

De Waterbergende Weg: Lokale effecten hydrologie (WP2)

Het functioneren van waterbergende wegen in relatie tot (grond)water

Faculteit Techniek
2021 – 2024



De Waterbergende Weg: Lokale effecten hydrologie (WP2)

Het functioneren van waterbergende wegen in relatie tot (grond)water

Author

Jeroen Schoonderbeek
Ted Veldkamp
Jeroen Kluck
Nick van der Lee
Dante Föllmi
Ronald Loeve

department

Faculteit Techniek

Date

18-Nov-24

Project type

RAAK Subsidie

Version

1.0

© 2020 Copyright Hogeschool Amsterdam

© 2020 Copyright Hogeschool Amsterdam

Inhoudsopgave

1.	Inleiding.....	4
1.1	Introductie.....	4
1.2	Hydrologische effecten WBW	4
2.	Data en methode	5
2.1	Dataverzameling	5
2.2	Analyse van de resultaten	7
3.	Resultaten	9
3.1	Julianapark	9
3.2	Margrietstraat (Zoeterwoude).....	13
3.3	Frans Halslaan (Amstelveen)	17
3.4	Solferinostraat (Diemen)	19
3.5	Boekenrode (Rotterdam)	22
3.6	Ellemare (Rotterdam)	24
3.7	Maerten van Heemskerckstraat (Heemskerk)	26
3.8	Velst (Heemskerk).....	29
4.	Discussie.....	31
4.1	Introductie.....	31
4.2	Overkoepelende resultaten	31
4.3	Aanbevelingen voor vervolgonderzoek	34
5.	Conclusie	37
6.	Bronnen.....	39

1. Inleiding

1.1 Introductie

In Nederland wordt het door klimaatverandering niet alleen natter en zullen de neerslagextremen toenemen, ook worden de zomers droger (KNMI, 2015). Om Nederland in 2050 klimaatbestendig en robuust te maken is het Deltaprogramma opgericht, waarin een koers voor de toekomst wordt gezet. Onderdeel van het Deltaprogramma is dat Nederland in de toekomst weerbaar moet zijn tegen zoetwatertekorten, door bijvoorbeeld water te bergen of op te slaan of slim te verdelen (Deltabeslissing Zoetwater), maar ook dat Nederland waterrobuust en klimaatbestendig moet worden ingericht (Deltabeslissing Ruimtelijke Adaptatie). Meekoppelkansen moeten daarin zoveel mogelijk worden benut. Dankzij het Deltaprogramma moeten partijen al sinds 2020 waterrobuustheid en klimaatbestendigheid meenemen in hun beleid (Nationaal Deltaprogramma, geraadpleegd op 07-06-2023).

Waterbergende wegen (WBW) kunnen een oplossing zijn voor verschillende stedelijke klimaatopgaven. Nederlandse gemeenten hadden in 2017 circa 122.000 km aan wegen in beheer. Elk jaar komt daar 300 tot 400 km aan wegen bij (SWOV, z.d.). Met name in steden, waar de druk op de boven- en ondergrond groot is, kunnen waterbergende wegen op een ruimtelijk efficiënte manier voor extra (tijdelijke) waterberging tijdens piekneerslag zorgen. Door water te bergen kan via ondergrondse infiltratie ook hemelwater aan het grondwater worden toegevoegd. Waterbergende wegen zouden hiermee ook een oplossing kunnen zijn tegen droogte.

1.2 Hydrologische effecten WBW

Over de effecten van WBW's op de geohydrologie en het functioneren van WBW's is nog maar weinig onderzoek gedaan. Eerdere onderzoeken leggen de focus op andere stedelijke watermanagement systemen en oplossingen, als waterdoorlatende verharding, ondergrondse infiltratievoorzieningen en wadi's (Boogaard en Wentink, 2011). Waterbergende wegen zijn echter een nieuwe vorm van ondiepe waterberging. Vervuiling van afstromende oppervlakken kunnen hierin mogelijk voor snellere verstopping leiden in het bergend pakket. Er zijn veel verschillende systemen en producten op de markt voor waterbergende wegen (Veldkamp, Schoenmaker en Kluck, 2020). Deze verschillende systemen hebben allen hun eigen voor- en nadelen en kenmerken, die allen mogelijk ook weer een effect hebben op het functioneren van de voorziening en op de grondwaterbalans. Zo kan infiltratie door waterbergende wegen kan een positief effect hebben op droogte, maar het kan ook wateroverlast in en rondom woningen tot gevolg hebben. Kwantitatief onderbouwde voorbeelden uit de praktijk waarin middels meten en monitoring de effecten van Waterbergende Wegen op de grondwaterhydrologie zijn vastgesteld zijn echter slechts sporadisch beschikbaar.

Als onderdeel van het SIA RAAK Publiek project 'De Waterbergende Weg' focust dit werkpakket zich daarom op de vraag:

Hoe functioneren waterbergende wegen in de praktijk met oog op de (gewenste) grondwaterhydrologie en kunnen we op basis van gedane inzichten het ontwerp van waterbergende wegen verbeteren?

Hoofdstuk 2 van deze rapportage behandelt de toegepaste methodiek voor dataverzameling en analyse. Hoofdstuk 3 bespreekt de resultaten. Hoofdstuk 4 reflecteert op de resultaten en gaat verder in op aanbevelingen voor de praktijk en aanbevelingen voor vervolgonderzoek. Hoofdstuk 5 sluit af met enkele conclusies.

2. Data en methode

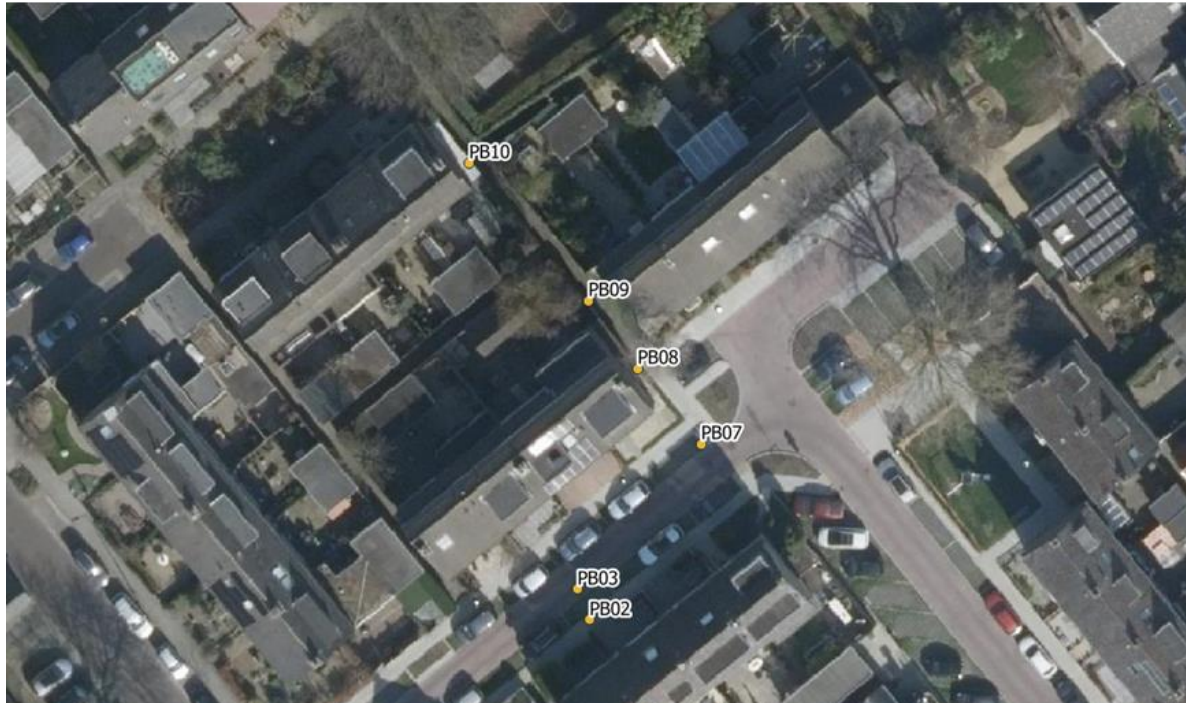
Om een goede indruk te krijgen van de geohydrologische effecten van waterbergende wegen in de praktijk en het functioneren zijn op een aantal locaties grondwaterstanden en waterstanden in de voorziening gemeten. De wijze van dataverzameling en de manier waarop de resultaten zijn geanalyseerd worden in hoofdstuk 2 kort omschreven.

2.1 Dataverzameling

2.1.1 Grondwatermetingen

Een uitgebreide beschrijving en onderbouwing van de gebruikte methode waterbergende wegen te meten en monitoren te verzamelen is terug te vinden in het meetprotocol Waterbergende Wegen (Veldkamp & van der Lee, 2023). Een overzicht van de onderzoek locaties is terug te vinden in Bijlage 1.

Bij de gemeente Diemen (1), Zoeterwoude (2), Amstelveen (1), Rotterdam (2) zijn in en bij in totaal 6 waterbergende wegen peilbuisraaien geplaatst. Bij deze peilbuisraaien zijn een aantal peilbuizen haaks op de weg in een rij geplaatst, zoals getoond in Figuur 1 voor de waterbergende weg in de Margrietstraat (Zoeterwoude). Bij de gemeente Heemskerk (2) zijn alleen in het wegcunet peilbuizen geplaatst, die tot onderin het wegcunet meten. Bij de waterbergende wegen in de Margrietstraat (Zoeterwoude) en Frans Halslaan (Amstelveen) is onderin het wegcunet gemeten. Bij de Frans Halslaan (Amstelveen) is in de in de Bufferblocks gemeten. In de Solferinostraat (Diemen) is in het drainagestelsel gemeten door een drukopnemer in een put.



Figuur 1 Voorbeeld peilbuisraai Margrietstraat (Zoeterwoude)

Bij de peilbuizen is tevens de bodemopbouw tot maximaal 4m-maaiveld bepaald. De peilbuisraaien zijn door de gemeenten zelf (in opdracht) geplaatst. Daarnaast zijn de divers door de gemeenten zelf uitgelezen, met uitzondering van Amstelveen die door de onderzoekers van de Hogeschool van Amsterdam zijn uitgelezen en geijkt. De gemeten grondwaterstanden zijn vergeleken op afwijkingen door middel van 1 tot 3 controlemetingen in de peilbuizen. In de peilbuizen is er in een tijdsinterval van 5 minuten tot 1 uur de grondwaterstand gemeten.

Een overzicht van de gemeten WBW's en bodemopbouw wordt getoond in Tabel 1.

Tabel 1 Overzicht metingen WBW

Locatie	Systeem	Peil- buizen	Referentie- meting	Bodem- opbouw	Meetperiode	Neerslagstation
Beatrixstraat (Zoeterwoude)	Waterdoorlatend met Rockflow	5	1 (PB10)	Klei	02-01-2022 t/m 12-11-2023	Lokaal station
Julianapark (Zoeterwoude)	Rainshells met drain	2	1 (PB06)	Klei	01-04-2022 t/m 24-03-2023	Lokaal station
Solferinostraat (Diemen)	Drain in zandpakket	5	Geen	Zand (op klei)	01-03-2022 t/m 31-12-2022	Schiphol (KNMI)
Frans Halslaan (Amstelveen)	Waterdoorlatend met bufferblocks	5	Geen	Klei (met lagen zand)	04-03-2022 t/m 14-11-2022	Amstelveen centrum (lokaal station)
Boekenrode (Rotterdam)	WPV met zandpakket (Drain)	5	Ellemare en PB05	Klei	01-02-2021 t/m 24-01-2022	Zestienhoven (KNMI)
Ellemare (geen WPV) (Rotterdam)	Drain in zandpakket	4	1 (PB10)	Klei	01-05-2018 t/m 12-11-2019	Zestienhoven (KNMI)
De Velst (Heemskerk)	Harsteenpakket met WPV	2	Geen	Klei	17-06-2021 t/m 12-04-2022	Wijk aan Zee (KNMI)
Maarten van Heemskerckstraat (Heemskerk)	(Terga)Kolken met hardsteen	2	Geen	Zand	25-03-2021 t/m 19-12-2022	Wijk aan Zee (KNMI)

Om de drukopnemers om te kunnen rekenen naar waterkolom boven het meetpunt is een meting van de luchtdruk nodig. Dit gebeurt idealiter door de plaatsing van een baro-diver dicht in de buurt van de drukopnemers. Daar waar geen baro-diver aanwezig was is met behulp van de gemeten luchtdruk van het dichtstbijzijnde KNMI-station weerstation de waterstand in de peilbuis berekend. Omdat de luchtdruk bij de KNMI-stations in uur wordt gegeven is deze lineair geïnterpoleerd naar kleinere tijdstappen.

2.1.2 Neerslagmetingen

In Tabel 1 wordt ook aangegeven welke stations gebruikt zijn voor de neerslagmetingen. Om een totaaloverzicht te geven van de grondwaterdynamiek zijn naast de grondwaterstandsmetingen zoveel als mogelijk neerslaggegevens toegevoegd aan de grafieken van de grondwaterstandsmetingen. Daarnaast zijn voor de aan de hand van neerslag van lokale weerstations (www.knmi.nl) of, indien niet beschikbaar, metingen van de dichtstbijzijnde KNMI-weerstations gebruikt.

2.2 Analyse van de resultaten

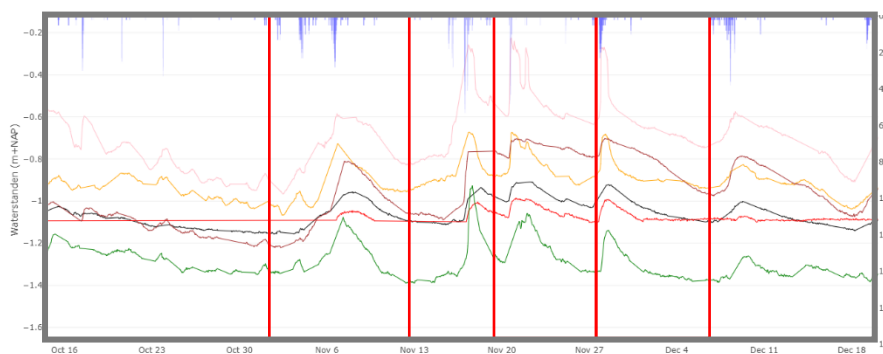
Op basis van de metingen is een beschrijvende analyse uitgevoerd naar de waterstandsfluctuaties in de seizoenen en als gevolg van neerslag. Hierbij is rekening gehouden met de bodemopbouw op basis van grondboringen, de aanwezige ondergrondse infrastructuur, de aanleg van de waterbergende weg op basis van rapportages en revisietekeningen, de aanwezigheid van oppervlaktewateren en hun waterpeilen, en stedelijke inrichting in de buurt van de waterbergende weg. Ook zijn er verschillende statistieken berekend, zoals de gemiddelde grondwaterstand, maximale en minimale grondwaterstand en vertragingstijden.

2.2.1 Selectie op basis van neerslaggebeurtenissen

In natuurlijke situaties wordt grondwater aangevuld als gevolg van neerslag. Grondwater kan dalen (of uitzakken) door wegzijging naar het eerste watervoerend pakket, onttrekkingen door vegetatie of stroming naar oppervlaktewater. In niet natuurlijke situaties kan er aanvullende grondwater worden onttrokken door bijvoorbeeld lekke riolering, grondwateronttrekkingen en drainage. Daarnaast zijn in steden veel verharde oppervlakken aanwezig, waardoor infiltratie als gevolg van neerslag per locatie sterk kan verschillen. Hierdoor kan het gedrag in grondwaterfluctuaties per locatie sterk verschillen.

De snelle stijging van grondwater, gevolgd door het uitzakken van de grondwaterstand naar een staat van voor de neerslaggebeurtenis kan als een enkele waterstandsfluctuatie worden omschreven. De hoogte van de piek, de duur van neerslag tot piek, de snelheid van het uitzakken naar de natuurlijke staat, het lange-termijn gedrag van het grondwater kunnen van veel factoren afhangen. Door de meetreeks van een peilbuis te vergelijken met een andere meetreeks kan mogelijk aanvullende informatie worden verkregen over de aanvulling van het grondwater als gevolg van neerslag en effecten van ondergrondse voorzieningen (zoals drainage) op het grondwater.

Het selecteren van neerslaggebeurtenissen is door middel van een handmatige selectie gedaan. Een voorbeeld van een selectie van waterstandsfluctuaties wordt getoond in Figuur 2. Er is in de analyse voor gekozen om een selectie te maken op basis van visuele waterstandsfluctuaties en niet op basis van neerslaggebeurtenissen. Op veel locaties is namelijk geen (betrouwbaar) weerstation in de buurt aanwezig. De neerslagpieken die daarom gemeten zijn kunnen in tijd en in intensiteit sterk afwijken van wat er daadwerkelijk gevallen is.



Figuur 2 Voorbeeld van een selectie aan neerslaggebeurtenissen (rode lijnen) voor een waterbergende weg

Vervolgens zijn door middel van een R script verschillende statistische analyses gedaan op de neerslaggebeurtenissen. Er is per neerslaggebeurtenis, per locatie en per peilbuis berekend:

- de hoogte van de piek (*maximale waarde van de piek minus minimale waarde voor de stijging*);
- het uitzakken na de piek (*maximale waarde – minimale waarde na de piek / tijdsverschil*),
- de daling en stijging in mm/uur (*((minimale waarde – maximale waarde)/(tijd minimale waarde – tijd maximale waarde))*);
- de vertragingstijd (*het verschil tussen de piekneerslag en de piek van de grondwaterstandstijging*).

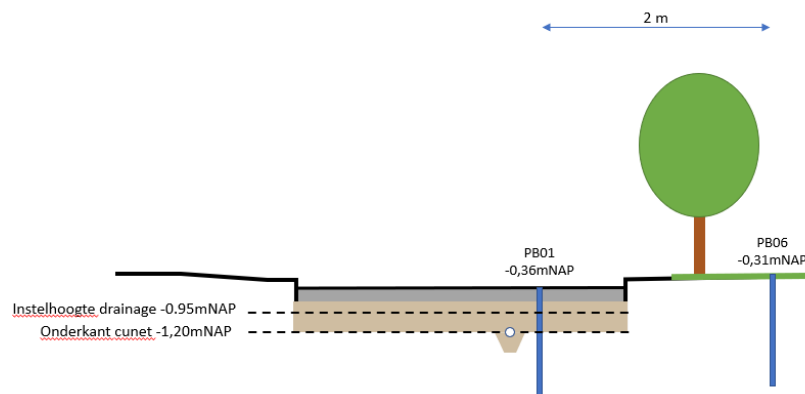
De vertragingstijd bleek bij geen enkele waterbergende weg relevante informatie op te leveren door de grote afstand van de meeste weerstations tot de onderzoek locaties.

3. Resultaten

Hoofdstuk 3 bespreekt de resultaten van het meet- en monitoringstraject dat per locatie is doorlopen. Per waterbergende weg is een beschrijvende analyse uitgevoerd van de verzamelde meetgegevens. Daar waar mogelijk zijn aanvullende analyses op basis van waterstandsfluctuaties uitgevoerd. De resultaten zijn in dit hoofdstuk per locatie toegelicht.

3.1 Julianapark

In het Julianapark is een URS schelpenpakket toegepast. Hemelwater kan via kolken aan de zijkant van de weg in het schelpenpakket van 40 á 50 cm dik komen. Daar kan het langzaam infiltreren in de bodem, of via de drain onderin het pakket op oppervlaktewater komen. Voor de het uitstroompunt van de drain zit een overstort met instelniveau op -0.95mNAP. Op de voorziening met een oppervlakte van 835 m² zit 1990 m² verhard oppervlak aangesloten, bestaande uit wegen, daken en tuinen. De bodemopbouw bestaat uit de 1m zand op klei. In het Julianapark is een peilbuis in de waterbergende weg geplaatst, en naast de weg, zoals te zien in Figuur 3.

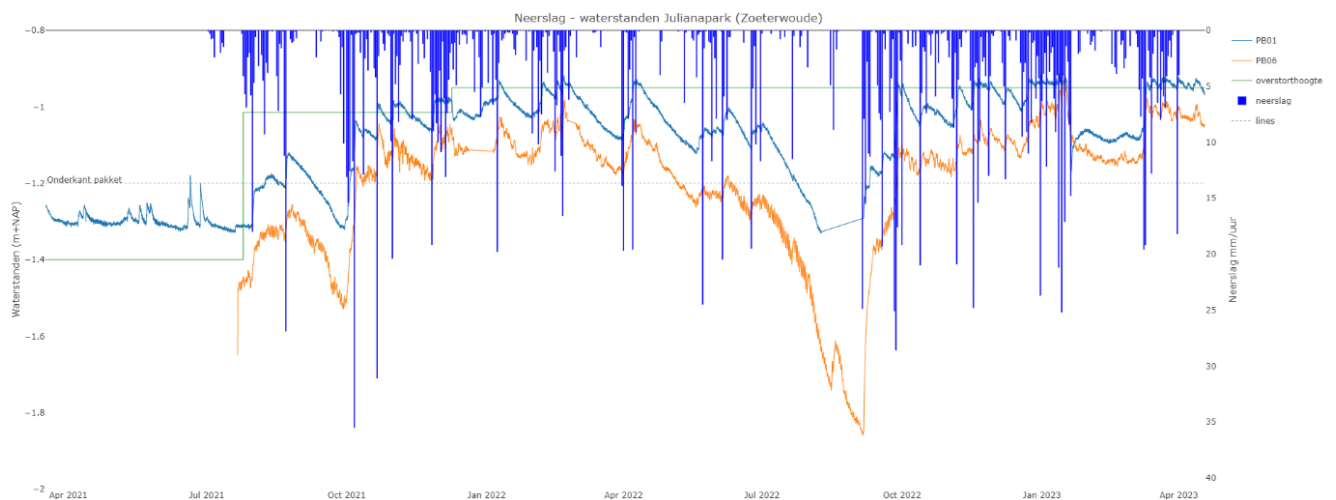


Figuur 3 Doorsnede van de peilbuisraai in en om het Julianapark (Zoeterwoude)

Figuur 4 toont de gemeten grondwaterstanden in het Julianapark van 17-03-2021 t/m 18-04-2023. Van PB01 (blauw, in het wegcunet) is voor de hele reeks een meting beschikbaar, voor PB06 (oranje, naast de weg) is dat vanaf 21-07-2021. De neerslag (2^e y-as) is een lokaal station met dagwaarden (gepositioneerd op 600 m afstand hemelsbreed). De locatie bevindt zich in een gebied met enige wegzijging (0,1 – 0,5 mm/dag, klimaat-effectatlas.nl, geraadpleegd op 12-04-2022).

Op de grafiek is de overstort aangegeven met een groene lijn. De overstort is een aantal keer verhoogd: op 25-07-2021 van -1,40mNAP naar -1,015mNAP, en op 9-12-2021 naar -0,95mNAP. De onderkant filter zit bij PB01 op -1,34mNAP, bij PB06 op -3,33mNAP.

Gedurende de gehele meting is de waterstand in PB01 hoger dan in PB06 met gemiddeld circa 11 cm. Dat betekent dat water uit de URS in ieder geval bij PB06 naar de omgeving kan infiltreren. Voordat de overstort is opgehoogd in de zomer van 2021 is waarschijnlijk weinig geïnfiltreerd, omdat de overstorthoogte zich onder de onderkant van het pakket bevond en de voorziening hierdoor snel kon leegstromen. PB01 laat daarnaast ook slechts enkele, korte fluctuaties zien.



Figuur 4 Waterstandsmetingen van PB01 (blauw) en PB06 (oranje) in het Julianapark (y-as), neerslaggegevens per dag (2e y-as) en hoogte overstort (groen)

Het systeem heeft waarschijnlijk een redelijk goede uitwisseling met de bodem. De waterstandsfluctuaties in de berging volgen een vergelijkbaar patroon als de waterstandsfluctuaties in PB06. De twee peilbuizen hebben daarnaast een Pearson's r van 0.94, een statistische berekening waarmee correlatie tussen datasets kan worden omschreven. Bij een Pearson's r van 1 correleren de twee datasets heel goed, wat voor PB01 en PB06 duidt op een goede correlatie tussen de twee peilbuizen.

Op basis van 6 gemeten piekgebeurtenissen in de winter stijgt waterstand in PB01 met circa 1 mm/uur. PB06 stijgt met 0,8mm/uur. Vermoedelijk zijn de hoge waterstanden in de berging dan ook de oorzaak van hoge grondwaterstanden in de omgeving van de waterbergende weg. Normaliter zou het grondwater in PB06, dat relatief dicht bij de berging ligt, nagenoeg hetzelfde peil moeten krijgen als de waterstand in de berging. De lage grondwaterstand in PB06 (gemiddeld 11cm lager dan in PB01) ten opzichte van PB01 duiden vermoedelijk op een (lokale) grondwateronttrekking bij PB06. Dat zou waarschijnlijk ook betekenen dat elders bij de berging het grondwater hoger ligt die het water in de berging aanvult. Door het hoge grondwater wordt de statische berging van circa 122 mm (Syntraal, 2023) niet geheel benut. Op 08-09-2021 t/m 03-10-2021 en op 24-07-2022 t/m 09-09-2022 zijn waterstanden onder de berging gemeten. Het gemiddelde niveau in de berging ligt op -1,02mNAP. Bij een overstorthoogte van -0,95mNAP betekend dit dat de waterstand in de berging gemiddeld 7 cm kan stijgen tot de rand van de overstort. Omgerekend betekent dit een berging van circa 21 mm (41m^3 berging, $7\text{cm} * 70\%$ holle ruimte $* 835\text{m}^2$ bergingoppervlak) neerslag per 1 m^2 aangesloten verhard oppervlak. Het gevolg hiervan is dat de waterstand in de berging een aantal keer het boven niveau van de overstort komt. Een aantal keer is dit van korte duur, maar er zijn ook momenten dat dit van langere duur is. Met name de periode van 19-12-2022 t/m 14-01-2023 is opvallend, omdat gedurende deze periode er een continu peil boven de overstort aanwezig is (op circa -0,93mNAP) in de URS, en de GWS in PB06 omhoog komt tot op overstorthoogte.

Op 14-01-2023 is een snelle, abrupte daling te zien. Op dat moment zijn waarschijnlijk een aantal schotten uit de overstort verwijderd, waardoor water uit de voorziening naar oppervlaktewater kon stromen. Opvallend is dat het water in de berging snel uitzakt met circa 24 cm in 43 uur tot onder het peil van de grondwaterstand in PB06. Op dit moment zal grondwater de URS in stromen. Het peil van PB06

De Waterbergende Weg: Lokale effecten hydrologie (WP2)

Faculteit Techniek – version 1.0

© 2020 Copyright Hogeschool Amsterdam

zakt ook uit maar veel minder snel en diep met 16 cm in 11 dagen tijd. Na de snelle daling in PB01 vindt er een snelle stijging plaats door neerslag en instroming van grondwater, waarna de stijging afvlakt als gevolg van grondwaterinstroming. PB06 en PB01 vinden een nieuw evenwicht waarbij het water in PB01 circa 4cm hoger is dan PB06.

In de zomer zakt het grondwater uit. Met name in PB06 is een grote daling zichtbaar in de periode van 07-04-2022 t/m 04-09-2022, waarna een abrupte stijging van het grondwater plaatsvindt die duurt t/m 28-09-2022. In deze periode staat de waterstand in PB01 vanaf 25-07-2022 t/m 09-09-2022 onder het wegcunet.

Bij een selectie van 5 perioden in de hydrologische zomer waarbij geen of nauwelijks neerslag is gemeten (met een periodeduur van 7 dagen tot 14 dagen) is bepaald wat de daalsnelheid van de grondwaterstand in mm/dag voor PB01 en PB06. Bij PB01 komt de daling op circa 6,5mm/dag, vergelijkbaar met de rapportage van Syntraal. In PB06 komt deze daling op 8,7mm/dag, fors hoger dan PB01 dus. Vermoedelijk is de snellere daling van de waterstand PB06 het gevolg van de eerder genoemde onttrekking van een drain of lekker riolering, samen met aanvullende onttrekking van de bomen nabij de peilbuis.

Op basis van de meting in het waterbergend pakket kan een inschatting gemaakt worden van de hoeveelheid water die jaarlijks over de overstort verdwijnt. Hiervoor zijn de volgende aannames gedaan:

- De stijging in het systeem het gevolg is van directe aanvoer van neerslag (en geen aanvullend grondwater);
- Er circa 70% holle ruimte in de URS en het oppervlak van de hele berging is 835m²;
- Waterstand in PB01 hoger dan de overstorthoogte is meteen overstort;
- Er circa 0,5mm/dag wegzijging;

Dan kan een inschatting gemaakt worden wat de cumulatieve waterstijging onder de drempel om hiermee het aangesloten oppervlak te bepalen met de volgende formule:

$$P \cdot \frac{A_v}{A_b} \cdot \frac{100}{P_o} = \Delta h$$

met:

P: neerslag (m/dag)

A_v: aangesloten afstromend oppervlak (m²)

A_b: oppervlakte berging (m²)

P_o: porositeit van de berging (%)

h: waterhoogte (m/dag)

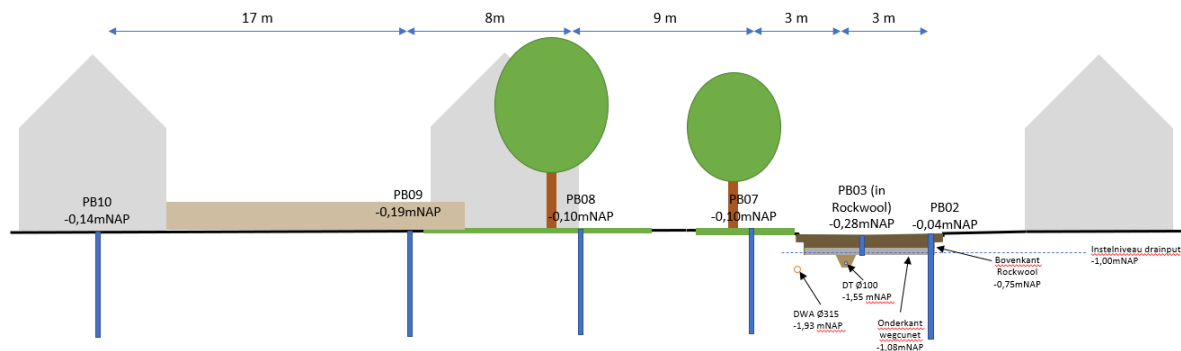
De aangesloten verharding zoals gegeven door Syntraal is 1990m². Hier van zal een deel verloren gaan als gevolg van verdamping, infiltratie en interceptie. De hoeveelheid hiervan kan bepaald worden door de gemeten cumulatieve stijging van de waterstand onder de overstort te nemen te vergelijken met de berekende cumulatieve stijging als hierboven op basis van de dag-neerslag. Uiteindelijk kan de omgerekende aangesloten oppervlak, 857 m², worden gebruikt om voor het hele jaar de cumulatieve waterstandstijging te berekenen. Dit oppervlak is overigens een heel stuk kleiner dan het opgegeven oppervlak (1990m²). Het verschil tussen beide cumulatieve waterstandstijging is de hoeveelheid neerslag die niet geborgen wordt, maar over de overstort verdwijnt. Het verschil tussen de gemeten

waterstandsstijging en de berekende waterstandsstijging door neerslag is circa 22% voor 2022. Van de 919 mm neerslag die is gemeten voor 2022 is er circa 202 mm over de overstort verdwenen. Dat betekent wel dat de overige 717 mm kan infiltreren in de bodem.

Op basis van de metingen kan worden vastgesteld dat de waterberging in het Julianapark voor een groot deel van het jaar gevuld is. Alleen tijdens de zomermaanden zakt de waterstand in de berging uit tot de berging droog staat. Als gevolg hiervan verdwijnt circa 22% van de neerslag in 2022 over de overstort, de overige 78% kan infiltreren. De stijging van de waterstand in de berging lijkt eerder het gevolg van hoge grondwaterstanden elders in de berging dan een slechte infiltratie uit de berging naar de ondergrond.

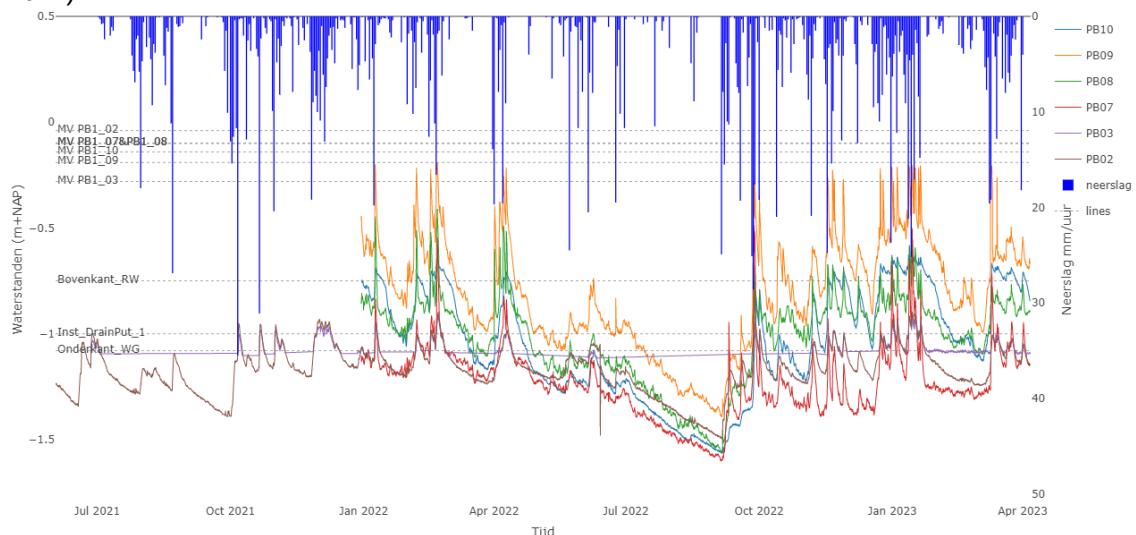
3.2 Margrietstraat (Zoeterwoude)

In de Margrietstraat ligt een Rockwoolpakket onder een pakket van gewassen menggranulaat 4/31,5. Neerslag kan via de halfverharde parkeervakken of via de infiltratiegoot in het pakket komen. Het gehele pakket onder de Beatrixstraat, Margrietstraat en Bernhardstraat heeft een theoretische berging van 318 m³ in het Rockwoolpakket en 156,4m³ in de funderingslaag. Op het pakket is 2239 m² verhard oppervlak aangesloten, bestaande uit daken (voorzijde), platte daken, wegen, parkeervakken en trottoirs (notitie HB Adviesbureau, 2019). Onderin het wegcunet ligt een drainage (Ø100mm), die met een overstortput (instelniveau -1,00mNAP) op 2 punten is aangesloten op het HWA-stelsel in de Nassaulaan. De bodem bestaat uit de eerste 80-180 cm zand op klei. In de Margrietstraat zijn 6 peilbuizen geplaatst. Een doorsnede van de situatie is weergegeven in Figuur 5.



Figuur 5 Doorsnede van de peilbuisraai in en om de Margrietstraat (Zoeterwoude)

Figuur 6 toont de gemeten grondwaterstanden in de Margrietstraat van 05-06-2021 t/m 05-04-2023. Van PB02 (bruin) en PB03 (paars) is voor de hele reeks een waarde beschikbaar. Voor PB07 (rood), PB08 (groen), PB09 (geel) en PB10 (blauw) lopen de eerste metingen vanaf 31-12-2021. De neerslag (2^e y-as) is gemeten op een lokaal station op 600 m afstand (hemelsbreed) met dagwaarden. De locatie bevindt zich in een gebied met enige wegzijging van 0,1 – 0,5 mm/dag (klimaat-effectatlas.nl, geraadpleegd op 12-04-2022).



Figuur 6 Waterstandsmetingen van de peilbuisraai in de Margrietstraat (y-as), neerslaggegevens per dag (2e y-as) en maaiveldhoogtes (MV) en hoogtes waterberaende wec pakket.

De Waterbergende Weg: Lokale effecten hydrologie (WP2)

Faculteit Techniek – version 1.0

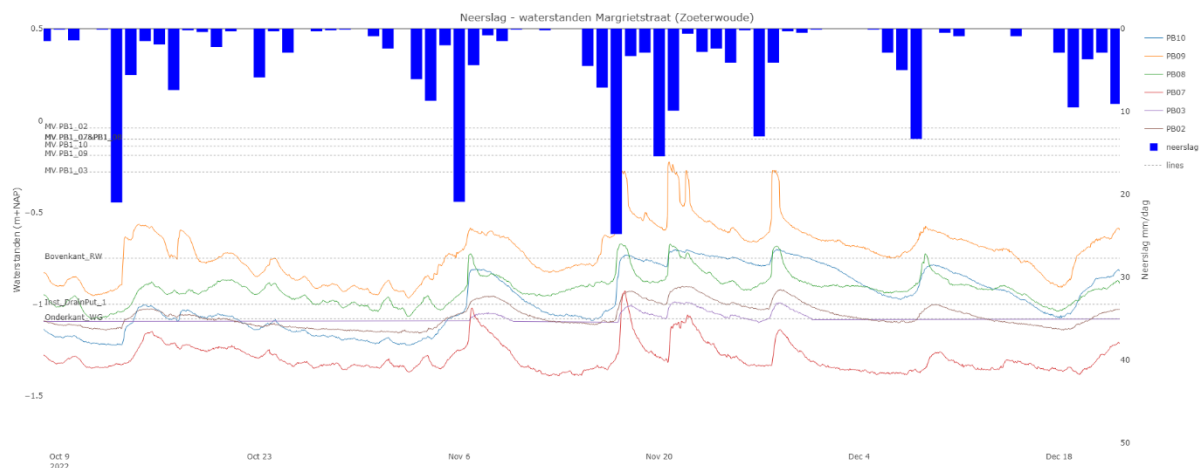
© 2020 Copyright Hogeschool Amsterdam

PB03 (paars) bevindt zich onder in het wegcunet. In de peilbuis een groot deel van de meetreeks droogstand zien. De metingen laten zien dat er in het pakket relatief weinig geborgen wordt, en dat het water in het pakket al vrij snel over de overstort verdwijnt. Mogelijk is er te weinig oppervlak op de voorziening aangesloten voor de bergingscapaciteit. Veel buien zullen dan niet tot een stijging in waterstand in de berging zorgen, omdat een deel van de bui verdwijnt door verdamping en infiltratie, en omdat een deel van de neerslag in het draincunet onder de WBW geborgen kan worden. De waterstand in PB03 stijgt gedurende een aantal perioden (4 dagen tot 2 weken) tot op of boven de instelhoogte van de drain ($>-1\text{mNAP}$), met een maximale gemeten waterstand in het pakket van 17,5 cm (op 14-01-2023 om 18:00). Na de waterstandsstijging was de voorziening binnen een paar uur tot een paar dagen weer leeg. Gedurende de meeste gebeurtenissen waarin de waterstand in de berging stijgt laten de waterstanden in de peilbuizen direct naast de weg (PB07 en PB02) ook een stijging in grondwaterniveau zien tot boven de onderkant van de berging, soms tot boven het instelniveau van de drain. Tijdens die situaties voert het stelsel waarschijnlijk grondwater af, en zijn stijgingen in het bergend pakket niet alleen toe te wijzen aan inloop door neerslag.

Opvallend om te zien is dat PB02 (direct naast de weg) dezelfde waterstandspatronen meet als in PB03, maar dat de grondwaterstanden in PB02 gemiddeld circa 9 cm hoger staan dan PB03. Daarnaast vertoont PB03 ook geen extremer piekgedrag dan PB02, wat wel eerder te verwachten zouden zijn in het waterbergende weg systeem dat sneller reageert op neerslag dan de kleige ondergrond.

Op 20-01-2023 treedt een abrupte waterstandsverlaging op met name in PB07 die eindigt na een flinke bui op 09-03-2023. Tijdens deze periode zakt de waterstand in PB07 uit tot circa $-1,30\text{mNAP}$. De andere peilbuizen laten gedurende deze periode een langzamere daling zien. Eenzelfde gebeurtenis treedt op tussen 12-01-2022 en 26-01-2022, maar dan van kortere duur.

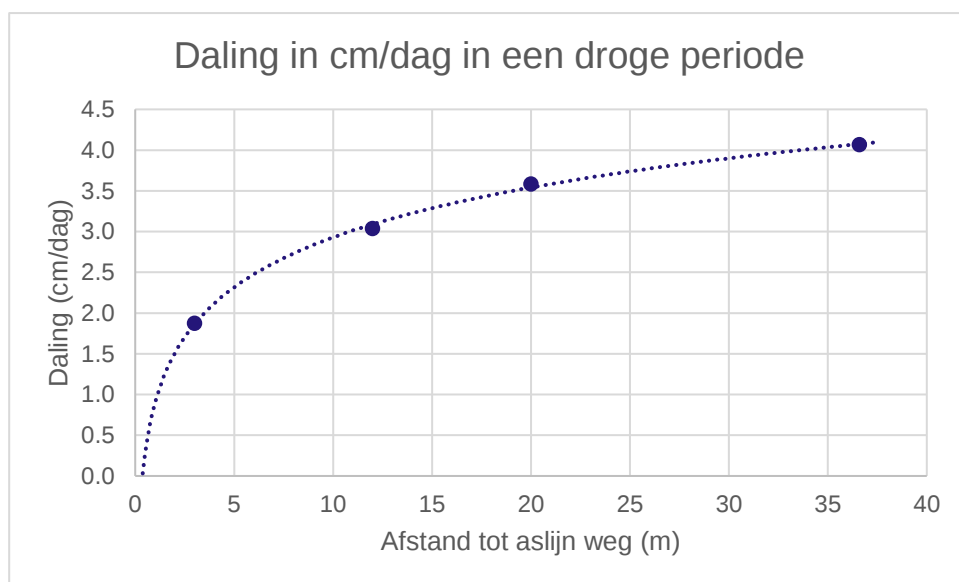
De peilbuizen laten grote verschillen in reactie zien na een neerslaggebeurtenis. Er is dan ook geen duidelijke ruimtelijke relatie ten opzichte van de waterbergende weg vast te stellen. Dit is goed zichtbaar in Figuur 7. **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden..** Bij PB09 (geel) zijn een aantal hoge pieken waarneembaar, vermoedelijk omdat door de lage ligging van de peilbuis ten opzichte van PB10 en PB08. Waarschijnlijk kan water oppervlakkig naar deze peilbuis toe stromen met waterstandspieken in de peilbuis als gevolg. PB07 en PB03 laten opvallend genoeg ook sterke verschillen zien in grondwaterstandspieken. In PB03 loopt de waterstand geleidelijk op, en neemt daarna geleidelijk af. PB07 laat hevigere pieken maar ook snellere dalingen zien. PB10 lijkt een outlier te zijn in gedrag vergeleken met PB07, PB08 en PB09. Deze peilbuis daalt en stijgt veel meer geleidelijk en vertoont nauwelijks de pieken zichtbaar in PB07, PB08 en PB09. Daarnaast lijkt de gemiddelde grondwaterstand ook lager dan PB09.



Figuur 7 Uitsnede van een natte periode van 09-10-2022 t/m 19-10-2022

In de relatief droge periode (03-07-2022 t/m 05-09-2022), maar ook tijdens natte perioden is bij PB02 en PB07 goed te zien dat het grondwater tot onder het pakket uitzakt. Na de zomer van 2022 lijkt PB07 echter na neerslaggebeurtenissen verder uit te zakken dan voor de zomer van 2022. De waterstandspieken lijken dan ook “heftiger” en van kortere duur dan voor de zomer.

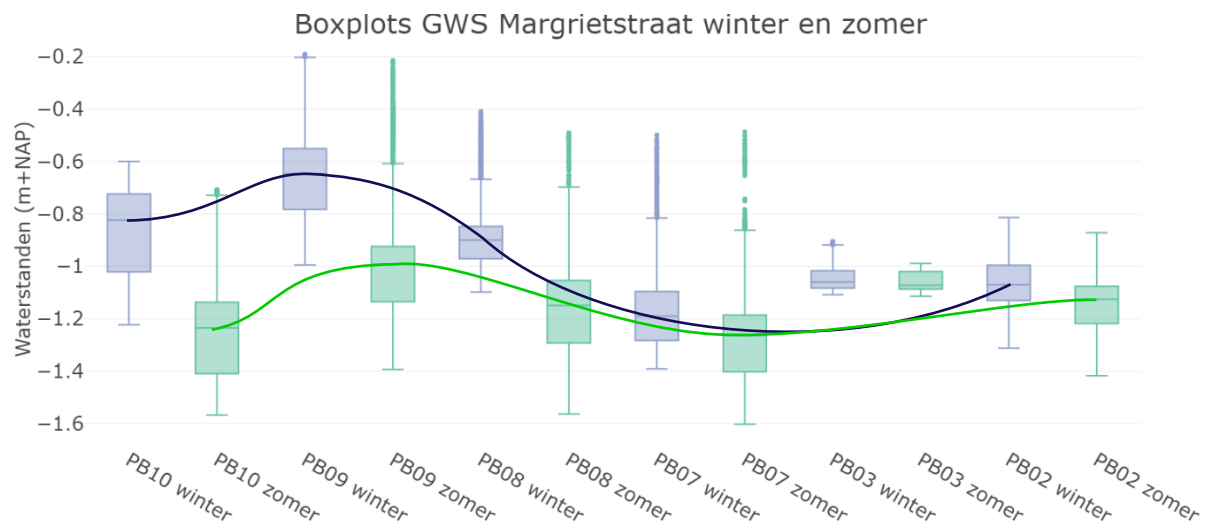
Gedurende de zomer zijn een 5 perioden geselecteerd (met >48 uur geen neerslag). De gemiddelde waarden ten opzichte van afstand tot aslijn weg (m) zijn afgebeeld Figuur 8. Daaruit blijkt richting PB10 de daling in cm/dag toeneemt tot 4,1cm/dag. PB02 daalt het langzaamst, met 1,2cm/dag. Deze daling heeft mogelijk te maken met de aanwezigheid van vegetatie in de buurt: richting PB10 lijken de bomen in de nabijheid steeds groter te worden.



Figuur 8 Daling in cm/dag in een droge periode ten opzichte van afstand tot aslijn weg (m), gebaseerd op 5 perioden

Om de spreiding in grondwaterstandsfluctuaties ruimtelijk weer te geven zijn boxplots gemaakt, weergegeven in Figuur 9. **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden..** Voor de raai van de peilbuizen PB07,

PB08, PB09 en PB10 kan worden verondersteld dat het grondwater in de winter van PB07 op loopt richting PB09 en weer afneemt richting PB10. Mogelijk vindt er een lokale onttrekking plaats nabij PB07, eventueel door een lekke riolering of een drainageleiding. Dit kan mogelijk ook verklaren zijn waarom het verschil in gemiddelde grondwaterstand tussen de zomer (01-04 t/m 30-09) en winter steeds kleiner wordt in de richting van PB07. Door deze onttrekking wordt het grondwater redelijk constant gehouden, vergelijkbaar met de invloed van drainage op grondwater. Eenzelfde onttrekking kan plaatsvinden in de Irenestraat, waar PB10 vlakbij ligt. Door opbolling ligt de grondwaterstand in PB09 dan het hoogst, maar het effect hiervan kan worden aangesterkt door de lagere ligging van het maaiveld bij PB09 en de oppervlakkig afstroming naar deze peilbuis.

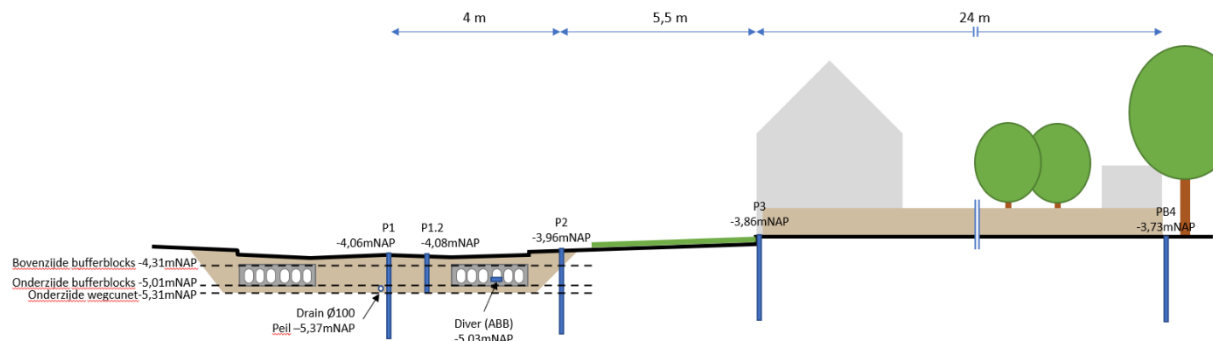


Figuur 9 Boxplots (min, max, 1ste kwantiel, 3e kwantiel, mediaan, en de outliers) van de peilbuismetingen in de Margrietstraat, in de winter (1 oktober - 31 maart) en in de zomer (1 april - 30 september)

Het oorspronkelijke ontwerp van het Rockwoolpakket was bedoeld als tijdelijke berging. Daarbij is ook uitgegaan van dynamische berging. Op dit moment werkt het pakket echter niet volledig en verdwijnt er vrij snel water over de overstort. De drainage onderin de berging zorgt er daarnaast ook gedeeltelijk voor dat grondwater wordt onttrokken in de natte perioden. Een advies zou zijn om de overstortdrempel te verhogen, en aanvullend te meten hoeveel water er over de overstort verdwijnt. Daarnaast reageert de berging niet altijd bij neerslag. Vermoedelijk is er te weinig verharding aangesloten op de berging, waardoor de berging zich niet of nauwelijks vult na een regenbui.

3.3 Frans Halslaan (Amstelveen)

Het pakket in de Frans Halslaan bestaat uit Bufferblocks aan twee zijden van de weg in een fundering van zand. In totaal kan er 106 m³ water worden geborgen (bron: mailwisseling gemeente Amstelveen). Door een HWA-leiding staan de bufferblocks in open verbinding met het oppervlaktewater (peil - 5,37mNAP). In totaal is er 730m² dakoppervlak, 2,551m² publiek verhard oppervlak en 270m² publiek onverhard oppervlak aangesloten. De bodem bestaat uit tot 70 cm zand op klei. De opbouw van het systeem en de locatie van de peilbuizen in de raai is in Figuur 10 getoond.



Figuur 10 Doorsnede van de peilbuisraai in en om de Frans Halslaan (Amstelveen)

Figuur 11 toont de gemeten waterstanden in de peilbuisraai en neerslag (lokaal weerstation op 100 meter afstand hemelsbreed) in de Frans Halslaan tussen 03-01-2022 en 13-11-2022. Hier is het verschil in waterstandsfluctuaties voor en na de aanleg van de waterbergende weg goed te zien. Het grondwater lijkt voor de aanleg heftiger te reageren op neerslaggebeurtenissen dan na de aanleg. Dit is met name goed te zien in peilbuis AP2 (groen). Daarnaast is er geen enkele neerslagsituatie geweest waarbij de grondwaterstanden in AP1.1 (rood, onderin het wegcunet) boven de onderzijde van de bufferblocks uit is gekomen. Ook valt op dat deze peilbuis (AP1.1) maar weinig fluctueert, mogelijk door de invloed van de drain onderin het wegcunet.

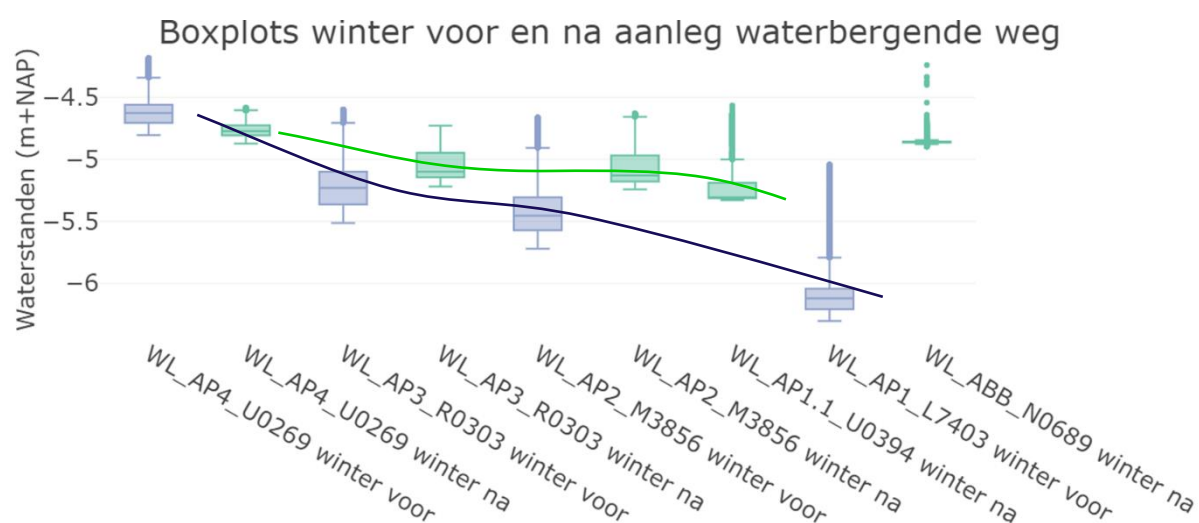


Figuur 11 Waterstandsmetingen van de peilbuisraai in de Frans Halslaan (y-as), neerslaggegevens per uur (2e y-as) en maaiveldhoogtes (MV) en hoogtes waterbergende weg pakket.

Begin oktober 2022 stijgt de waterstand in de peilbuizen naast de weg (AP2, groen en AP3, geel) tot boven de onderzijde van het wegcunet. Bij een grondwaterstand in AP2 boven -5,03mNAP treedt er een stijging in waterstand in de berging op. Het is daarom mogelijk dat de gemeten waterstandstijging in het

cunet deels het gevolg is van hoge grondwaterstanden. Na deze gebeurtenis zijn, op de infiltratieproef na die op 15 november 2022 is uitgevoerd, geen waterstandsfluctuaties meer gemeten onderin het cunet. Er is daarom een langere meting nodig om uitsluitsel te geven over het vulling- en ledigingsgedrag onder de WBW en het functioneren van de drain onderin het pakket.

Onderstaande figuur toont de boxplots van de waterstanden voor en na de aanleg van de waterbergende weg in de winter. Te zien is dat de gemiddelde grondwaterstanden in AP2 en AP3 lijken te zijn gestegen ten opzichte van de situatie voor de aanleg van de WBW. Een verklaring hiervoor kan mogelijk worden gevonden in een lokale onttrekking, of dat simpelweg de peilbuizen door aanleg van de waterbergende weg zijn verstoort. Een langere meting moet meer uitsluitsel geven over het optredend grondwaterpeil rondom de waterbergende weg. Na de aanleg is er namelijk maar 1,5 maand aan grondwatermetingen bekend, wat helaas te kort is om echte conclusies te kunnen trekken. Daarnaast zouden metingen in de drain uitsluitsel kunnen geven over de invloed van de drain op de grondwater aan en afvoer.

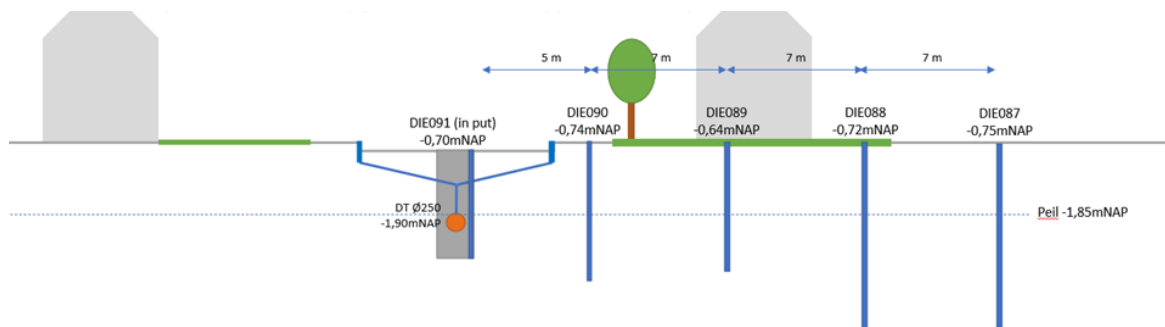


Figuur 12 Boxplots (min, max, 1ste kwantiel, 3e kwartiel, mediaan, en de outliers) van de peilbuismetingen in de Frans Halslaan, in de winter (1 oktober - 31 maart) voor en na de aanleg van de waterbergende weg

De eerste metingen in de Frans Halslaan laten voorzichtig een stijging, maar ook een stabilisering van pieken in de grondwaterstanden zien na de aanleg van de waterbergende weg. Er zijn echter langere metingen nodig om goede conclusies over de hydrologische effecten van de waterbergende weg te kunnen trekken. Aanvullende moet worden gemeten wat de bron is van het water gemeten onderin het wegcunet, door een debietmeter te plaatsen in de HWA leiding van de Bufferblocks en de HWA-leiding van de drains.

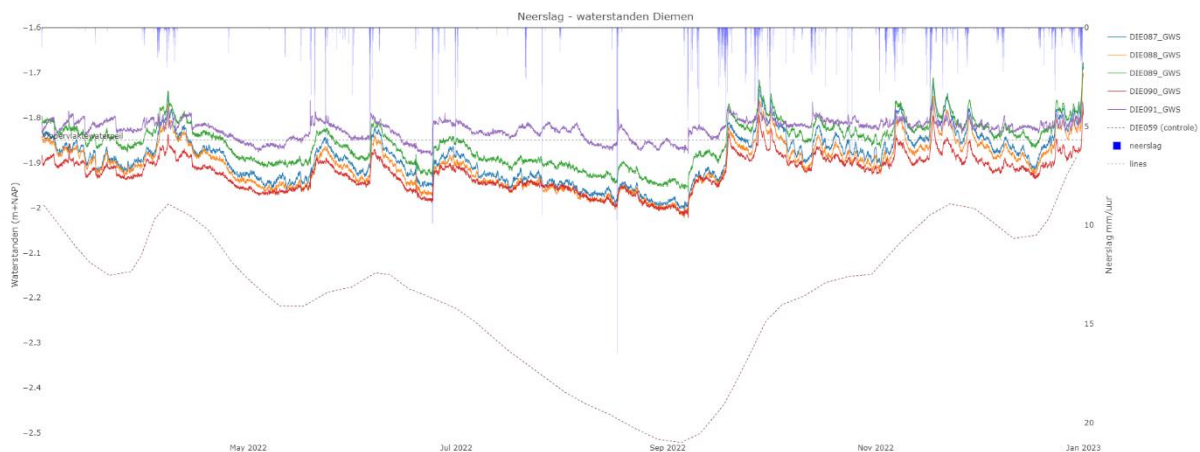
3.4 Solferinostraat (Diemen)

In Solferinostraat ligt een DIT-riool met open verbinding naar oppervlaktewater. Het vermaasde stelsel ligt in geheel in Ruimzicht-Oost (ten zuiden van de Kruislaan) en heeft verschillende uitlaten op het oppervlaktewater ten zuiden van de Henry Dunantlaan, met een peil op circa -1,85mNAP. Per meter weg watert mogelijk 33 m² verhard oppervlak (daken, tuinen, wegen en trottoirs) af via de kolken. De bodemopbouw in het gebied is klei tot circa 0,7 m, op zand tot circa 3 m, gevolgd door klei. De situatie wordt getoond in Figuur 13.



Figuur 13 Doorsnede van de peilbuisraai in en om de Solferinostraat (Diemen)

Op basis van de gemeten waterstanden en neerslag (weerstation Schiphol, 12 km afstand) in de Solferinostraat is tussen 1 maart en 31 december 2022 het verschil tussen grondwaterstanden in de peilbuisraai te zien. De metingen worden getoond in **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden..** De g rondwaterstanden in de drain zijn over het algemeen lager dan de waterstand in de drain. Er is hier dus sprake van infiltratie vanuit de drainage naar de omgeving. Dit komt door de wegzijging in het plangebied van 0,1 tot 0,5 mm/dag (bron: Klimaateffectatlas.nl).



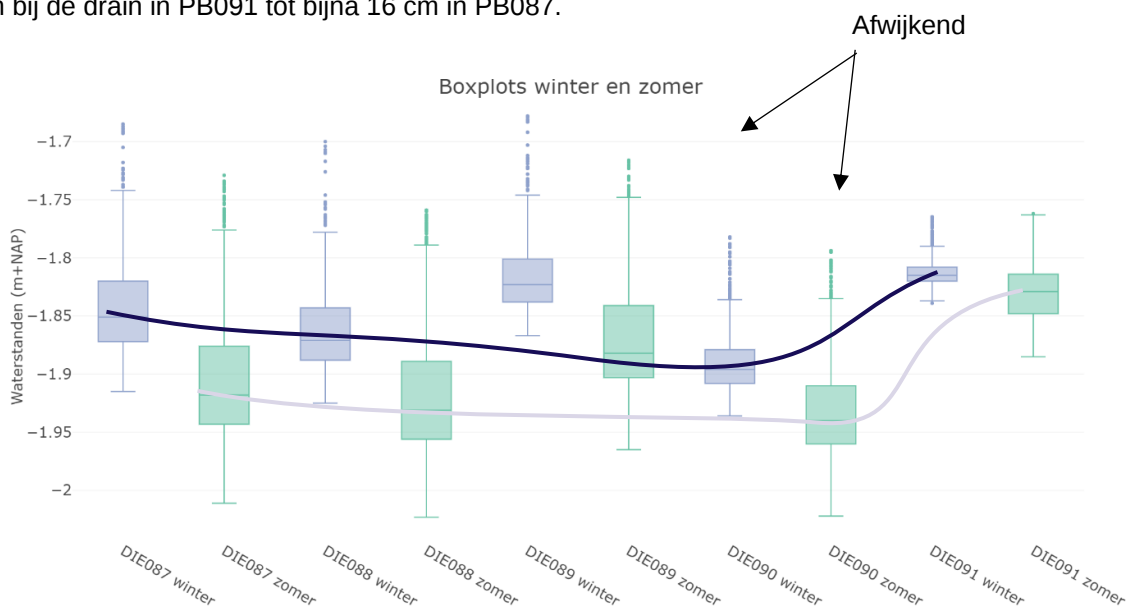
Figuur 14 Waterstandsmetingen van de peilbuisraai in de Solferinostraat (y-as), neerslaggegevens per uur (2e y-as) en maaiveldhoogtes (MV) en hoogtes waterbergende weg pakket.

In de natte periode komen de grondwaterstanden rondom de Solferinostraat dicht bij de waterstanden in de drainput (DIE091, paars), en een enkele keer (in oktober 2022 en december 2022) stijgen ze boven de waterstand in de drain. In de zomer zakken de grondwaterstanden met enkele centimeters (maximaal tot 15 cm onder oppervlaktewaterpeil). Wel zijn een aantal snelle stijgingen te zien in na een

neerslagpiek. De waterstanden verder van de drain in peilbuis DIE087 (blauw) en DIE088 (oranje) zakken daarin verder uit dan dichterbij de drains. Daarnaast laat PB091 (paars) weinig waterstandsfluctuaties zien, vergeleken met de metingen in de andere peilbuizen. Dit komt waarschijnlijk door een combinatie van een hoge infiltratiecapaciteit van de drain (gemeten met 70mm/uur t.o.v. verhard oppervlak), een directe verbinding met oppervlaktewater waardoor water snel kan wegstromen en de relatief grote tijdsstap (uurlijks) van de metingen. De langdurige (>2 uur) waterstandsschommelingen die hier zichtbaar zijn worden mogelijk verklaard door schommelingen in het oppervlaktewaterniveau.

De grafiek toont ook een referentiemeting uit de Prinses Beatrixlaan (bruin gestippelde lijn), op circa 300m van de peilbuisraai in de Solferinostraat. Deze peilbuis staat in een vergelijkbare bodemopbouw, maar er is hier geen drainage aanwezig. Hier zijn grote waterstandsfluctuaties te zien en zakt de grondwaterstand verder uit ten opzichte van de metingen in de Solferinostraat, met een minimale waterstand van -2,52mNAP begin september 2022.

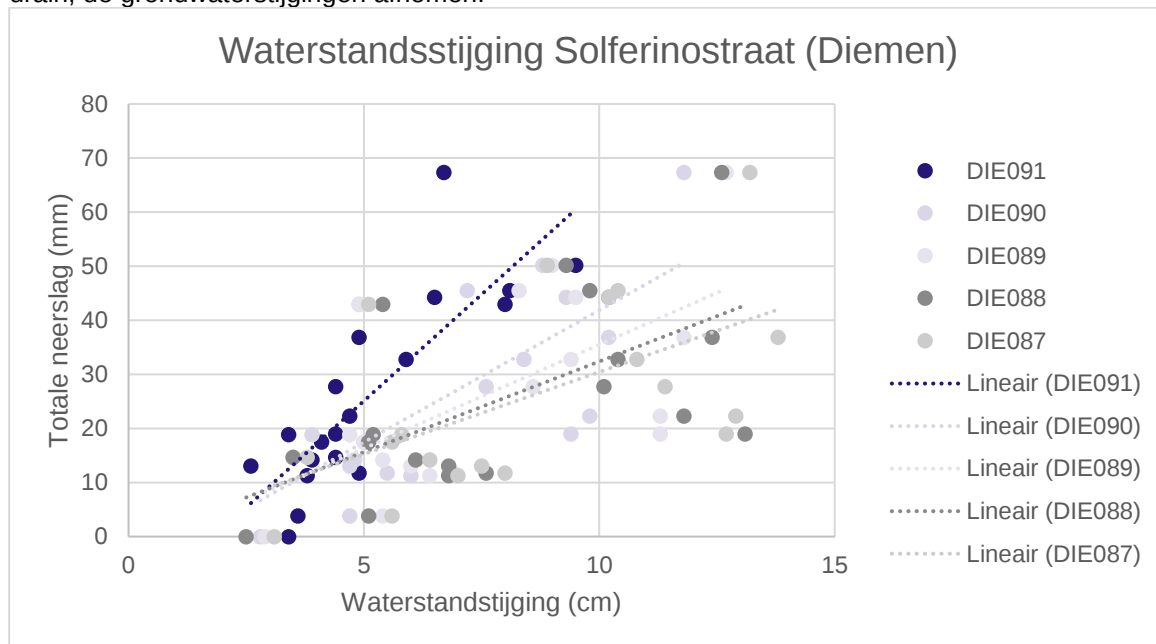
De boxplots in figuur 16 tonen de waterstanden per peilbuis, met een onderscheid tussen de hydrologische zomer en winter. In de zomer zakken de grondwaterstanden rondom de waterbergende weg verder uit dan de waterstanden in de drain. Ook is te zien dat de grondwaterstanden een soort W-vorm laten zien. De grondwaterstanden in PB089 liggen circa 5 tot 7 cm hoger dan de waterstanden in de peilbuizen er naast. De grondwaterstanden in peilbuis DIE087 liggen weer gemiddeld 1 à 2 cm hoger dan PB088. Verder van de drain af neemt de fluctuaties in grondwaterstanden ook heel lichtelijk toe: het verschil tussen de hoogste 5% waterstanden en de laagste 5% waterstanden in de winter neemt toe van 7 cm bij de drain in PB091 tot bijna 16 cm in PB087.



Figuur 15 Boxplots (min, max, 1ste kwantiel, 3e kwantiel, mediaan, en de outliers) van de peilbuismetingen in de Solferinostraat, in de winter (1 oktober - 31 maart) en in de zomer (1 april - 30 september)

Op grotere afstand van de drain neemt de invloedssfeer van de drain op grondwaterstanden logischerwijs af en zullen sterkere grondwaterstandsfluctuaties als gevolg van neerslag plaatsvinden. Dit goed terug te zien op basis van de selectie van neerslaggebeurtenissen die gedaan zijn in Figuur 16. De figuur toont

aan dat op grotere afstand van de drain, van DIE091 in de drainput tot DIE087 op grootste afstand van de drain, de grondwaterstijgingen afnemen.

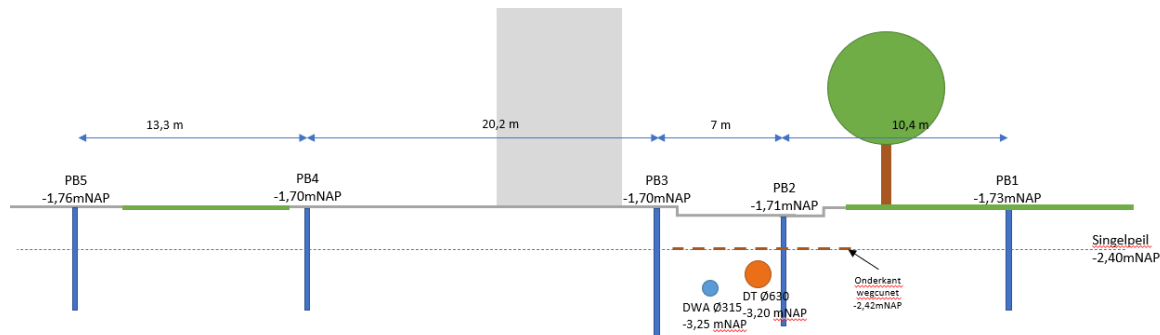


Figuur 16 De waterstandsstijging (cm) bij een neerslaggebeurtenis (mm) per peilbuis in de Solferinostraat

De grondwaterstandsmetingen in de Solferinostraat en de referentiemeting in de Prins Beatrixlaan laten zien dat door de drainage in de Solferinostraat de grondwaterstanden op een zelfde niveau worden gehouden, waarbij de drainage het grootste deel van het jaar het grondwater aanvult. Op grotere afstand van de drain nemen de grondwaterfluctuaties toe, als gevolg van aanvullende infiltratie in de groenzone en verminderd effect van de drain.

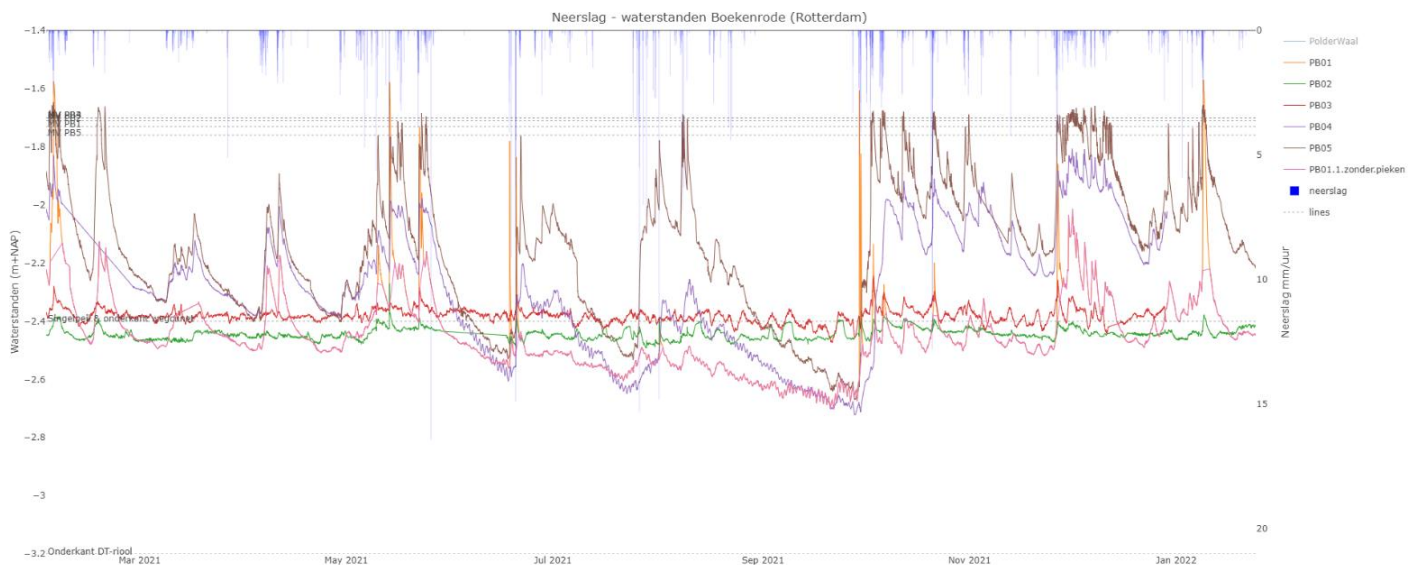
3.5 Boekenrode (Rotterdam)

In Boekenrode ligt een DIT-stelsel met directe verbinding op oppervlaktewater met een peil op -2,42mNAP. Het DIT-stelsel is vermaasd aangelegd en in een groot deel van Zuidwijk. In de Boekenrode kan neerslag op de weg en stoepen via de waterpasserende verharding (WPV) infiltreren in het waterbergende cunet of via kolken in het DIT-stelsel. De daken zijn niet aangesloten op het stelsel. De bodem bestaat uit klei. Figuur 17 toont de doorsnede van de Boekenrode met de peilbuisraai.



Figuur 17 Doorsnede van de peilbuisraai in en om de Boekenrode (Rotterdam)

Figuur 18 toont de waterstandsmetingen in de peilbuisraai in Boekenrode (1 februari 2021 t/m 24 januari 2022), de neerslag (KNMI station Zestienhoven, 10,5km hemelsbreed) en met lijnen de hoogtes van het maaiveld bij de peilbuizen en het singelpeil aangegeven. Hierin zijn bij PB01 (oranje) veel pieken te zien na een neerslaggebeurtenis. Vermoedelijk loopt water hier via maaiveld de peilbuis in, waarbij waterstanden tot boven het maaiveld worden gemeten. Daarom is er bij PB01.1 (roze) een “correctie” uitgevoerd, waarbij de extreme piek uit de metingen zijn gefilterd.



Figuur 18 Waterstandsmetingen van de peilbuisraai in de Boekenrode (y-as), neerslaggegevens per uur (2e y-as) en maaiveldhoogtes (MV) en hoogtes waterbergende weg pakket.

Op de grafiek is te zien dat rond de drain (PB02, groen en PB03, rood) de waterstanden zeer constant blijven rond het singelpeil. Deze peilbuizen ondervinden sterke invloed van de drain. Deze peilbuizen

De Waterbergende Weg: Lokale effecten hydrologie (WP2)

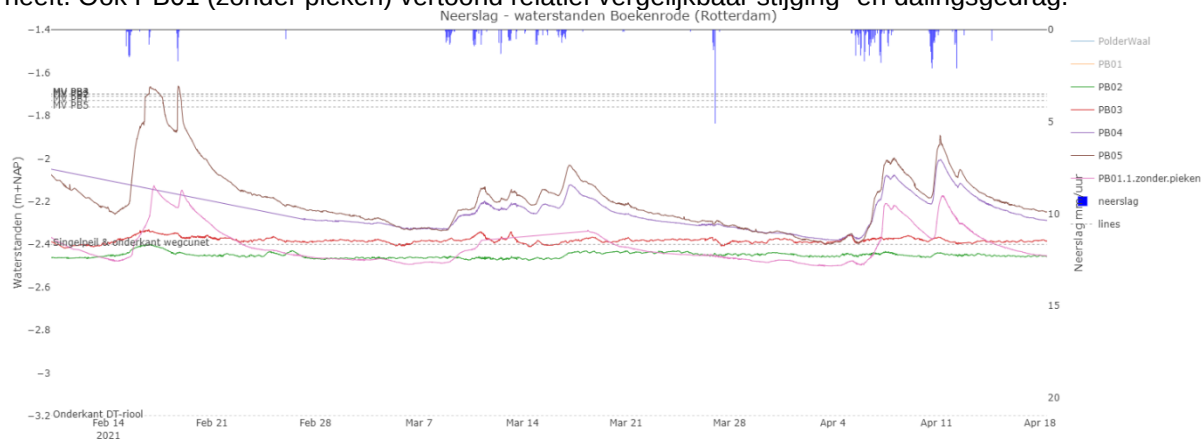
Faculteit Techniek – version 1.0

© 2020 Copyright Hogeschool Amsterdam

staan in het zand van het wegcunet, waarbij deze laag in PB02 dikker is dan PB03. Dit kan verklaren waarom PB03 meer fluctuaties in waterstand laat zien en de gemiddelde grondwaterstand ligt hier ook hoger dan PB02, omdat het grondwater blijft meer hangen op de dichte kleilaag.

In de hydrologische zomer laten PB04 en PB01 cyclische schommelingen zien van ~24 uur (in een dalende lijn), die mogelijk te maken hebben met onttrekking van grondwater overdag door vegetatie. Op grotere afstand van de drain (PB04, paars naar PB05, bruin) laten de grondwaterstanden stijgt de gemiddelde hoogte en worden de fluctuaties extremer. Het grootste deel van het jaar stroomt het grondwater naar de drain toe, en voert de drain af. Daarbij komt het een aantal keer in de meetperiode voor dat het grondwater in PB05 tot boven maaiveld gemeten wordt. Dit kan het gevolg zijn van een lokale laagte in het maaiveld, waardoor er plassen ontstaan rond deze peilbuis.

Het stijg- en daalgedrag van de waterstanden in de peilbuizen na een neerslaggebeurtenis is redelijk vergelijkbaar, dit is met name goed te zien in een inzoom op kortere periode (14-02-2021 t/m 18-04-2021) in Figuur 19. **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden..** Met name PB04 (paars) en PB05 (bruin) laten op grote lijnen redelijke vergelijkbare pieken (en dalingen) zien, waar PB05 extremere waterstandspieken heeft. Ook PB01 (zonder pieken) vertoont relatief vergelijkbaar stijging- en dalingsgedrag.



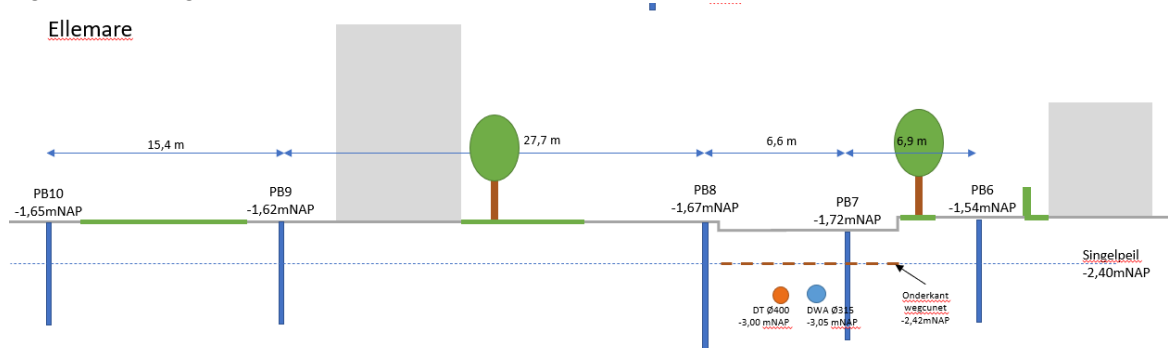
Figuur 19 Inzoom op waterstandsmetingen (14-02-2021 t/m 18-04-2021) van de peilbuisraai in de Boekenrode (y-as), neerslaggegevens per uur (2e y-as) en maaiveldhoogtes (MV) en hoogtes waterbergende weg pakket.

Er zijn een aantal perioden dat de grondwaterstanden in PB01, PB04 en PB05 uitzakken tot onder de drain. PB02 en PB03 laten tijdens deze perioden nauwelijks daling in de waterstand zien. Er vind op deze momenten dan ook infiltratie vanuit de drain naar het grondwater plaats (de drain staat niet droog). Met name vanaf 24-05-2021 t/m 18-06-2021, 07-07-2021 t/m 24-07-2021 en 09-08-2021 t/m 29-09-2021 zijn perioden met grote dalingen in grondwaterstand. De grondwaterstanden in PB01, PB04 en PB05 dalen respectievelijk 25 cm (hele zomer onder singelpeil), 32 cm (in 41 dagen) en 27 cm (in 28 dagen).

In de Boekenrode zorgt de drain ervoor dat voor het grootste deel grondwater wordt onttrokken uit het gebied. Het effect van de drainage op het grondwater is echter maar beperkt tot aan de woningen. Achter de woningen komt het grondwater soms zelfs tot op maaiveld. Er zijn geen metingen gedaan in de drainage, hierdoor is onbekend is hoeveel water de drainage jaarlijks afvoert. Dankzij de drainage en betere doorlatendheid van het wegcunet dan de natuurlijke bodem heeft waterpasserende verharding ook geen (negatief) effect op de grondwaterstanden omdat deze sneller door de drain worden afgevoerd dan geïnfiltreerd.

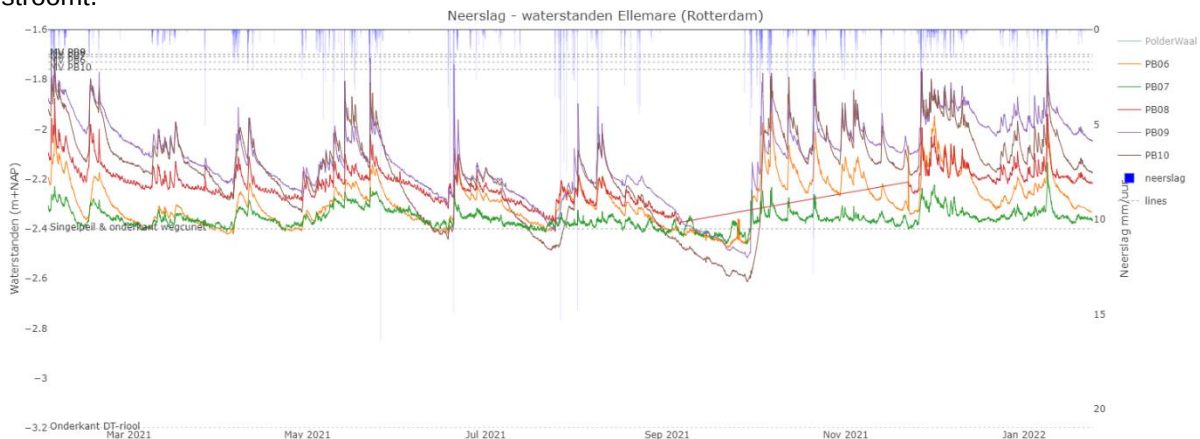
3.6 Ellemare (Rotterdam)

In Ellemare ligt hetzelfde stelsel, aangesloten verhard oppervlak en bodemopbouw als in Boekenrode, echter zonder waterpasserende verharding. Ellemare ligt op circa 200 meter van Boekenrode. De situatie is getoond in Figuur 20.



Figuur 20 Doorsnede van de peilbuisraai in en om de Ellemare (Rotterdam)

Figuur 21 toont de gemeten grondwaterstanden in Ellemare, gemeten van 01-02-2021 t/m 24-01-2022. De neerslag komt van het KNMI weerstation Zestienhoven (op ca. 10,5 km hemelsbreed). Daarnaast is het singelpeil en de maaiveldhoogtes op de peilbuizen weergegeven als horizontale lijn. Het grondwatersysteem lijkt op basis van de metingen sterk op Boekenrode. Op grotere afstand van de drainage stijgen de grondwaterstanden (PB09, paars en PB10, bruin) en worden de waterstandsfluctuaties heviger. Daarnaast staan de grondwaterstanden ook in Ellemare het grootste deel van het jaar boven het singelpeil, waardoor er een groot deel van het jaar grondwater naar de drain toe stroomt.



Figuur 21 Waterstandsmetingen van de peilbuisraai in de Ellemare (y-as), neerslaggegevens per uur (2e y-as) en maaiveldhoogtes (MV) en hoogtes waterbergende weg pakket.

De gemeten grondwaterstanden in Ellemare in het wegcunet (gemeten in PB07, groen) liggen gemiddeld circa 9 cm hoger dan Boekenrode, boven het singelpeil. Daarnaast vertonen de grondwaterstanden ook grotere (langdurige) fluctuaties dan in Boekenrode. Een verklaring hier voor kan zijn dat grondwater in de Ellemare meer blijft hangen op het dunnere (0,7m) zandpakket in de weg dan in Boekenrode (1,2m).

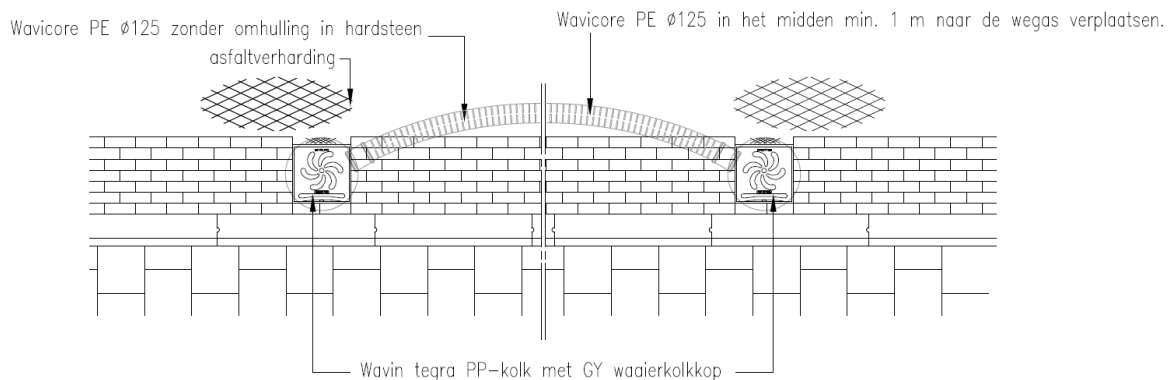
In de zomer zakt het grondwater in alle peilbuizen voor korte tijd uit tot onder de drain. Dit is gebeurd van 9-09-2021 t/m 29-09-2021. Toch zakt het grondwater hier minder ver, minder vaak en minder lang uit dan het grondwater in Boekenrode.

In de Ellemare zorgt de drain ervoor dat voor het grootste deel grondwater wordt onttrokken uit het gebied, vergelijkbaar met de Boekenrode. Door het dunnere cunet in de Ellemare ten opzichte van Boekenrode treden rondom de drain wel meer grondwaterstandsschommelingen plaats.



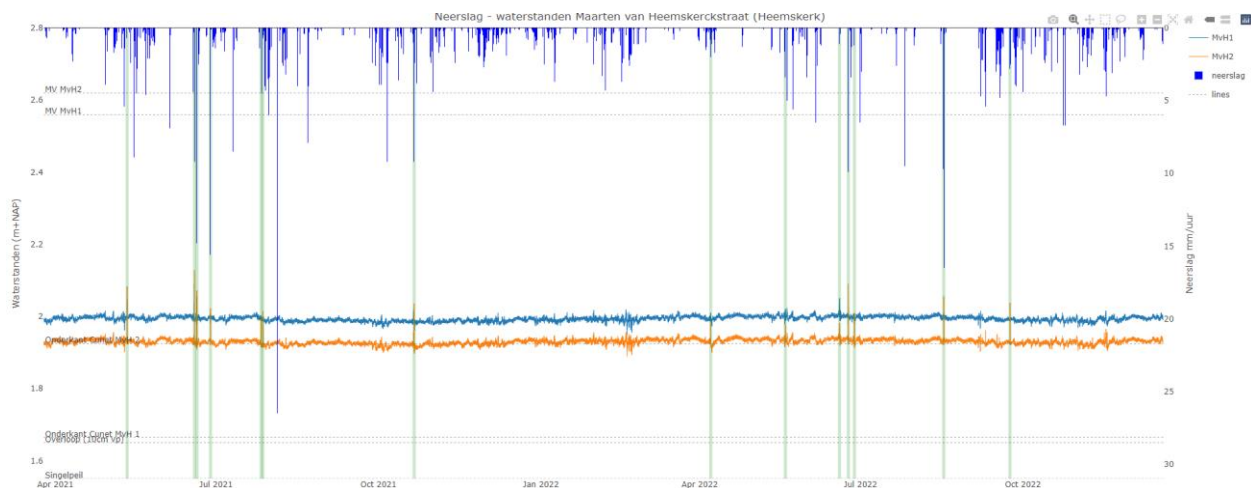
3.7 Maerten van Heemskerckstraat (Heemskerk)

In de Maerten van Heemskerckstraat is een Wavicore drain aanwezig in een hardsteenpakket (8/32) van circa 50 cm dik. In totaal kan circa 6.752 m² verhard en onverhard oppervlak van daken, wegen, stoepen en aangelegde tuinen via de kolken in het pakket afwateren. De kolken zitten op een drainageleiding aangesloten die door het waterbergende pakket lopen en onderling met elkaar verbonden zijn. In Figuur 22 wordt een bovenaanzicht van het systeem getoond. Onder het systeem ligt een drainageleiding als noodvoorziening in de toekomst als het huidige systeem onvoldoende infiltreert. Momenteel is deze drainageleiding afgesloten, en is het waterbergende wegsysteem in de Maerten van Heemskerckstraat een afgesloten systeem. Het hele pakket heeft een theoretische inhoud van circa 140 m³. De waterbergende weg staat op duinzand met een goede doorlatendheid (7 m/dag). In het pakket wordt alleen aan de twee uiterste zijden van het waterbergende wegpakket gemeten. Deze divers meten daarnaast alleen tot onderin het pakket. De grondwaterstanden in de Maerten van Heemskerckstraat zijn diep (1,48m-maaiveld). Grondwater zal door de diepte onder het WBW pakket naar verwachting geen invloed hebben op het functioneren van het pakket.



Figuur 22 Bovenaanzicht van het Wavicore systeem met een drainage leiding en kolken in een hardsteenpakket zoals aangelegd in de Maerten van Heemskerckstraat.

Figuur 23 toont de waterstanden onderin het wegcunet van de Maerten van Heemskerckstraat, gemeten tussen 25-03-2021 en 19-12-2022. De neerslag is gemeten op het KNMI station aan Wijk aan Zee (3,5 km afstand hemelsbreed). Opvallend is dat MvH1 (blauw) zich hoger bevindt dan MvH2 (oranje). Dit komt waarschijnlijk omdat het systeem met een klein afschot in de lengterichting is aangelegd. Opvallend zijn de pieken die te zien zijn, gearceerd met de groene balkjes. Dit zijn snelle waterstandstijgingen, die ook relatief snel weer uitzakken.



Figuur 23 Waterstandsmetingen in de Maarten van Heemskerckstraat (y-as), neerslaggegevens per uur (2e y-as) en maaiveldhoogtes (MV) en hoogtes waterbergende weg pakket.

Op basis van de korte pieken en de gemeten neerslag kan een inschatting worden gemaakt van de stijgsnelheid, daalsnelheid, de duur de vulling en hoe ver het pakket zich vult. Voor deze analyse is met name diver MvH2 interessant, omdat deze het laagst ligt en daardoor vaker bij (kleinere) buien reageert. Opvallend is wel dat MvH1 niet altijd waterstandstijgingen laat zien, terwijl bij MvH2 de waterstand tot boven het niveau van MvH1 stijgt (met name de piek). Dit kan er op wijzen dat MvH1 in werkelijkheid nog hoger ligt, of dat water in het bergende pakket richting MvH2 stroomt en daarbij zo snel naar de ondergrond infiltreert dat er nauwelijks waterstandsstijgingen in MvH1 kunnen worden gemeten.

Op basis van de peilbuisgegevens zijn 14 neerslaggebeurtenissen geselecteerd. Tijdens deze gebeurtenissen laat MvH2 echt duidelijke “pieken” zien. Omdat het neerslagstation op 4 km afstand staat kan er helaas geen goede vergelijking met neerslag gemaakt worden (zoals reactiesnelheid van het pakket of een simpele waterbalans van neerslag, infiltratie en afstroming). Een vergelijking met grondwaterstanden in de omgeving tonen wel aan dat gedurende de meetreeks de grondwaterstand ver onder het pakket >1,5m staat.

Water in het bergend pakket van de Maarten van Heemskerckstraat kan alleen door infiltratie kan verdwijnen uit het pakket. Gemiddeld vult het pakket zich tot 14 cm, met de maximale vulling waargenomen op 24 juni 2022 met een 17 cm stijging. Gemiddeld vult het pakket zich dus maximaal tot 44 m³.¹ De gemiddelde snelheid van vulling (op basis van 8 neerslaggebeurtenissen) is 326,6 mm/uur, en de gemiddelde daling is 192 mm/uur. Daarmee is de waterbergende weg gemiddeld in iets meer dan een uur leeg.

¹ Aangenomen porositeit van 40% (hardsteen 8/32), een gelijk afschot van 6,5cm/155m in de lengterichting van het pakket, een wegbreedte van 4,5m en een gelijkmatige infiltratie over het hele pakket.

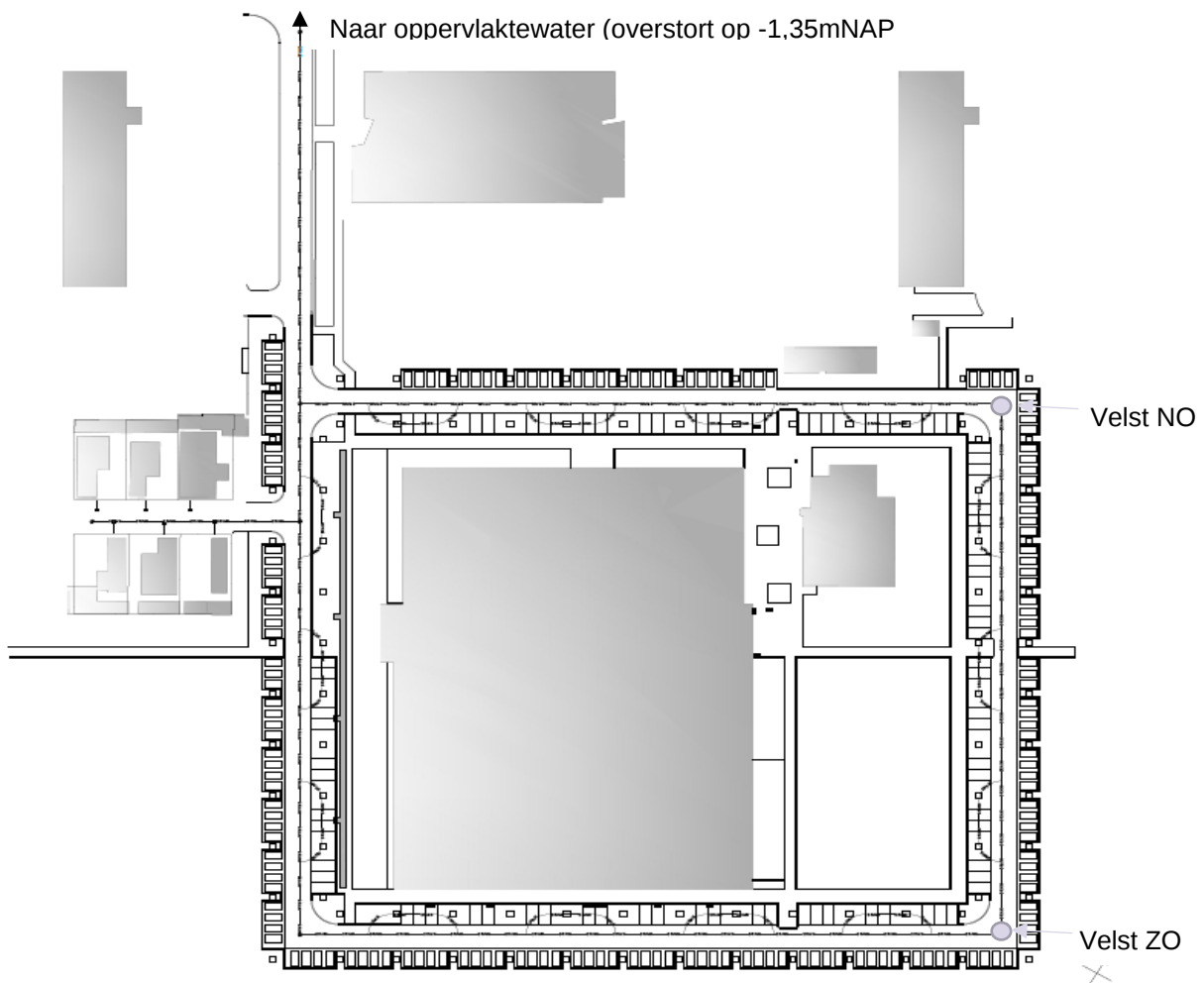
Opvallend is dat de waterstanden in het systeem niet altijd stijgen met een neerslaggebeurtenis. Er zijn veel gemeten buien waarbij in het pakket geen stijging in waterstand wordt waargenomen. Dit kan worden verklaard door gedeeltelijke verdamping van neerslag voor inloop in het pakket, waardoor niet alle neerslag in de berging terecht komt. Daarnaast infiltreert water in het bergend pakket vermoedelijk zo snel dat het niet tot een meetbare stijging in het pakket leidt. Ook is het mogelijk dat gemeten buien in Wijk aan Zee niet in Maerten van Heemskerckstraat zijn gevallen.

Op basis van de metingen in de Maerten van Heemskerckstraat kan worden geconcludeerd dat het systeem goed functioneert. Er is geen enkele keer sprake geweest van water op maaiveld omdat de berging volledig is gevuld, en water uit de berging is na enkele uren al weer geïnfiltreerd naar de ondergrond. Met langere metingen kan worden bepaald of het systeem op dezelfde manier blijft functioneren.

Door de goede doorlatendheid is in de Maerten van Heemskerckstraat gedurende de gehele meetperiode geen wateroverlast op straat als gevolg van volledige vulling van het bergend pakket vastgesteld. Neerslag kan in de berging zo snel infiltreren, dat niet alle buien door de diver worden geregistreerd. Als er wel waterstandstijging plaatvindt in de berging, is de berging ook binnen een aantal uur. Aanvullend op de metingen in het bergend pakket kunnen er nog diepere grondwaterstanden onder de WBW worden gemeten, om het effect van de aanvullende infiltratie op de grondwaterstanden vast te kunnen stellen.

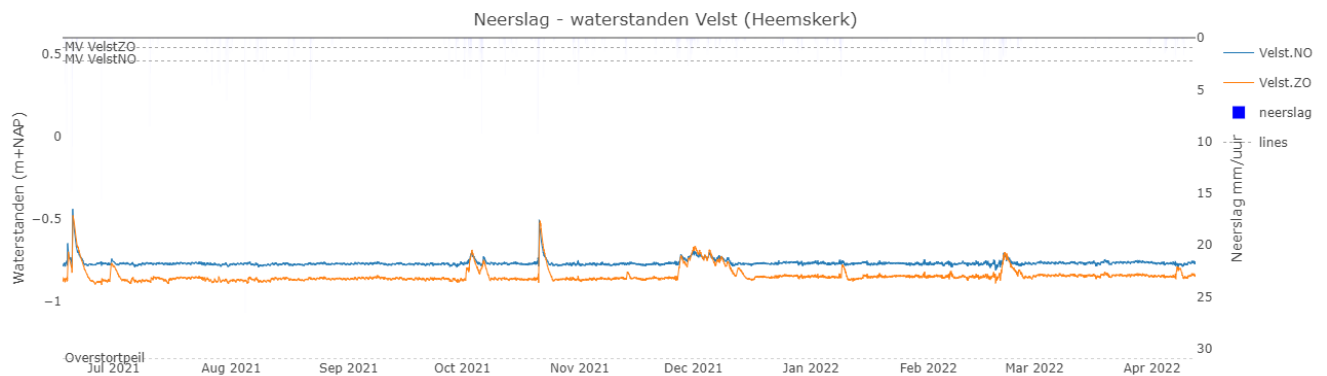
3.8 Velst (Heemskerk)

In Velst in is een hardsteenpakket (circa 45 cm dik) aangelegd met onder de weg een drainagestelsel. Het totale pakket kan theoretisch 1172,5 m³ bergen dankzij een berging onder de weg en de aanliggende parkeervakken. Op het pakket is circa 23.897m² verharding aangesloten, afkomstig van daken, wegooppervlak en parkeervakken. De drainageleiding die onder de gehele lengte van de weg ligt en de parkeervakken (Ø125) kan uitstromen op oppervlaktewater, met een overstortconstructie op -1,35mNAP. Het oppervlaktewaterpeil ligt op -1,45mNAP. Water kan via de waterpasserende verharding of via kolken in het hardsteenpakket terecht komen of in de permavoids terecht komen. Water kan daarna infiltreren naar de ondergrond, of via een uitstroombleiding naar het oppervlaktewater stromen. De ondergrond onder het pakket bestaat uit klei (zwak siltig) tot 1,50m-mv, op zand. De gemeten grondwaterstanden in het gebied liggen hoog, variërend tussen -1,5mNAP en -0,1mNAP (respectievelijk -1,1m-maaiveld tot boven maaiveld).



Figuur 24 Bovenaanzicht van de waterbergende weg in de Velst met drainageleiding onder de weg en de parkeervakken, met de meetpunten Velst NO en Velst ZO in de drainageput

In Velst is op twee locaties gemeten, namelijk de Velst NO (blauw) en Velst ZO (oranje). Er is gemeten van 17-06-2021 t/m 12-04-2022, zoals te zien in Figuur 25. De neerslag komt van het KNMI-station op Wijk aan Zee (5,6km) worden deze metingen en de neerslaggegevens van Schiphol getoond. Daarnaast worden in de figuur de maaiveldhoogtes bij de meetpunten getoond als horizontale lijn. Daarnaast zijn er diepere grondwaterstandsmetingen van 17-06-2021 t/m 25-11-2021 beschikbaar (niet in figuur 25 afgebeeld).



Figuur 25 Waterstandsmetingen in de Velst (y-as), neerslaggegevens per uur (2e y-as) en maaiveldhoogtes (MV) en hoogtes waterbergende weg pakket.

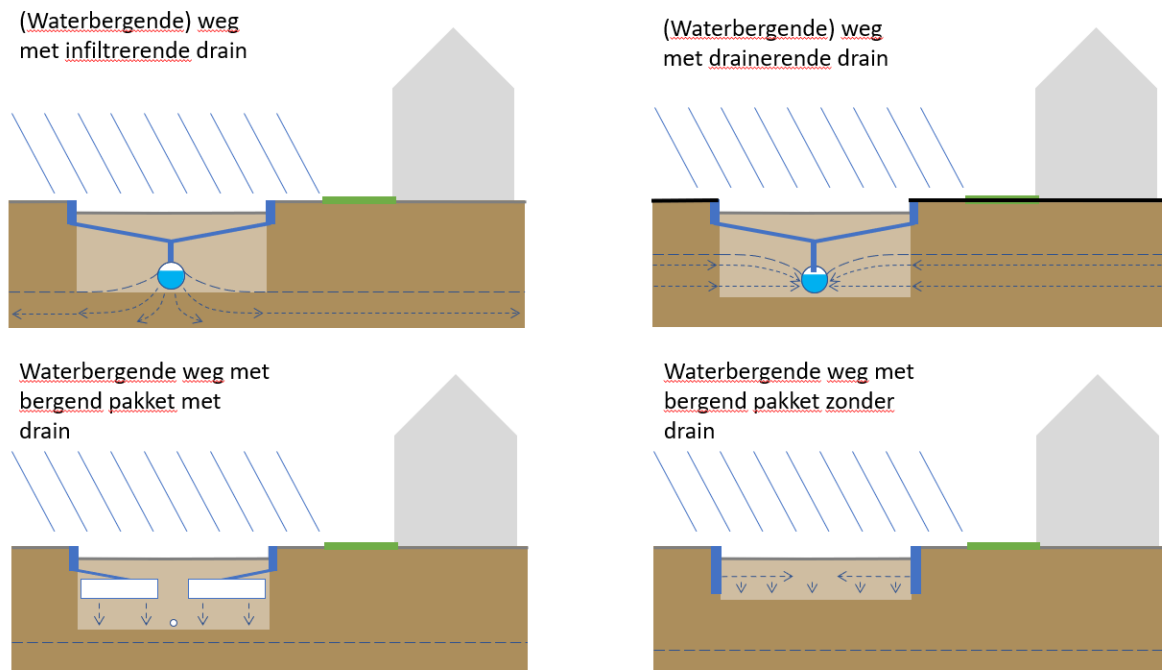
De waterstanden onderin het pakket laten over het algemeen weinig fluctuaties zien. Het verschil in hoogte (mNAP) tussen de diver in de Velst ZO (oranje) en Velst NO (blauw) is circa 9 cm. Er is in de gehele periode ook geen enkel moment geweest dat het water in het pakket tot vlak onder of boven maaiveld is gemeten. De maximale gemeten waterstand in Velst ZO was -0,48mNAP (0,42m waterstandsstijging). Slechts op enkele momenten zijn waterstandsstijgingen in het pakket te zien. Omdat niet van de gehele meetduur grondwaterstanden van onder het waterbergende pakket bekend zijn, is niet met zekerheid vast te stellen of de waterstandsstijging in het pakket alleen door neerslag komt, of ook door stijging van grondwater tot in het pakket. Zo zijn de pieken eind juni 2021 met zekerheid deels toe te wijzen aan grondwater. De diepere grondwaterstandsmetingen laten een stijging tot 0,30m-mv zien (-0,6mNAP).

Binnen de Velst worden tijdens de hele meetreeks geen waterstanden op straat gemeten. Het pakket ledigt zich vrij snel na een regenbui. Vermoedelijk is een deel van de waterstandsstijgingen in het pakket toe te wijzen aan grondwaterstandstijgingen. Om een beter beeld te krijgen van de effect van de berging op het grondwater zou aanvullend het debiet in de uitstroompunten kunnen worden gemeten, en de diepere grondwaterstanden onder het pakket.

4. Discussie

4.1 Introductie

De in totaal 8 onderzochte waterbergende wegen zijn allen zeer verschillend. Zo zijn er niet alleen verschillen in ontwerpuitgangspunten, opbouw, gebruikte materialen en toegepaste (doorlatende) verharding. Ook zitten er verschillen in soort ondergrond en omgeving van de waterbergende weg. In relatie tot hun invloed op grondwater kunnen deze waterbergende wegen globaal in vier categorieën worden onderverdeeld, zoals afgebeeld in Figuur 26.



Figuur 26 Categorisering van de waterbergende wegen

Aan de hand van deze categorieën kunnen overeenkomstige conclusies worden getrokken aan de hand van de analyses uitgevoerd als onderdeel van dit project.

4.2 Overkoepelende resultaten

4.2.1 WBW met infiltrerende drain

Tot de categorie (waterbergende) weg met infiltrerende drain behoort alleen de Solferinostraat (Diemen). Deze waterbergende weg is opgebouwd uit een standaard zandpakket. De waterstand in dit pakket wordt gereguleerd door een drain, al dan niet met waterpasserende verharding. De weg in de Solferinostraat heeft een hoge infiltratiecapaciteit, er is sprake van wegzijging naar het eerste watervoerend pakket en de drain voert het grootste deel van het jaar water af naar de ondergrond vanuit het oppervlaktewater. De metingen tot op 30m afstand van de drain laten een grondwaterstand zien tot die stijgt toe het oppervlaktewaterpeil. In dit ontwerp zal de aanleg van de waterbergende weg geen wateroverlast tot gevolg hebben. Bij stijging van het grondwater tot boven de onderkant van de drain zal deze grondwater gaan afvoeren.

In dit type ontwerp is de aanleghoogte van de drain, afstand tussen drains, het peil van het oppervlaktewater waar op geloosd gaat worden en de mate van wegzijging in het gebied leidend in het effect van de waterbergende weg op grondwater in de omgeving. Het functioneren van de waterbergende weg wordt niet belemmerd door de aanbreng van aanvullende (waterbergende) constructies zoals bergingskratten en geotextiel, die mogelijk kunnen verstoppert of beschadigd kunnen raken.

Dit type waterbergende weg komt in Nederland voor in gebieden met een hogere wegzijging dan grondwateraanvulling van neerslag of waar de oppervlaktewaterstanden hoger zijn dan de grondwaterstanden. In het geval van de Solferinostraat, met een goede en relatief homogene doorlatendheid van de bodem (K-waarde >5m/dag), steeg het grondwater rond woningen niet tot boven de 1,04m-mv (DIE089). De verwachting is niet dat door het aanleggen van de waterbergende weg grondwater over- of onderlast wordt ervaren, omdat de grondwaterstanden het verst van de drain (DIE087) relatief constante waarden laat zien.

De waterbalans bij deze vorm van waterbergende weg is sterk afhankelijk van de wegzijging uit het desbetreffende gebied. Omdat de mate van de relatief sterke wegzijging uit het gebied onbekend is, kan er moeilijk worden vastgesteld in hoeverre neerslag en infiltratie invloed hebben op de stabiliteit van de grondwaterstanden, en hoeveel water er jaarlijks infiltreert vanuit de drainage.

4.2.2 WBW met drainerende drain

Tot de categorie waterbergende weg met drainerende drain behoren de Boekenrode (Rotterdam) en Ellemare (Rotterdam). De drainage staat hier permanent onder water, en de omliggende grondwaterstanden zijn het grootste deel van het jaar hoger dan het oppervlaktewaterpeil. Hierdoor zal de drain het grootste deel van het jaar (>80% van de dagen) grondwater afvoeren. Wanneer de grondwaterstanden onder het oppervlaktewaterpeil uitzakken, met name in de zomer, zal de drain gaan infiltreren. Deze systemen liggen tevens in een slecht doorlatende grond, waardoor infiltratie uit de WBW naar de in de bodem bemoeilijkt wordt. Het effect van de slecht doorlatende bodem op de grondwaterstanden is goed te zien in Ellemare, waarbij de grondwaterstanden ook in het wegcunet van de waterbergende weg op de kleibodem blijven hangen.

Het effect van de waterbergende weg op de geo-hydrologie wordt ook in deze situatie hoofdzakelijk door de drain bepaald. Afgezien van het verschil in gebruikt materiaal onder de waterbergende weg (zand) ten opzichte van de bodem (klei), functioneert deze waterbergende weg in principe hetzelfde een gewone weg met drainage. Ook hier zijn geen aanvullende ondergrondse systemen aanwezig, zoals alternatieve poreuze materialen en geotextielen, die kunnen verstoppert. In dit geval zorgt de drainage voor een verlaging van de grondwaterstanden in de omgeving. Dit effect is echter door de slecht doorlatende bodems voor maar beperkt. De invloedssfeer van drainage is sterk afhankelijk van de diepte van de drainage, hoeveelheid neerslag, de tussenperiodes tussen neerslaggebeurtenissen en de doorlatendheid van de bodem (Perrochet & Musy, 1992).

4.2.3 WBW met bergend pakket met drain

Tot de categorie waterbergende weg met bergend pakket, met drain horen het Julianapark (Zoeterwoude), Margrietstraat (Zoeterwoude), Frans Halslaan (Amstelveen) en Velst (Heemskerk). Deze pakketten hebben een funderingslaag (meestal bestaande uit hardsteen) en daarnaast een extra bergend pakket (Rockwool of Bufferblock). Het stelsel kan via een drainage direct of via een overstort afwateren

De Waterbergende Weg: Lokale effecten hydrologie (WP2)

Faculteit Techniek – version 1.0

© 2020 Copyright Hogeschool Amsterdam

op oppervlaktewater of het hemelwaterstelsel. Dit type waterbergende weg wordt toegepast in gebieden met hoge grondwaterstanden en slechte bodemdoorlatendheid, en in gebieden met lage grondwaterstanden en hoge bodemdoorlatendheid.

Dit pakket verschilt met eerder genoemde waterbergende wegen met een drain in een zandcunet dat er nog aanvullende systemen worden toegepast, zoals bufferblocks of rockwool. Deze bergende pakketten hebben vaak een grotere porositeit, variërend tussen 30 – 100% dan een standaard zandpakket van 38 – 44 % (grondwaterformules.nl, z.d.). Wel zijn er vaak aanvullende maatregelen nodig om het holle pakket te scheiden van de ondergrond, om vervuiling (en verstoppingen) van het holle pakket te voorkomen.

Doordat het waterbergende systeem uit meerdere onderdelen bestaat, kan het daardoor gevoeliger zijn voor schades en verstoppingen dan een standaard weg met een slechts een drain en zandig wegcunet. De grondwaterstandsmetingen in de gemeten waterbergende wegen laten echter zien dat in de meeste gevallen de drain (of het instelniveau van de overstortdrempel) en de bodemopbouw rondom de waterbergende weg leidend is in het functioneren van de waterbergende weg, en waarschijnlijk niet het disfunctioneren van enkele onderdelen van het systeem.

Bij de meeste systemen staat het bergend pakket een groot deel van het jaar droog. In alle gemeten situaties die tot deze categorie horen stijgt het grondwater naast de waterbergende weg tot boven de onderzijde van het waterbergende weg pakket. In dergelijke gevallen gaat de drainage onderin de waterbergende weg grondwater draineren. Dit gebeurt ook in situaties waarbij wel een overstortdrempel is geïnstalleerd, zoals de Margrietstraat (Zoeterwoude). De aanbreng van drainage heeft als voordeel dat bij te hoge waterstanden (vanuit neerslag of te hoge grondwaterstanden naast de waterbergende weg) de drain gaat draineren. Daardoor kan ook het grondwaterpeil in de omgeving van de waterbergende weg door de drain gestuurd worden.

Een nadeel van de aangebrachte drainage is dat water te snel uit de berging kan stromen en dat hierdoor de waterbergende weg een groot deel van zijn waterbergende verliest. Met name in de bergingen waar de drainage vrij kan lozen kan dit in zomer situaties (met een lage grondwaterstand) er toe leiden dat de waterstanden niet of nauwelijks stijgen bij neerslag. Dit is duidelijk te zien in de Frans Halslaan (Amstelveen) en vermoedelijk ook de Velst (Heemskerk), al ontbreken hier corresponderende metingen over de diepere grondwaterstanden. Wanneer een waterbergende weg puur op piekwaterberging is ontworpen (en minder op infiltratie) kan dit er alsnog toe leiden dat water maar in kleine mate de piekneerslag kan afvlakken, en dat water snel in oppervlaktewater of het benedenstroomse hemelwaterstelsel terecht komt.

Ook kan het zijn dat omdat de waterberging te snel leegstroomt niet of nauwelijks water kan infiltreren naar de ondergrond. Dit is zeker het geval bij drainage zonder overstortdrempel, maar ook wanneer wel een overstortdrempel is toegepast. Eerdere schattingen van bijvoorbeeld Margrietstraat of het Julianapark geven een schatting van 0,1 tot 1 mm/uur infiltratie naar ondergrond. In het geval van de Margrietstraat is er vermoedelijk te weinig verhard oppervlak aangesloten voor de hoeveelheid berging, waardoor er weinig waterstandsfluctuaties in de berging worden gemeten. In het Julianapark valt de berging een deel van het jaar droog. Hierdoor kunnen pieken wel worden geborgen. Toch is te zien dat ook hier de berging snel vol raakt, en ook gedurende het grootste deel van het jaar grotendeels gevuld is. Circa 78% van de neerslag kan in theorie hier echter wel infiltreren, maar vermoedelijk wordt het water

elders door een lekke riolering of een drain onttrokken. Het water in de berging stijgt en daalt gelijk met de gemeten grondwaterstanden mee, waardoor het water in de berging waarschijnlijk grondwaterstanden wordt gemeten, en niet zozeer wordt geremd in uitwisseling met de ondergrond.

4.2.4 WBW met bergend pakket zonder drain

Tot de categorie waterbergende weg zonder drain hoort de Maerten van Heemskerckstraat (Heemskerk). Dit pakket bevindt zich op hoge zandgrond met goede doorlatendheid en lage grondwaterstanden. Water uit de berging kan snel uit de berging de ondergrond in infiltreren zonder dat het tot problemen met grondwateroverlast tot gevolg heeft.

Omdat er geen functionerende drain in het pakket ligt kan 100% van de neerslag die het waterbergend pakket bereikt infiltreren. Metingen tonen aan dat dankzij de goede doorlatendheid van de bodem (zand) de waterstanden in de berging in de Maerten van Heemskerckstraat niet tot zo ver zijn gestegen dat wateroverlast op straat ontstaat door volledige vulling van de berging, en dat de berging in een paar uur leeg is.

4.3 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

In dit rapport is een eerste aanzet gedaan voor onderzoek naar de effecten van waterbergende wegen op grondwater en oppervlaktewater. Hiervoor zijn een aantal verschillende waterbergende wegen middels een peilbuisraai gemeten. Door middel van de grondwaterstandsmetingen zijn unieke nieuwe inzichten opgedaan over grondwaterstanden in en rond waterbergende wegen. Ook kan op basis van de huidige metingen aanvullende metingen worden voorgesteld die in vervolgonderzoek noodzakelijk of wenselijk zijn om meer informatie over de werking van waterbergende wegen en hun invloed op grondwaterstanden te verschaffen. Deze aanbevelingen worden in onderstaand stuk uiteen gezet.

4.3.1 Langer meten

Met de huidige meetduur (<2 jaar) is het nog lastig om voor de meeste waterbergende wegen conclusies over geohydrologische verschijnselen te trekken (Ritzema, 2006). Tijdens de meetreeks zijn niet altijd geen extreme neerslagsituaties vastgelegd, maar konden met name ook de seizoensgebonden effecten van waterbergende wegen (nog) niet goed worden bepaald. Voor vervolgonderzoek is de aanbeveling om daarom langer te meten. Door langer te meten kan ook worden onderzocht hoe goed de waterbergende weg door de tijd heen blijft functioneren.

4.3.2 Aanvullende analyses op basis van tijdsserie-analyses

Door langer te meten kunnen tijdserie-analyses worden gedaan, zoals de Water Table Fluctuation (WTF) method (Healy en Cook, 2002), Episodic Master Recession (Nimmo en Perkins, 2018) of transfer function noise (TFN) models (Collenteur et al., 2021). Bij deze methoden worden statistische modellen gebruikt om een relatie tussen gemeten neerslag, verdamping en eventuele onttrekkingen op waterstandsfluctuaties te omschrijven. Hiermee kan bijvoorbeeld de hoeveelheid van grondwateraanvulling als gevolg van neerslag en het (verwachte) gevolg van een onttrekking worden bepaald (Collenteur et al., 2019). Voor deze methoden moeten echter wel parameters worden gekalibreerd. Uit een eerste analyse met een aantal waterstandsmetingen blijkt dat op basis van huidige metingen is gebleken dat dit nog niet mogelijk was.

Tijdsserie-analyses zijn een aanvulling op de in dit onderzoek gebruikte, handmatige selectie van waterstandsfluctuaties. Bij deze handmatige selectie is geen rekening gehouden met de effecten van de omgeving op de mate van stijging van grondwater bij neerslag, zoals verharding of onttrekkingen. Door middel van tijdsserie-analyses kan hiervoor echter wel worden verdisconteerd. Onder andere TFN models kunnen gebruikt worden om een zogenoemde unit-hydrograph op te stellen. Dit is een uniforme waterstandsfluctuatie bij een vastgestelde neerslaggebeurtenis, van bijvoorbeeld 1 mm. Hiermee kunnen verschillende peilbuizen met elkaar vergeleken worden. Daarnaast kunnen tijdsserie-analyses ook grondwatermodellering ondersteunen door ontbrekende metingen aan te vullen of om grondwatermodellen mee te parameteriseren (Bakker en Schaars, 2019; Koïta et al., 2017). Tijdsserie-analyses hebben als voordeel dat er minder input of minder parameters nodig zijn om iets te zeggen over grondwater dan fysische modellen. Tijdsserie-analyses kunnen daarom een goed alternatief of aanvulling zijn op de fysische grondwatermodellen zijn (Collenteur et al., 2021).

Veel van de hierboven genoemde methoden zijn echter nog niet altijd direct toepasbaar in de stad en zijn daarom niet in dit onderzoek toegepast. Er zijn veel onttrekkingen aanwezig in de stad waarvan de locatie en het debiet niet altijd bekend is, zoals lekke riolering of drainage op particulier terrein (Attard et al., 2015; Schirmer, Leschik en Musolff, 2013). Neerslag kan op veel verschillende manieren en met verschillende snelheden de ondergrond bereiken. De ruimtelijke spreiding van infiltratie in de stad is daarnaast ook sterk verschillend. De meeste methoden zijn ontwikkeld voor “natuurlijke” situaties, met minimale invloed van door mensen aangebrachte (grond)waterstandsbeheersing. In een vervolgonderzoek kunnen de eerder genoemde methoden worden aangepast, zodat ze ook in de stad beter geschikt zijn.

4.3.3 Aanvullende metingen

Naast een langere grondwaterstandsmeting is ook wenselijk een debietmeter in de drainage te plaatsen die in verbinding staat met een oppervlaktewatersysteem of een HWA-stelsel, bij voorkeur op alle uitlaten van de drainage. Samen met de grondwaterstandsmetingen kan worden bepaald hoeveel water stroomt er uit het systeem stroomt en hoeveel water er infiltreert vanuit de drainage. Met deze metingen kan ook een model worden gekalibreerd. Dit is met name van belang voor de systemen in Diemen, Rotterdam, Zoeterwoude en Heemskerk.

Ook moet er op aanvullende locaties direct naast een waterbergende weg worden gemeten. Waterbergende wegen zijn vaak systemen waarbij de hele straat (of zelfs een aantal straten) met elkaar verbonden is. Met name bij Zoeterwoude is gebleken dat door de grote lokale verschillen in grondwaterstand de bron van het water in de waterbergende weg niet altijd met zekerheid vast te stellen is. Deze metingen kunnen verder worden uitgebreid door referentiemetingen in wegen te plaatsen waar geen waterbergend systeem is toegepast, om ook de natuurlijke situatie van het gebied vast te stellen. Bij de meting in Diemen bijvoorbeeld heeft deze referentiemeting tot waardevolle nieuwe inzichten geleid. Eventueel kan een aanvullende diepe boring in het eerste watervoerend pakket gebruikt worden om ook kwel en wegzijging in het gebied vast te stellen. Hiermee kunnen tijdsserie-analyses en modellen worden verbeterd.

Als laatste is het plaatsen van een neerslagstation nabij de metingen een goede aanvulling op eerdere metingen. Met name piekbuien kunnen erg lokaal plaatsvinden. Veel neerslagstations hebben incomplete metingen (WOW-KNMI), zijn niet gekalibreerd (WOW-KNMI) of staan ver weg van de

waterbergende weg. Hierdoor is het moeilijk waterstandsstijgingen aan een individuele bui te koppelen. Met goede metingen van een neerslagstation in de buurt van de projectlocatie kunnen ook de tijdsserie analyses worden verbeterd.

4.3.4 Aanbevelingen voor de praktijk

De eerste meetresultaten laten zien dat de meeste waterbergende wegen functioneren zoals ontworpen. De waterbergende wegen hebben nergens gedurende de meetreeks tot (grond)wateroverlast geleidt. In bijna alle waterbergende blijkt de drainage de belangrijkste factor te zijn in het functioneren van de waterbergende weg en het effect van de waterbergende weg op grondwater in de omgeving. Hoewel de meetreeks te kort is gebleken om goede conclusies over hydrologie te trekken, lijken veel waterbergende wegen al snel leeg te lopen door de drainage. In de meeste wegen blijken waterstandsstijgingen niet direct het gevolg te zijn van neerslag, maar door stijgend grondwater tot in de berging. Het gevolg hiervan is dat de berging gedurende perioden met hoge grondwaterstanden (gedeeltelijk) gevuld is.

Aanbevelingen voor de gemeente zijn:

- Vooral door te gaan met meten en monitoren en daarbij - waar mogelijk - ook te investeringen in een aantal metingen/instrumenten die de aanvullende variabelen van de waterbalans kunnen invullen. E.g. debietmeters en/of een neerslagmeter nabij. Ook in te zetten op nulmetingen voorafgaand aan installatie van WBW's of op vergelijkbare plaatsen. Zodat na afloop functioneren op een goede wijze bepaald kan worden. Ook voor nieuwe wegen is het van belang om het liefste voor, maar met name na de aanleg van de waterbergende weg is het belangrijk te monitoren om te controleren of systeem ook daadwerkelijke functioneert zoals beoogd.
- Per WBW-locatie aan de voorkant goed te bedenken welk doel de weg dient (bergen, tijdelijk bufferen, aanvullende infiltratie, etc.) en hierop het systeem te ontwerpen (e.g. kijkend naar instelhoogte van drains en overstorten). Waterbergende wegen blijven maatwerk, waarbij de bodemopbouw, grondwaterstanden en mogelijkheid tot overstorten bepalend zijn in het ontwerp. In gebieden met in de winter hoge grondwaterstanden die in de zomer ver kunnen uitzakken kan bijvoorbeeld gekozen worden voor een (geknepen) overstort met drain, zodat piekbuien worden gedempt en extra infiltratie naar de ondergrond worden gerealiseerd, maar de hoge grondwaterstanden in de winter niet tot grondwateroverlast in de omgeving leiden.
- Het effect van waterbergende wegen op de grondwaterstand in de omgeving wordt het meest bepaald door het wel of niet aanleggen van drainage en welke overstordrempel daar op is toegepast. Met name in de kleine omgevingen is het effect van de waterbergende weg op de omgeving beperkt. Meestal voert de drainage het water uit de waterbergende weg zo snel af dat infiltratie niet of nauwelijks plaatsvindt.

5. Conclusie

Waterbergende wegen hebben de potentie om droogte tegen te gaan door extra waterinfiltratie te stimuleren. Daarnaast kunnen waterbergende wegen piekneerslag bufferen, waardoor oppervlaktewater en riolering worden ontlast. Onbekend is echter nog hoe goed deze waterbergende wegen werken en wat de effecten van waterbergende wegen op het grondwater zijn.

De vraag die – als onderdeel van het SIA RAAK Publiek project ‘De Waterbergende Weg’ dan ook is gesteld is:

Hoe functioneren waterbergende wegen in de praktijk met oog op de (gewenste) grondwaterhydrologie en kunnen we op basis van gedane inzichten het ontwerp van waterbergende wegen verbeteren?

In het kader van dit onderzoek zijn in Diemen, Zoeterwoude, Rotterdam, Amstelveen en Heemskerk 8 peilbuisraaien naast waterbergende wegen geplaatst om het grondwater te kunnen meten. Deze metingen zijn vervolgens vergeleken met neerslagdata van het KNMI en lokale stations om het grondwatergedrag te kunnen verklaren, en eventuele uitspraken te kunnen doen over het functioneren van de waterbergende wegen.

Op basis van de metingen kunnen 4 soorten waterbergende wegen worden gecategoriseerd. De wegen hebben veelal wisselende ontwerpprincipes (bergen, bufferen, infiltreren) die samenhangen met aanwezige bodemopbouw en grondwaterstanden. De 4 categorieën van wegen zijn:

- Waterbergende weg met infiltrerende drain (Diemen). Deze waterbergende weg infiltreert het grootste deel van het jaar oppervlaktewater naar de ondergrond door de grote aanwezigheid van kwel. Het systeem is simpel, waardoor weinig “schakels” in het waterbergende systeem het functioneren kunnen belemmeren, en voorkomt droogte in droge periodes. Deze vorm van waterbergende weg bergt echter ook minder en komt alleen voor in gebieden met veel kwel.
- Waterbergende wegen met drainerende drain (Rotterdam). Deze waterbergende wegen zijn net als de waterbergende wegen met infiltrerende drain simpel, met enkel een drainage op oppervlaktewaterpeil en een wegcunet bestaande uit zand. De omgeving van deze waterbergende wegen bestaat uit klei, en er zijn voor het grootste deel van het jaar hoge grondwaterstanden. Deze waterbergende weg onttrekt voornamelijk water daardoor, en infiltratie vanuit de weg naar de bodem is minimaal.
- De waterbergende weg met drain en bergend pakket is het meest complexe systeem van de onderzochte categorieën (Zoeterwoude, Amstelveen, Heemskerk). In dit systeem zitten veel schakels die er voor kunnen zorgen dat het systeem minder goed functioneert, maar door het bergend pakket is er in de waterbergende weg meer berging mogelijk. Door middel van een overstortdrempel kan er op worden gestuurd dat het systeem meer kan bergen. De metingen uit dit systeem laten echter zien dat geen van de wegen nog echt goed aanvullend water bergen. De wegen zonder drempel (Amstelveen) voeren over het algemeen het water snel af en de metingen zijn te kort om echte neerslagpieken waar te nemen. De wegen met overstortdrempel hebben of een te lage drempel gecombineerd met te weinig aangesloten oppervlak (Margrietstraat, Zoeterwoude), waardoor er relatief weinig water in het systeem kan worden geborgen, en de drainage al vrij snel water gaat afvoeren.
- De waterbergende weg zonder drain (Heemskerk). Dit pakket bevindt zich op zandgrond met lage grondwaterstanden, waardoor water in het pakket automatisch met voldoende snelheid kan infiltreren.

Uit de metingen blijkt dat dit pakket goed werkt. Bij neerslag is het pakket in enkele uren helemaal leeg, en infiltreert neerslag soms zo snel dat het niet eens gemeten wordt.

Dit onderzoek is een eerste aanzet geweest naar hoe waterbergende wegen onderzocht kunnen worden op invloed op grondwater, en het functioneren in de praktijk. In vervolgonderzoek moet er langer gemeten worden, om zo meer data te verzamelen over de hydrologische cycli en het functioneren van de waterbergende weg over langere termijn te kunnen bepalen. Ook moet aanvullend gekeken worden naar aanvullende grondwaterstandsmetingen bij de gehele weg, om daar het effect en invloed van grondwater op het functioneren van de waterbergende weg te bepalen. Diepere boringen zouden tevens helpen om de hoeveelheid kwel of wegzijging vast te stellen, waarmee, door deze te combineren met debietmetingen op de drainage, een waterbalans van de waterbergende weg kan worden vastgesteld. Als laatste kan met behulp van de aanvullende metingen modelstudies worden gedaan of kunnen tijdsserie-analyses worden uitgevoerd.

De metingen tonen aan dat waterbergende wegen niet tot wateroverlast leiden, en in veel gevallen zelfs droogte tegen kunnen gaan. Gemeenten moeten goed nadenken over de functie van de waterbergende weg, waarin de bodemopbouw en aanwezige grondwaterstanden leidend zijn in welke ontwerpkeuzes ze kunnen maken voor de waterbergende weg. Een waterbergende weg kan namelijk veel verschillende functies hebben, van het tijdelijk bergen van piekneerslag, tot het bevorderen van infiltratie. Voor en na aanleg van de waterbergende weg moet er gemeten worden, en deze kennis moet ook worden gedeeld met andere gemeenten om zo tot best practices te kunnen komen en te blijven leren van elkaar.

6. Bronnen

Attard, Guillaume & Winiarski, T. & Rossier, Yvan & Eisenlohr, Laurent. (2016). Review: Impact of underground structures on the flow of urban groundwater. *Hydrogeology Journal*. 24. 5-19. 10.1007/s10040-015-1317-3.

Boogaard, F., & Wentink, R. (2011). (Inter) nationale ervaringen met ondergrondse infiltratievoorzieningen: een overzicht van 20 jaar monitoring in Nederland en een aanzet tot richtlijnen. *WT-afvalwater*, 11(5), 99-113.

Collenteur, R. A., Bakker, M., Caljé, R., Klop, S. A., & Schaars, F. (2019). Pastas: open source software for the analysis of groundwater time series. *Groundwater*, 57(6), 877-885.

Collenteur, R. A., Bakker, M., Klammler, G., and Birk, S.: Estimation of groundwater recharge from groundwater levels using nonlinear transfer function noise models and comparison to lysimeter data, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 25, 2931–2949, <https://doi.org/10.5194/hess-25-2931-2021>, 2021.

Grondwaterformules. (z.d.). Effectieve porositeit. Geraadpleegd op 30-06-2023, van: <http://grondwaterformules.nl/index.php/vuistregels/ondergrond/effectieve-porositeit>

Healy, R. W. and Cook, P. G.: Using groundwater levels to estimate recharge, *Hydrogeol. J.*, 10, 91–109, <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0178-0>, 2002.

KNMI, 2015: KNMI'14-klimaatscenario's voor Nederland; Leidraad voor professionals in klimaatadaptatie, KNMI, De Bilt, 34 pp

Koïta, M., Sandwidi, W.J.P. and Dara, A.E. (2017) Recharge Estimation of Hard Rock Aquifers under Sahelian Climate Conditions Using Water Table Fluctuation: Case Study of Tougou Catchment, Burkina Faso. *Journal of Water Resource and Protection*, 9, 1428-1448.

Veldkamp, T., Schoenmaker, T., & Kluck, J. (2020). WP2: functioneren van infiltrerende verharding in de praktijk: RAAK MKB project: De infiltrerende stad.

Veldkamp, T. & van der Lee, N. (2023). Meetprotocol Waterbergende Wegen: RAAK: De Waterbergende Weg.

Nationaal Deltaprogramma, <https://www.deltaprogramma.nl/themas>, geraadpleegd op 07-06-2023

Nimmo, J.R. & K.S. Perkins. (2018). Episodic master recession evaluation of groundwater and streamflow hydrographs for water-resource estimation. *Vadose Zone J.* 17:180050. doi:10.2136/vzj2018.03.0050.

Ritzema, H. P. (1994). Subsurface flow to drains. *Drainage principles and applications*, 16, 263-304.

SWOV. (z.d.). *Weglengte – NWB*. Geraadpleegd op 08-06-2023, van: <https://theseus.swov.nl/single/?appid=09f1b022-0415-4ff5-9409-761422821953&sheet=WfmxSU&opt=currsel%2Cctxmenu>



Bijlage A Overzicht waterbergende wegen

Locatie	Straat	Systeem	Peil- buizen	Referentie- meting	Bodem- opbouw	Meetperiode	Neerslagstation	Bijzonder- heden
Zoeterwoude	Beatrixstraat	Waterdoorlatend met Rockflow	5	1 (PB10)	Klei	02-01-2022 t/m 12-11-2023	Lokaal station	
Zoeterwoude	Julianapark	Rainshells met drain	1	1 (PB06)	Klei	01-04-2022 t/m 24-03-2023	Lokaal station	
Diemen	Solferinostraat	Drain in zandpakket	5	Geen	Zand (op klei)	01-03-2022 t/m 31-12-2022	Schiphol (KNMI)	Veel wegzijging
Amstelveen	Frans Halslaan	Waterdoorlatend met bufferblocks	5	Geen	Klei (met lagen zand)	04-03-2022 t/m 14-11-2022	Amstelveen centrum (lokaal station)	
Rotterdam	Boekenrode	WPV met zandpakket (Drain)	5	Ellemare en PB05	Klei	01-02-2021 t/m 24-01-2022	Zestienhoven (KNMI)	
Rotterdam	Ellemare (geen WPV)	Drain in zandpakket	4	1 (PB10)	Klei	01-05-2018 t/m 12-11-2019	Zestienhoven (KNMI)	
Heemskerk	De Velst	Harsteenpakket met WPV	2	Geen	Klei	17-06-2021 t/m 12-04-2022	Schiphol (KNMI)	
Heemskerk	Maarten van Heemskerckstraat	(Terga)Kolken met hardsteen	2	Geen	Zand	25-03-2021 t/m 19-12-2022	Schiphol (KNMI)	