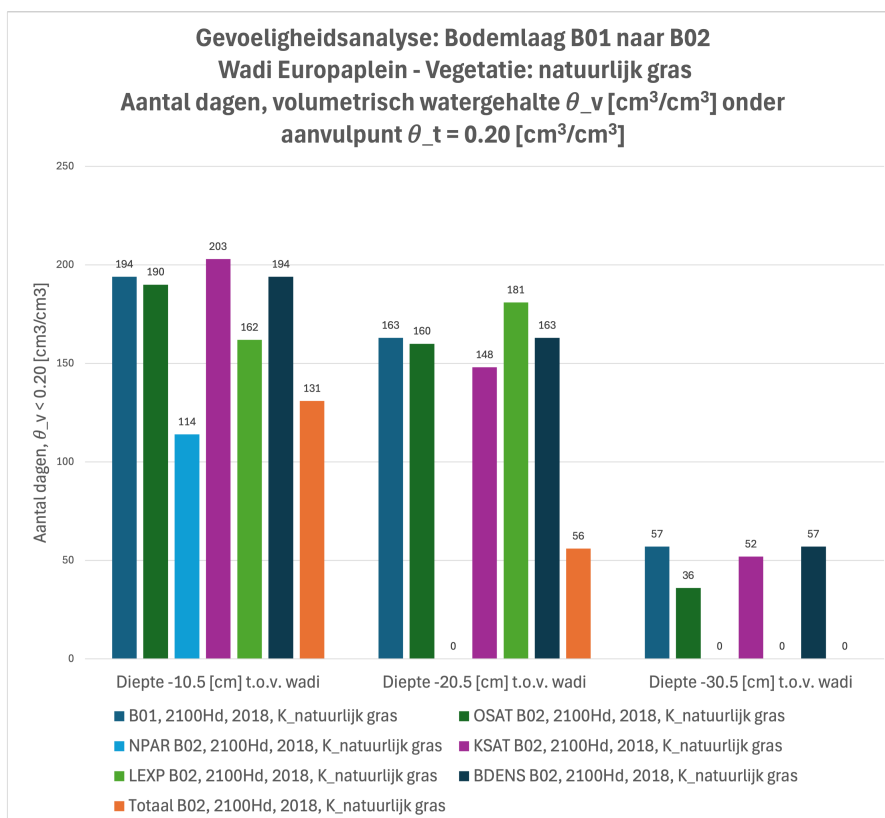
4.8.1. Aanpassing bodemfysische parameters

Om aan te geven hoeveel invloed de hierboven directe bodemfysische parameters hebben op het volumetrisch watergehalte, zijn er bij meerdere scenario's de bodemparameters aangepast. Zo is bij de wadi op het Europaplein, de bovenste bodemlaag verandert van type Staringreeks B01 naar type Staringreeks B02. Dit is per bodemfysische parameter, die hierboven zijn gegeven, gedaan. De verschillen tussen deze twee bodemlagen, zijn te zien in tabel 4.2. Vervolgens is er gekeken hoeveel dagen het volumetrisch watergehalte onder een bepaalde drempelwaarde valt. Dit is gedaan voor zowel het aanvulpunt als het verwelkingspunt. Uiteindelijk zijn deze waarden vergeleken met de eerste resultaten waar type Staringreeks B01 was toegepast.

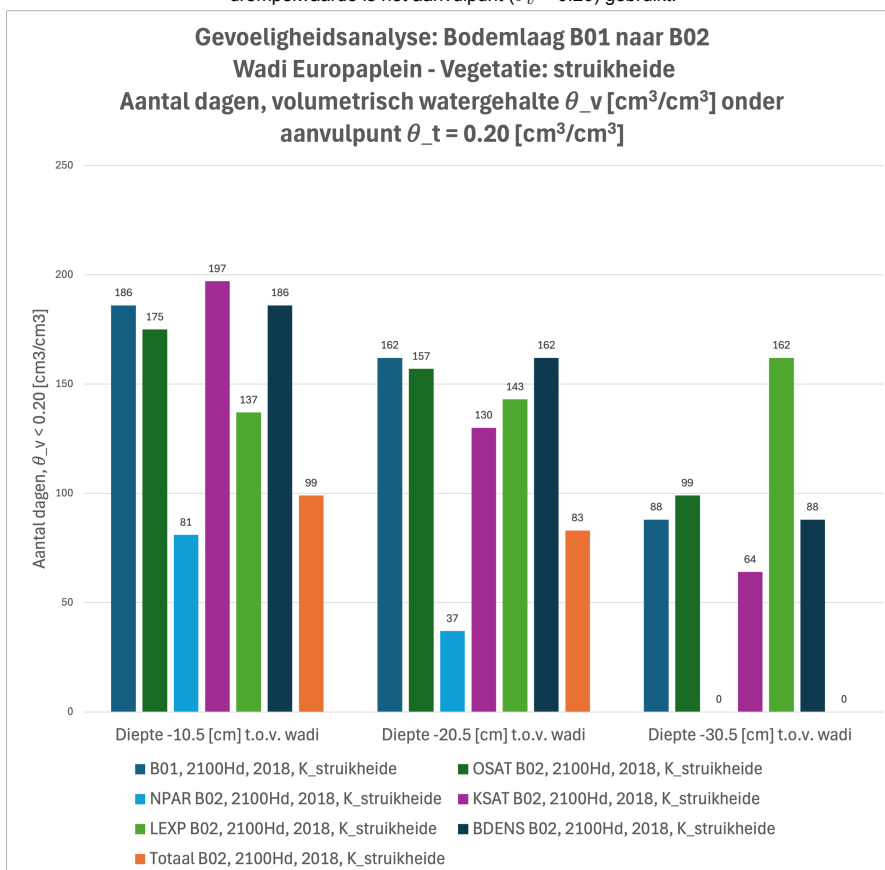
Tabel 4.2: Bodemfysische parameters van de Staringreeks bodemlagen B01 en B02

Staring- reeks grond	Verzadigd vochtgehalte θ_s [cm ³ /cm ³]	Vorm- parameter n [cm ⁻¹]	Verzadigd water- doorlatend- heid K_s [cm/d]	Exponent hydraulische geleidbaar- heids- functie λ [—]	Droge bulk- dichtheid ρ [mg/cm ³]
B01	0.427	1.735	31.23	0.981	1550.0
B02	0.434	1.349	83.24	7.202	1400.0

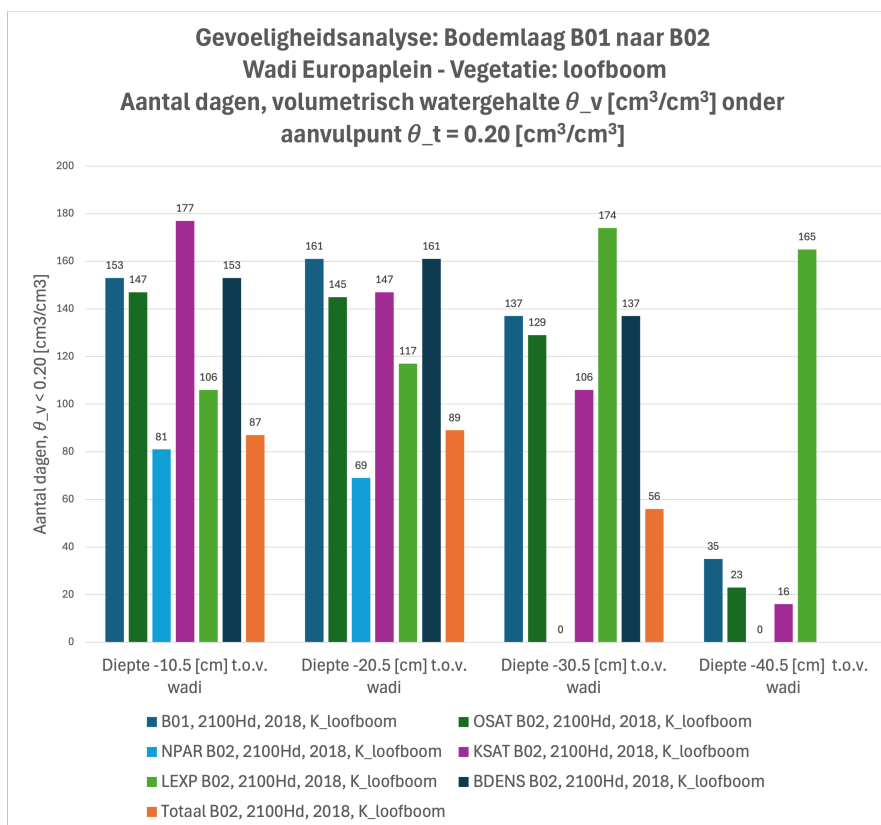
Na het aanpassen van elk van de bovenstaande bodemfysische parameters ten opzichte van de originele bodemlaag Staringreeks B01, is er gekeken hoeveel dagen het volumetrisch watergehalte onder de twee drempelwaarden, aanvulpunt en verwelkingspunt, zijn gekomen. Dit is weergegeven in figuren 4.24a, 4.24b en 4.24c. Door dit te vergelijken met de bodemlaag Staringreeks B01, is duidelijk te zien hoeveel invloed de bodemfysische parameters op het volumetrisch watergehalte hebben. Dit is gedaan voor de wadi op het Europaplein met klimaatscenario '2100Hd', voor de drie verschillende vegetatietypen: natuurlijk gras, struikheide en loofbomen.



(a) In dit geval is voor de wadi op het Europaplein, de vegetatietype: natuurlijk gras gebruikt. Als drempelwaarde is het aanvulpunt ($\theta_v < 0.20$) gebruikt.



(b) In dit geval is voor de wadi op het Europaplein, de vegetatietype: struikheide gebruikt. Als drempelwaarde is het aanvulpunt ($\theta_v < 0.20$) gebruikt.



(c) In dit geval is voor de wadi op het Europaplein, de vegetatietype: loofbomen gebruikt. Als drempelwaarde is het aanvulpunt ($\theta_v < 0.20$) gebruikt.

Figuur 4.24: Voor de gevoeligheidsanalyse zijn de bodemfysische parameters van de bodemlaag Staringreeks B01 aangepast naar de bodemfysische parameters van de bodemlaag Staringreeks B02. Dit is per bodemfysische parameter gedaan, zodat de invloed van de bodemfysische parameter duidelijk te zien is in het aantal dagen dat het volumetrisch watergehalte onder een drempelwaarde valt. Dit is voor drie scenario's van de wadi op het Europaplein gedaan, met telkens een verschillende vegetatietype: natuurlijk gras (figuur 4.24a), struikheide (figuur 4.24b) en loofbomen (figuur 4.24c).

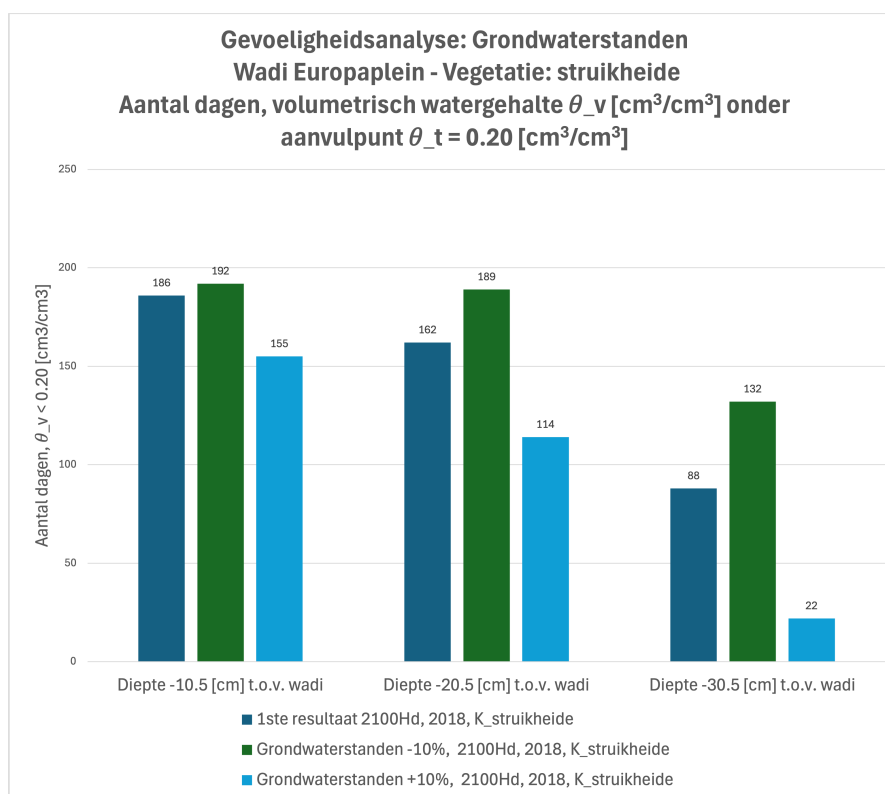
Uit de resultaten van de figuren 4.24a, 4.24b en 4.24c, springen er twee bodemfysische parameters uit. Dit is de vormparameter: n en de exponent in de hydraulische geleidbaarheidsfunctie: λ . Bij het aanpassen van de vormparameter: n , zien we als voorbeeld bij de vegetatietype: struikheide (figuur 4.24b) een verschil van -105, -125 en -88 dagen op respectievelijk een diepte van -10.5, -20.5 en -30.5 [cm]. Bij de exponent in de hydraulische geleidbaarheidsfunctie: λ is dit respectievelijk -49, -19 en +74 dagen voor de vegetatietype: struikheide. De resultaten van de andere scenario's zoals het aantal dagen dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt komt, zijn in de bijlage C gegeven.

Dit laat zien dat het van belang is om de waarden van deze twee bodemfysische parameters zo nauwkeurig mogelijk in het model toe te passen. De exponent λ bepaalt namelijk hoe snel de hydraulische geleidbaarheid afneemt naarmate de bodem minder verzadigd raakt. Een hogere waarde van λ betekent dat de hydraulische geleidbaarheid sneller afneemt bij lagere verzadigingsgraden. Dit is cruciaal voor het modelleren van waterstromen in onverzadigde zones, zoals bij regenval. De andere bodemfysische parameter n , wordt gebruikt om de relatie tussen waterpotentiaal van de bodem (ψ) en volumetrisch watergehalte (θ) te beschrijven. Deze parameter bepaalt de steilheid van de overgang in de retentiecurve tussen hoge en lage vochtspanningen, oftewel hoe snel de bodem water loslaat naarmate de zuigspanning toeneemt.

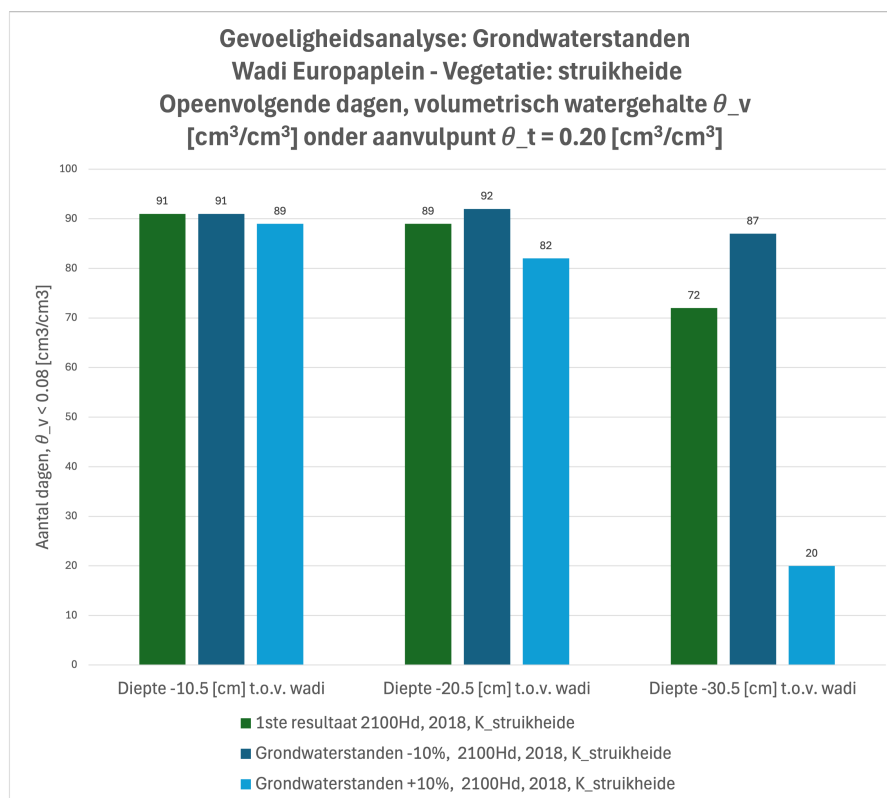
4.8.2. Aanpassing grondwaterstanden

Als laatste zijn er voor verschillende scenario's, de grondwaterstanden aangepast. In de werkelijkheid zijn de grondwaterstanden natuurlijk maar deels te beïnvloeden door bijvoorbeeld drainage of door middel van de bodemlagen aan te passen waardoor de waterdoorlatendheid omhoog gaat. Maar een directe invloed is hoe verdiept de wadi wordt aangelegd waardoor de vegetatie dichter of verderaf van het grondwaterpeil komt. Vandaar dat deze parameter is meegenomen in de gevoeligheidsanalyse. Voor de gevoeligheidsanalyse, zijn de grondwaterstanden voor wederom de wadi op het Europaplein aangepast. Er zijn twee scenario's berekend. Ten eerste een scenario waarbij de grondwaterstanden +10 [cm] hoger staan dan de eerste resultaten en ten slotte een scenario waarbij de grondwaterstanden -10 [cm] lager staan. Dit zijn beide realistische scenario's omdat door de aanleg van wadi's er meer water in de bodem stroomt waardoor het grondwaterpeil hoger kan komen te staan. Daarnaast is het ook mogelijk dat het grondwaterpeil juist lager komt te staan door de toekomstige droogtes die in Nederland kunnen plaatsvinden.

Bij beide resultaten zijn duidelijke verschillen te zien ten opzichte van de eerste resultaten. Bij de vegetatietype: struikheide is het verschil in aantal dagen dat het volumetrisch watergehalte onder het aanvulpunt ($\theta_v < 0.20$) komt, weergegeven in figuur 4.25. Dit is voor zowel de grondwaterstanden die +10 [cm] hoger staan, als de grondwaterstanden die -10 [cm] liggen. Aan deze resultaten is te zien dat de gevoeligheid van de grondwaterstanden in het model SWAP vrij hoog is. De overige scenario's zoals voor andere vegetatietypen en voor het aantal dagen dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt ($\theta_{wp} = 0.08$) komt, staan in bijlage C.



(a) De waarden boven de staven, geven het aantal dagen weer waar het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het aanvulpunt ($\theta_t = 0.20$ [cm³/cm³]) komt. Dit is voor de wadi op het Europaplein met vegetatietype: struikheide.



(b) De waarden boven de staven, geven het aantal maximaal opeenvolgende dagen weer waar het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het aanvulpunt ($\theta_t = 0.20 \text{ [cm}^3/\text{cm}^3\text{)]}$) komt. Dit is voor de wadi op het Europaplein met vegetatietype: struikheide.

Figuur 4.25: Gevoeligheidsanalyse waar de grondwaterstanden met +10 [cm] en -10 [cm] zijn aangepast ten opzichte van de eerste resultaten. In figuur 4.25a, zijn het aantal dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) van de wadi op het Europaplein, onder het aanvulpunt (θ_t) komt. In figuur 4.25b, zijn het aantal maximaal opeenvolgende dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het aanvulpunt ($\theta_t = 0.20 \text{ [cm}^3/\text{cm}^3\text{]}$) komt.

De hierboven gegeven resultaten van de gevoeligheidsanalyse, zijn in twee overzichten onderverdeeld. De resultaten van de aangepaste bodemfysische parameters in tabel 4.3. En de aanpassingen van de grondwaterstanden in tabel 4.4.

Tabel 4.3: Voor de gevoeligheidsanalyse zijn de parameters van de eerste bodemlaag (Staringreeks type B01) aangepast naar de parameters van Staringreeks type B02. Dit is apart voor elke bodemfysische parameter gedaan. Als eindresultaat zijn het totaal aantal dagen dat het volumetrisch watergehalte onder het aanvulpunt komt, berekend. Met als reden dat dit een belangrijke drempelwaarde is voor de vegetatie aangezien vanaf dit punt, de vegetatie droogtestress gaat ervaren. Het verschil tussen het eindresultaat met de originele bodemfysische parameter en het eindresultaat met de aangepaste bodemfysische parameter, is in dagen gegeven.

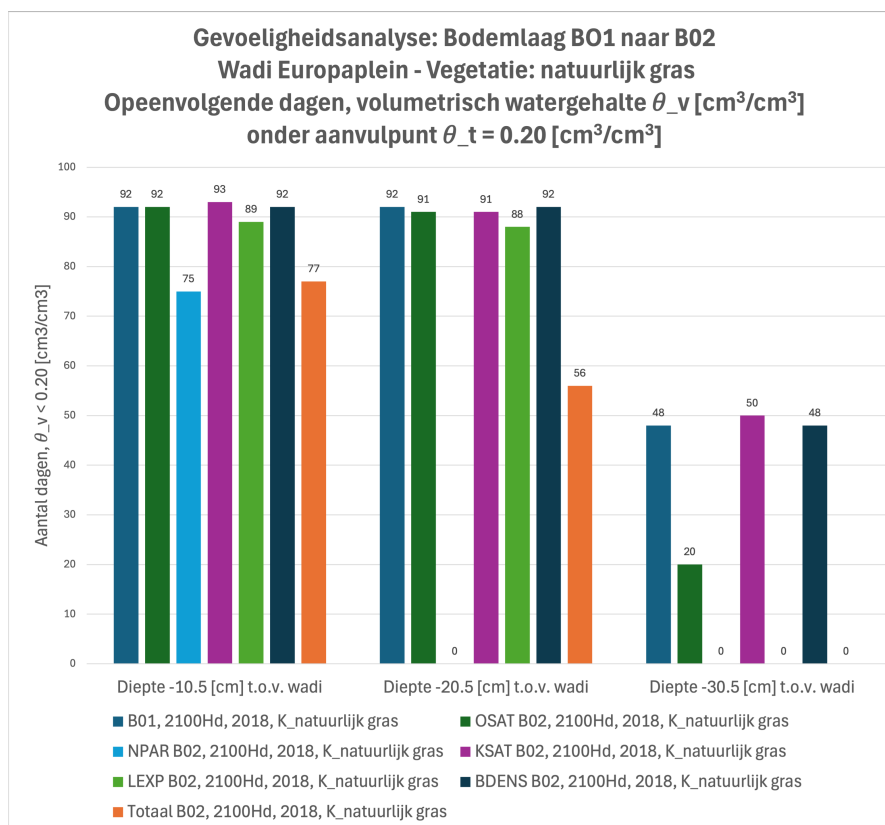
[illegible]

Tabel 4.4: Voor de gevoeligheidsanalyse zijn tevens de grondwaterstanden aangepast. Voor het eerste scenario, zijn de grondwaterstanden met 10 [cm] verhoogd voor het hele jaar. Voor het tweede scenario zijn de grondwaterstanden juist met 10 [cm] verlaagd gedurende het hele jaar. Als eindresultaat zijn wederom het aantal dagen dat het volumetrisch watergehalte onder het aanvulpunt komt gedurende het hele jaar, gebruikt. Met als reden dat dit een belangrijke drempelwaarde is voor de vegetatie aangezien vanaf dit punt, de vegetatie droogtestress gaat ervaren. Het verschil tussen het eindresultaat met de originele bodemfysische parameter en het eindresultaat met de aangepaste bodemfysische parameter, is in dagen gegeven.

Aangepaste parameter	Symbool	Afkorting SWAP	Verschil originele en aangepaste situatie	Effect eindresultaat Scenario 1: natuurlijk gras Verschil in [dagen]			Effect eindresultaat Scenario 2: struikheide Verschil in [dagen]			Effect eindresultaat Scenario 3: loofboom Verschil in [dagen]		
				Diepte - 10.5 [cm]	Diepte - 20.5 [cm]	Diepte - 30.5 [cm]	Diepte - 10.5 [cm]	Diepte - 20.5 [cm]	Diepte - 30.5 [cm]	Diepte - 10.5 [cm]	Diepte - 20.5 [cm]	Diepte - 30.5 [cm]
Grondwaterstanden	gwl	GWLEVEL	+ 10 [cm]	-22	-43	-57	-31	-48	-66	-17	-48	-73
Grondwaterstanden	gwl	GWLEVEL	- 10 [cm]	6	22	62	6	27	44	17	21	29

Voor het uitvoeren van de gevoeligheidsanalyse, zijn in totaal 5 directe bodemfysische parameters aangepast en ten slotte nog de grondwaterstanden. Van de vijf bodemfysische parameters, sprongen voornamelijk de vormparameter: n en de exponent in de hydraulische geleidbaarheidsfunctie: λ erboven uit. Daarnaast lieten de resultaten van de aangepaste grondwaterstanden ook grote verschillen zien met de eerste resultaten. Hierdoor kan de conclusie worden getrokken dat de waarden van deze drie parameters van belang zijn voor het nauwkeurig bepalen van het volumetrisch watergehalte. Zoals beschreven in hoofdstuk 4.7, zijn het aantal dagen dat het volumetrisch watergehalte onder het aanvulpunt of zelfs onder het verwelkingspunt komt, van grote invloed om te bepalen of de verschillende vegetatietypen permanente schade zullen oplopen. Om hier een concreet antwoord op te geven, is het van belang dat de hierboven drie parameters met nauwkeurigheid worden gemeten zodat de exacte waarden in het model SWAP kunnen worden ingevuld. Als er onnauwkeurigheid optreedt in bijvoorbeeld de referentie verdamping, dan kunnen scenario analyse uitkomsten nog steeds erg betrouwbaar zijn voor strategische studies (Droogers, 2009). Maar bij het ontwerpen van maatregelen zoals een wadi, is wel een absolute nauwkeurigheid gewenst.

Naar aanleiding van de gevoeligheidsanalyse, kan er wederom gekeken worden naar het aantal maximaal opeenvolgende dagen dat het volumetrisch watergehalte onder het aanvulpunt komt. Voor de gevoeligheidsanalyse is alleen de wadi op het Europaplein gebruikt met klimaatscenario '2100Hd', voor de drie verschillende vegetatietypen: natuurlijk gras, struikheide en loofbomen. In alle meegenomen scenario's van de gevoeligheidsanalyse waar de vijf directe bodemfysische parameters apart zijn aangepast, zijn het aantal maximaal opeenvolgende dagen dat $\theta_v < \theta_t$ in de meeste scenario's significant gedaald. Echter zijn in twee van de vijf scenario's, het aantal maximaal opeenvolgende dagen nog steeds te hoog voor de vegetatietype: natuurlijk gras om permanente schade te voorkomen. Dit is weergegeven in figuur 4.26.



Figuur 4.26: Resultaten van de gevoeligheidsanalyse voor de wadi op het Europaplein met klimaatscenario '2100Hd', met vegetatietype: natuurlijk gras. De waarden geven het aantal maximaal opeenvolgende dagen aan dat $\theta_v < \theta_t$. In verband met de worteldiepte van natuurlijk gras die tot 28 [cm] gaat, ontstaat er pas permanente schade aan de vegetatie als $\theta_v < \theta_t$ op diepte -10.5, -20.5 en -30.5 [cm] minimaal een periode van 28 dagen (4 weken) duurt. Zoals te zien, komt dit bij de scenario's KSAT B02 en BDENS B02 voor.

5

Discussie

Voor de overzichtelijkheid is de discussie opgedeeld in twee secties: een discussie over de methode en aannames van dit onderzoek en een discussie over het onderzoek in vergelijking met vergelijkbare onderzoeken.

5.1. Discussie onderzoek

Voor dit onderzoek, zijn er aannames gedaan. Het eerste aspect zijn de meteorologische waarden. Deze zijn gebruikt van het KNMI-weerstation Schellingwoude (#223). Dit weerstation bevindt zich niet op exact dezelfde locatie als de wadi's die als onderzoekslocaties zijn gebruikt. Hierdoor zitten er verschillen in de exacte waarden van de meteorologische waarden zoals neerslag [mm/dag]. Daarnaast is de intensiteit van de neerslag niet meegenomen in het model, aangezien deze data niet beschikbaar was voor het KNMI-weerstation Schellingwoude. Hierdoor simuleert het model SWAP de neerslag over 24 uur in plaats van over een kortere periode, waardoor het regenwater geleidelijker in de bodem kan infiltreren dan in de werkelijkheid.

Naast de hoeveelheid neerslag die er per dag valt of in totaal in een jaar, is het van belang hoeveel regenwater er in de wadi terecht komt afkomstig van omliggende verharde oppervlakken (wegen, trottoirs en daken). Dit aandeel wordt 'run on' genoemd en wordt naar de wadi geleid om daar te infiltreren in plaats van af te voeren naar het rioolstelsel. Dit speelt een cruciale rol bij het beheersen van piekbuien in de zomer. De data van de 'run on' zoals de grootte van het afwateringsgebied en het percentage verharding, was niet beschikbaar. Vandaar dat deze data niet is meegenomen in het model SWAP. Dit heeft invloed op de totale hoeveelheid regenwater die er in de wadi infiltreert. Het meenemen van dit aandeel, zal een positieve invloed hebben op het volumetrisch watergehalte van de wadi.

Als ondergrens van het model, zijn de grondwaterstanden van het droge jaar 2018 gebruikt. Dit jaar is als referentiejaar gebruikt voor de klimaatscenario's. De gemeten grondwaterstanden zijn afkomstig van het peilbuizen meetnet van Waternet (Waternet, 2024). Enkele peilbuizen meten op dagelijkse basis, maar de gebruikte peilbuizen voor dit onderzoek destijds nog niet. Hierdoor zijn er in enkele gevallen maar 11 grondwaterstand metingen voor het jaar 2018 in het model ingevoerd en zullen er afwijkingen zijn ten opzichte van de werkelijkheid. Daarnaast zijn alle wadi's die als onderzoekslocaties gebruikt zijn, pas later aangelegd dan het jaar 2018. Het aanleggen van de wadi, heeft natuurlijk invloed op de grondwaterstand gedurende het hele jaar. Door de aanleg van een wadi, kan er meer regenwater in de bodem infiltreren waardoor de grondwaterstand hoger komt te staan in perioden van voldoende neerslag. Daarnaast verdampt er ook meer water uit de bodem door de transpiratie van de vegetatie (E_t). Hierdoor kan in droge perioden de grondwaterstand uiteindelijk weer verder uitzakken dan zonder beplanting. Al met al zijn de gemodelleerde grondwaterstanden niet precies de werkelijkheid.

Om de werkelijke vegetatie van de wadi te simuleren in waarden, zijn er vegetatie factoren gebruikt van het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium (Bartholomeus and Witte, 2013). Echter is aangege-

ven dat als men in hydrologische modellen gebruik wil blijven maken van de gewasfactorbenadering, aanbevolen wordt om de gepubliceerde K-waarden aan te passen aan de klimatologische condities waarvoor men berekeningen uitvoert (Bartholomeus and Witte, 2013). Dat kan door nauwkeurige metingen van de werkelijke verdamping te combineren met modelsimulaties. Dit was voor dit onderzoek niet mogelijk omdat er geen meetapparatuur beschikbaar was om nauwkeurige metingen van de werkelijke verdamping uit te voeren. Ten slotte zijn de meteorologische waarden van het droge jaar 2018 gebruikt als invoergegevens. Een vergelijkbare periode qua droogte heeft tevens in het afgelopen jaar 2024 niet plaatsgevonden.

Naast het simuleren van de werkelijke vegetatie in waarden, zijn er maar drie natuurlijke vegetatietypen gebruikt in dit onderzoek. De drie vegetatietypen zijn: natuurlijk gras, struikheide en loofbomen. Deze drie typen weerspiegelen immers niet exact de werkelijke vegetatie in de wadi. In voldoende onderzoeken zoals het onderzoek van Pereira (2015), is de werkelijke verdamping van verschillende soorten gewassen bepaald, maar niet voor natuurlijke vegetatietypen. De meeste onderzoeken richten zich op het bodemvocht van landbouw- en natuurgebieden vanwege het belang voor gewasproductie, ecologie, en waterbeheer. Daarnaast hebben stedelijke gebieden een complexe ondergrond door verharding, bebouwing en ondergrondse infrastructuur. Hierdoor was het niet mogelijk om de werkelijke natuurlijke vegetatietypen te simuleren in het model SWAP. Dit was een beperking in de beschikbaarheid van data.

Gekeken naar het simuleren van de vegetatie van de wadi, is het alleen mogelijk om maar één vegetatietype tegelijk te modelleren in het model SWAP. Daardoor was het niet mogelijk om de gemixte beplanting van de wadi te modelleren. Als alternatief is er een gemixte vegetatie factor berekend door middel van wegingen. De wegingen in percentages, zijn gebruikt om de vegetatie factoren, bladoppervlakte index en worteldiepte te berekenen (zie hoofdstuk 3.3.1). Echter is dit geen juiste afspiegeling van de werkelijkheid. Met name de worteldiepte varieert behoorlijk van de vegetatietypen.

Ten slotte de betrouwbaarheid van de resultaten. De resultaten die gemodelleerd zijn met het model SWAP, zijn niet gevalideerd door in-situ metingen. Het valideren was zodoende niet mogelijk door zowel beperkte vergelijkbare data die in literatuurstudies beschikbaar was, als de beschikbaarheid van meetapparatuur om metingen te doen op de onderzoekslocaties. Hierdoor moet er vertrouwd worden op de kwaliteit van de onderliggende theorie van het erkende model SWAP (Heinen et al., 2024).

Afsluitend zijn er verschillende aannames gedaan die de invoerparameters van het hydrologisch model SWAP beïnvloeden. Ondanks deze aannames bieden de modelresultaten waardevolle inzichten in het gedrag van bodemvocht tijdens periodes van droogte. Deze bevindingen kunnen worden benut om zowel de vegetatie als de bodemstructuur binnen de wadi verder te optimaliseren, zodat de waterretentie en droogtetolerantie verbeteren.

5.2. Discussie vergelijkbare onderzoeken

Om te bepalen hoe dit onderzoek zich weerhoudt tot andere vergelijkbare onderzoeken, is de methode, bijbehorende aannames en resultaten in vergelijking genomen. Dit geeft een indicatie over de kwaliteit van dit onderzoek.

In het algemeen kan bodemvocht op drie manieren worden verkregen: (i) metingen in het veld, (ii) observaties met remote sensing, en (iii) simulaties met een hydrologisch model. In dit onderzoek is als methode gebruik gemaakt van het hydrologische waterbalans model SWAP om het volumetrisch watergehalte van de onverzadigde zone te berekenen. Het nadeel van complexe modellen is echter dat er vaak ook gedetailleerde invoerdata voor nodig zijn, die niet altijd beschikbaar zijn (Terink et al., 2012). In dit onderzoek van Terink en Droogers (Terink et al., 2012), wordt ook aangegeven dat SWAP een veel gebruikt model op veldschaal (perceel niveau) is. Echter is het doel van die studie “het ontwikkelen van een hydrologisch waterbalans model voor Nederland dat gericht is op het simuleren van het bodemvocht in de wortelzone”. Het resultaat van deze studie is een goed gekalibreerd en gevalideerd model met de naam SPHY (Spatial Processes in HYdrology). Daarentegen is het SPHY model nationaal, ook wel landsdekkend, te gebruiken. Het SWAP model is juist geschikt op perceel niveau zoals een wadi in stedelijk gebied en dit wordt ook bevestigd in een onderzoek van FutureWater (Droogers

and Immerzeel, 2010).

In dit onderzoek is het volumetrisch watergehalte gemodelleerd van vier verschillende wadi's in stedelijk gebied Amsterdam. Deze resultaten zijn niet gevalideerd door middel van bijvoorbeeld metingen op locatie. Daarentegen is er wel een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd die een indicatie kan geven omtrent de kwaliteit van de resultaten. Een gevoeligheidsanalyse wordt namelijk gebruikt om de onzekerheid van modelparameters te onderzoeken. Echter zijn deze resultaten niet gevalideerd door middel van metingen op locatie of remote-sensing waarden. In het onderzoek van Terink en Van Leuken (Terink et al., 2012) is zowel een kalibratie als een validatie gedaan. De kalibratie is gedaan aan de hand van gemeten verdamping op verschillende locaties in Nederland, om zo de gesimuleerde verdamping te kalibreren. Een validatie is gedaan door middel van bodemvochtsensoren van DACOM (Terink et al., 2012). Het valideren van het bodemvocht van de vier gemodelleerde wadi's, zal de eindresultaten van het bodemvocht van dit onderzoek verbeteren.

Conclusie & Aanbeveling

6.1. Conclusie

De hoofdvraag van het onderzoek luidt als volgt: 'Blijft er voldoende bodemvocht in wadi's beschikbaar in stedelijk gebied tijdens droge perioden gebaseerd op KNMI'23-klimaatscenario's, om permanente schade aan vegetatie te voorkomen?' Om deze vraag te beantwoorden is het hydrologisch waterbalans model SWAP gebruikt om vier verschillende wadi's in Amsterdam te modelleren. In dit model zijn de meteorologische waarden van het jaar 2017, 2018 en referentieperiode 2018 met klimaatscenario's '2050Hd' en '2100Hd' gebruikt. Daarnaast zijn de heterogene bodemopbouw van de wadi's meegenomen en drie verschillende vegetatietypen: natuurlijk gras, struikheide en loofbomen. Per wadi is er vervolgens een samenstelling van deze drie vegetatietypen gemaakt door middel van wegingen. Ten slotte zijn de fluctuaties van de grondwaterstanden per wadi voor het jaar 2017 en 2018 meegenomen, als ondergrens van het model. Om permanente schade aan vegetatie te voorkomen, is de duur van een ononderbroken periode dat het volumetrisch watergehalte (θ_v [cm^3/cm^3]) onder het aanvulpunt (θ_t) komt, leidend. Vervolgens is de droogte resistentie van elke vegetatietype met bijbehorende worteldiepte bepaald. Om de resultaten gedeeltelijk te kalibreren, is er nog een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd door middel van het aanpassen van bodemfysische parameters en de grondwaterstanden.

Aan de hand van dit onderzoek, is het volgende antwoord op de hoofdvraag tot stand gekomen: Gekeken naar alleen de gemodelleerde scenario's met een samenstelling van vegetatietypen zoals in de werkelijkheid, zijn er twee wadi's waarbij het volumetrisch watergehalte (θ_v) te lang ononderbroken onder het aanvulpunt (θ_t) komt, waardoor de vegetatietype: natuurlijk gras permanente schade door droogte zal oplopen.

Daarnaast kunnen door de resultaten die zijn gemodelleerd, de volgende conclusies worden getrokken:

- Diepgewortelde vegetatie zoals struikheide en loofbomen, hebben langer de beschikbaarheid tot bodemvocht aan de hand van water uit diepere bodemlagen die dicht bij het grondwaterpeil staan. Daarnaast hebben diepgewortelde vegetaties gemiddeld een hogere droogte resistentie dan de vegetatietype: natuurlijk gras. Deze combinatie zorgt ervoor dat diepgewortelde vegetatie een lange periode van droogte kan overbruggen.
- Door middel van het planten van verschillende vegetatietypen in de wadi waarbij de worteldieptes van elkaar verschillen, wordt ervoor gezorgd dat het gebruikte bodemvocht voor transpiratie optimaal wordt verdeeld over het totale bodemprofiel van de wadi in tijden van droogte.
- Een heterogene bodemopbouw met een bovenste bodemlaag die een hoog verzadigd vochtgehalte als kenmerk heeft, zoals een schimmeldominante humuscompost laag, zorgt ervoor dat het bodemvocht in de ondiepere bodemlagen langer op peil blijft waardoor een periode met droogte langer overbrugd kan worden.
- De bodemfysische parameter: vormparameter n (hoe snel de bodem water loslaat naarmate de zuigspanning toeneemt), aanzienlijke invloed heeft omtrent het berekenen van het volumetrisch watergehalte. Daarnaast hebben de grondwaterstanden ook een grote invloed op de resultaten van het volumetrisch watergehalte.

Al met al, toont dit onderzoek aan dat het volumetrisch watergehalte van wadi's in Amsterdam meerdere perioden onder het aanvulpunt of zelfs onder het verwelkingspunt komt, als er zich een jaar voordoet met droge perioden zoals het jaar 2018. Rekening houdend met de klimaatverandering, wordt de kans groter dat deze perioden nog langer en droger worden en daarnaast vaker voorkomen. Dit is aangetoond aan de hand van de KNMI'23-klimaatscenario's '2050Hd' en '2100Hd' voor het referentiejaar 2018. Desondanks is er maar bij twee van de vier gemodelleerde wadi's, de conclusie getrokken dat een deel van de vegetatie van de wadi permanente schade heeft opgelopen. In het geval dat deze droge perioden meerdere jaren achter elkaar voorkomen, zal er in meerdere scenario's permanente schade aan vegetatie ontstaan. Met name bomen zoals de vegetatietype: loofbomen zijn vatbaar voor herhaalde blootstelling aan droogte stress, waardoor er onherstelbare symptomen kunnen optreden die uiteindelijk fataal zijn (Taiwo et al., 2020). Deze conclusies en waarnemingen kunnen worden meegenomen door Gemeente Amsterdam om het ontwerp van wadi's verder te optimaliseren.

6.2. Aanbeveling

Voor het vervolgonderzoek zijn er drie aanbevelingen. De eerste aanbeveling, is het meten op locatie door middel van sensoren. Hierdoor kan er een meer gedetailleerde weergave worden gegeven van het bodemvocht in stedelijk gebied dan een hydrologisch model. Door metingen op locatie uit te voeren, kunnen de lokale variaties in bodemstructuur, vegetatie, en waterinfiltratie direct worden vastgelegd. Hydrologische modellen werken regelmatig met aannames en vereenvoudigingen van de werkelijkheid, die niet altijd rekening houden met complexe factoren zoals microklimaten en onverwachte waterstromen in stedelijke omgevingen. Hierdoor kunnen metingen op locatie meer nauwkeurige en specifieke informatie geven, wat essentieel is voor effectief waterbeheer en de gezondheid van het stedelijk groen. Deze metingen kunnen vervolgens gebruikt worden om de resultaten van het hydrologisch model SWAP te valideren.

Bij vervolgonderzoek, wordt daarnaast aanbevolen om de focus op kalibratie van de invoergegevens van het hydrologisch model SWAP te leggen. Voor zowel de vegetatie factoren als voor de bodemopbouw, zijn in dit onderzoek twee erkende methodes gebruikt. Desondanks worden de resultaten van deze methoden in twijfel getrokken in een aantal onderzoeken. Het onderzoek van Van Walsum (Van Walsum et al., 2013), geeft bijvoorbeeld aan dat de gewasfactor-methode niet klimaatrobuust is. Daarnaast is het regenwater dat afkomstig is van omliggende verharde oppervlakken (wegen, trottoirs en daken) en uiteindelijk in de wadi terecht komt, ook wel runon genoemd, van belang voor de resultaten van het bodemvocht. Dit kan een significant aandeel zijn in het totaal geïnfiltreerde regenwater in de wadi en is aan te bevelen om mee te nemen in vervolgonderzoek.

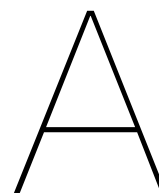
Ten slotte is de duur van de periode van droogte voor vervolgonderzoek van belang. Zoals aangegeven zorgt een periode van droogte stress niet meteen voor permanente schade aan vegetatie. Echter na langdurige periodes van droogte en herhaalde blootstelling, kunnen onherstelbare symptomen optreden die uiteindelijk fataal zijn (Taiwo et al., 2020). Dit is van toepassing voor onder andere loofbomen en andere diepgewortelde vegetatie. In dit onderzoek is een periode van één jaar gemodelleerd maar een periode van meerdere jaren in combinatie met terugkomende perioden van droogte, kan een indicatie geven of dit uiteindelijk wel fataal kan zijn voor diepgewortelde vegetatie.

Bibliografie

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., et al. (1998). Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements - fao irrigation and drainage paper 56. *FAO, Rome*, 300(9):D05109.
- Amsterdam, G. (2023). De amsterdamse bodem: Zo divers als de stad zelf. <https://aandegrachten.amsterdam/de-amsterdamse-bodem/>. Bezocht op: 17 september 2024.
- Bartholomeus, R. and Witte, J. (2013). Gewasfactoren en potentiële verdamping; geen robuuste combinatie. *KWR*.
- Bessembinder, J., Bintanja, R., Van Dorland, R., Homan, C., Overbeek, B., Selten, F., and Siegmund, P. (2023). Knmi 23: Klimaatscenario's voor nederland. *KNMI publicatie*.
- Bos-Burgering, L., Weerts, A., Pouwels, J., Jacobs, C., and Jansen, F. (2020). Deltafact verdamping. *STOWA*.
- Bout, K. (2021). Beplantingsplan wadi merwedeplein. *Gemeente Amsterdam Ruimte en Duurzaamheid*.
- Dik, P. and Mulder, M. (2024). Bepalen penman-monteith gewasweerstand: Gestandaardiseerde conversie van makkink-gewasfactoren naar penman-monteith gewasweerstand, documentatie r-script en toepassing voor het nhi. *Wageningen Environmental Research*.
- Droogers, P. (2009). Verbetering bepaling actuele verdamping voor het strategisch waterbeheer. *Definitiestudie*. *STOWA*.
- Droogers, P. and Immerzeel, W. (2010). Wat is het beste model? *H 2 O*, 43(4):38.
- Groenblauwenetwerken (2024). Wadi's. <https://groenblauwenetwerken.nl/measures/wadis/>. Bezocht op: 28 september 2024.
- Han, J. and Singh, V. P. (2023). A review of widely used drought indices and the challenges of drought assessment under climate change. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(12):1438.
- Heinen, M., Bakker, G., and Wösten, J. (2020). Waterretentie-en doorlatendheidskarakteristieken van boven-en ondergronden in nederland: de staringreeks: Update 2018. Technical report, Wageningen Environmental Research.
- Heinen, M., Mulder, M., van Dam, J., Bartholomeus, R., van Lier, Q. d. J., de Wit, J., de Wit, A., and Hack-ten Broeke, M. (2024). Swap 50 years: Advances in modelling soil-water-atmosphere-plant interactions. *Agricultural Water Management*, 298:108883.
- Hendriks, D., Passier, H., Marsman, A., Levelt, O., and Lamers, N. (2023). Integrale grondwaterstudie nederland, module 1: landelijke analyse. *Deltares and Wageningen Environmental Research*.
- Henry, H. A. and Jefferies, R. L. (2003). Plant amino acid uptake, soluble n turnover and microbial n capture in soils of a grazed arctic salt marsh. *Journal of Ecology*, 91(4):627–636.
- Hofman, R., Timmermans, G., Schiller, N., Nijboer, M., Vos, F., Muller, T., Aardse, H., Buys, J., Tepe, L., Kaljee, H., Denters, T., M., S., and Favôt, J. (2024). Standaard voor het amsterdamse straatbeeld (onderdeel van de puccinimethode). *Handboek Groen*.
- Hoogvliet, M., Spijker, J., Noome, W., Slingerland, E., and De Groot, M. (2021). Droogte en stedelijk groen. Technical report, NKWK Klimaatbestendige Stad.

- Hoving, I. and Booij, J. (2022). Handleiding beregeningsadvies. Technical report, Wageningen University & Research.
- Hulsman, R., Stapel, W., Jensen, I., and Heuvelink, D. (2021). Klimaat en watervraag stedelijk gebied. *Royal HaskoningDHV*.
- Janssen, G., Fraters, B., Boumans, L., and Vrijhoef, A. (2013). Onderzoek naar vervangend rekenmodel om weersinvloeden op nitraatconcentraties te berekenen: Vergelijking van de modellen onzat, hydrus-1d en swap.
- Klimaatadaptatie (2020). Wadi. <https://klimaatadaptatienederland.nl/actueel/actueel/interviews/wadi/>. Bezocht op: 14 augustus 2024.
- Klimaatadaptatie (2022). Droogte. <https://klimaatadaptatienederland.nl/kennisdossiers/droogte/>. Bezocht op: 12 augustus 2024.
- Klimaatadaptatie (2023). Oorzaken van de toenemende hitte. <https://klimaatadaptatienederland.nl/kennisdossiers/hitte/oorzaken/>. Bezocht op 14: september 2024.
- KNMI (2018a). Historisch verloop neerslagtekort. <https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/geografische-overzichten/historisch-neerslagtekort>. Bezocht op: 12 september 2024.
- KNMI (2018b). Zeer warm, zonnig en nat: 2017 in perspectief van klimaatverandering. <https://klimaatadaptatienederland.nl/actueel/actueel/nieuws/2018/overzicht-knmi-2017/>. Bezocht op: 25 september 2024.
- Kroes, J., Van Dam, J., Bartholomeus, R., Groenendijk, P., Heinen, M. en Hendriks, R., Mulder, H., Supit, I., and Van Walsum, P. (2017). Swap version 4: Theory description and user manual.
- Mobron, N. en Van de Ven, F. e. T. V. M. e. V. d. H. E. e. N. J. (2020). Hydraulisch functioneren van wadi's in poldercondities. *H2O*.
- Monteith, J. (2000). Agricultural meteorology: evolution and application. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103(1-2):5–9.
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water resources research*, 12(3):513–522.
- Richard, L. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *physics*, 1(5):318–333.
- Roest, B. (2014). De variabele constante: Onderzoek naar de psychrometrische constante bij lage windsnelheden.
- Sensoterra (2023). Handleiding voor bodemkalibratie. <https://www.sensoterra.com/resources/bodemkalibratiegids/>. Bezocht op: 6 mei 2024.
- Taiwo, A. F., Daramola, O., Sow, M., and Semwal, V. K. (2020). Ecophysiology and responses of plants under drought. *Plant Ecophysiology and Adaptation under Climate Change: Mechanisms and Perspectives I: General Consequences and Plant Responses*, pages 231–268.
- Terink, W., Droogers, P., Immerzeel, W., and vd Eertwegh, G. (2012). Sphy—een hydrologisch model gericht op de berekening van bodemvocht in de wortelzone en de actuele verdamping. *Report FutureWater*, 115.
- Van de Giessen, R. and De Heij, M. (2021). Beplantingsplan wadi europaplein oost. *Gemeente Amsterdam Ruimte en Duurzaamheid*.
- Van de Giessen, R., Solci, A., and De Heij, M. (2019). Beplantingsplan vivaldi. *Gemeente Amsterdam Ruimte en Duurzaamheid*.

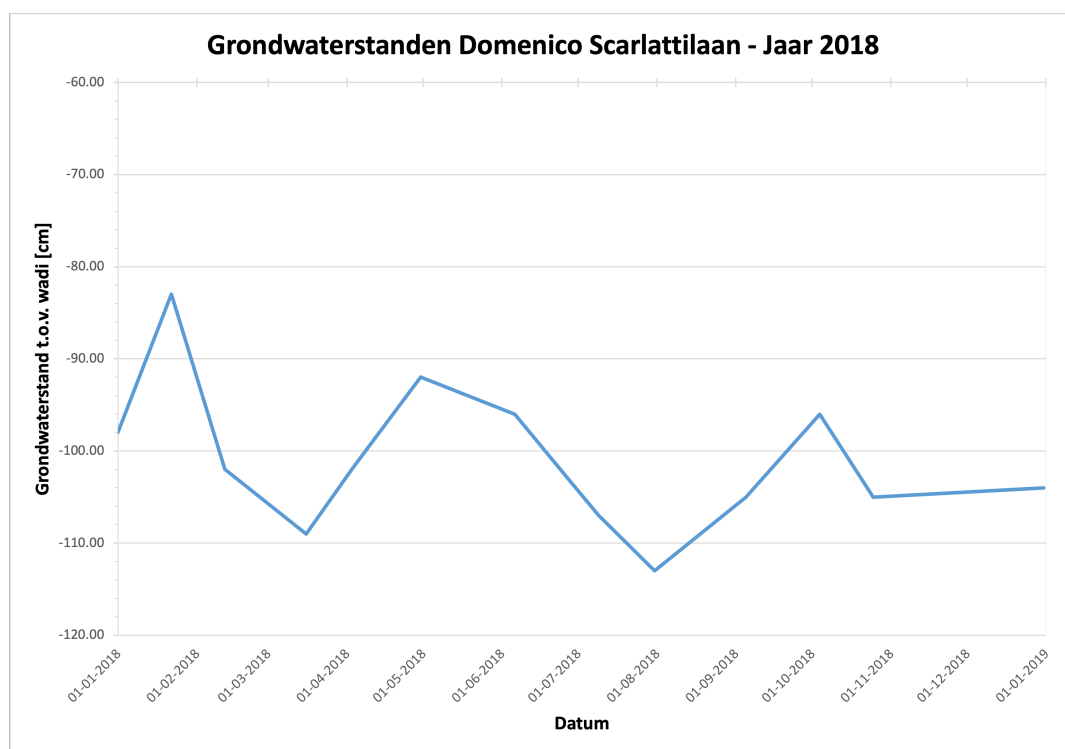
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5):892–898.
- Van Walsum, P., van der Bolt, F., and Veldhuizen, A. (2013). Hoe klimaatrobust is de gewasfactormethode van het nationaal hydrologisch instrumentarium? *Stromingen: vakblad voor hydrologen*, 19(3/4):127–133.
- Verkade, K. en Koopman-Kuipers, E. e. G. K. (2017). De nederlandse wadi beplant?! *Koos Verkade*. <http://www.koosverkade.nl/wadi>
- Verzandvoort, S., Van Tol-Leenders, D., Römkens, P., Mol, G., and Van den Elsen, E. (2020). Bodeminformatiebehoefte voor de metropoolregio amsterdam: Bodeminformatie voor vraagstukken in en om de stad.
- Waternet (2024). Kaart peilbuizen waternet. <https://maps.waternet.nl/kaarten/peilbuizen.html>. Bezocht op: 26 september 2024.
- Weerproof, A. (2021). Wadi's merwedeplein. <https://weerproof.nl/project/wadis-merwedeplein/>. Bezocht op: 16 september 2024.
- Xie, C., Cai, S., Yu, B., Yan, L., Liang, A., and Che, S. (2020). The effects of tree root density on water infiltration in urban soil based on a ground penetrating radar in shanghai, china. *Urban Forestry Urban Greening*, 50:126648.
- Yang, T., Ala, M., Guan, D., and Wang, A. (2021). The effects of groundwater depth on the soil evaporation in horqin sandy land, china. *Chinese Geographical Science*, 31:727–734.
- Zhang, D., Wang, Z., Guo, Q., Lian, J., and Chen, L. (2019). Increase and spatial variation in soil infiltration rates associated with fibrous and tap tree roots. *Water*, 11(8):1700.
- Zhu, H., Liu, T., Xue, B., and Wang, G. (2018). Modified richards' equation to improve estimates of soil moisture in two-layered soils after infiltration. *Water*, 10(9):1174.
- Zotarelli, L., Dukes, M. D., Romero, C. C., Migliaccio, K. W., and Morgan, K. T. (2010). Step by step calculation of the penman-monteith evapotranspiration (fao-56 method). *Institute of Food and Agricultural Sciences. University of Florida*, 8.



Achtergrond informatie

A.1. Grondwaterstanden

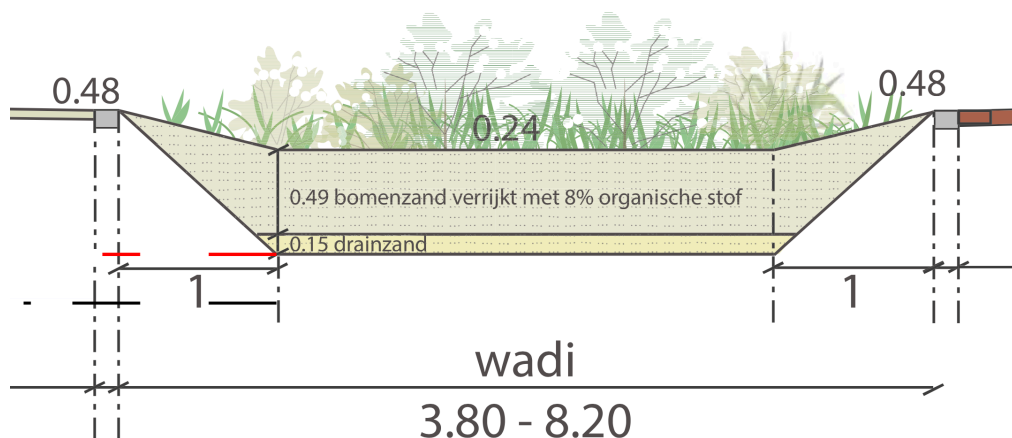
In figuur A.1 zijn de grondwaterstanden van het jaar 2018 gegeven voor de wadi in de Domenico Scarlattilaan.



Figuur A.1: Grondwaterstanden t.o.v. de wadi in centimeters voor de wadi in de Domenico Scarlattilaan, van het jaar 2018.

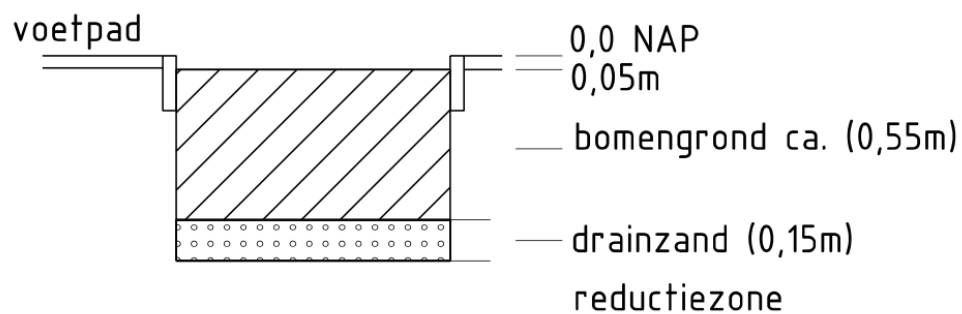
A.2. Bodemopbouwen

In figuur A.2 is de bodemopbouw van de wadi op het Europaplein gegeven.



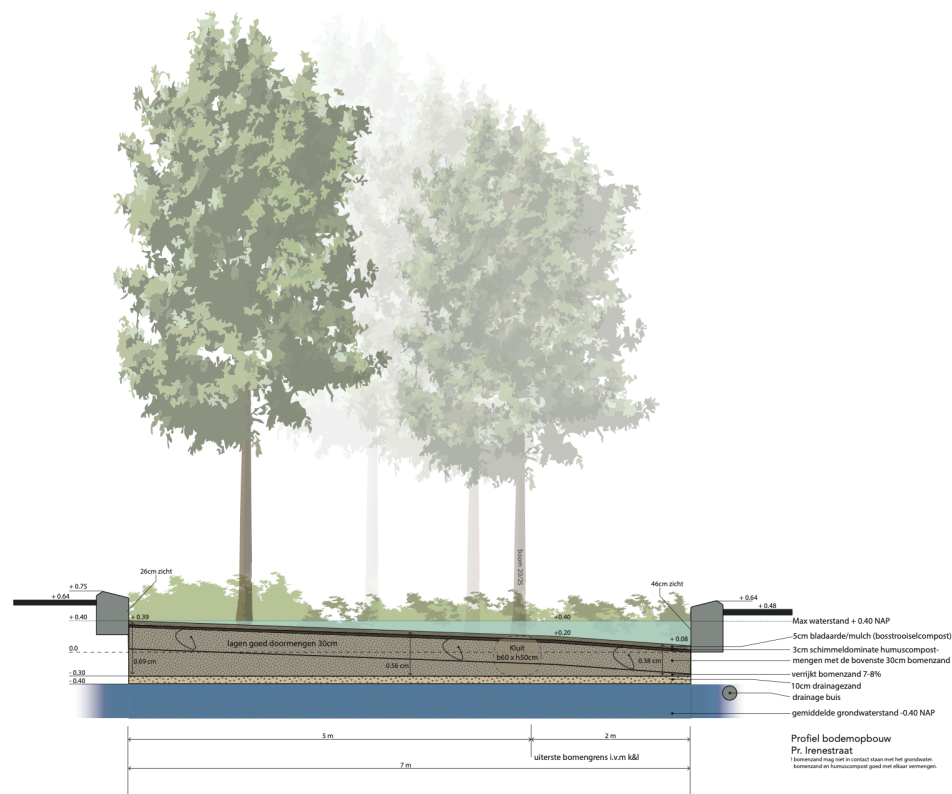
Figuur A.2: Doorsnede van bodemopbouw van wadi op het Europaplein (Van de Giessen and De Heij, 2021).

In figuur A.3 is de bodemopbouw van de wadi op het Merwedeplein gegeven.



Figuur A.3: Doorsnede van bodemopbouw van wadi op het Merwedeplein.

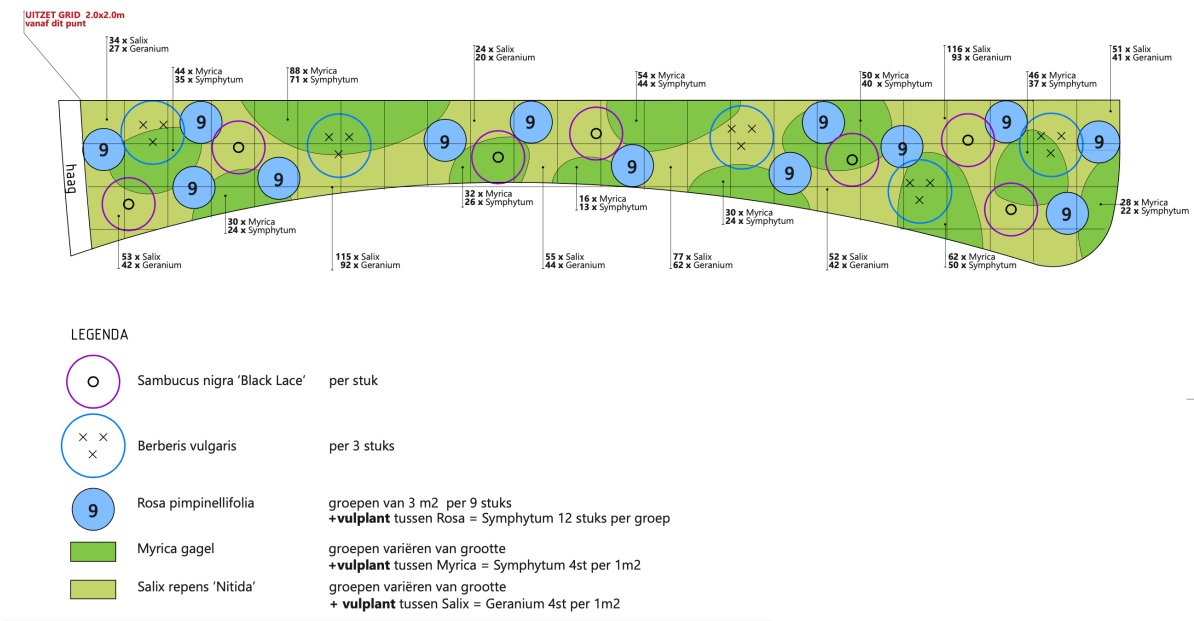
In figuur A.4 is de bodemopbouw van de wadi in de Prinses Irenestraat gegeven.



Figuur A.4: Doorsnede van bodemopbouw van wadi in de Prinses Irenestraat.

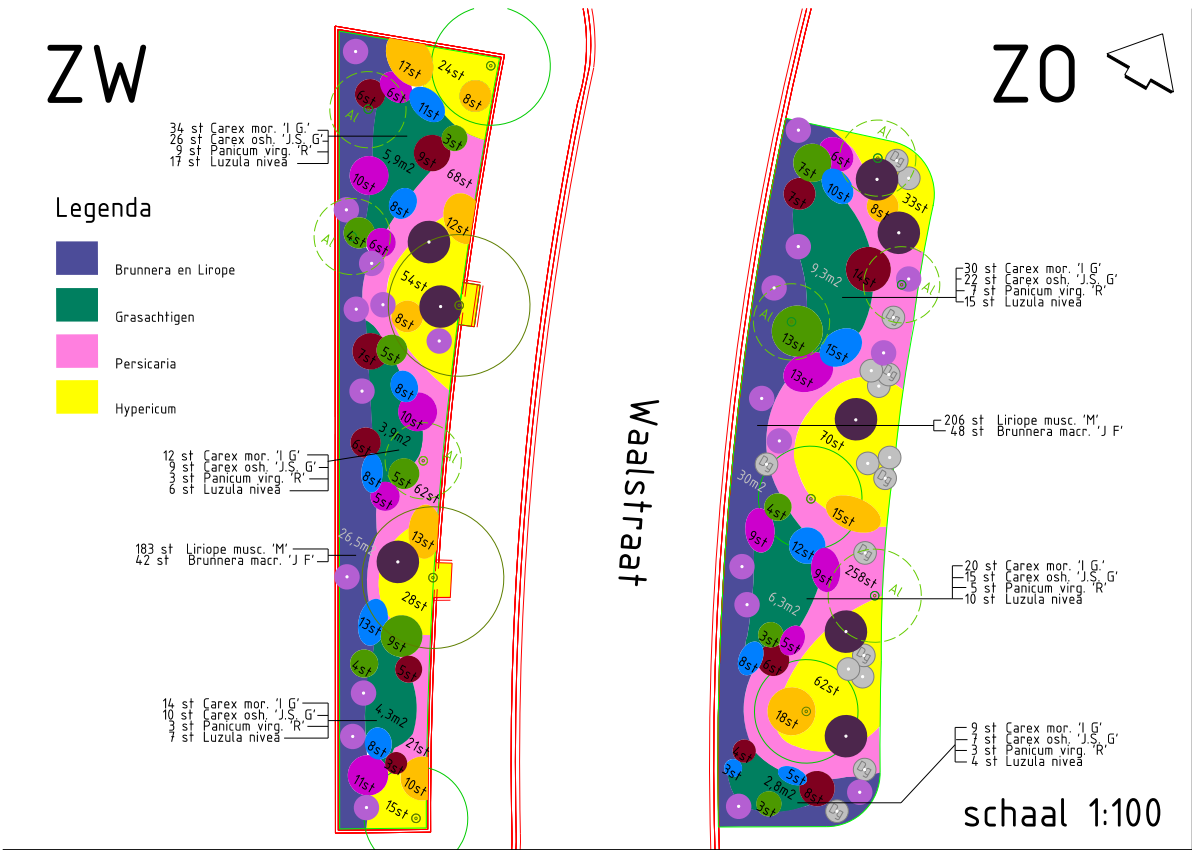
A.3. Beplantingsontwerpen

In figuur A.5 is de samenstelling van vegetatie gegeven voor de wadi op het Europaplein.



Figuur A.5: Beplantingsplan van wadi op het Europaplein (Van de Giessen and De Heij, 2021).

In figuur A.6, is het beplantingsplan van de wadi's op het Merwedeplein te zien:



Figuur A.6: Beplantingsplan van wadi op het Merwedeplein (Bout, 2021).

A.4. Samengestelde vegetatie factor

Tabel A.1: Samengestelde vegetatie factor $K_{mix, Europaplein}$ voor de wadi op het Europaplein in verband met de verschillende soorten beplanting.

Maand	Weging natuurlijk grasland [%]	Weging struikheide [%]	Weging loofbos [%]	Samengestelde vegetatie factor $K_{mix, Europaplein}$ [-]
1	50.0	50.0	0.0	1.485
2	50.0	50.0	0.0	1.240
3	50.0	50.0	0.0	1.135
4	50.0	50.0	0.0	1.070
5	50.0	50.0	0.0	1.050
6	50.0	50.0	0.0	1.040
7	50.0	50.0	0.0	1.045
8	50.0	50.0	0.0	1.060
9	50.0	50.0	0.0	1.100
10	50.0	50.0	0.0	1.195
11	50.0	50.0	0.0	1.415
12	50.0	50.0	0.0	1.615

Tabel A.2: Samengestelde vegetatie factor $K_{mix,Merwedeplein}$ voor de wadi op het Merwedeplein in verband met de verschillende soorten beplanting.

Maand	Weging natuurlijk grasland [%]	Weging struikheide [%]	Weging loofbos [%]	Samengestelde vegetatie factor $K_{mix,Merwedeplein}$ [-]
1	30.0	60.0	10.0	1.476
2	30.0	60.0	10.0	1.220
3	30.0	60.0	10.0	1.107
4	30.0	60.0	10.0	1.040
5	30.0	60.0	10.0	1.024
6	30.0	60.0	10.0	1.018
7	30.0	60.0	10.0	1.024
8	30.0	60.0	10.0	1.045
9	30.0	60.0	10.0	1.094
10	30.0	60.0	10.0	1.215
11	30.0	60.0	10.0	1.475
12	30.0	60.0	10.0	1.635

Tabel A.3: Samengestelde vegetatie factor $K_{mix,PrinsesIrenestraat}$ voor de wadi in de Prinses Irenestraat in verband met de verschillende soorten beplanting.

Maand	Weging natuurlijk grasland [%]	Weging struikheide [%]	Weging loofbos [%]	Samengestelde vegetatie factor $K_{mix,PrinsesIrenestraat}$ [-]
1	65.0	25.0	10.0	1.557
2	65.0	25.0	10.0	1.262
3	65.0	25.0	10.0	1.132
4	65.0	25.0	10.0	1.054
5	65.0	25.0	10.0	1.031
6	65.0	25.0	10.0	1.025
7	65.0	25.0	10.0	1.035
8	65.0	25.0	10.0	1.052
9	65.0	25.0	10.0	1.108
10	65.0	25.0	10.0	1.247
11	65.0	25.0	10.0	1.549
12	65.0	25.0	10.0	1.737

A.5. Bladoppervlakte-index

Tabel A.4: Bladoppervlakte-index (LAI) voor de natuurlijk vegetatie: natuurlijk gras ($K_{tot,nat.gras}$). Het verloop van de bladoppervlakte-index van NHI-vegetaties zijn gebruikt uit het onderzoek van Wageningen University & Research (Dik and Mulder, 2024).

Maand [-]	Dag: DNR [-]	DeVelopment Stage: DVS [0 - 2]	Leaf Area Index: LAI [-]
Januari	1	0.000	0.75
	16	0.087	0.75
Februari	32	0.174	0.75
	46	0.261	0.75
Maart	60	0.348	0.75
	75	0.435	0.75
April	91	0.522	0.75
	106	0.609	0.75
Mei	121	0.696	0.75
	136	0.783	1.50
Juni	152	0.870	8.75
	167	0.957	8.75
Juli	182	1.043	8.75
	197	1.130	8.75
Augustus	213	1.217	8.75
	228	1.304	8.75
September	244	1.391	8.75
	259	1.478	8.75
Oktober	274	1.565	3.50
	290	1.652	2.50
November	305	1.739	1.25
	320	1.826	0.75
December	335	1.913	0.75
	365	2.000	0.75

Tabel A.5: Bladoppervlakte-index (LAI) voor de natuurlijk vegetatie: struikheide ($K_{tot, struikheide}$). Het verloop van de bladoppervlakte-index van NHI-vegetaties zijn gebruikt uit het onderzoek van Wageningen University & Research (Dik and Mulder, 2024).

Maand [-]	Dag: DNR [-]	DeVelopment Stage: DVS [0 - 2]	Leaf Area Index: LAI [-]
Januari	1	0.000	0.75
	16	0.087	0.75
Februari	32	0.174	0.75
	46	0.261	0.75
Maart	60	0.348	0.75
	75	0.435	0.75
April	91	0.522	0.75
	106	0.609	0.75
Mei	121	0.696	0.75
	136	0.783	1.50
Juni	152	0.870	8.75
	167	0.957	8.75
Juli	182	1.043	8.75
	197	1.130	8.75
Augustus	213	1.217	8.75
	228	1.304	8.75
September	244	1.391	8.75
	259	1.478	8.75
Oktober	274	1.565	3.50
	290	1.652	2.50
November	305	1.739	1.25
	320	1.826	0.75
December	335	1.913	0.75
	365	2.000	0.75

Tabel A.6: Bladoppervlakte-index (LAI) voor de samengestelde vegetatie factor: $K_{mix,Domenico}$.

Maand [-]	Dag: DNR [-]	DeVelopment Stage: DVS [0 - 2]	Leaf Area Index: LAI [-]
Januari	1	0.000	1.003
	16	0.087	1.003
Februari	32	0.174	1.003
	46	0.261	1.003
Maart	60	0.348	1.003
	75	0.435	1.003
April	91	0.522	1.003
	106	0.609	1.003
Mei	121	0.696	1.003
	136	0.783	1.374
Juni	152	0.870	4.961
	167	0.957	4.961
Juli	182	1.043	4.961
	197	1.130	5.231
Augustus	213	1.217	5.340
	228	1.304	5.466
September	244	1.391	5.592
	259	1.478	5.466
Oktober	274	1.565	2.742
	290	1.652	2.212
November	305	1.739	1.250
	320	1.826	1.003
December	335	1.913	1.003
	365	2.000	1.003

Tabel A.7: Bladoppervlakte-index (LAI) voor de samengestelde vegetatie factor: $K_{mix, Europeplein}$.

Maand [-]	Dag: DNR [-]	DeVelopment Stage: DVS [0 - 2]	Leaf Area Index: LAI [-]
Januari	1	0.000	0.939
	16	0.087	0.939
Februari	32	0.174	0.939
	46	0.261	0.939
Maart	60	0.348	0.939
	75	0.435	0.939
April	91	0.522	0.939
	106	0.609	0.939
Mei	121	0.696	0.939
	136	0.783	1.406
Juni	152	0.870	5.918
	167	0.957	5.918
Juli	182	1.043	5.918
	197	1.130	6.107
Augustus	213	1.217	6.201
	228	1.304	6.296
September	244	1.391	6.390
	259	1.478	6.296
Oktober	274	1.565	2.934
	290	1.652	2.217
November	305	1.739	1.250
	320	1.826	0.939
December	335	1.913	0.939
	365	2.000	0.939

Tabel A.8: Bladoppervlakte-index (LAI) voor de samengestelde vegetatie factor: $K_{mix, Merwedeplein}$.

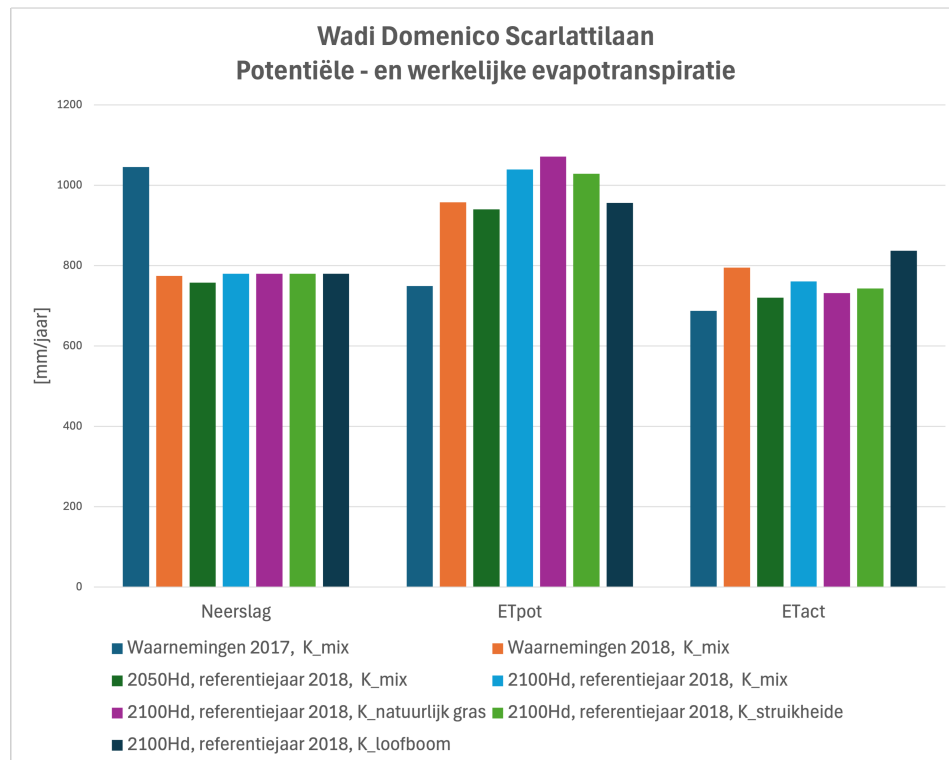
Maand [-]	Dag: DNR [-]	DeVelopment Stage: DVS [0 - 2]	Leaf Area Index: LAI [-]
Januari	1	0.000	1.050
	16	0.087	1.050
Februari	32	0.174	1.050
	46	0.261	1.050
Maart	60	0.348	1.050
	75	0.435	1.050
April	91	0.522	1.050
	106	0.609	1.050
Mei	121	0.696	1.050
	136	0.783	1.350
Juni	152	0.870	4.250
	167	0.957	4.250
Juli	182	1.043	4.250
	197	1.130	4.550
Augustus	213	1.217	4.700
	228	1.304	4.850
September	244	1.391	5.000
	259	1.478	4.850
Oktober	274	1.565	2.600
	290	1.652	2.050
November	305	1.739	1.250
	320	1.826	1.050
December	335	1.913	1.050
	365	2.000	1.050

Tabel A.9: Bladoppervlakte-index (LAI) voor de samengestelde vegetatie factor: $K_{mix, PrinsesIrenestraat}$.

Maand [-]	Dag: DNR [-]	DeVelopment Stage: DVS [0 - 2]	Leaf Area Index: LAI [-]
Januari	1	0.000	0.875
	16	0.087	0.875
Februari	32	0.174	0.875
	46	0.261	0.875
Maart	60	0.348	0.875
	75	0.435	0.875
April	91	0.522	0.875
	106	0.609	0.875
Mei	121	0.696	0.875
	136	0.783	1.438
Juni	152	0.870	6.875
	167	0.957	6.875
Juli	182	1.043	6.875
	197	1.130	7.000
Augustus	213	1.217	7.063
	228	1.304	7.125
September	244	1.391	7.188
	259	1.478	7.125
Oktober	274	1.565	3.125
	290	1.652	2.313
November	305	1.739	1.250
	320	1.826	0.875
December	335	1.913	0.875
	365	2.000	0.875

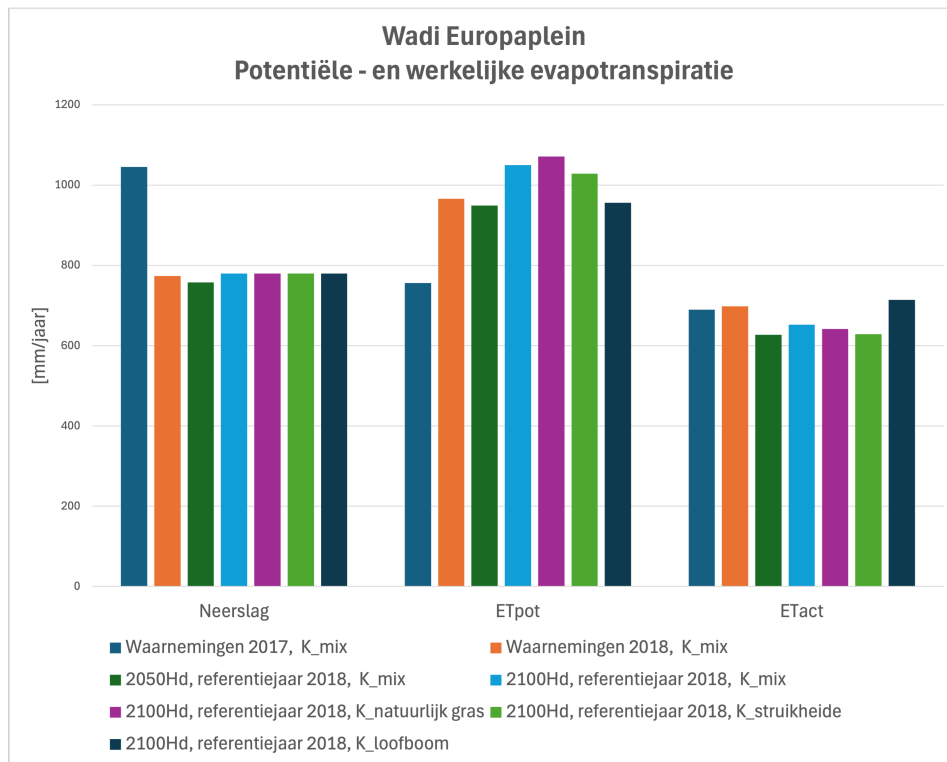
Model resultaten

B.1. Model resultaten wadi Domenico Scarlattilaan

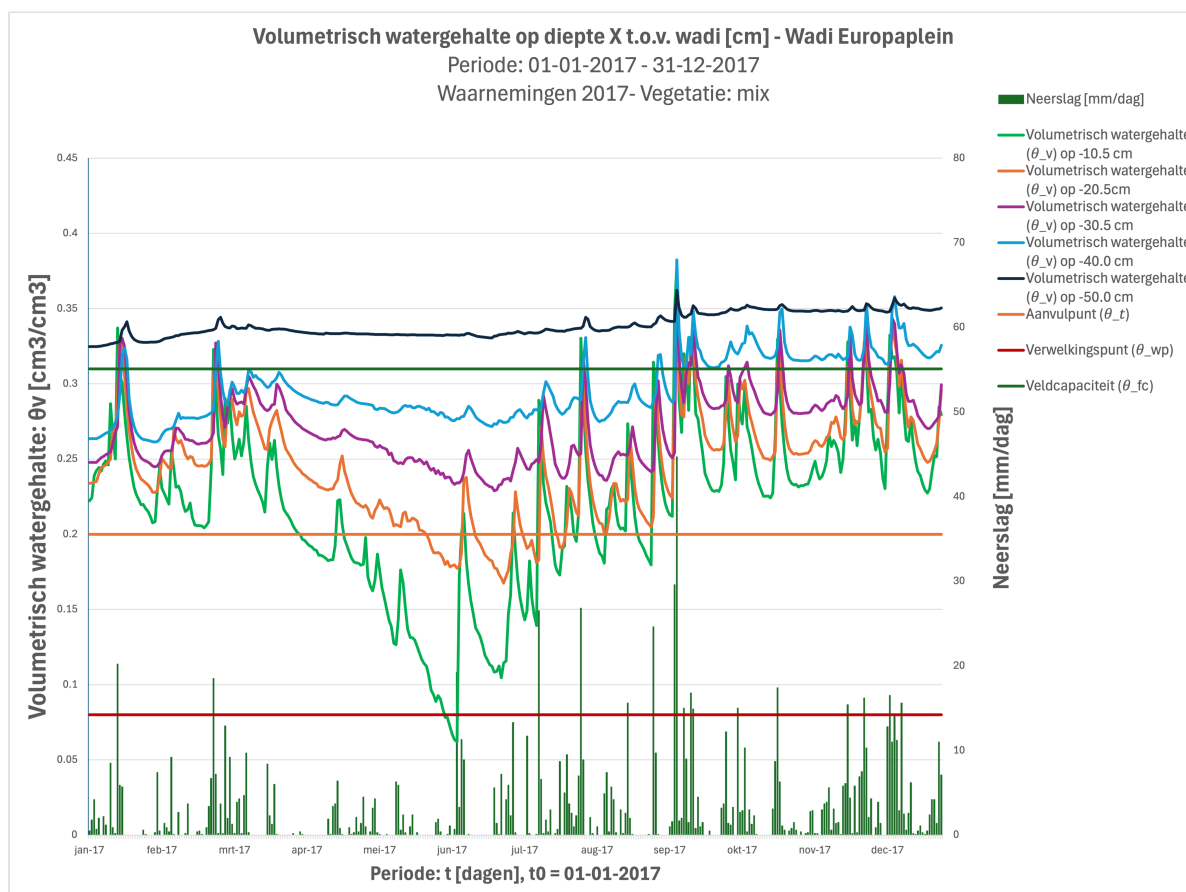


Figuur B.1: Neerslag, potentiële - en werkelijke evapotranspiratie in [mm/jaar] voor de wadi in de Domenico Scarlattilaan. Zoals beschreven in hoofdstuk 3.2.3, bestaat evapotranspiratie (ET) uit verdamping van de bodem (E_s), interceptie van vegetatie (E_i) en transpiratie van vegetatie door wortels (E_t).

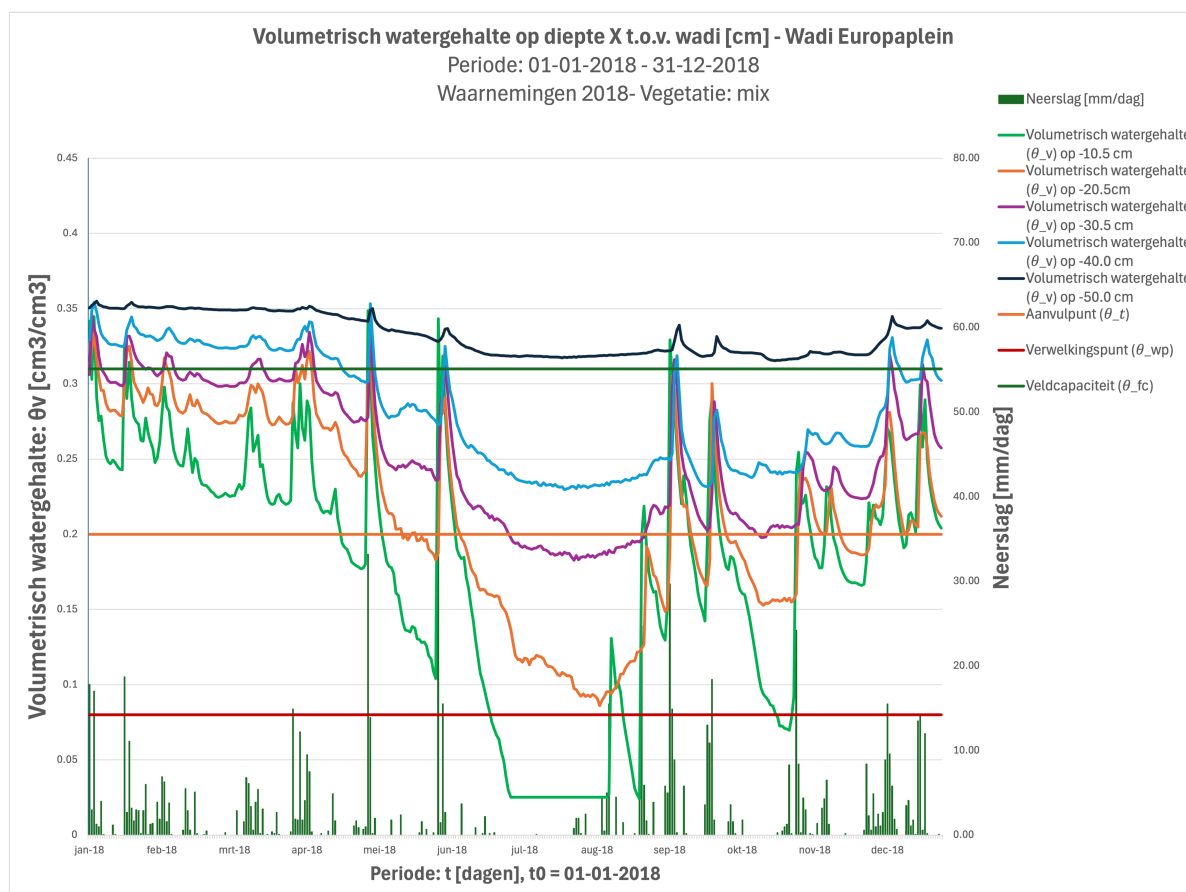
B.2. Model resultaten wadi Europaplein



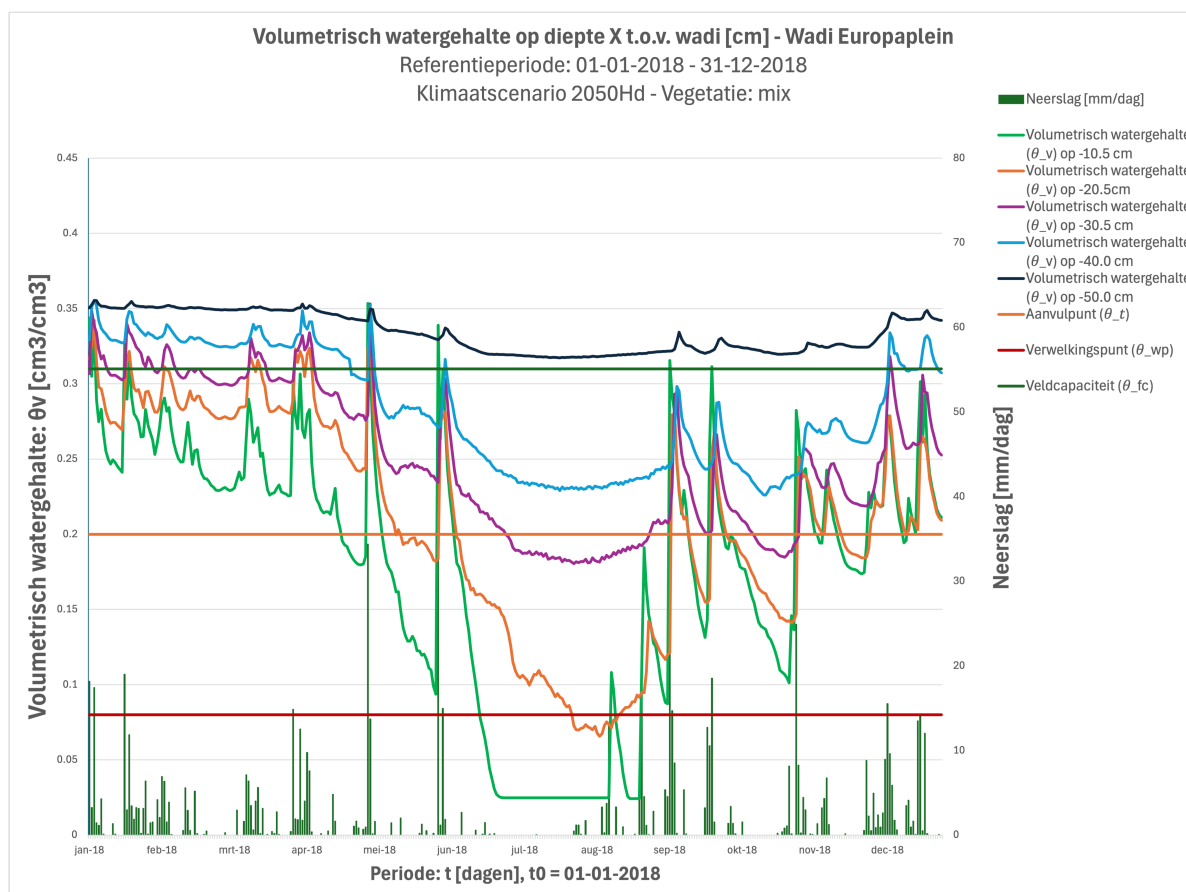
Figuur B.2: Neerslag, potentiële - en werkelijke evapotranspiratie in [mm/jaar] voor de wadi op het Europaplein. Evapotranspiratie (ET) bestaat uit verdamping van de bodem (E_s), interceptie van vegetatie (E_i) en transpiratie van vegetatie door wortels (E_t).



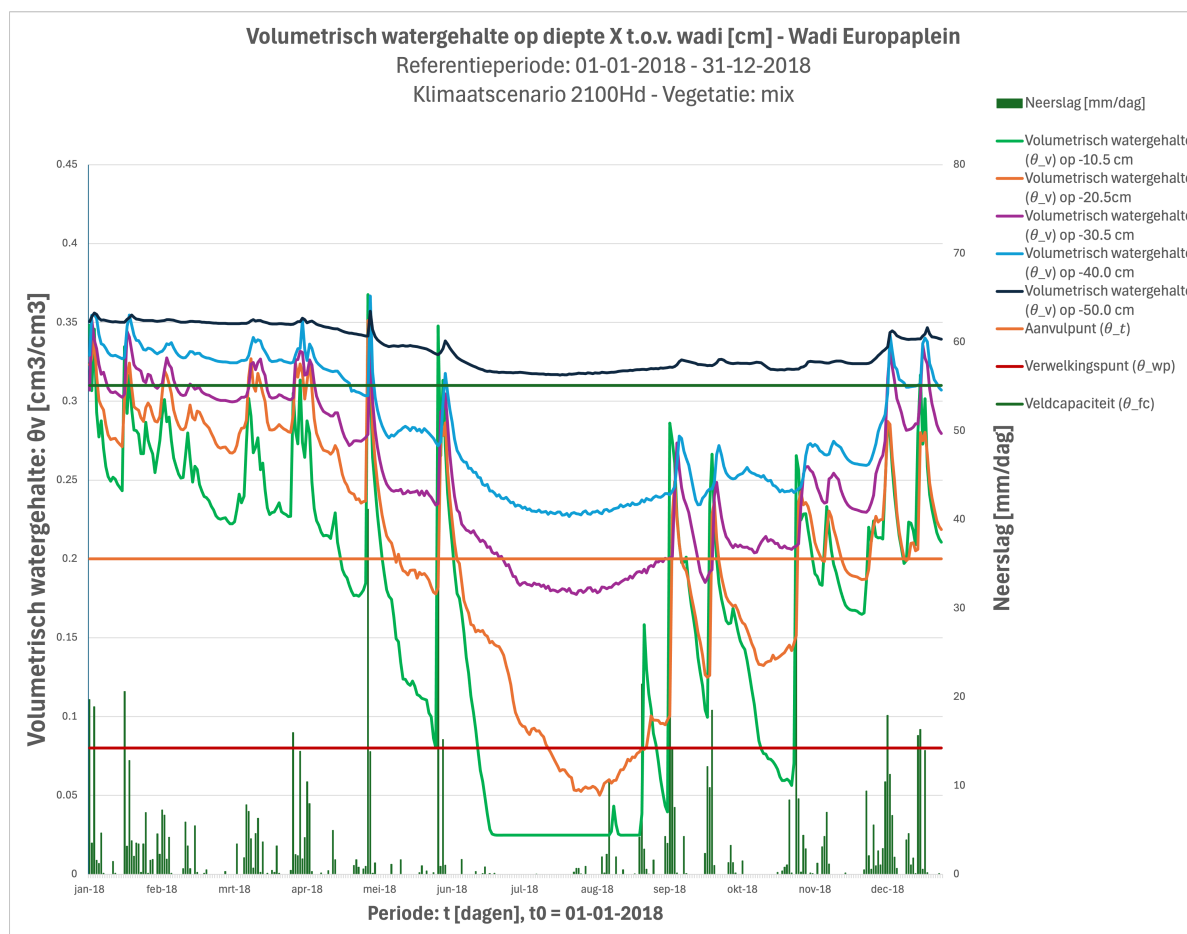
Figuur B.3: Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi op het Europaplein voor het jaar 2017. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2017. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,mix}$ gebruikt.



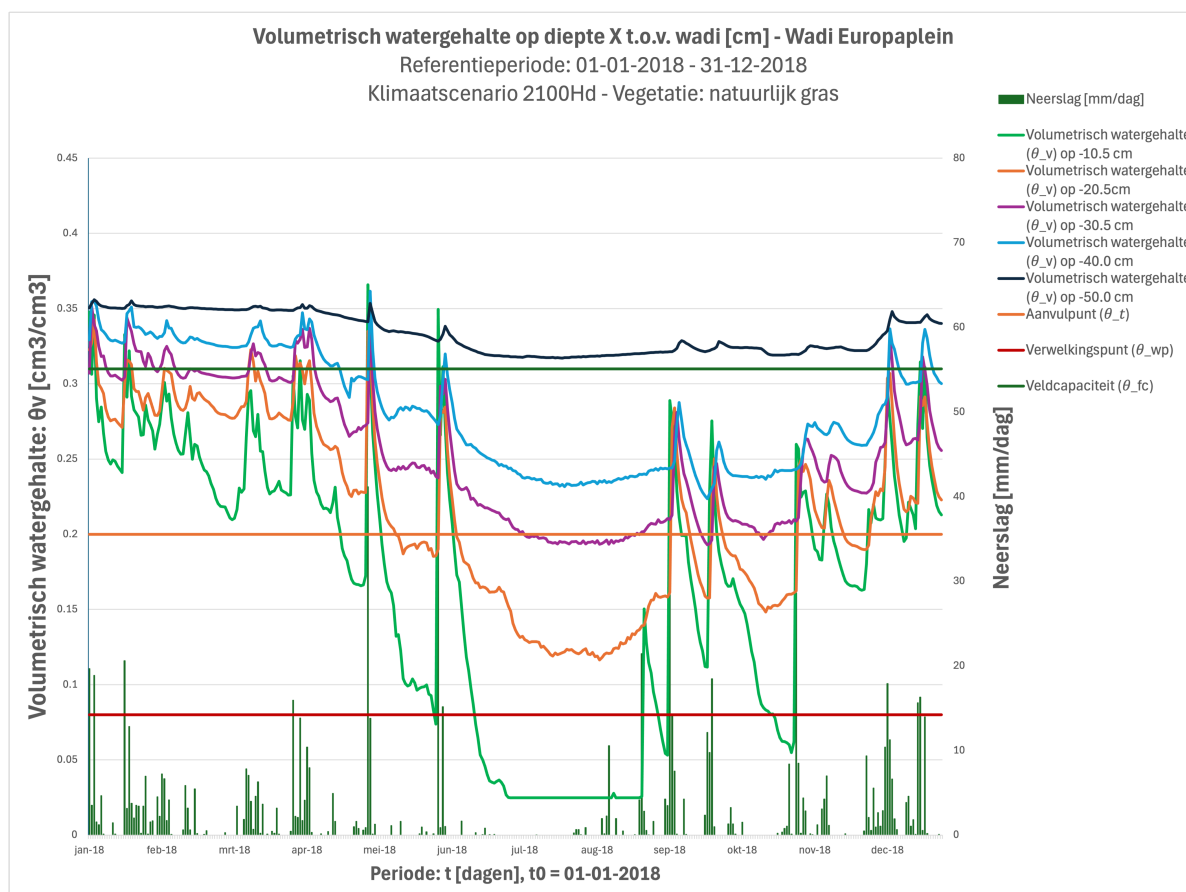
Figuur B.4: Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi op het Europaplein voor het jaar 2018. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,mix}$ toegepast.



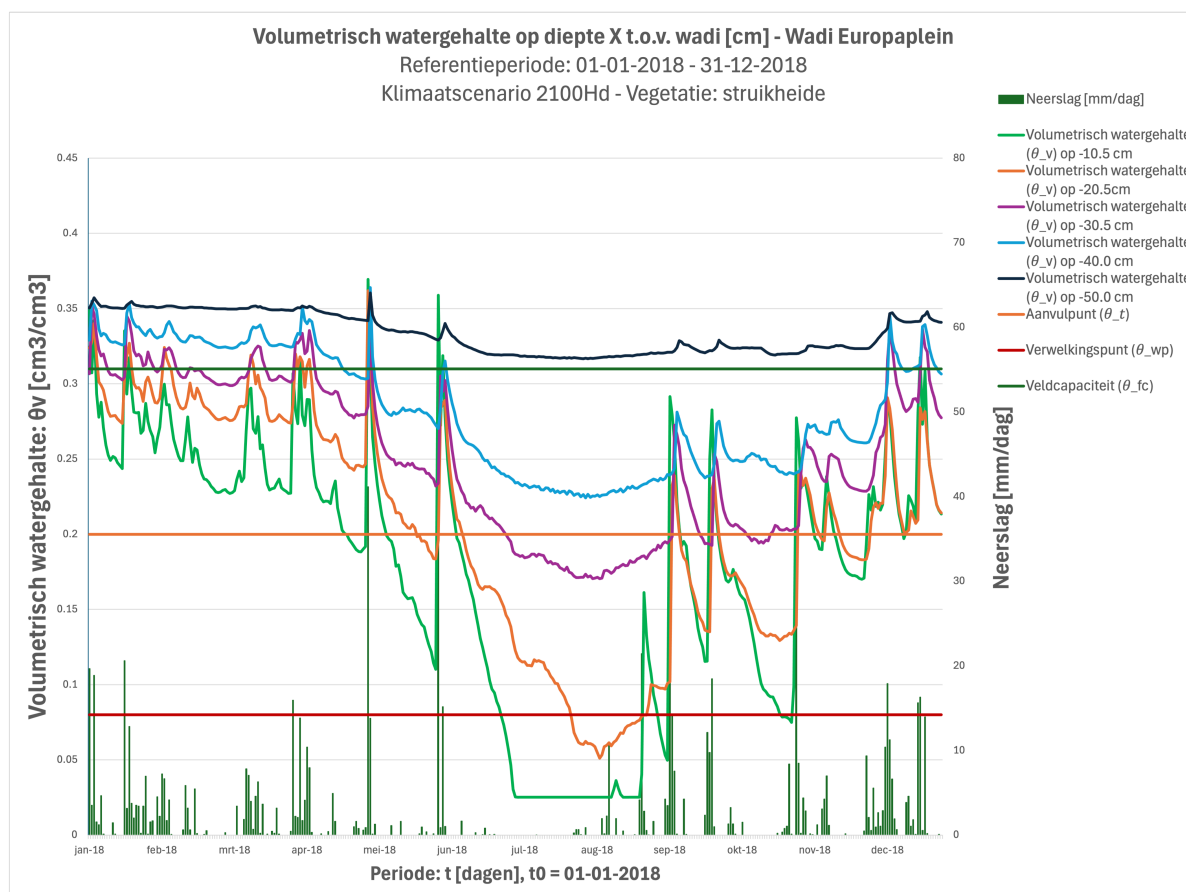
Figuur B.5: Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi op het Europaplein voor het de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2050Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,mix}$ toegepast.



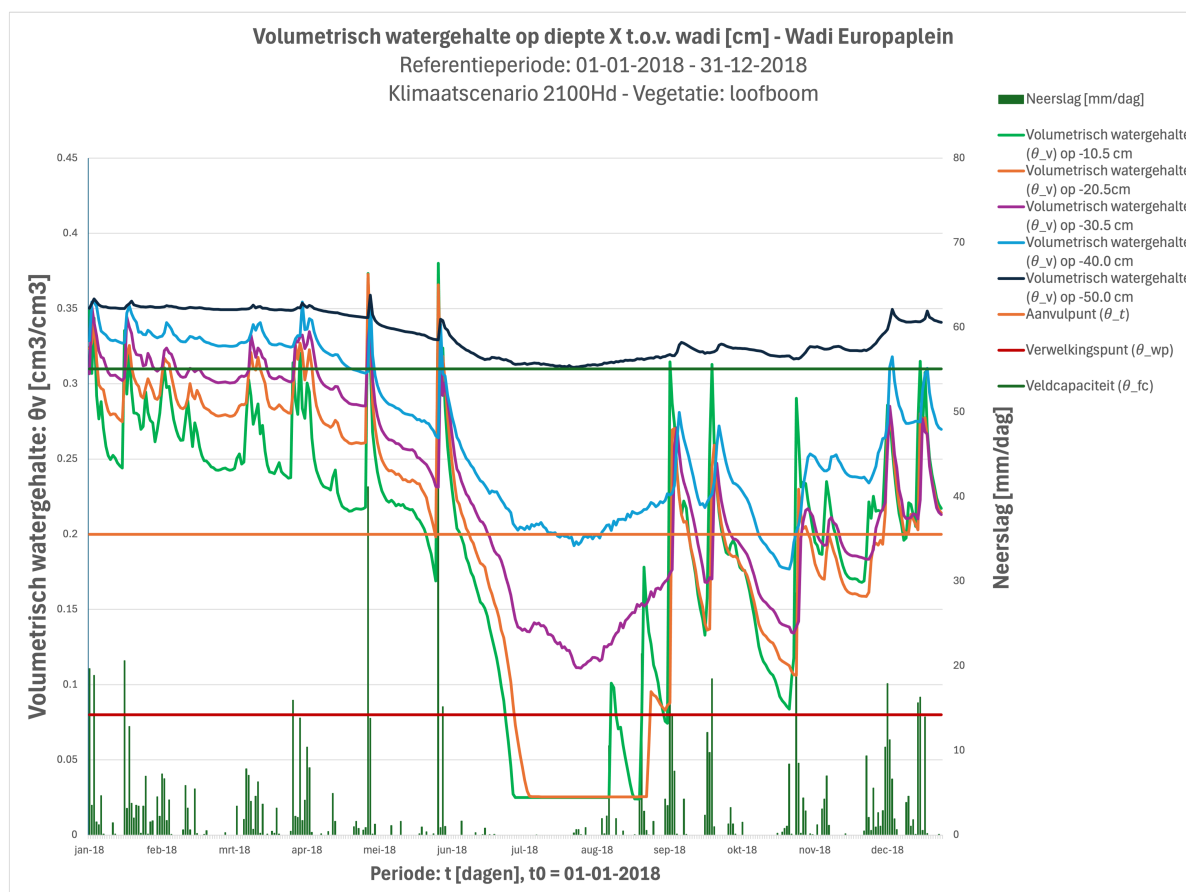
Figuur B.6: Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi op het Europaplein voor het de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2100Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,mix}$ toegepast.



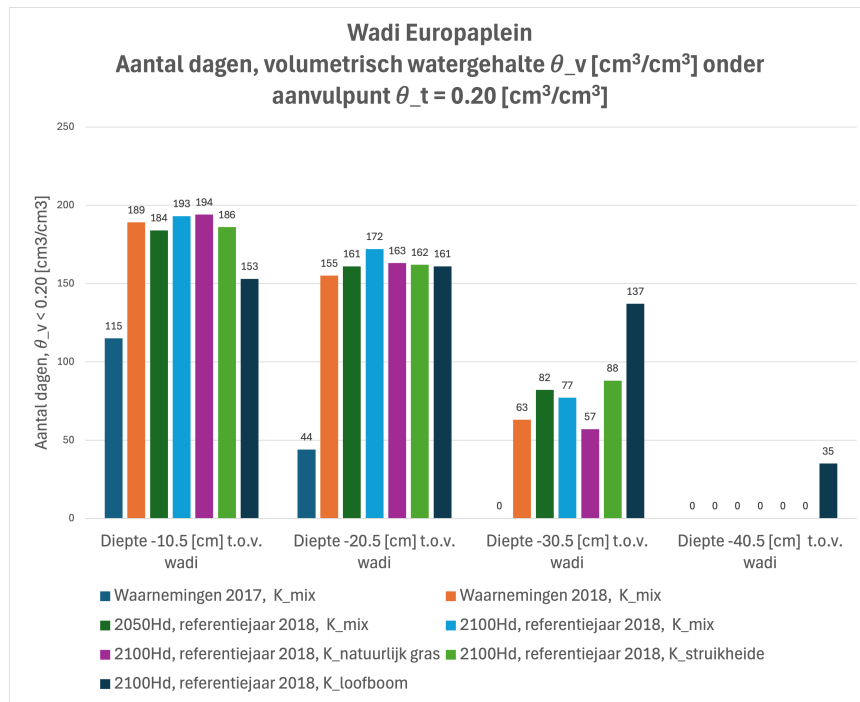
Figuur B.7: Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi op het Europaplein voor het de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2100Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,gras}$ toegepast.



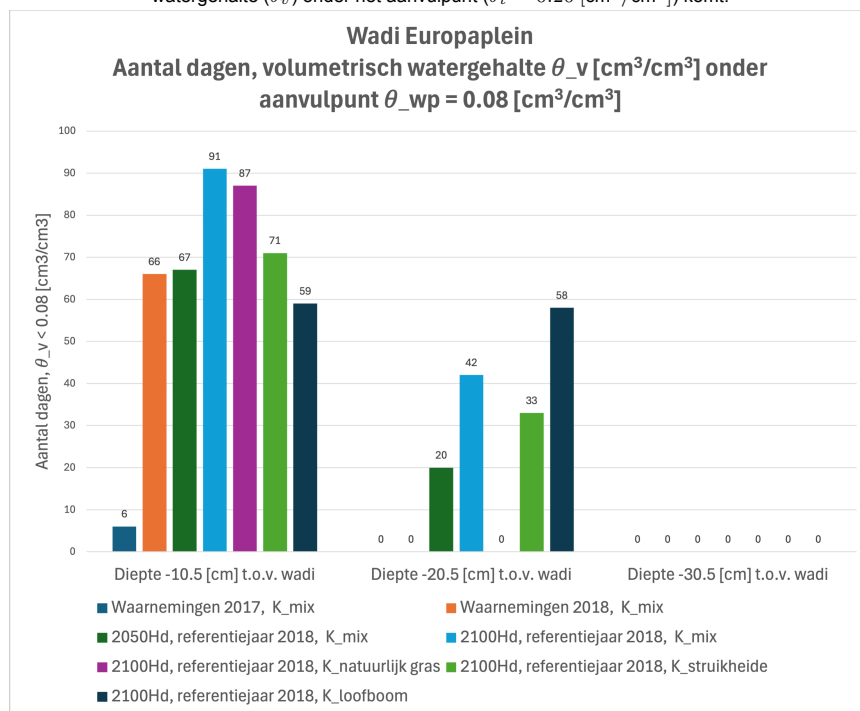
Figuur B.8: Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi op het Europaplein voor het de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2100Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot, struikheide}$ toegepast.



Figuur B.9: Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi op het Europaplein voor het de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2100Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot, loofboom}$ toegepast.



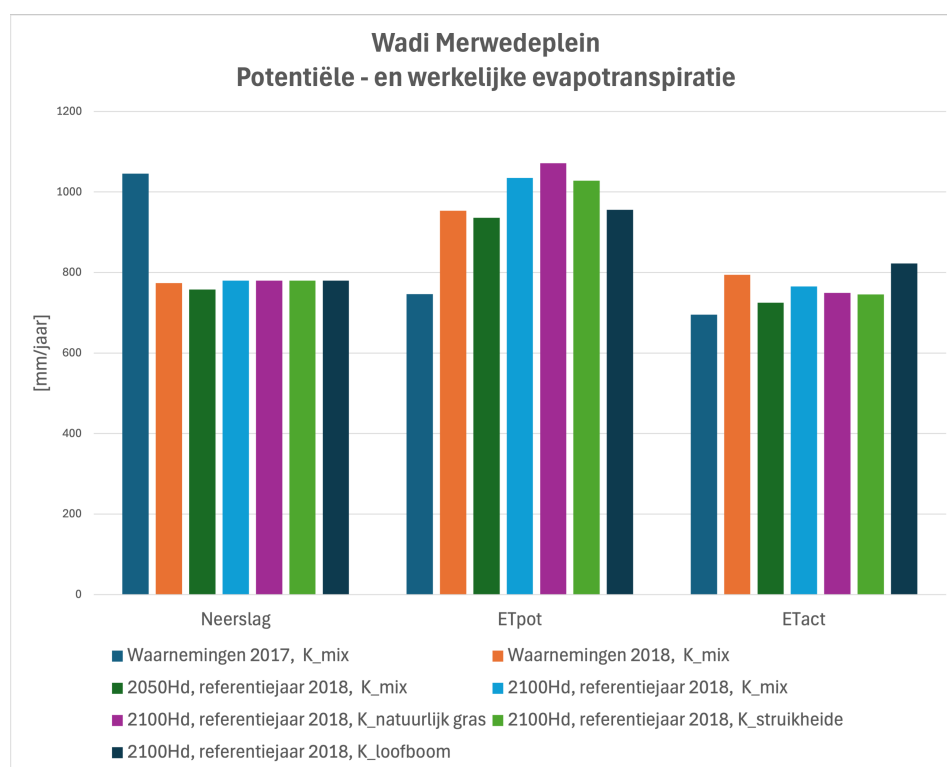
(a) Voor de wadi op de Europaplein, het aantal dagen per diepte t.o.v. de wadi dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het aanvulpunt ($\theta_t = 0.20$ [cm³/cm³]) komt.



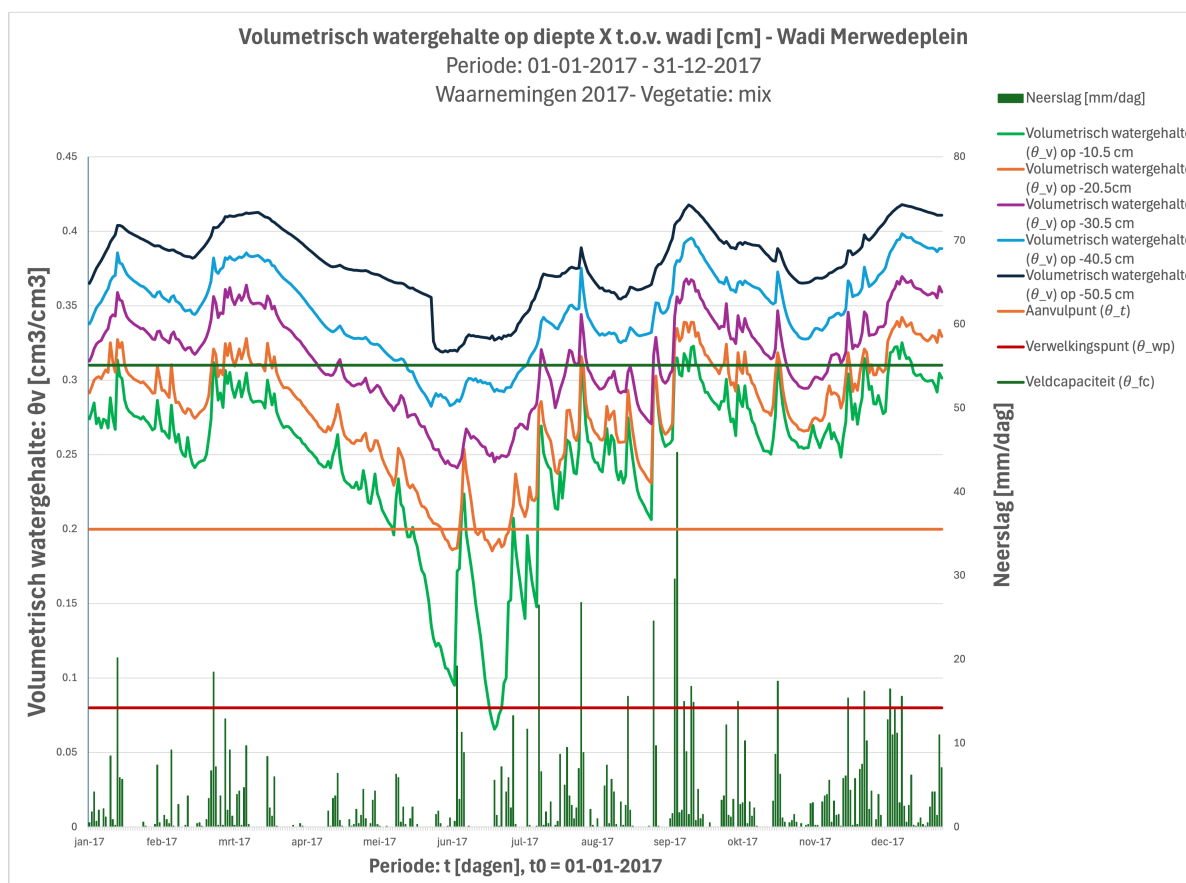
(b) Voor de wadi op de Europaplein, het aantal dagen per diepte t.o.v. de wadi dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt ($\theta_{wp} = 0.08$ [cm³/cm³]) komt.

Figuur B.10: In figuur B.10a, zijn het aantal dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte(θ_v) van de wadi op het Europaplein onder het aanvulpunt (θ_t) komt. In figuur B.10b, zijn het aantal dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt (θ_{wp}) komt.

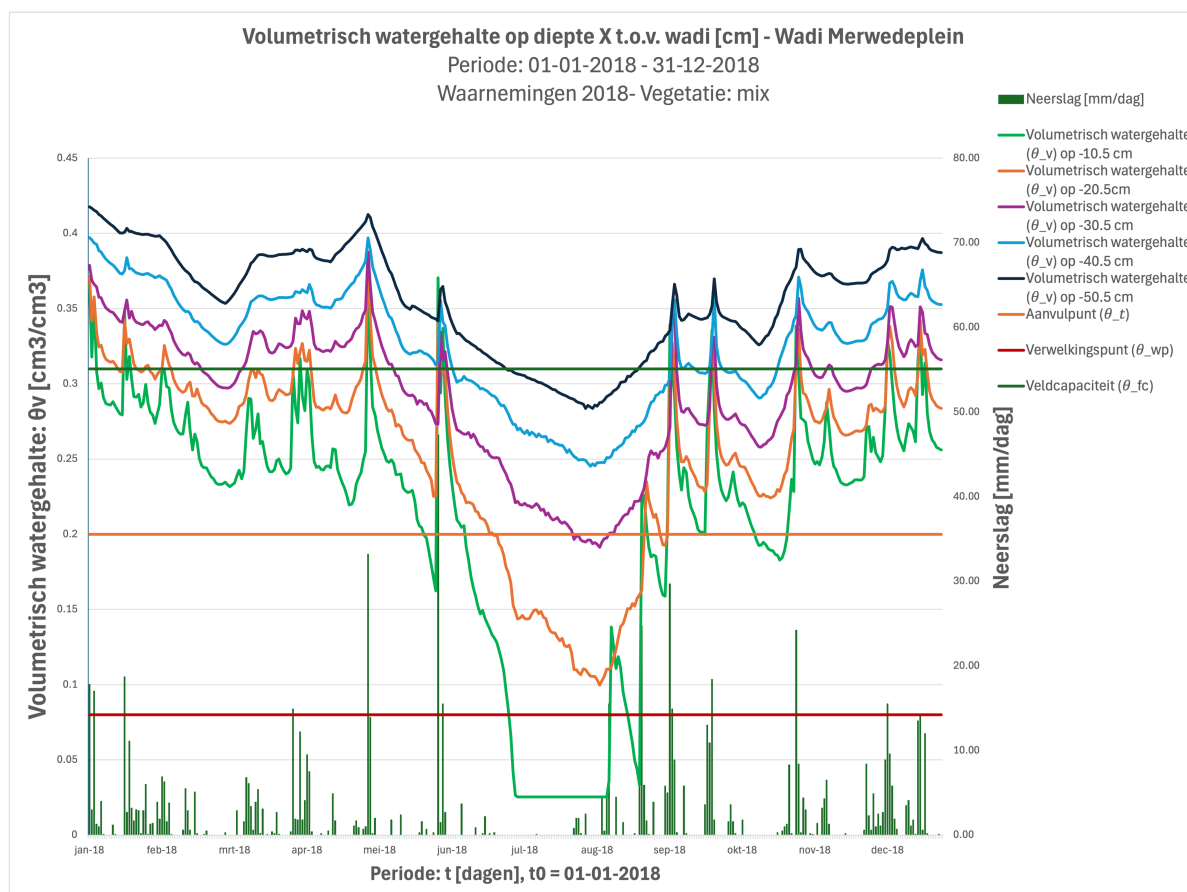
B.3. Model resultaten wadi Merwedeplein



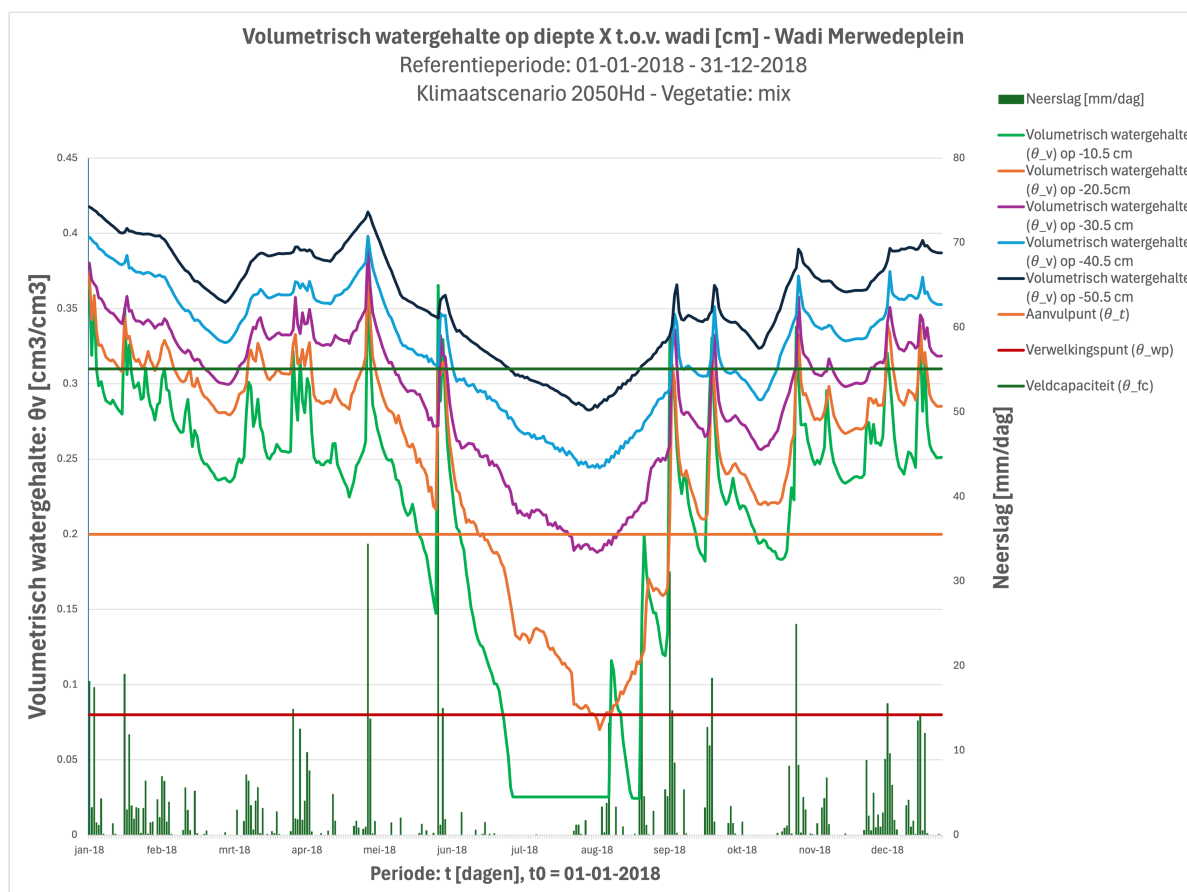
Figuur B.11: Neerslag, potentiële - en werkelijke evapotranspiratie in [mm/jaar] voor de wadi op het Merwedeplein. Evapotranspiratie (ET) bestaat uit verdamping van de bodem (E_s), interceptie van vegetatie (E_i) en transpiratie van vegetatie door wortels (E_t).



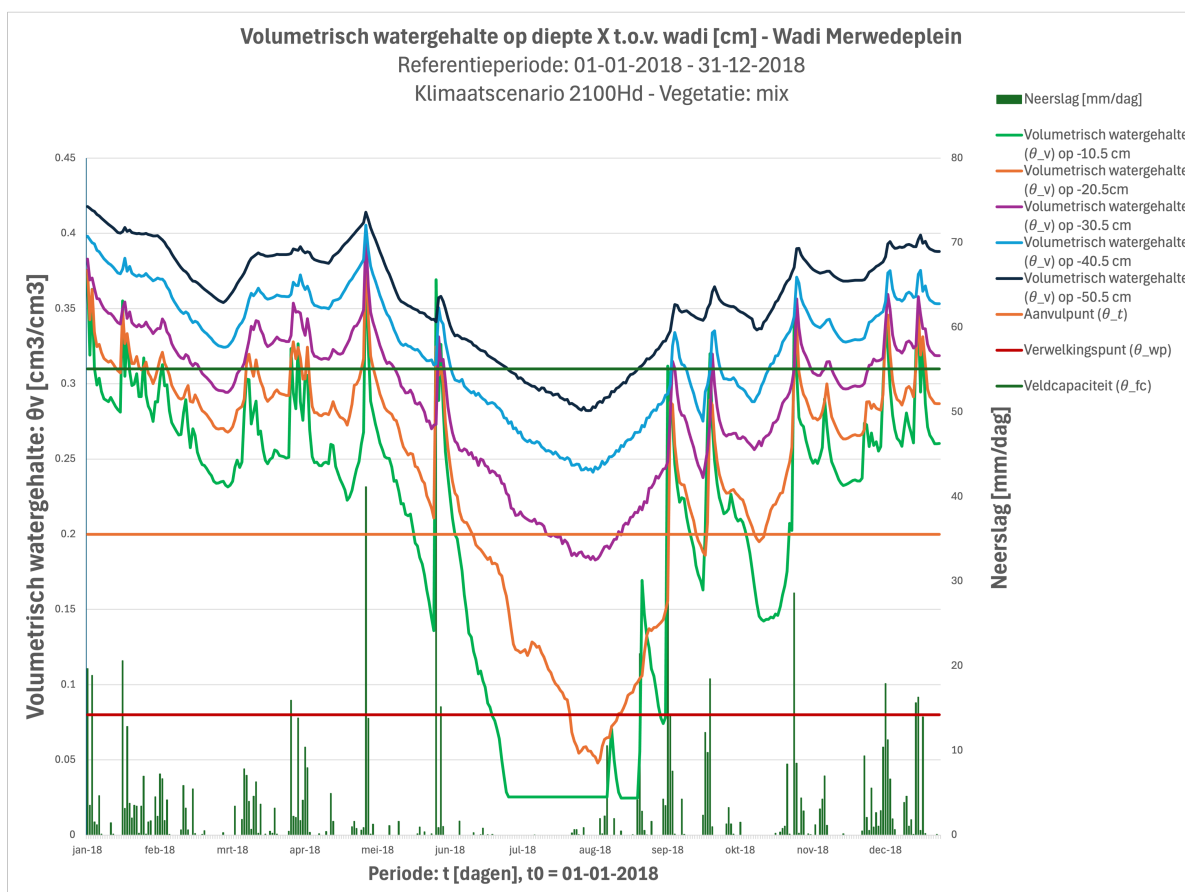
Figuur B.12: Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi op het Merwedeplein voor het jaar 2017. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2017. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,mix}$ gebruikt.



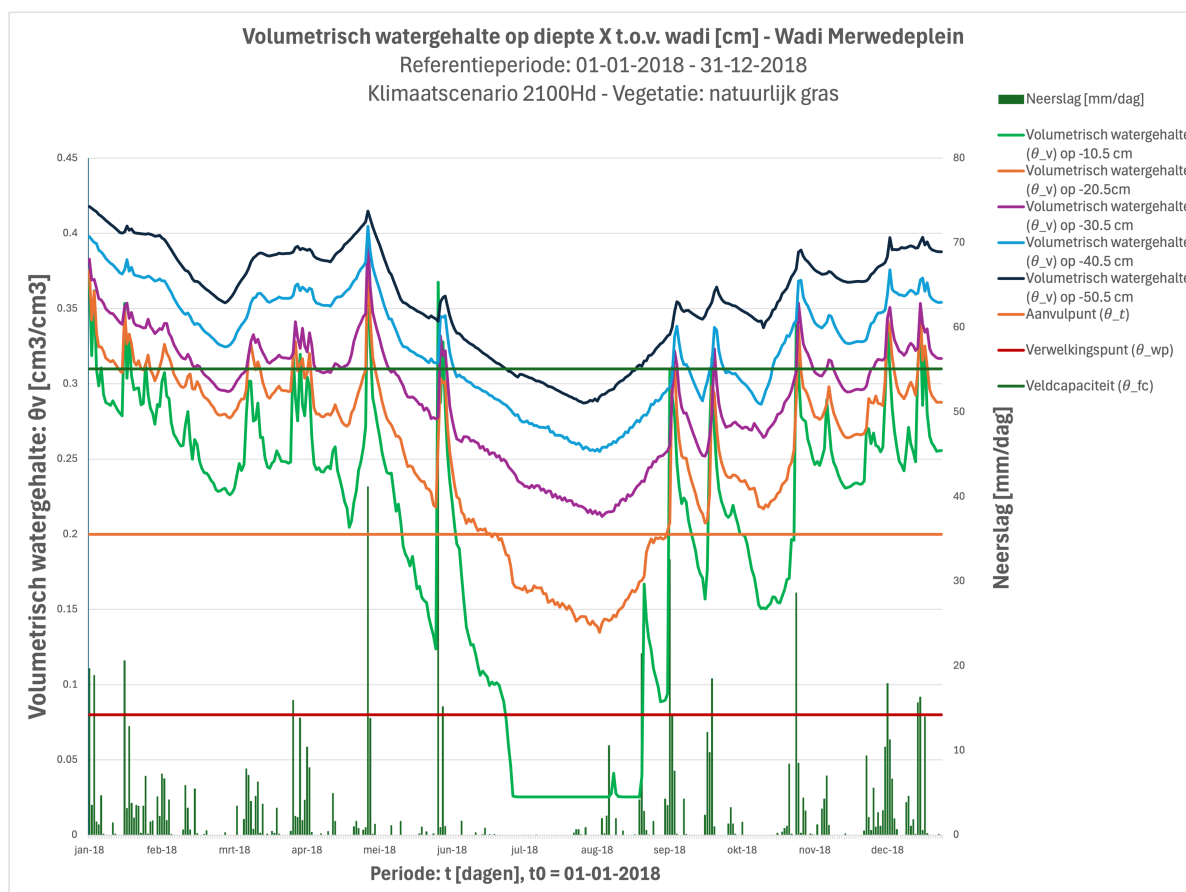
Figuur B.13: Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi op het Merwedeplein voor het jaar 2018. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,mix}$ toegepast.



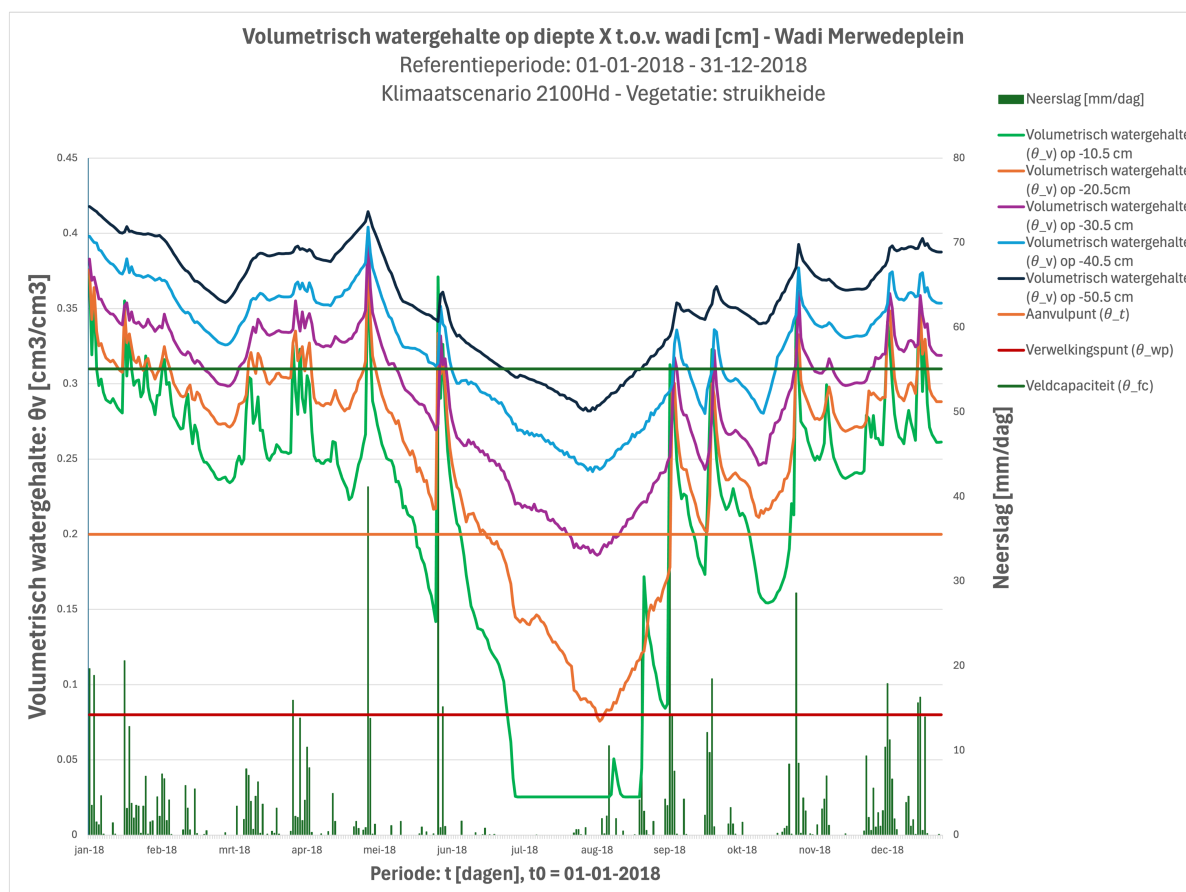
Figuur B.14: Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi op het Merwedeplein voor het de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2050Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,mix}$ toegepast.



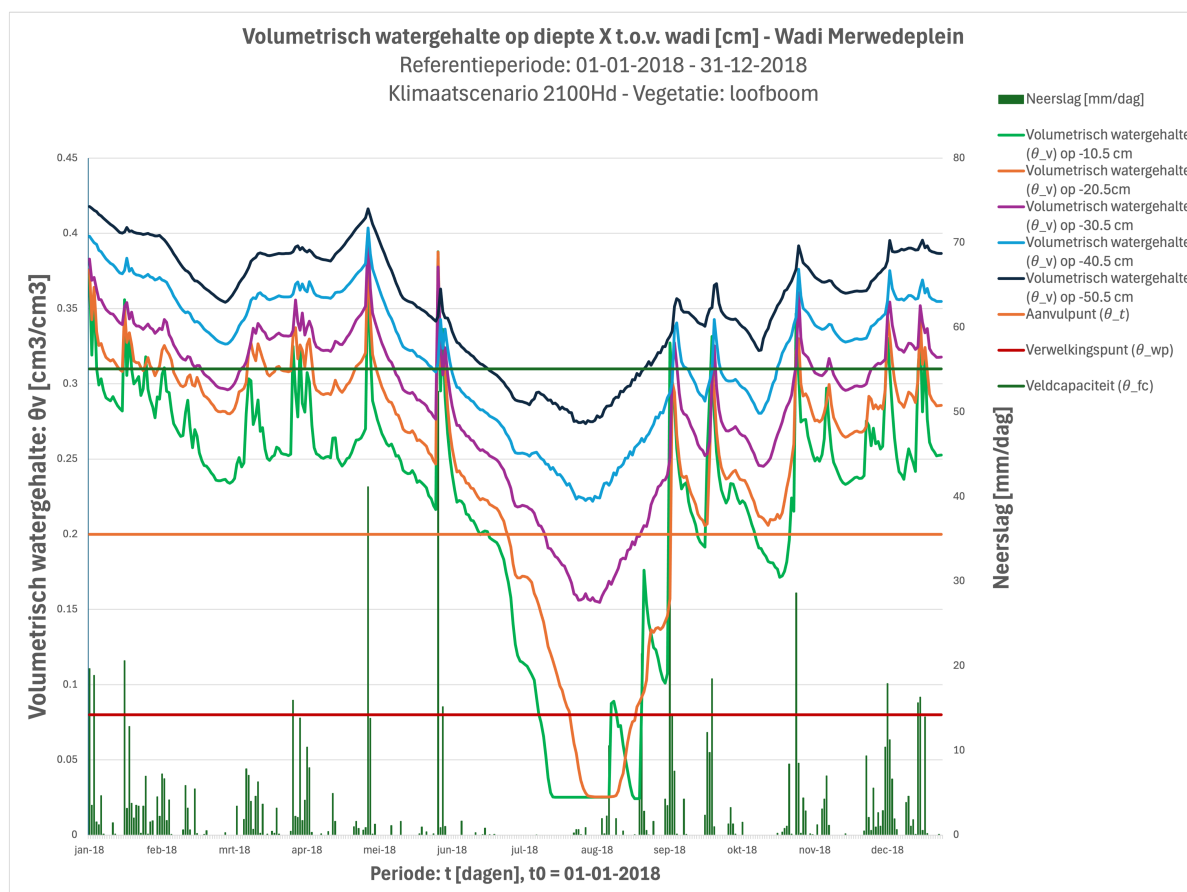
Figuur B.15: Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi op het Merwedeplein voor het de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2100Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,mix}$ toegepast.



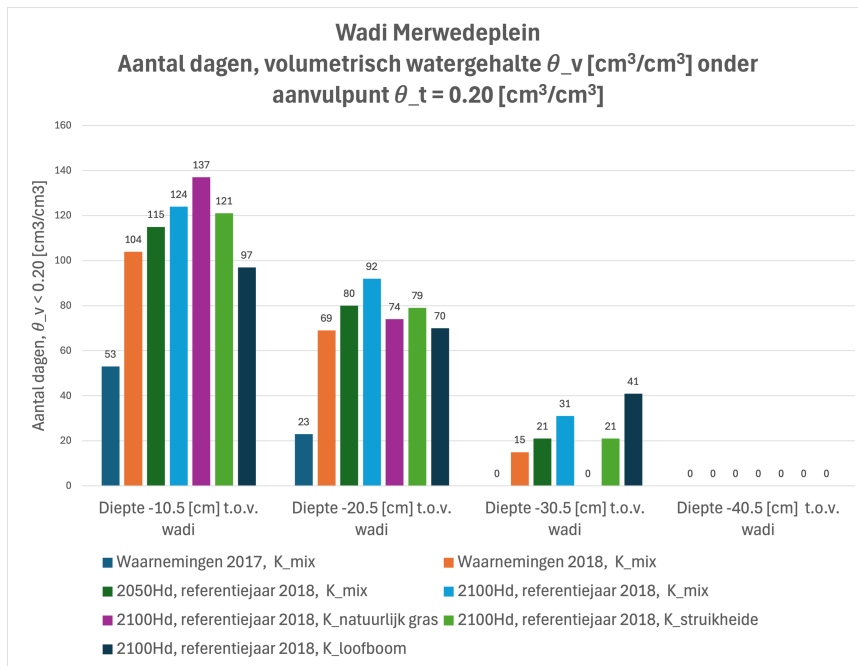
Figuur B.16: Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi op het Merwedeplein voor het de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2100Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,gras}$ toegepast.



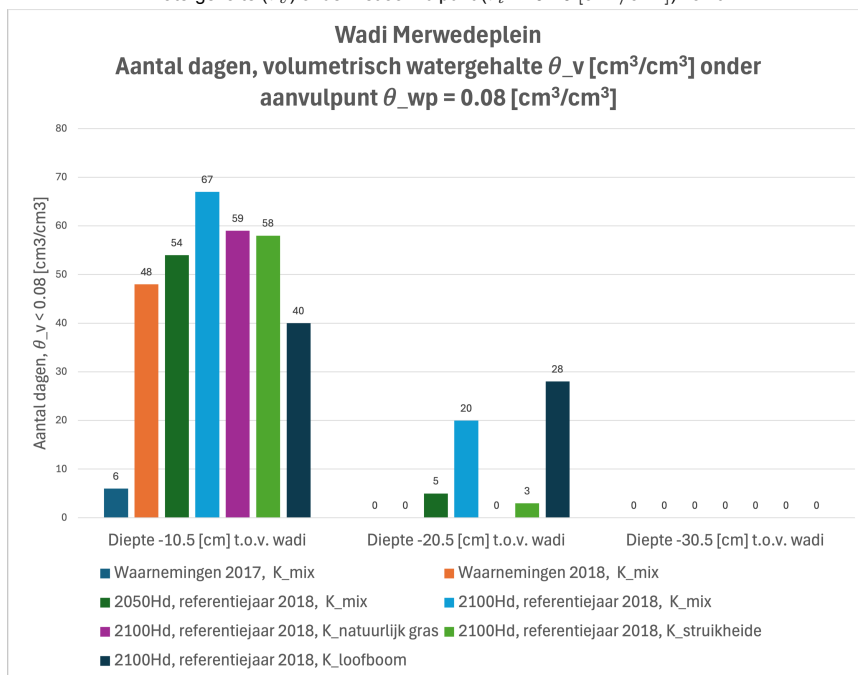
Figuur B.17: Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi op het Merwedeplein voor het de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2100Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot, struikheide}$ toegepast.



Figuur B.18: Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi op het Merwedeplein voor het de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2100Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot, loofboom}$ toegepast.



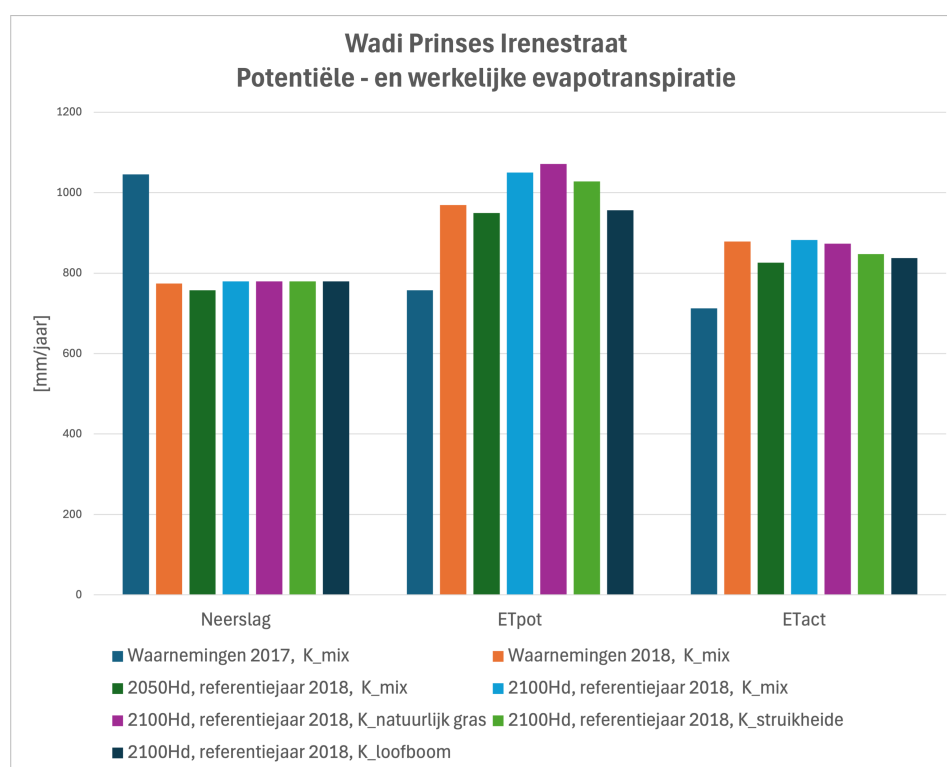
(a) Voor de wadi op de Merwedeplein, het aantal dagen per diepte t.o.v. de wadi dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het aanvulpunt ($\theta_t = 0.20$ [cm³/cm³]) komt.



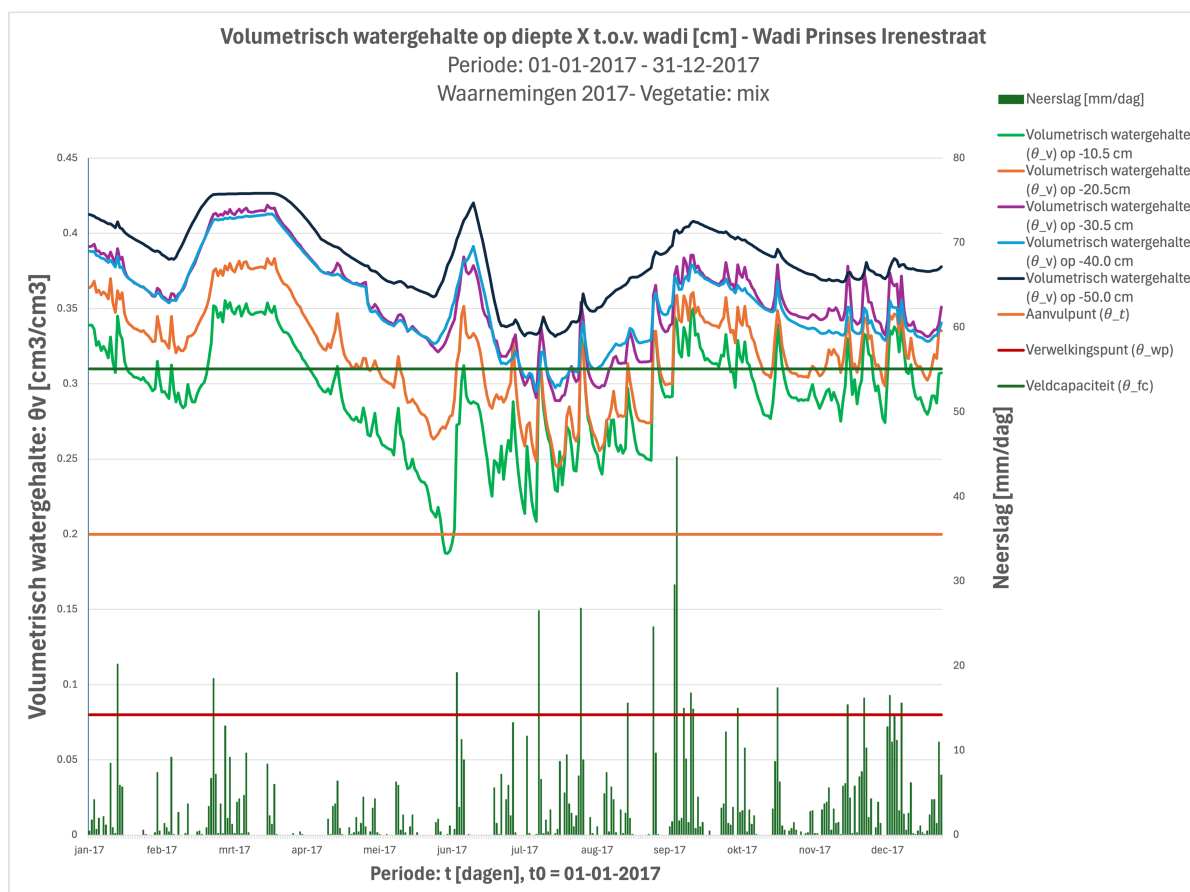
(b) Voor de wadi op de Merwedeplein, het aantal dagen per diepte t.o.v. de wadi dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt ($\theta_{wp} = 0.08$ [cm³/cm³]) komt.

Figuur B.19: In figuur B.19a, zijn het aantal dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte(θ_v) van de wadi op het Merwedeplein onder het aanvulpunt (θ_t) komt. In figuur B.19b, zijn het aantal dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt (θ_{wp}) komt.

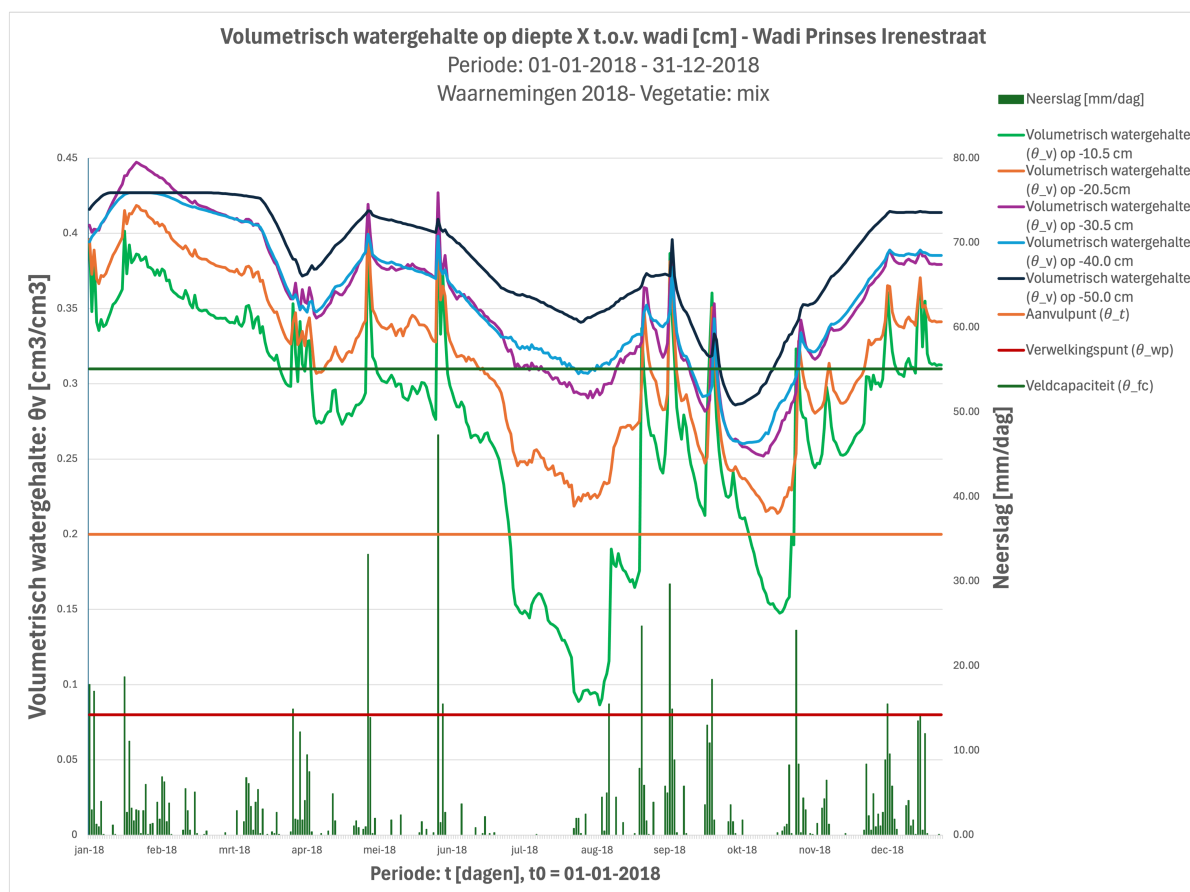
B.4. Model resultaten wadi Prinses Irenestraat



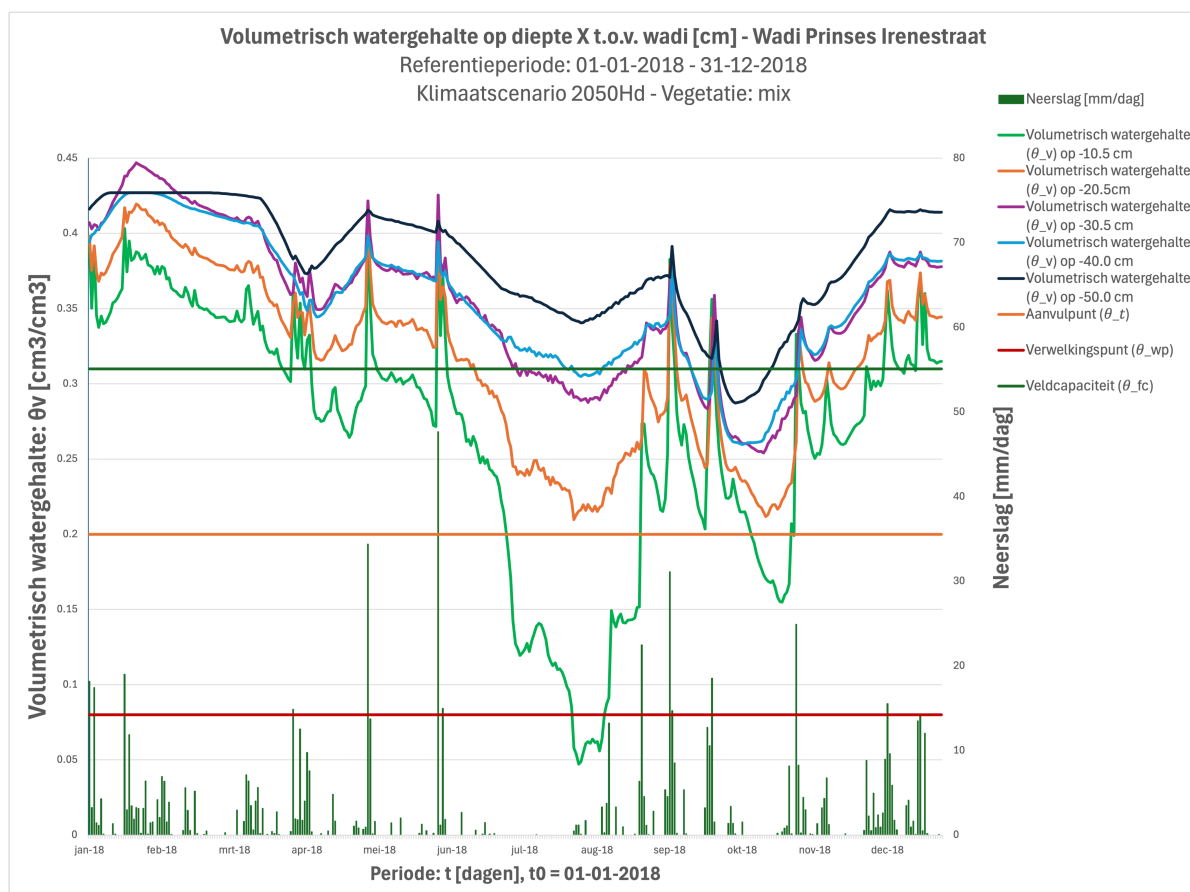
Figuur B.20: Neerslag, potentiële - en werkelijke evapotranspiratie in [mm/jaar] voor de wadi in de Prinses Irenestraat. Evapotranspiratie (ET) bestaat uit verdamping van de bodem (E_s), interceptie van vegetatie (E_i) en transpiratie van vegetatie door wortels (E_t).



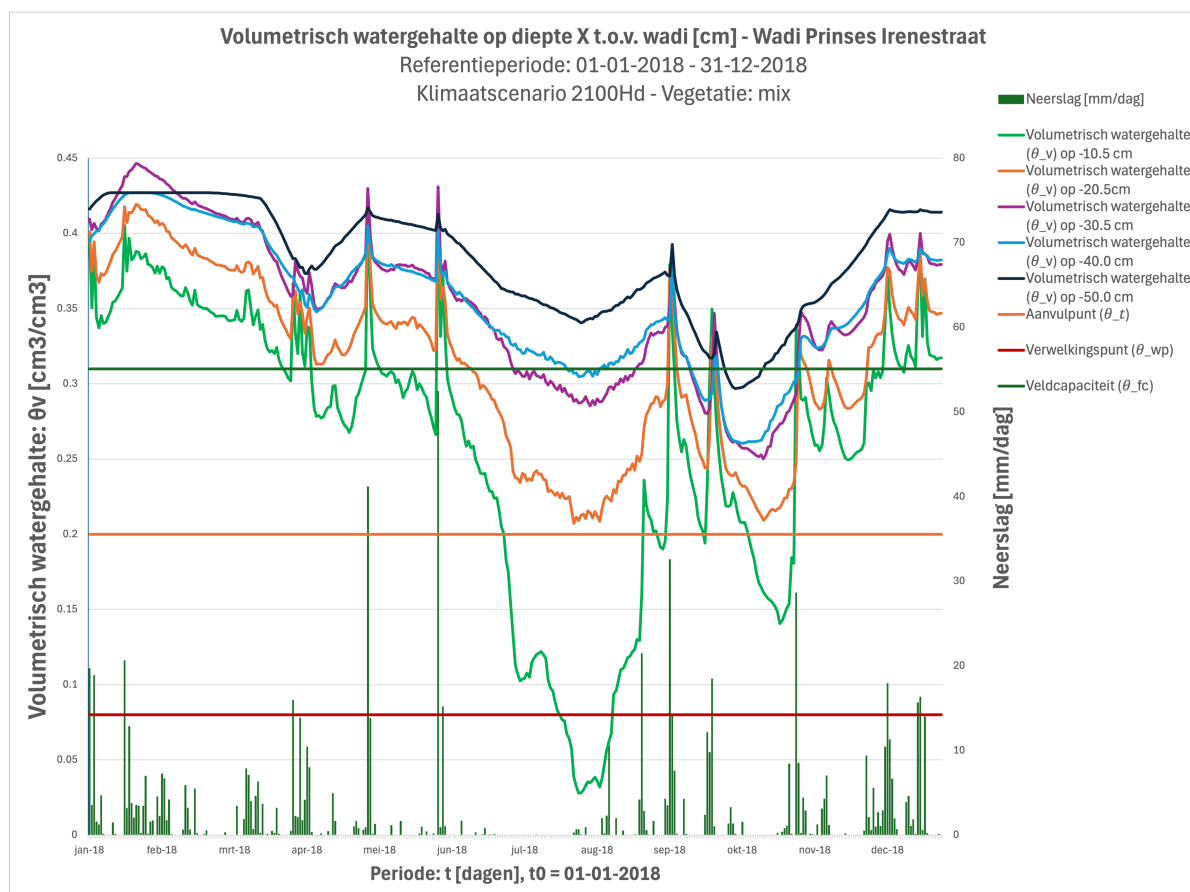
Figuur B.21: Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi in de Prinses Irenestraat voor het jaar 2017. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2017. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,mix}$ gebruikt.



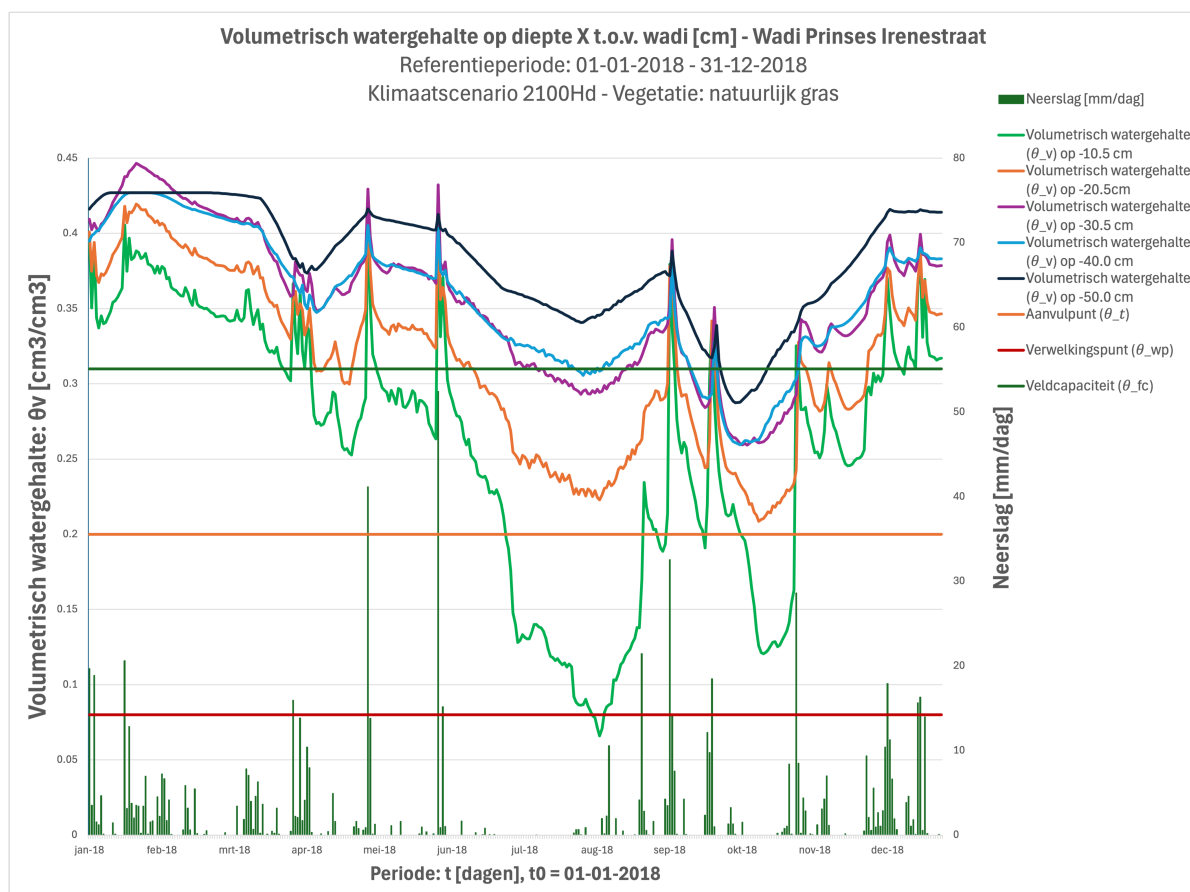
Figuur B.22: Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi in de Prinses Irenestraat voor het jaar 2018. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,mix}$ toegepast.



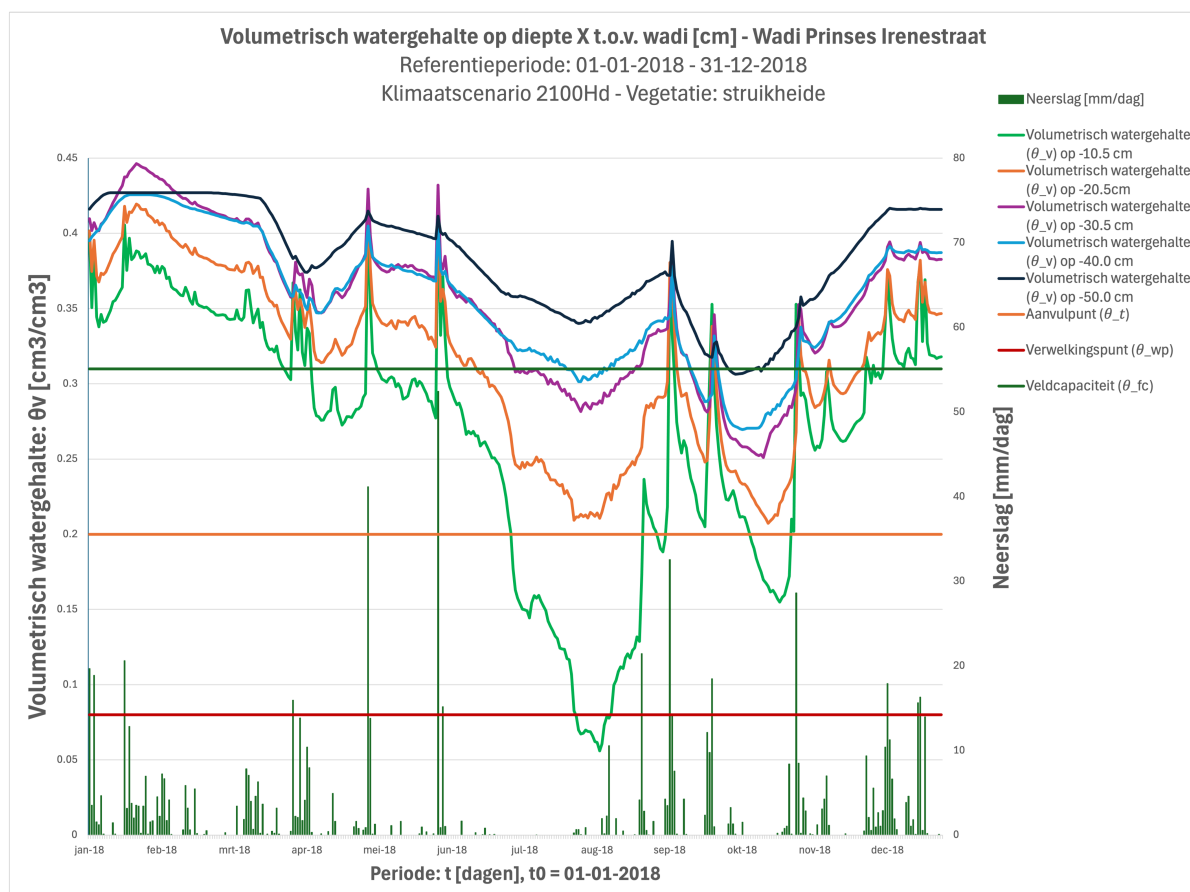
Figuur B.23: Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi in de Prinses Irenestraat voor het de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2050Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,mix}$ toegepast.



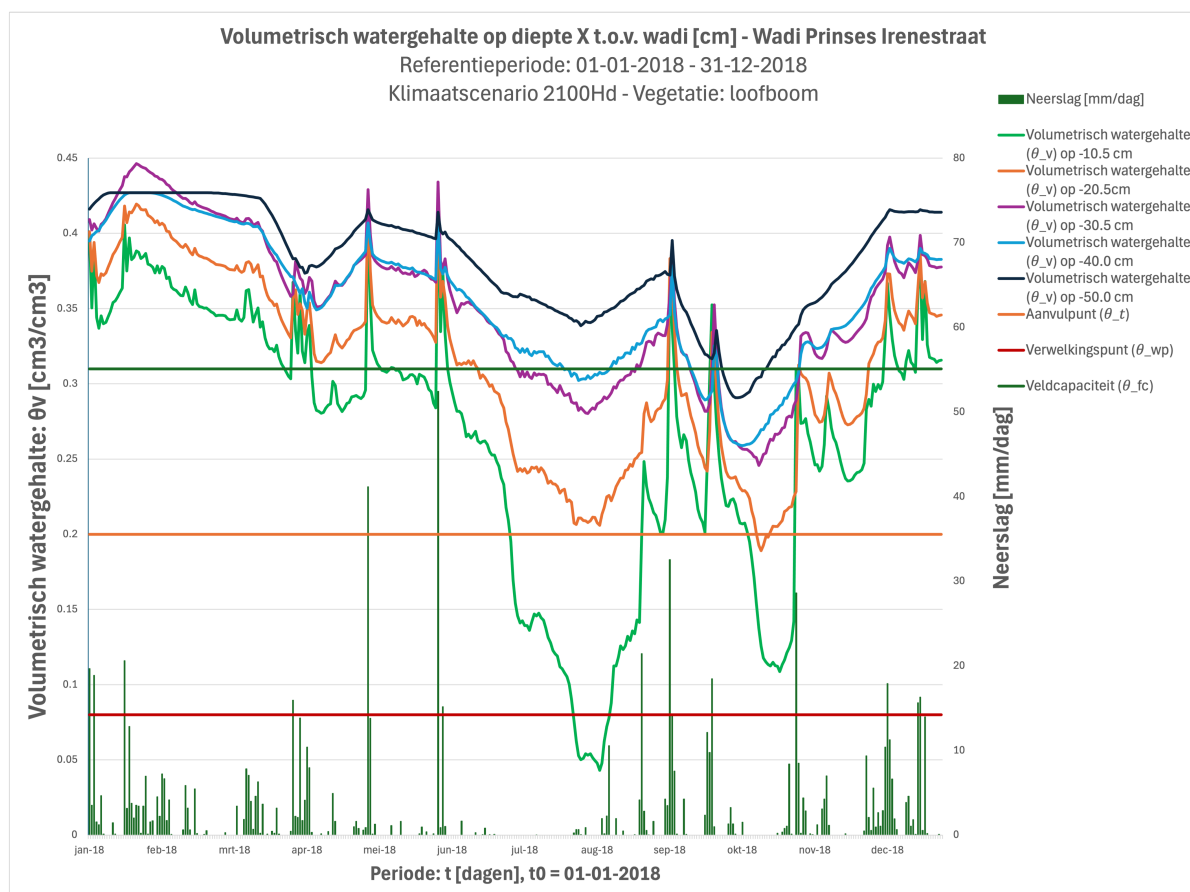
Figuur B.24: Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi in de Prinses Irenestraat voor het de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2100Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,mix}$ toegepast.



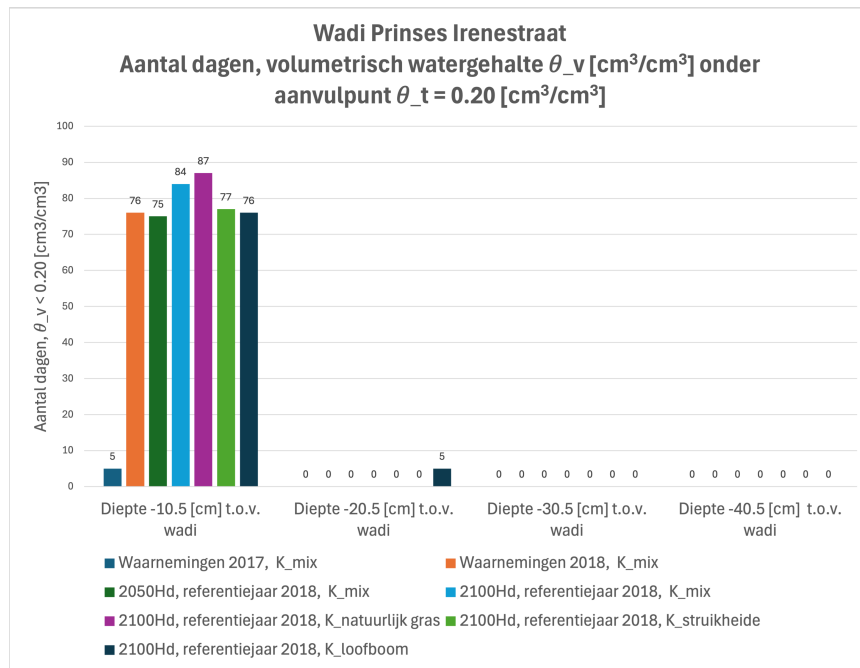
Figuur B.25: Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi in de Prinses Irenestraat voor het de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatsscenario '2100Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,gras}$ toegepast.



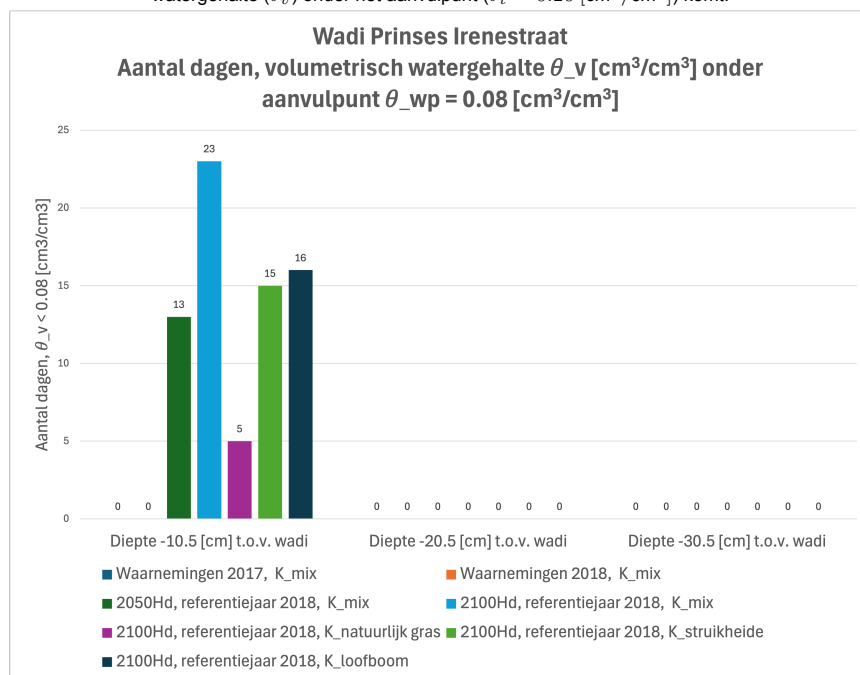
Figuur B.26: Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi in de Prinses Irenestraat voor het de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatsscenario '2100Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot, struikheide}$ toegepast.



Figuur B.27: Volumetrisch watergehalte op verschillende dieptes van de wadi in de Prinses Irenestraat voor het de referentieperiode 2018, met het KNMI'23 klimaatscenario '2100Hd'. De meteorologische waarden zijn de waarnemingen voor het jaar 2018. Voor de vegetatie is de factor $K_{tot,loofboom}$ toegepast.

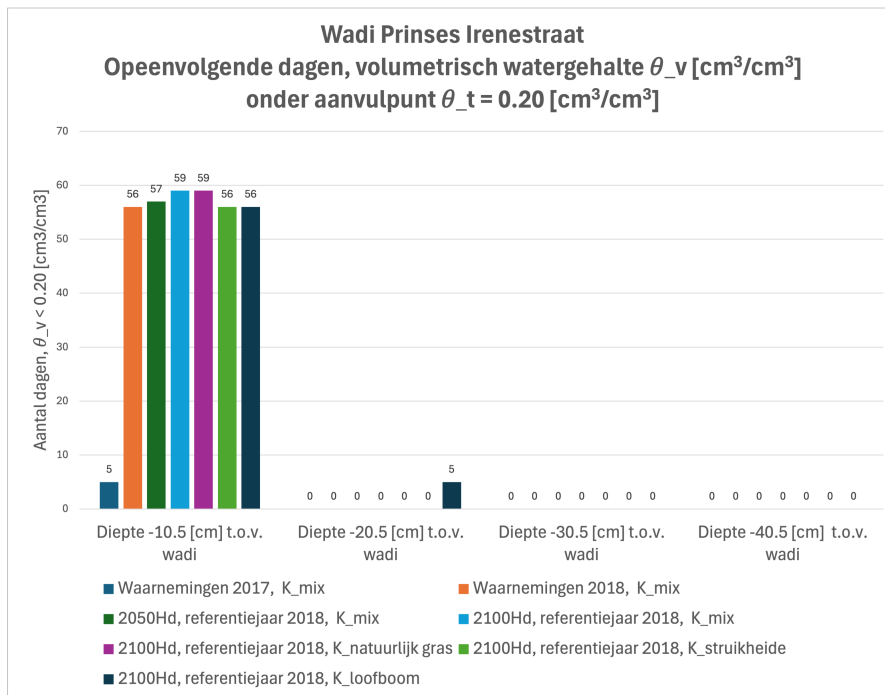


(a) Voor de wadi in de Prinses Irenestraat, het aantal dagen per diepte t.o.v. de wadi dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het aanvulpunt ($\theta_t = 0.20$ [cm³/cm³]) komt.

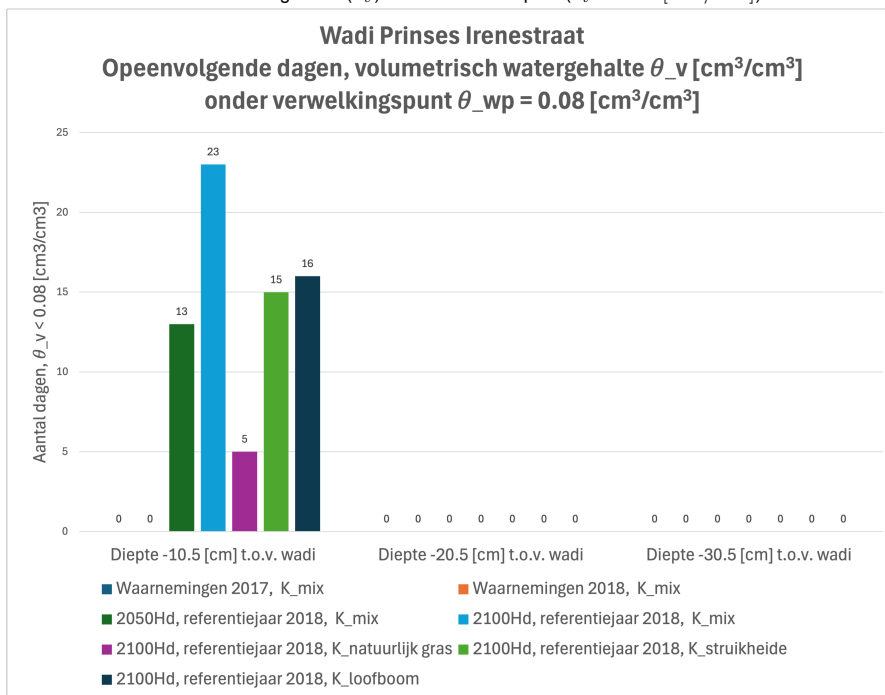


(b) Voor de wadi in de Prinses Irenestraat, het aantal dagen per diepte t.o.v. de wadi dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt ($\theta_{wp} = 0.08$ [cm³/cm³]) komt.

Figuur B.28: In figuur B.28a, zijn het aantal dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) van de wadi in de Prinses Irenestraat onder het aanvulpunt (θ_t) komt. In figuur B.28b, zijn het aantal dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt (θ_{wp}) komt.



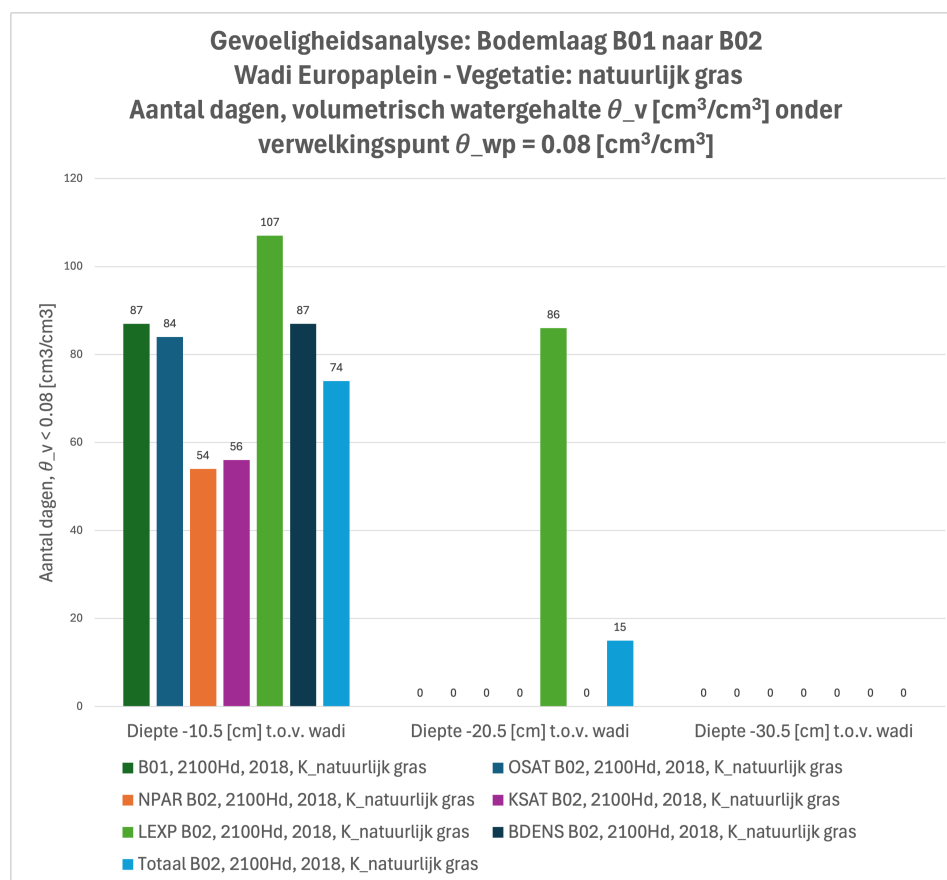
(a) Voor de wadi in de Prinses Irenestraat, het maximaal opeenvolgende dagen per diepte t.o.v. de wadi dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het aanvulpunt ($\theta_t = 0.20$ [cm³/cm³]) komt.



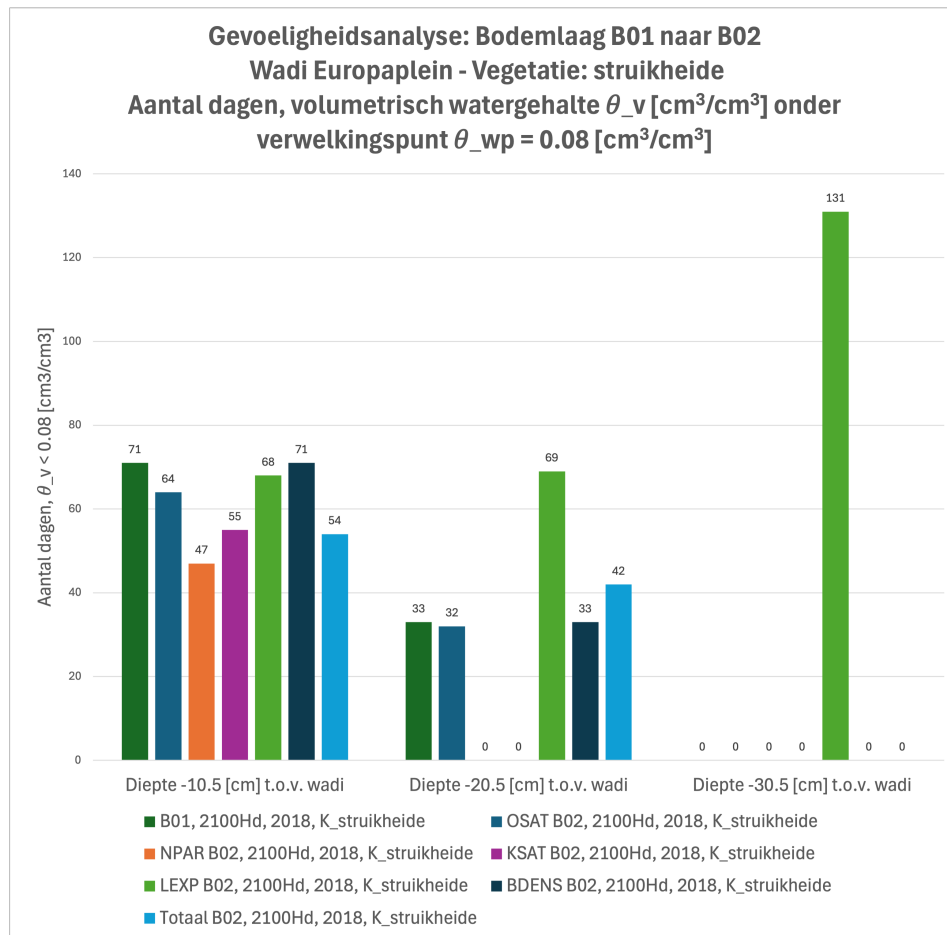
(b) Voor de wadi in de Prinses Irenestraat, het maximaal opeenvolgende dagen per diepte t.o.v. de wadi dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt ($\theta_{wp} = 0.08$ [cm³/cm³]) komt.

Figuur B.29: In figuur B.29a, zijn het aantal opeenvolgende dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) van de wadi in de Prinses Irenestraat onder het aanvulpunt (θ_t) komt. In figuur B.29b, zijn het aantal opeenvolgende dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt (θ_{wp}) komt.

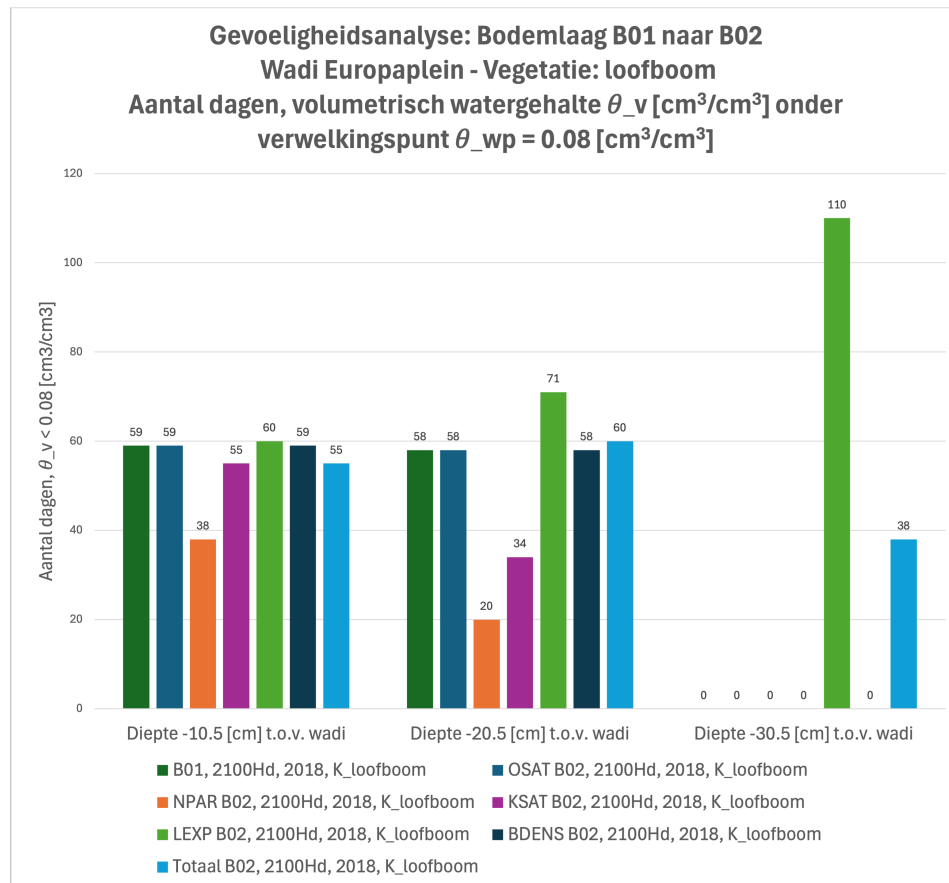
Resultaten gevoeligheidsanalyse



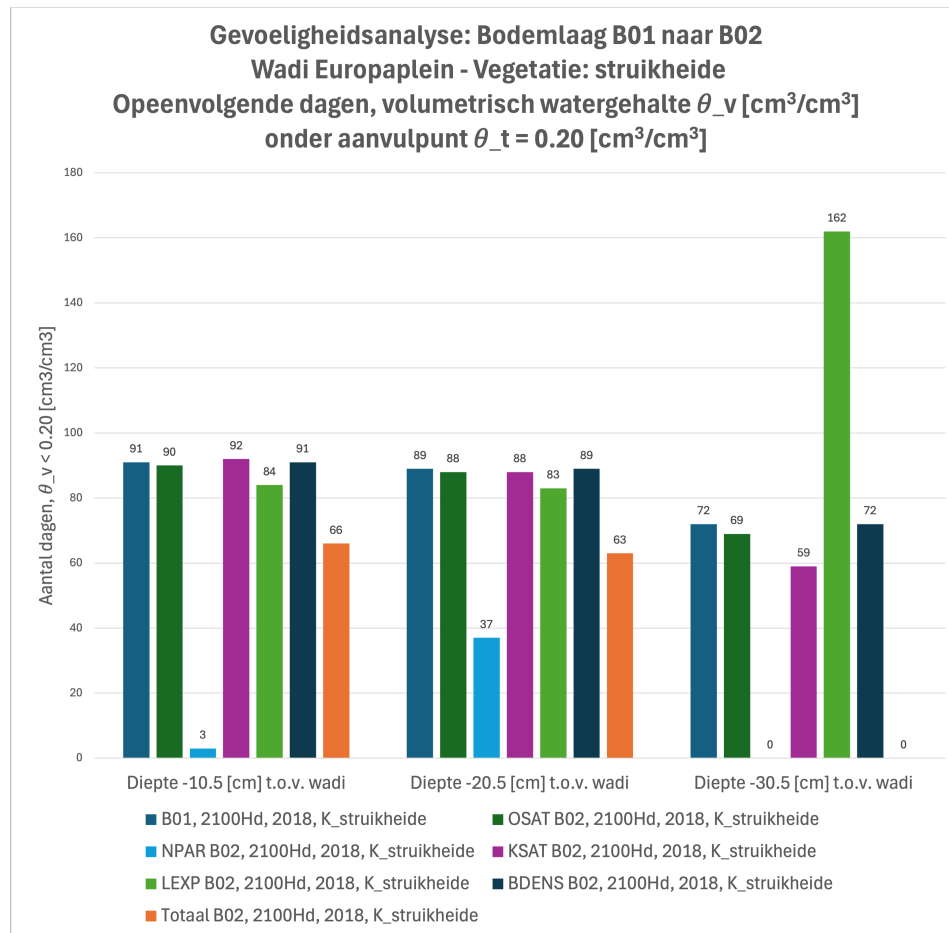
Figuur C.1: Voor de gevoeligheidsanalyse, zijn de bodemfysische parameters van de bodemlaag Staringreeks B01 aangepast naar de bodemfysische parameters van de bodemlaag Staringreeks B02. Dit is per bodemfysische parameter gedaan, zodat de invloed van de bodemfysische parameter duidelijk te zien is in het aantal dagen dat het volumetrisch watergehalte onder een drempelwaarde valt. In dit geval is het verwelkingspunt ($\theta_v < 0.08$) gebruikt als drempelwaarde en daarnaast is de vegetatie: natuurlijk gras gebruikt voor de wadi op het Europaplein.



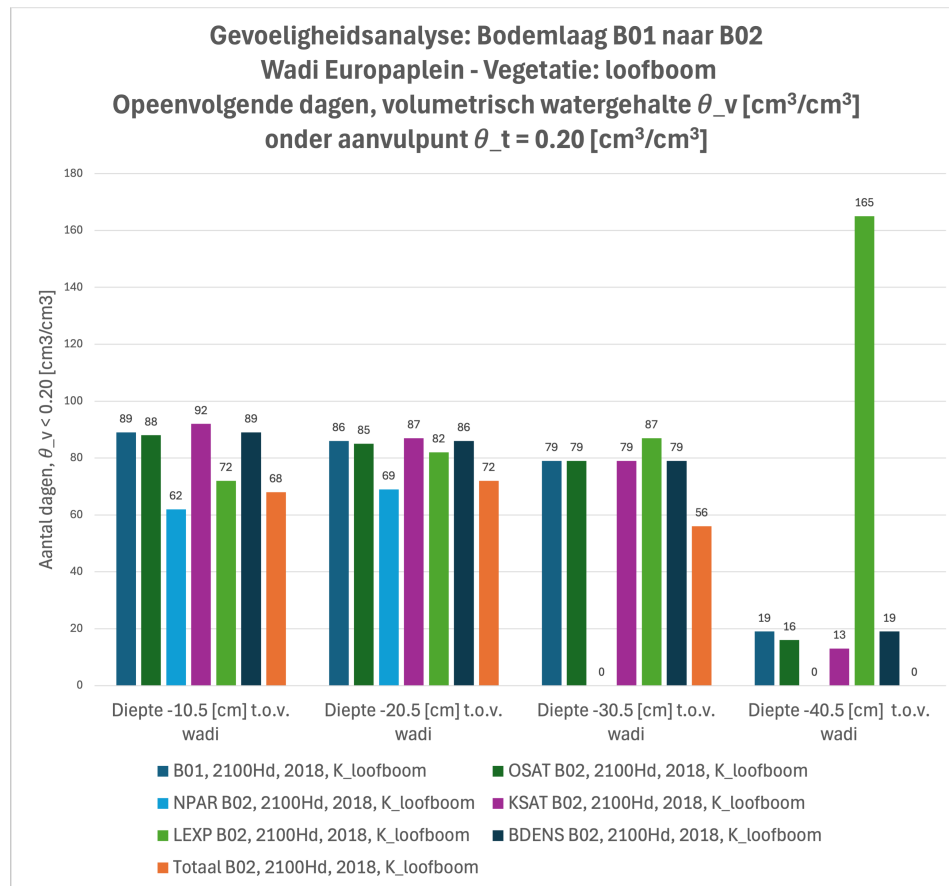
Figuur C.2: Voor de gevoeligheidsanalyse, zijn de bodemfysische parameters van de bodemlaag Staringreeks B01 aangepast naar de bodemfysische parameters van de bodemlaag Staringreeks B02. Dit is per bodemfysische parameter gedaan, zodat de invloed van de bodemfysische parameter duidelijk te zien is in het aantal dagen dat het volumetrisch watergehalte onder een drempelwaarde valt. In dit geval is het verwelkingspunt ($\theta_v < 0.08$) gebruikt als drempelwaarde en daarnaast is de vegetatie: natuurlijk gras gebruikt voor de wadi op het Europaplein.



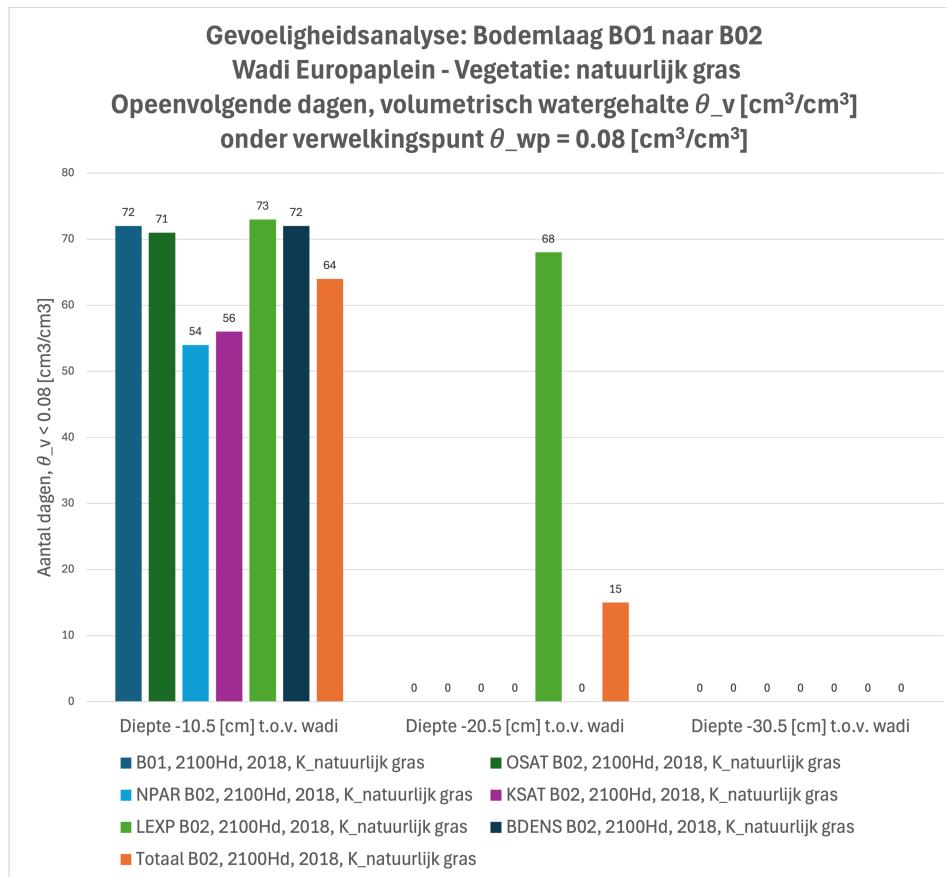
Figuur C.3: Voor de gevoeligheidsanalyse, zijn de bodemfysische parameters van de bodemlaag Staringreeks B01 aangepast naar de bodemfysische parameters van de bodemlaag Staringreeks B02. Dit is per bodemfysische parameter gedaan, zodat de invloed van de bodemfysische parameter duidelijk te zien is in het aantal dagen dat het volumetrisch watergehalte onder een drempelwaarde valt. In dit geval is het verwelkingspunt ($\theta_v < 0.08$) gebruikt als drempelwaarde en daarnaast is de vegetatie: natuurlijk gras gebruikt voor de wadi op het Europaplein.



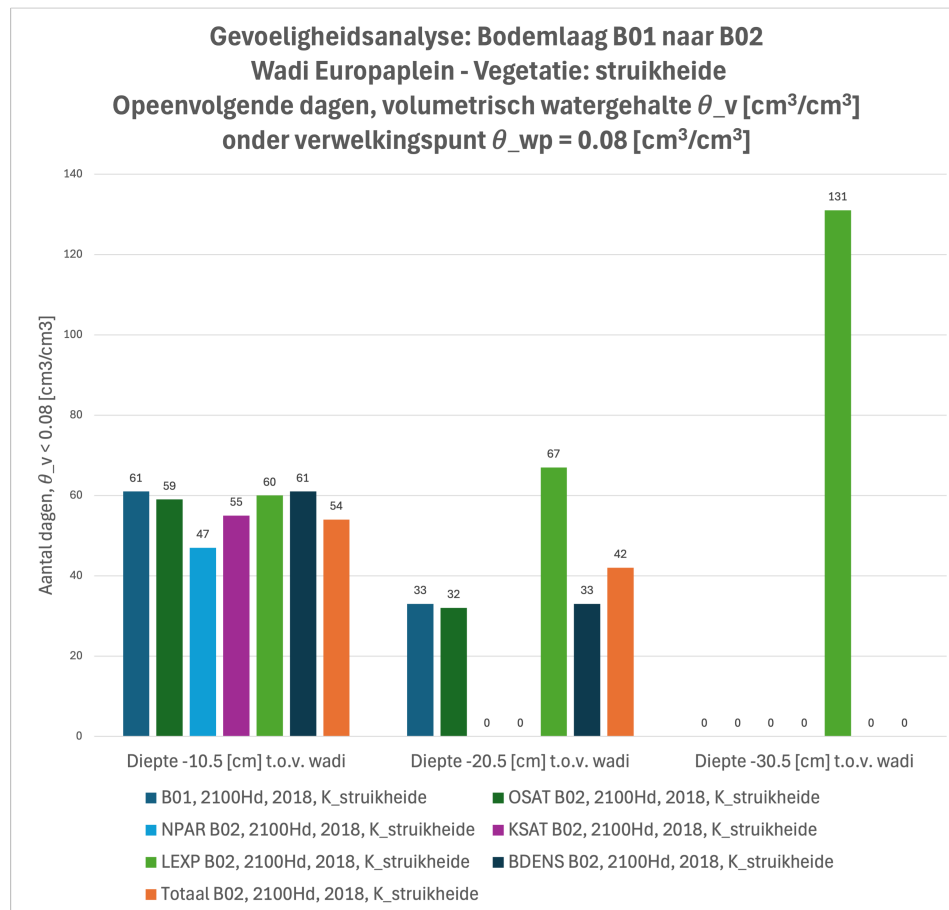
Figuur C.4: Voor de gevoeligheidsanalyse, zijn de bodemfysische parameters van de bodemlaag Staringreeks B01 aangepast naar de bodemfysische parameters van de bodemlaag Staringreeks B02. Dit is per bodemfysische parameter gedaan, zodat de invloed van de bodemfysische parameter duidelijk te zien is in het aantal maximaal opeenvolgende dagen dat het volumetrisch watergehalte onder een drempelwaarde valt. In dit geval is het irrigatiepunt ($\theta_v < 0.20$) gebruikt als drempelwaarde en daarnaast is de vegetatie: struikheide gebruikt voor de wadi op het Europaplein.



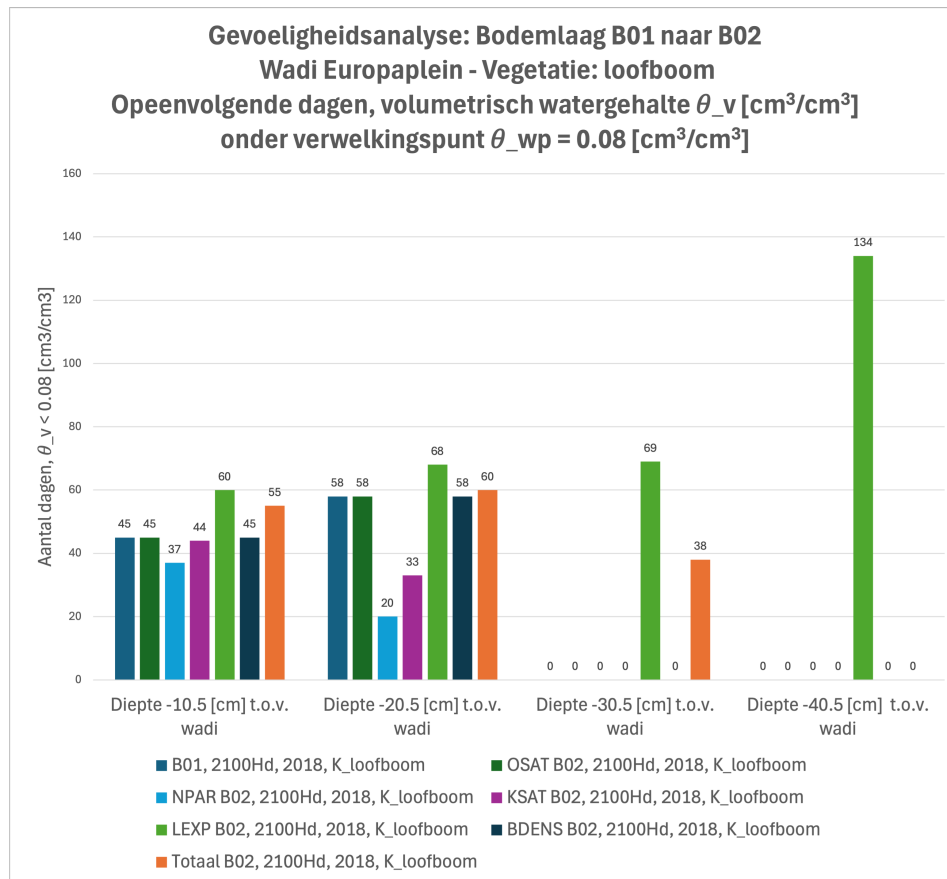
Figuur C.5: Voor de gevoeligheidsanalyse, zijn de bodemfysische parameters van de bodemlaag Staringreeks B01 aangepast naar de bodemfysische parameters van de bodemlaag Staringreeks B02. Dit is per bodemfysische parameter gedaan, zodat de invloed van de bodemfysische parameter duidelijk te zien is in het aantal maximaal opeenvolgende dagen dat het volumetrisch watergehalte onder een drempelwaarde valt. In dit geval is het irrigatiepunt ($\theta_v < 0.20$) gebruikt als drempelwaarde en daarnaast is de vegetatie: loofboom gebruikt voor de wadi op het Europaplein.



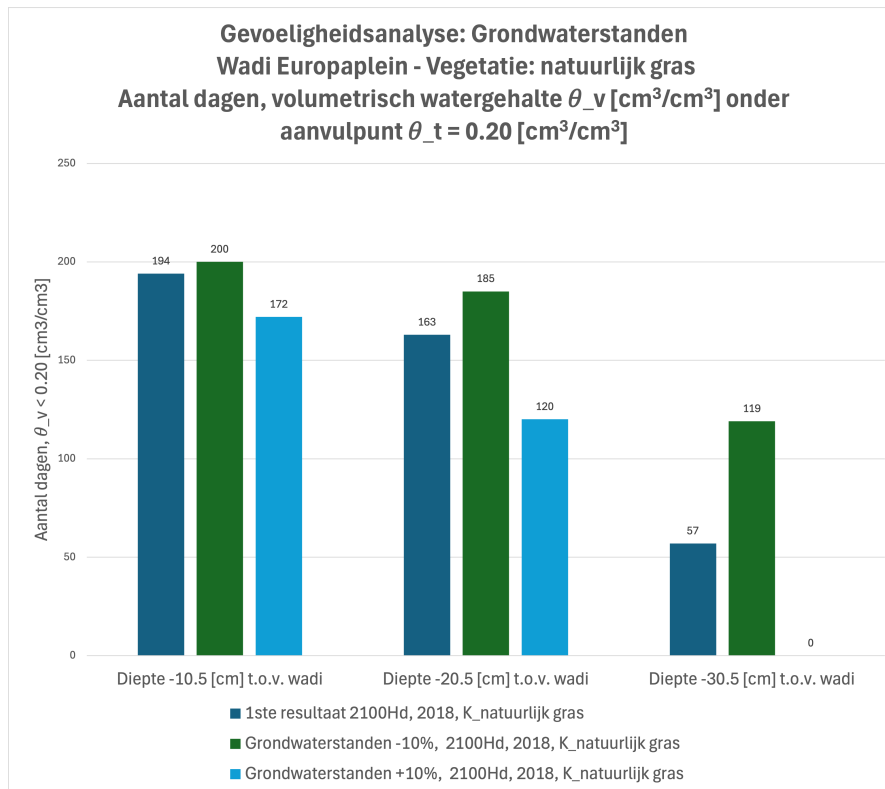
Figuur C.6: Voor de gevoeligheidsanalyse, zijn de bodemfysische parameters van de bodemlaag Staringreeks B01 aangepast naar de bodemfysische parameters van de bodemlaag Staringreeks B02. Dit is per bodemfysische parameter gedaan, zodat de invloed van de bodemfysische parameter duidelijk te zien is in het aantal maximaal opeenvolgende dagen dat het volumetrisch watergehalte onder een drempelwaarde valt. In dit geval is het verwelkingspunt ($\theta_v < 0.08$) gebruikt als drempelwaarde en daarnaast is de vegetatie: gras gebruikt voor de wadi op het Europaplein.



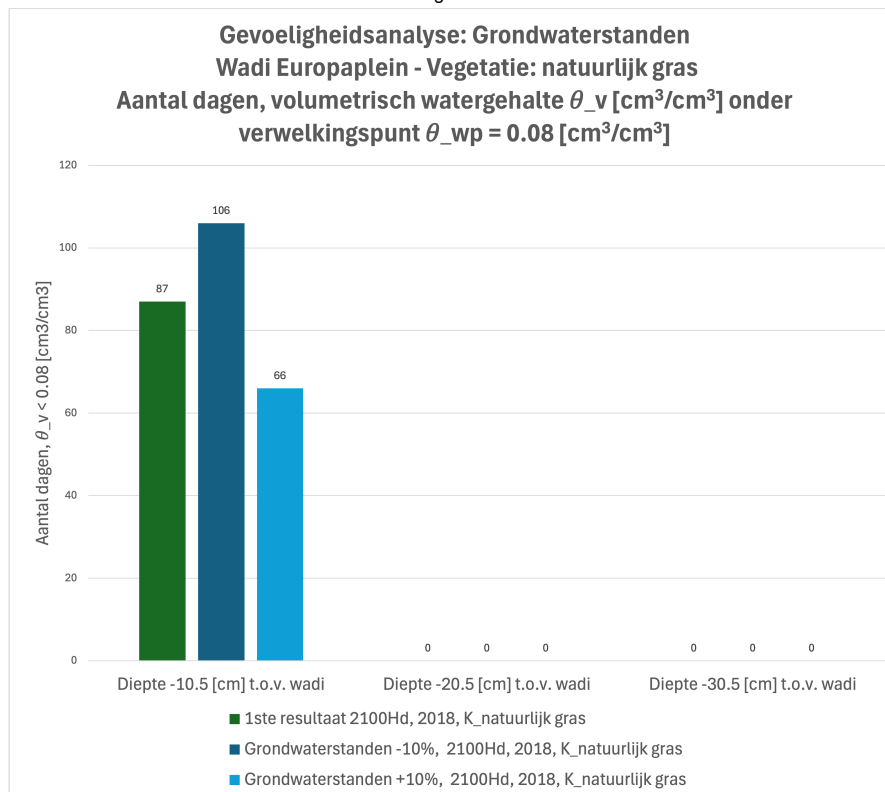
Figuur C.7: Voor de gevoeligheidsanalyse, zijn de bodemfysische parameters van de bodemlaag Staringreeks B01 aangepast naar de bodemfysische parameters van de bodemlaag Staringreeks B02. Dit is per bodemfysische parameter gedaan, zodat de invloed van de bodemfysische parameter duidelijk te zien is in het aantal maximaal opeenvolgende dagen dat het volumetrisch watergehalte onder een drempelwaarde valt. In dit geval is het verwelkingspunt ($\theta_v < 0.08$) gebruikt als drempelwaarde en daarnaast is de vegetatie: struikheide gebruikt voor de wadi op het Europaplein.



Figuur C.8: Voor de gevoeligheidsanalyse, zijn de bodemfysische parameters van de bodemlaag Staringreeks B01 aangepast naar de bodemfysische parameters van de bodemlaag Staringreeks B02. Dit is per bodemfysische parameter gedaan, zodat de invloed van de bodemfysische parameter duidelijk te zien is in het aantal maximaal opeenvolgende dagen dat het volumetrisch watergehalte onder een drempelwaarde valt. In dit geval is het verwelkingspunt ($\theta_v < 0.08$) gebruikt als drempelwaarde en daarnaast is de vegetatie: loofboom gebruikt voor de wadi op het Europaplein.

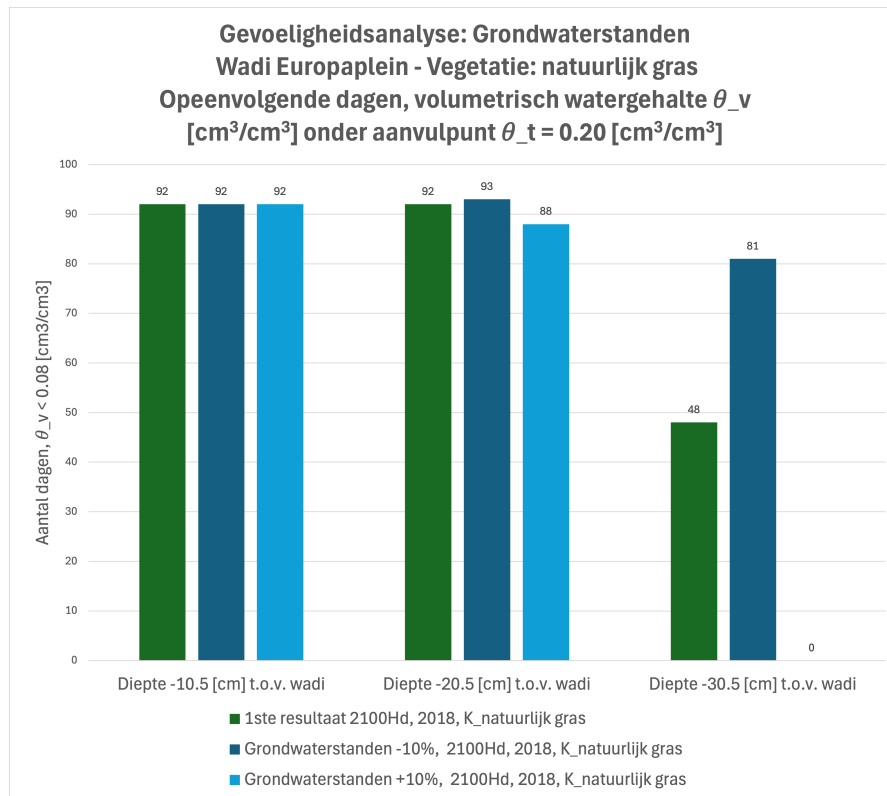


(a) De waarden boven de staven, geven het aantal dagen weer waar het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het aanvulpunt ($\theta_t = 0.20$ [cm³/cm³]) komt. Dit is voor de wadi op het Europaplein met vegetatie: gras.

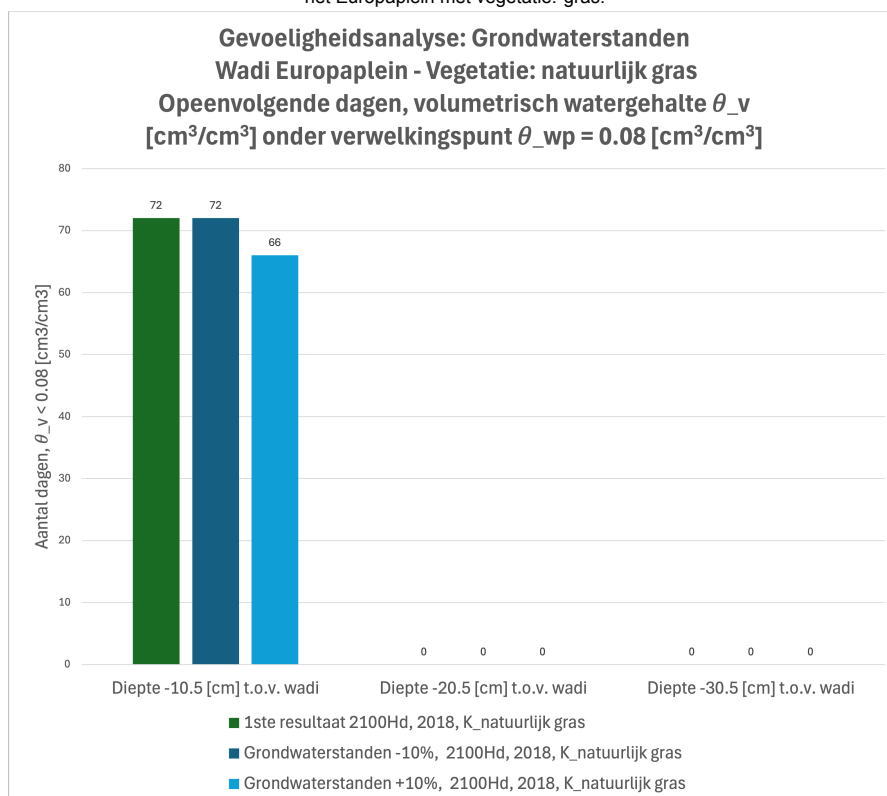


(b) De waarden boven de staven, geven het aantal dagen weer waar het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt ($\theta_{wp} = 0.08$ [cm³/cm³]) komt. Dit is voor de wadi op het Europaplein met vegetatie: gras.

Figuur C.9: Gevoeligheidsanalyse waar de grondwaterstanden met +10 [cm] en -10 [cm] zijn aangepast ten opzichte van de eerste resultaten. In figuur C.9a, zijn het aantal dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) van de wadi op het Europaplein, onder het aanvulpunt (θ_t) komt. In figuur C.9b, zijn het aantal dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt ($\theta_{wp} = 0.08$ [cm³/cm³]) komt.

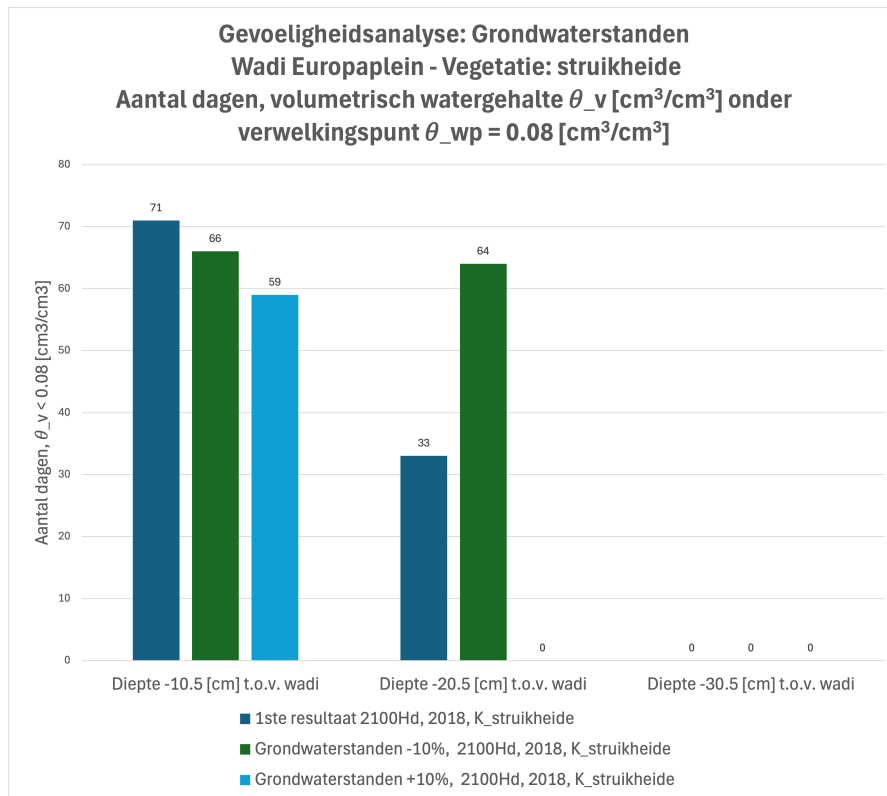


(a) De waarden boven de staven, geven het aantal maximaal opeenvolgende dagen weer waar het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het aanvulpunt ($\theta_t = 0.20$ [cm³/cm³]) komt. Dit is voor de wadi op het Europaplein met vegetatie: gras.

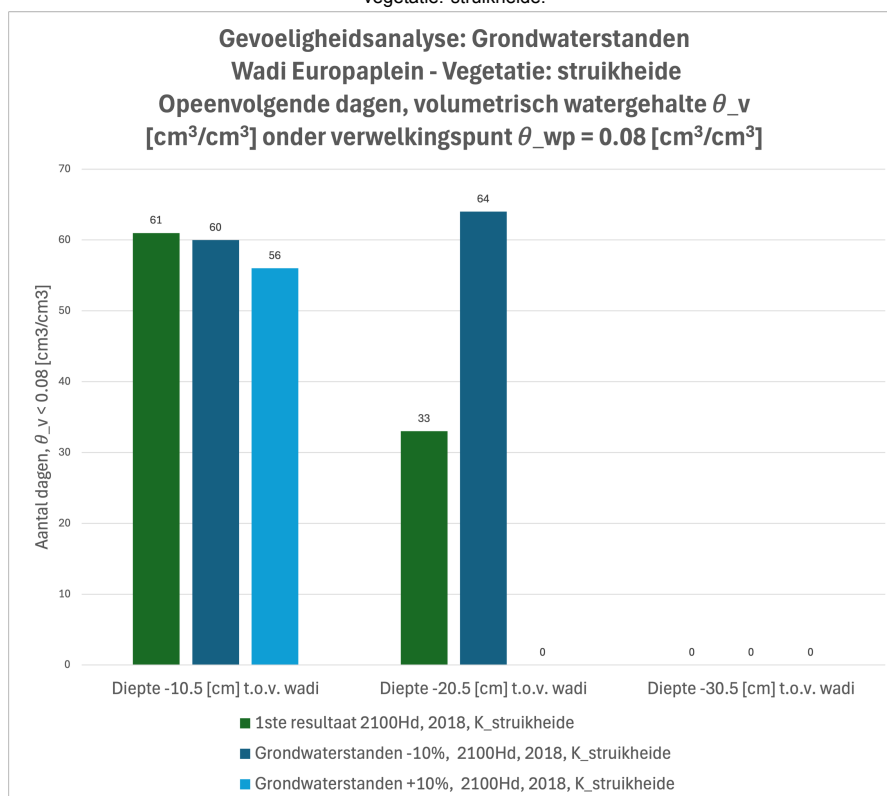


(b) De waarden boven de staven, geven het aantal maximaal opeenvolgende dagen weer waar het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt ($\theta_{wp} = 0.08$ [cm³/cm³]) komt. Dit is voor de wadi op het Europaplein met vegetatie: gras.

Figuur C.10: Gevoeligheidsanalyse waar de grondwaterstanden met +10 [cm] en -10 [cm] zijn aangepast ten opzichte van de eerste resultaten. In figuur C.10a, zijn het aantal maximaal opeenvolgende dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) van de wadi op het Europaplein, onder het aanvulpunt (θ_t) komt. In figuur C.10b, zijn het aantal maximaal opeenvolgende dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt ($\theta_{wp} = 0.08$ [cm³/cm³]) komt.

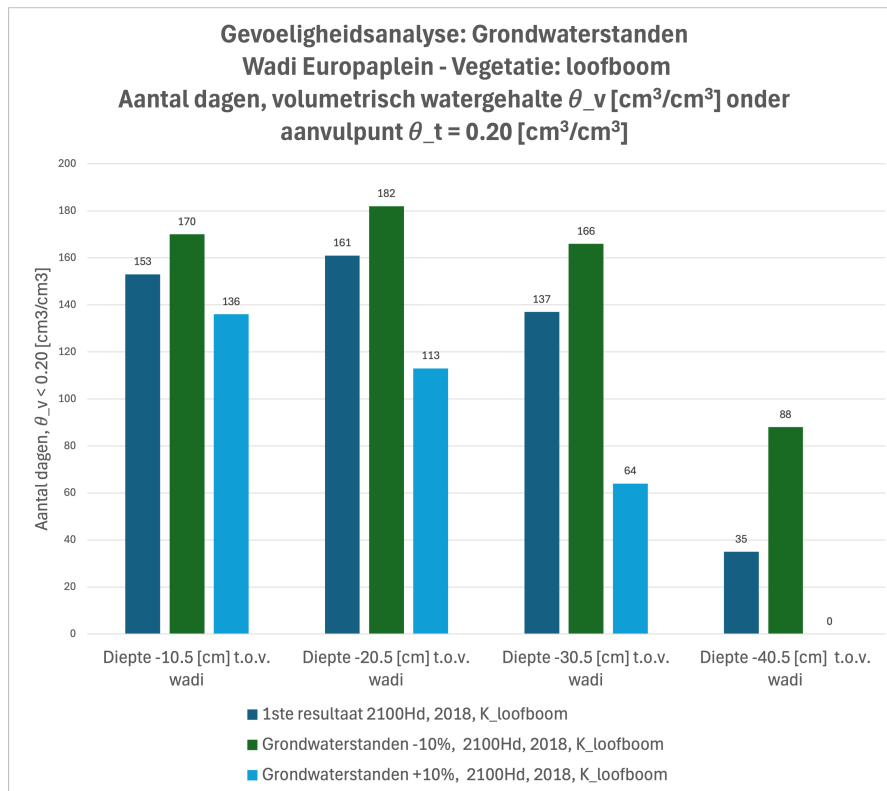


(a) De waarden boven de staven, geven het aantal dagen weer waar het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt ($\theta_{wp} = 0.08$ [cm³/cm³]) komt. Dit is voor de wadi op het Europaplein met vegetatie: struikheide.

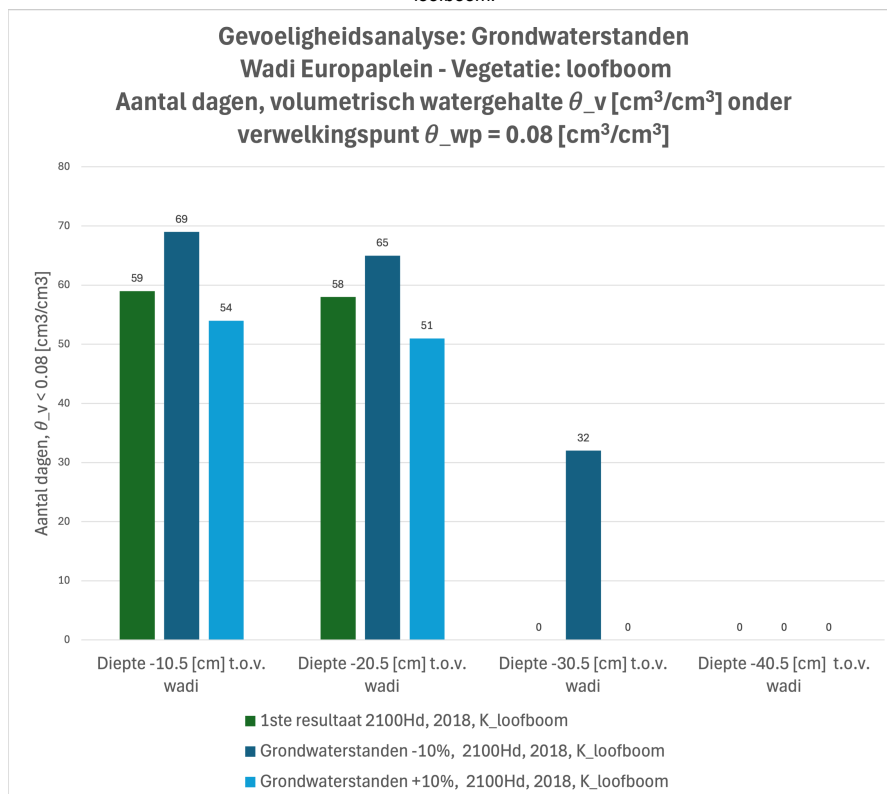


(b) De waarden boven de staven, geven het aantal maximaal opeenvolgende dagen weer waar het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt ($\theta_{wp} = 0.08$ [cm³/cm³]) komt. Dit is voor de wadi op het Europaplein met vegetatie: struikheide.

Figuur C.11: Gevoeligheidsanalyse waar de grondwaterstanden met +10 [cm] en -10 [cm] zijn aangepast ten opzichte van de eerste resultaten. In figuur C.11a, zijn het aantal dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) van de wadi op het Europaplein, onder het verwelkingspunt ($\theta_{wp} = 0.08$ [cm³/cm³]) komt. In figuur C.11b, zijn het aantal maximaal opeenvolgende dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt ($\theta_{wp} = 0.08$ [cm³/cm³]) komt.

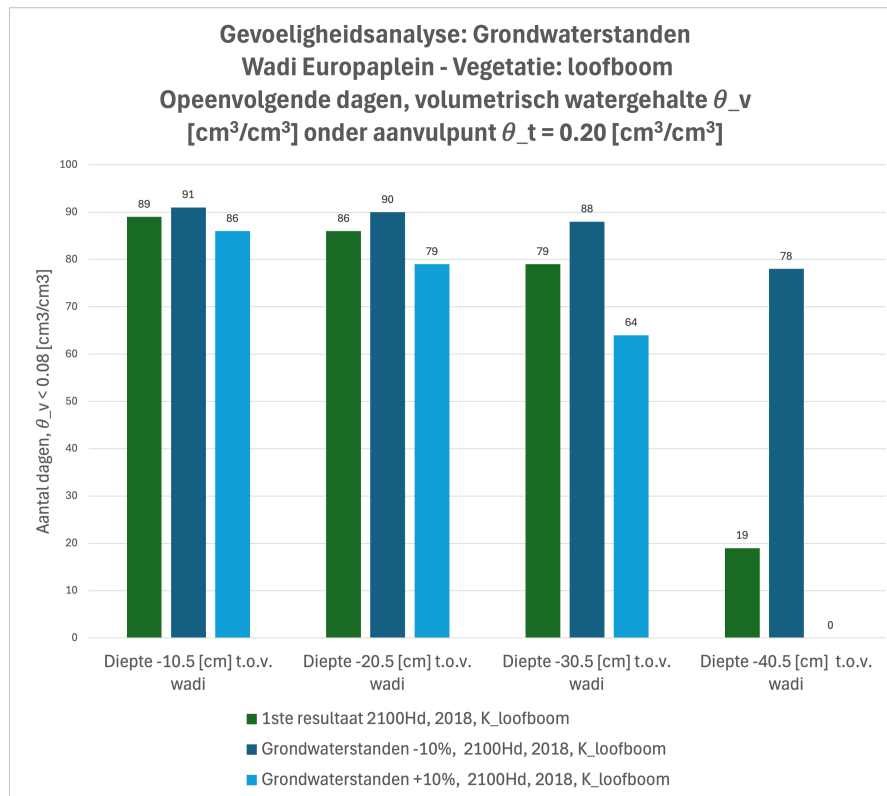


(a) De waarden boven de staven, geven het aantal dagen weer waar het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het aanvulpunt ($\theta_t = 0.20$ [cm³/cm³]) komt. Dit is voor de wadi op het Europaplein met vegetatie: loofboom.

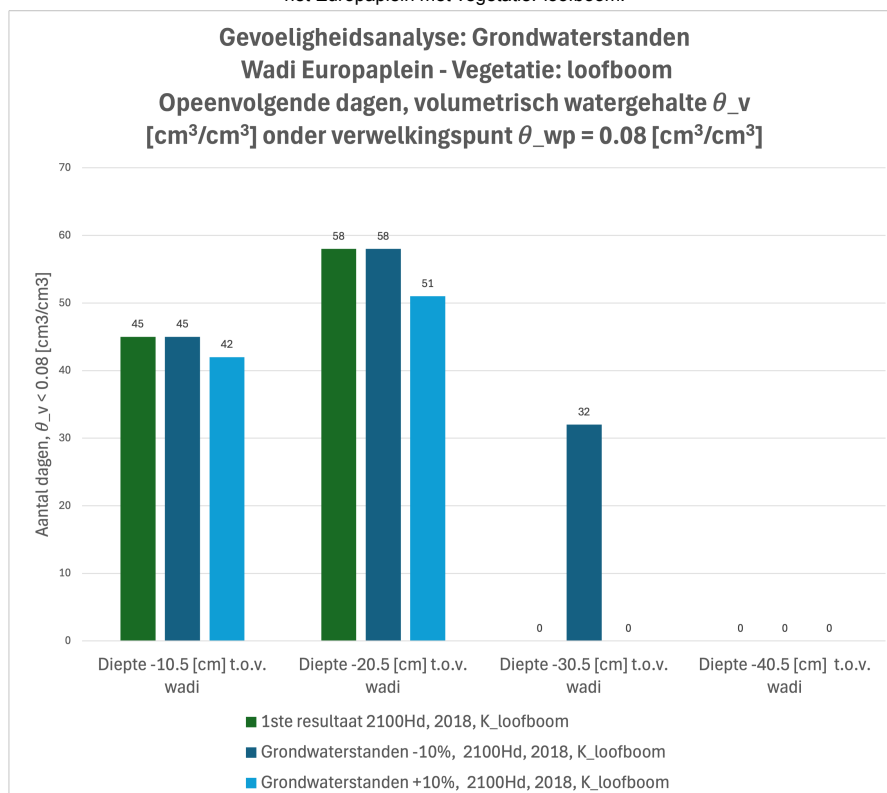


(b) De waarden boven de staven, geven het aantal dagen weer waar het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt ($\theta_{wp} = 0.08$ [cm³/cm³]) komt. Dit is voor de wadi op het Europaplein met vegetatie: loofboom.

Figuur C.12: Gevoeligheidsanalyse waar de grondwaterstanden met +10 [cm] en -10 [cm] zijn aangepast ten opzichte van de eerste resultaten. In figuur C. 12a, zijn het aantal dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) van de wadi op het Europaplein, onder het aanvulpunt (θ_t) komt. In figuur C. 12b, zijn het aantal dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt ($\theta_{wp} = 0.08$ [cm³/cm³]) komt.



(a) De waarden boven de staven, geven het aantal maximaal opeenvolgende dagen weer waar het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het aanvulpunt ($\theta_t = 0.20 [\text{cm}^3/\text{cm}^3]$) komt. Dit is voor de wadi op het Europaplein met vegetatie: loofboom.



(b) De waarden boven de staven, geven het aantal maximaal opeenvolgende dagen weer waar het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt ($\theta_{wp} = 0.08 [\text{cm}^3/\text{cm}^3]$) komt. Dit is voor de wadi op het Europaplein met vegetatie: loofboom.

Figuur C.13: Gevoeligheidsanalyse waar de grondwaterstanden met +10 [cm] en -10 [cm] zijn aangepast ten opzichte van de eerste resultaten. In figuur C.13a, zijn het aantal maximaal opeenvolgende dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) van de wadi op het Europaplein, onder het aanvulpunt (θ_t) komt. In figuur C.13b, zijn het aantal maximaal opeenvolgende dagen gegeven dat het volumetrisch watergehalte (θ_v) onder het verwelkingspunt ($\theta_{wp} = 0.08 [\text{cm}^3/\text{cm}^3]$) komt.