

De invloed van stedelijke gebiedskenmerken op grondwaterfluctuaties

Peilbuisanalyse naar de invloed van stedelijke gebiedskenmerken voor funderingsbehoud in Rotterdam

E.P.P. (Emmanuel) Weizenbach

De invloed van stedelijke gebiedskenmerken op grondwaterfluctuaties

Peilbuisanalyse naar de invloed van stedelijke
gebiedskenmerken voor funderingsbehoud in
Rotterdam

door

E.P.P. (Emmanuel) Weizenbach

Thesis Committee	Dr. E. (Erik) Mostert	TU Delft
	Dr. Ir. A.M.J. (Miriam) Coenders	TU Delft
	Drs. ing. J.W. (John) van Dijk	Gemeente Rotterdam

Faculteit: Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen TU Delft

Cover: Rotterdams Weerwoord, Programmakader

Voorwoord

Voor u ligt mijn masterscriptie, getiteld *De invloed van stedelijke gebiedskenmerken op grondwaterfluctuaties – Peilbuisanalyse naar de invloed van stedelijke gebiedskenmerken voor funderingsbehoud in Rotterdam*, het sluitstuk van de masteropleiding Environmental Engineering aan de Technische Universiteit Delft, met specialisatie Water Resources Engineering.

Het onderzoek is uitgevoerd in samenwerking met de Gemeente Rotterdam. In het bijzonder wil ik John van Dijk bedanken voor het mogelijk maken hiervan. Graag dank ik de collega's van het Funderingsloket voor de warme ontvangst, de fijne werksfeer en hun hulp tijdens het afstuderen. Hun praktische inzichten over funderingen in relatie tot grondwater hebben mij geholpen. Ook de sectie Geohydrologie van het Ingenieursbureau Rotterdam wil ik bedanken voor alle hulp. Hun kritische blik en ondersteuning hebben het onderzoek scherper en realistischer gemaakt.

Tot slot wil ik mijn begeleiders van de TU Delft, Erik Mostert en Miriam Coenders, hartelijk bedanken voor de begeleiding gedurende het gehele traject. De wekelijkse overleggen waren altijd prettig en gaven richting en voortgang. Dankzij hun input kon ik het onderzoek tot een goed einde brengen.

Het afronden van deze scriptie markeert het einde van een intensieve en leerzame periode. Ik kijk ernaar uit om in dit vakgebied verder te gaan en mijn kennis in de praktijk toe te passen.

*E.P.P. (Emmanuel) Weizenbach
Delft, oktober 2025*

Samenvatting

Deze masterthesis onderzoekt hoe stedelijke gebiedskenmerken het grondwatergedrag beïnvloeden en welke implicaties dit heeft voor risico's op funderingsschade, maaiveldddaling en wateroverlast. De meegenomen gebiedskenmerken zijn: verharding, boomdekking, riool, DIT, drainage, drooglegging, afstand tot oppervlaktewater en grondsoort. Voor de analyse zijn dagelijkse tijdreeksen van honderden peilbuizen van de gemeente Rotterdam geanalyseerd. Voor elke peilbuis is de amplitude bepaald op basis van de seizoenskarakteristieken (GHG en GLG), daarnaast is ook de mediane grondwaterstand bepaald. Genoemde karakteristieken zijn gerelateerd aan klassen van gebiedskenmerken. Daarmee is getoetst naar de samenhang tussen de amplitude en gebiedskenmerken en aangevuld met een niveau-analyse ten opzichte van maaiveld. De aanpak is stadsbreed toegepast en verdiept met een wijkspecifieke uitwerking om het effect van de individuele gebiedskenmerken beter te analyseren.

Drie kenmerken hangen consequent samen met kleinere fluctuaties van de grondwaterstand: verharding, drainage en DIT-systemen. Dit beeld komt naar voren in de stadsbrede analyse en wordt in de wijkspecifieke analyse bevestigd. Drooglegging blijkt vooral het niveau ten opzichte van maaiveld te bepalen, bij grotere drooglegging ligt de mediane grondwaterstand dieper. De analyse ten opzichte van het maaiveld laat ook zien dat minder verharding zorgt voor een grotere ontwateringsdiepte. Het verschil tussen laag en hoog verharde klassen is substantieel, orde 0,3 m in de mediaan.

Andere kenmerken laten geen eenduidig verband zien. Boomdekking en riolering werken vooral lokaal, en een robuust effect van afstand tot oppervlaktewater is niet vastgesteld. De amplitude laat zich met de huidige gegevens niet betrouwbaar voorspellen op basis van alleen gebiedskenmerken, de resultaten zijn wel bruikbaar als richtinggevend kader.

Als laatste is getoetst aan de bandbreedte van de grondwaterstand, met drie criteria: ontwateringsdiepte ten opzichte van GHG, GLG ten opzichte van het niveau van het bovenste funderingshout en de mediaan ten opzichte van het singelpeil. In minder verharde, groenere gebieden ligt de GHG gemiddeld dicht bij het maaiveld, waardoor de ontwateringsdiepte vaker onder de grenswaarde van 0,80 m blijft en de kans op wateroverlast toeneemt. Voor de GLG ten opzichte van het bovenste funderingshout en de mediaan ten opzichte van het singelpeil is geen systematische samenhang met de verhardingsgraad aangetoond.

De resultaten laten zien dat verharding, drainage en DIT de belangrijkste sturingsknoppen zijn om grondwaterfluctuaties te beperken en daarmee potentieel grondwaterproblemen en funderingsrisico's te verkleinen. Deze kenmerken moeten hierom nadrukkelijk meegewogen worden bij inrichting en beheer van het stedelijk gebied en in het lokale grondwaterbeheer.

Belangrijk aandachtspunt is dat grondsoort in dit onderzoek slechts via de toplaag is meegenomen. Informatie op filterdiepte en een karakterisatie van de directe omgeving van de peilbuis ontbreken, terwijl uit de literatuur en gesprekken met de Gemeente Rotterdam juist blijkt dat deze de grondwaterstand sterk kunnen beïnvloeden.

Inhoudsopgave

Voorwoord	i
Samenvatting	ii
1 Introductie	1
1.1 Aanleiding	1
1.2 Probleemstelling	2
1.3 Doelstelling	2
1.4 Onderzoeksvragen	2
1.5 Leeswijzer	2
2 Literatuuranalyse	3
2.1 Actief Grondwaterpeilbeheer	3
2.1.1 Toepasbaarheid en effectiviteit van actief grondwaterpeilbeheer	3
2.1.2 Uitdagingen en randvoorwaarden voor actief grondwaterpeilbeheer	3
2.2 Verharding en Groen	4
2.2.1 Bomen	4
2.3 Riool	5
2.4 Klimaatverandering	5
2.5 Beleid	5
2.6 Conclusie Literatuuranalyse	6
2.7 Hypothesen	7
3 Methode	8
3.1 Data Peilbuizen	8
3.1.1 Dataverwerking	9
3.1.2 Selectie van Grondwaterreeksen	9
3.2 Tijdsreeksenmerk Peilbuizen	12
3.2.1 Maandelijkse tijdreeksen: GHG en GLG	12
3.2.2 Dagelijkse tijdreeksen: percentiële methode	13
3.3 Gebiedskenmerken Peilbuizen	13
3.3.1 Bomen	13
3.3.2 Verharding	13
3.3.3 Afstand tot oppervlaktewater	13
3.3.4 Riool, DIT en drainage	14
3.3.5 Drooglegging	14
3.3.6 Grondsoort	14
3.3.7 Bepalen Gebiedskenmerken per Peilbuis	15
3.4 Analyse Peilbuizen en Gebiedskenmerken	16
3.4.1 Algemene trend	16
3.4.2 Grondwaterniveaus ten opzichte van maaiveld	17
3.4.3 Wijkspecifiek	17
3.5 Toetsing aan Funderings- en Grondwaterrichtlijnen	19
4 Resultaten	20
4.1 Algemene Relatie	20
4.1.1 Verhard oppervlak	20
4.1.2 Boomdekking	21
4.1.3 Afstand tot oppervlaktewater	21
4.1.4 Drooglegging	22
4.1.5 Riool	22

4.1.6	DIT-Systeem	23
4.1.7	Drainage	24
4.1.8	Grondsoort	24
4.2	Grondwaterniveaus ten opzichte van maaiveld	25
4.3	Wijkspecifiek	27
4.3.1	Boomdekking	27
4.3.2	Verhardingsgraad	28
4.3.3	DIT-systeem	29
4.3.4	Riool	30
4.3.5	Drainage	31
4.4	Toetsing aan funderings- en grondwaterrichtlijnen	32
4.4.1	Toetsing grondwaterstanden per wijk	33
4.4.2	Toetsing samenhang overschrijdingen en gebiedskenmerken	36
5	Discussie	39
5.1	Verklaring van de resultaten	39
5.2	Vergelijking met literatuur	40
5.3	Beperkingen en onzekerheden	40
6	Conclusie	42
7	Aanbevelingen	45
	Referenties	46
A	Algemene Relatie - Maandelijks	48
B	Verdeling van gebiedskenmerken	53
C	Gebiedskenmerken - Wijkspecifiek	55

Lijst van figuren

3.1	Overzicht van de distributie van de freatische peilbuizen in Rotterdam: (a) westzijde en (b) centrum.	9
3.2	Visualisatie van dagelijkse peilbuizen.	10
3.3	Visualisatie van maandelijkse peilbuizen.	12
3.4	Definitie Drooglegging en Ontwateringsdiepte, overgenomen uit (Dano, 2014)	14
3.5	Visualisatie van koppeling gebiedskenmerken, in dit geval boomdekking, aan de peilbuizen.	15
3.6	Amplitudeverschillen per afstandsklasse	16
3.7	Ligging van de geselecteerde wijken in Rotterdam.	17
4.1	Boxplot van de amplitude per categorie verhard oppervlak (dagelijkse tijdseries).	21
4.2	Boxplot van de amplitude per categorie boomdekking (dagelijkse tijdseries).	21
4.3	Relatie tussen amplitude en afstand tot oppervlaktewater. Links: Boxplot per afstandscategorie. Rechts: Kaart van de afstanden tot oppervlaktewater.	22
4.4	Boxplot van de amplitude per categorie drooglegging (dagelijkse tijdseries).	22
4.5	Boxplot van de amplitude per categorie riool (dagelijkse tijdseries).	23
4.6	Boxplot van de amplitude voor aanwezigheid DIT (dagelijkse tijdseries).	23
4.7	Boxplot van de amplitude voor aanwezigheid drainage (dagelijkse tijdseries).	24
4.8	Boxplot van de amplitude per categorie grondsoort (dagelijkse tijdseries).	25
4.9	Mediaan van de grondwaterstand t.o.v. maaiveld per klasse drooglegging.	25
4.10	Mediaan van de grondwaterstand t.o.v. maaiveld per verhardingsklasse.	26
4.11	GHG t.o.v. maaiveld per verhardingsklasse.	26
4.12	GLG t.o.v. maaiveld per verhardingsklasse.	27
4.13	Amplitude in relatie tot boomdekking per wijk.	28
4.14	Amplitude in relatie tot verhard oppervlak per wijk.	29
4.15	Amplitude in relatie tot aanwezigheid van een DIT-systeem per wijk.	30
4.16	Amplitude in relatie tot aanwezigheid van riolering per wijk.	31
4.17	Amplitude in relatie tot aanwezigheid van drainage per wijk.	32
4.18	Locatie van freatische peilbuizen in de geselecteerde wijken.	32
4.19	Visualisatie van de grondwaterstand in de Agniesebuurt	33
4.20	Visualisatie van de grondwaterstand in Bloemhof	34
4.21	Visualisatie van de grondwaterstand in Kralingseveer	35
4.22	Visualisatie van de grondwaterstand in het Kleiwegkwartier	36
4.23	GLG – funderingshout per verhardingsklasse.	37
4.24	Mediaan – singelpeil per verhardingsklasse.	37
4.25	Ontwateringsdiepte t.o.v. GHG per verhardingsklasse.	38
A.1	Amplitude vs. percentage boomdekking	48
A.2	Amplitude vs. verharding	49
A.3	Amplitude vs. riool	49
A.4	Amplitude vs. DIT	50
A.5	Amplitude vs. drainage	50
A.6	Amplitude vs. drooglegging	51
A.7	Amplitude vs. grondsoort	51
A.8	Amplitude vs. afstand tot oppervlaktewater	52
B.1	Histogrammen van de gebiedskenmerken	53

Lijst van tabellen

3.1	Gemiddelde gebiedskenmerken voor Kralingseveer.	18
3.2	Overzicht van statistieken Kralingseveer per kenmerk (met marges voor wijkwaarden). .	18
4.1	Toetsing van bandbreedte grondwaterstand in de Agniesebuurt	33
4.2	Toetsing van bandbreedte grondwaterstand in Bloemhof.	34
4.3	Toetsing van bandbreedte grondwaterstand in Kralingseveer.	34
4.4	Toetsing van bandbreedte grondwaterstand in het Kleiwegkwartier.	35
C.1	Overzicht van statistieken Bloemhof per kenmerk (met marges voor wijkwaarden). . . .	55
C.2	Overzicht van statistieken Agniesebuurt per kenmerk (met marges voor wijkwaarden). .	55
C.3	Overzicht van statistieken Kleiwegkwartier per kenmerk (met marges voor wijkwaarden).	55

Introductie

1.1. Aanleiding

In Nederland staan naar schatting tussen de 750.000 en 1.000.000 gebouwen op houten of ondiepe funderingen, waardoor zij kwetsbaar zijn voor fluctuaties in de grondwaterstand (Kok et al., 2020). In de gemeente Rotterdam gaat het om ongeveer 300.000 woningen, waarvan 120.000 op houten paalfunderingen en 30.000 op ondiepe funderingen (Gemeente Rotterdam, 2025a).

Woningen met ondiepe funderingen zijn niet onderheid en daardoor extra gevoelig voor zettingen, een bekend probleem in Rotterdam vanwege de slappe veen- en kleigronden. Voor deze woningen is een lage grondwaterstand gewenst om wateroverlast te voorkomen. Tegelijkertijd mag de grondwaterstand niet te laag worden, omdat dit kan leiden tot ongelijkmatige zettingen en daarmee schade aan de constructie. Ook gebouwen op houten paalfunderingen zijn gevoelig voor lage grondwaterstanden. Wanneer de grondwaterstand langdurig te laag is, komen houten funderingspalen droog te staan en kunnen zij gaan rotten (KCAF, z.d.). De schade die hierdoor ontstaat, is kostbaar, met herstelkosten voor funderingen die gemiddeld tussen de €1750 en €2000 liggen per vierkante meter (Gemeente Rotterdam, 2025b).

Naast problemen door lage grondwaterstanden ervaren bewoners van Rotterdam ook schade door hoge grondwaterstanden. Te hoge grondwaterstanden onder woningen kunnen leiden tot water in kruipruimtes en optrekkend vocht in de muren. Dit veroorzaakt niet alleen schade aan houten vloeren en andere constructiedelen, maar leidt ook tot een vochtig binnenklimaat dat gezondheidsproblemen kan veroorzaken (Hoogvliet et al., 2020). De risico's van grondwateroverlast nemen bovendien toe op locaties waar bodemdaling optreedt: het peil van het oppervlaktewater blijft relatief hoog, terwijl woningen lager komen te liggen dan het straatniveau. Hierdoor neemt de kans op wateroverlast in woningen verder toe.

Dit onderstreept het belang van een goed beheerd grondwatersysteem. Grondwater op het publieke terrein is een van de gemeentelijk watertaken. Deze taak is nauw verbonden met andere maatschappelijke vraagstukken zoals het beheer en de inrichting van de openbare ruimte, de woningbouwopgave, het bewaken en versterken van ruimtelijke kwaliteit en leefbaarheid en het anticiperen op klimaatverandering (Dekker et al., 2021). Klimaatverandering, met als gevolg een toenemende kans op weersextremen, kunnen zorgen voor overlast en schade, onder meer aan de fundering van gebouwen. De uitdaging is om de bebouwde omgeving en het buitengebied zodanig in te richten dat de negatieve gevolgen van de effecten van weersextremen beperkt blijven. De deltabeslissing Ruimtelijke adaptatie stelt dat Nederland in 2050 zo goed mogelijk water robuust en klimaatbestendig is ingericht (Dekker et al., 2021). Gemeenten spelen hierbij een centrale rol in het grondwaterbeheer. In de praktijk blijkt echter dat zij slechts beperkt maatregelen treffen tegen grondwaterproblemen. Juridische onzekerheid weerhoudt gemeenten vaak van ingrijpen, uit vrees voor aansprakelijkheid en schadeclaims (Hoogvliet et al., 2020). Daarnaast bestaat er nog onvoldoende kennis over welke gebiedskenmerken de stedelijke waterbalans beïnvloeden, en hoe deze leidt tot fluctuaties in de stedelijke grondwaterstand (Hoogvliet et al., 2020). Dit maakt het opstellen van effectief beleid lastig en onderstreept de noodzaak

van gedetailleerd onderzoek naar de werking van het stedelijk grondwatersysteem.

1.2. Probleemstelling

Het rapport van Stowa *Klimaatverandering en grondwaterbeheer stedelijk gebied* (Hoogvliet et al., 2020) benoemt de omvang van de factoren die de waterbalans in stedelijk gebied beïnvloeden als een belangrijk kennishiaat. Er is weinig nauwkeurige informatie beschikbaar over welk deel van de neerslag daadwerkelijk bijdraagt aan de aanvulling van bodemvocht, grondwater en oppervlaktewater (Hoogvliet et al., 2020). Dit komt mede door de grote heterogeniteit van het stedelijke systeem en het beperkte aantal metingen. Concreet ontbreekt een lokaal toepasbaar model om grondwaterstanden op wijkniveau te verklaren en te voorspellen op basis van beschikbare gebiedskenmerken (Hoogvliet et al., 2020). Het Ingenieursbureau van de gemeente Rotterdam onderstreept dit kennishiaat, met name rond de vraag wat de stedelijke grondwaterstand op wijkniveau beïnvloedt.

Effectief stedelijk grondwaterbeheer vraagt daarnaast afstemming tussen beleid en uitvoering. Veel gemeenten nemen echter nog maar beperkt actieve maatregelen om grondwaterproblemen aan te pakken (Hoogvliet et al., 2020). De juridische complexiteit weerhoudt gemeenten er vaak van om in te grijpen, uit angst voor juridische conflicten (Hoogvliet et al., 2020). Daarnaast zijn woningeigenaren zich vaak niet bewust van hun verantwoordelijkheid voor het grondwaterbeheer op eigen terrein, wat ervoor zorgt dat er minder preventieve maatregelen genomen worden (Hoogvliet et al., 2020).

1.3. Doelstelling

Dit onderzoek beoogt inzicht te geven in hoe verschillende stedelijke factoren en klimaatscenario's invloed uitoefenen op de grondwaterstand. Door deze relaties te analyseren, ontstaat de mogelijkheid om de grondwaterstand beter te voorspellen op basis van vastgelegde gebiedskenmerken, zoals bodemtype, verhardingsgraad, vegetatie en aanwezige ondergrondse infrastructuur. Dit inzicht helpt de gemeente in hun onderbouwing voor actief grondwaterpeil beheer, om risico's zoals funderingsschade, maaiveldddaling, wateroverlast en wateronderlast te voorkomen.

1.4. Onderzoeksvragen

Om de doelstelling van dit onderzoek te realiseren, zijn de onderstaande deelvragen opgesteld.

1. Welke stedelijke gebiedskenmerken beïnvloeden de grondwaterstand?
2. In welke mate draagt elk kenmerk bij aan fluctuaties van de grondwaterstand?
3. In hoeverre is het mogelijk het bereik van de grondwaterstand te voorspellen op basis van vastgestelde gebiedskenmerken?
4. Welke inzichten bieden deze resultaten voor maatregelen ter beperking van funderingsschade en grondwaterproblemen?

1.5. Leeswijzer

Het rapport is als volgt opgebouwd. Hoofdstuk 2 presenteert een literatuuranalyse met als doel vast te stellen welke factoren volgens de literatuur de grootste invloed hebben op de grondwaterstand en waar kennishiaten bestaan. Hoofdstuk 3 beschrijft de methode: de dataverwerking, gevolgd door het beschrijven van de algemene relaties tussen gebiedskenmerken en grondwaterfluctuaties en de vertaling daarvan naar toepassing op wijkniveau. Hoofdstuk 4 presenteert de resultaten die uit deze aanpak volgen. De discussie in hoofdstuk 5 bespreekt en duidt de resultaten. Hoofdstuk 6 geeft de conclusies. De aanbevelingen voor vervolgonderzoek staan in hoofdstuk 7.

2

Literatuuranalyse

Voor deze literatuuranalyse is gezocht naar wetenschappelijke artikelen, rapporten en beleidsdocumenten die inzicht geven in de relatie tussen stedelijke gebiedskenmerken en de grondwaterstand. De focus lag daarbij op publicaties over actief grondwaterpeilbeheer, verharding, vegetatie, riolering en drainage. Daarnaast zijn rapporten van onder andere Deltares, STOWA en de gemeente Rotterdam geraadpleegd om de huidige kennis en praktijkervaringen in kaart te brengen. Het doel van deze analyse is om te bepalen welke factoren volgens de literatuur de grootste invloed hebben op de grondwaterstand en bepalen waar de kennishiaten bestaan.

2.1. Actief Grondwaterpeilbeheer

Actief grondwaterpeilbeheer is de gerichte inspanning om een gewenst grondwaterpeil te realiseren, door water te draineren in natte periodes en water te infiltreren in droge periodes. Dit kan gedaan worden met drainage-infiltratie leiding die in direct contact staat met oppervlakte water. De aanleg van deze leiding moet onder de laagste verwachte grondwaterstand worden geplaatst om ijzerafzetting te voorkomen (Buma et al., 2017). Het doel van actief grondwaterpeilbeheer is het beperken of voorkomen van schade door zowel grondwateroverlast als grondwateronderlast, waaronder funderingsschade, verzakkingen en schade aan vegetatie. Het betreft een inspanningsverplichting voor de gemeente, zonder resultaatsverplichting, om de grondwaterstand zodanig te reguleren dat deze geen problemen veroorzaakt. Met dit systeem regelt de gemeente de grondwaterstand in het openbaar gebied. Particuliere eigenaren kunnen zich vrijwillig aansluiten op het systeem. Hiermee biedt actief grondwaterpeilbeheer een mogelijkheid om ook op particulier terrein het grondwater effectief te reguleren (Buma et al., 2017).

2.1.1. Toepasbaarheid en effectiviteit van actief grondwaterpeilbeheer

Volgens onderzoek genereert actief grondwaterpeilbeheer naar verwachting de meeste baten in Laag-Nederland, waar bodems vaak bestaan uit veen- en kleilagen die gevoelig zijn voor maaiveldsdaling als gevolg van verdamping en wegzijging (Hendriks et al., 2023). Ook in complexere of minder gevoelige gebieden kan actief peilbeheer zinvol zijn, mits de aanlegkosten beperkt blijven en aanvullende baten verwacht worden (Buma et al., 2017). Actief grondwaterpeilbeheer is met name effectief in kleinschalige toepassingen op perceel-, straat- of buurniveau (Buma et al., 2017). Praktijkvoorbeelden in onder andere Dordrecht (Land van Valk), Amsterdam (Argonautenstraat) en Haarlem (Leidsebuurt) tonen aan dat actief grondwaterpeilbeheer technisch haalbaar en effectief is in verschillende bodemtypes, stedelijke dichtheden, hydrologische situaties (zoals kwel- of wegzijgingsgebieden) en bij uiteenlopende methoden van wateraanvoer (Buma et al., 2017).

2.1.2. Uitdagingen en randvoorwaarden voor actief grondwaterpeilbeheer

Hoewel actief grondwaterpeilbeheer veel potentie biedt, blijkt de grootschalige toepassing ervan in de praktijk nog beperkt. Dit komt onder meer door een gebrek aan kennis, zichtbaarheid, ervaring en financiële middelen (Buma et al., 2017). Daarnaast is er bij de gemeente angst voor schadeclaims wanneer het gewenste grondwaterpeil niet gerealiseerd wordt na invoering van actief grondwaterpeil-

beheer (Hoogvliet et al., 2020). De belangrijkste uitdaging is variërende ruimtelijke eisen aan de grondwaterstand. Deze treden op bij wijken waar een deel van de woningen op palen is gefundeerd en een ander deel niet onderheid is (Buma et al., 2018). Daarnaast speelt de technische haalbaarheid een rol. De werking van drainage-infiltratiesystemen is sterk afhankelijk van lokale omstandigheden, zoals de bodemopbouw, de beschikbaarheid van infiltratiewater, en voldoende ruimte in de ondergrond om leidingen aan te leggen (Hendriks et al., 2023). Uit de kosten-batenanalyse blijkt dat de baten van actief grondwaterpeilbeheer opwegen tegen de kosten. De uitdaging ligt echter in de verdeling hiervan: terwijl de kosten grotendeels bij de gemeente liggen, komen de baten vooral terecht bij particuliere woningeigenaren, in de vorm van minder funderingsschade en verminderde grondwateroverlast (Buma et al., 2017). Voor de aansluiting van particuliere percelen op gemeentelijke systemen, zoals de DIT-leidingen, zijn de kosten voor rekening van de eigenaar. In de praktijk wordt van deze mogelijkheid slechts beperkt gebruikgemaakt. Het praktijkvoorbeeld 'Land van Valk' laat zien dat de aanlegkosten beperkt kunnen blijven, zelfs in situaties met verschillende peilvakken en aanvullende bemaling via pompen. Dit toont aan dat technische complexiteit, zoals het combineren van vrij verval en actieve bemaling, geen onoverkomelijke kostenverhoging hoeft te betekenen (Buma et al., 2017). In gebieden die gevoelig zijn voor maaiveldddaling door seizoensgebonden lage grondwaterstanden, blijkt bovendien dat actief grondwaterpeilbeheer, zeker in combinatie met rioolvervanging in het openbaar gebied, meer oplevert dan het kost (Buma et al., 2017).

2.2. Verharding en Groen

Door de vele ruimtelijke ingrepen die door de jaren heen aan het stedelijk oppervlak en in de ondergrond zijn gedaan, is het functioneren van het stedelijk grondwatersysteem complexer en gevarieerder dan in landelijke gebieden (Hoogvliet et al., 2020). Twee belangrijke verschillen die hierin een rol spelen zijn de mate van verharding en het ontbreken van systematische drainage. Hoe meer verharding aanwezig is, hoe groter het deel van de neerslag dat wordt afgevoerd via het riool en hoe minder water infiltreert naar het grondwater (Hoogvliet et al., 2020). Wat kan leiden tot lagere grondwaterstanden, doordat de verminderde infiltratie slechts beperkt wordt gecompenseerd door de lagere actuele verdamping op verharde oppervlakken (Hoogvliet et al., 2020).

Tegelijkertijd brengt stedelijke vergroening aandachtspunten met zich mee voor het grondwaterpeilbeheer. Vergroening van stedelijk gebied kan leiden tot meer verdamping met verlaging van grondwaterstanden als gevolg (Hendriks et al., 2023). Vegetatie, en mate name bomen, moeten van voldoende water worden voorzien. De extra watervraag mag niet leiden tot een verlaging van de grondwaterstand nabij kwetsbare constructies. Bij de inrichting van groen in stedelijk gebied moet daarom zorgvuldig worden gekeken naar de effecten op de grondwaterstand (Hoogvliet et al., 2020). Het rapport *Integrale Grondwaterstudie Nederland* van Deltares gaat een stap verder en stelt dat er "gelet kan worden op vergroten of beperken van regenwaterinfiltratie en verdamping (bijvoorbeeld door bomen) voor gerichte aanpassingen en actief grondwaterbeheer" (Hendriks et al., 2023).

2.2.1. Bomen

Uit onderzoek van de gemeente Rotterdam blijkt dat de omvang van de wortelzone van bomen een belangrijke rol speelt in het grondwaterverbruik. In stedelijke gebieden groeien boomwortels vooral in de lengterichting van straten, omdat verdichte zandcunetten en gebouwfunderingen de wortelgroei haaks op de weg belemmeren (Mobron, 2023). Bij jonge, kleine bomen blijft de wortelzone vaak beperkt tot ongeveer één keer het boomkroonoppervlak, terwijl bij oudere en grotere bomen deze zone kan oplopen tot drie à vier keer het oppervlak van de kroon (Mobron, 2023). Er is hierbij ook gekeken naar de interactie met drainage-infiltratieleidingen (DIT-leidingen). Bomen die verder van DIT-leidingen staan, vertonen grotere seizoensfluctuaties in de grondwaterstand, hoge standen in de winter en sterke uitzakking in de zomer. Uit onderzoek blijkt dat grotere bomen niet alleen meer grondwater verbruiken, maar ook sterk afhankelijk zijn van de aanvulling via het DIT-systeem, vooral tijdens langdurige droogte. De mate van aanvoer wordt beïnvloed door de afstand tot de leiding, de doorlatendheid van de bodem en de lengte van de wortelzone (Mobron, 2023).

2.3. Riool

Rioolvervanging leidt vaak tot een verhoging van de grondwaterstand, omdat oude, lekkende riolen onbedoeld als drainage functioneren. Bij vervanging verdwijnt deze afvoerende werking, waardoor het grondwaterpeil stijgt. Dit roept de vraag op of rioolvervanging op zichzelf al voldoende is om lage grondwaterstanden en bijbehorende schade te voorkomen. Uit onderzoek blijkt echter dat dit effect beperkt is, rioolvervanging verhoogt alleen de gemiddelde en hoge grondwaterstanden, maar biedt geen bescherming tegen uitzakking van het grondwater tijdens droge perioden (Buma et al., 2017).

2.4. Klimaatverandering

Klimaatverandering heeft een grote invloed op het stedelijk grondwatersysteem. Uit onderzoeken blijkt dat de uitzakking van de grondwaterstand in de zomer toeneemt, met name in West-Nederland (Hendriks et al., 2023). Lange droogteperioden in de zomer leiden tot een diepere uitzakking van de grondwaterstand, voornamelijk als gevolg van verhoogde verdamping en wegzijging naar diepere watervoerende lagen. In 2050 wordt een gemiddelde verlaging van 10 tot 15 cm verwacht als gevolg van de klimaatverandering (Buma et al., 2017). Tegelijkertijd zorgt de toename van winterse neerslag voor hogere pieken in de grondwaterstand, wat kan resulteren in een grotere kans op grondwateroverlast (Buma et al., 2018). Dit verhoogt de druk op stedelijke functies zoals funderingen, riolering en stedelijk groen. Actief grondwaterpeilbeheer wordt daarom gezien als een mogelijke maatregel om de negatieve effecten van klimaatverandering op het stedelijk grondwaterregime te beperken (Buma et al., 2017). De mate waarin extra winterneerslag daadwerkelijk leidt tot verhoging van het grondwaterpeil verschilt sterk per gebied en is afhankelijk van lokale ont- en afwateringskenmerken (Hoogvliet et al., 2020).

De effecten van klimaatverandering op de grondwaterstand hangen sterk af van de lokale omstandigheden. De doorwerking van meer winterneerslag naar hogere grondwaterstanden is sterk afhankelijk van de drainage-intensiteit en de verhardingsgraad (Hoogvliet et al., 2020). Een hoge drainage-intensiteit betekent vooral meer afvoer via de buisdrainage en meer verharding beperkt over het algemeen ook de grondwateraanvulling. Onverhard oppervlak zorgt juist voor meer infiltratie waardoor het grondwaterniveau kan stijgen (Hoogvliet et al., 2020). Ook droogte in de zomer werkt verschillend door. In kwelgebieden blijft het grondwaterpeil redelijk stabiel door opwaartse stroming uit diepere lagen. In wegzijgingsgebieden zakt het grondwater juist snel weg, waardoor lage grondwaterstanden optreden. De ernst van de schade, door zowel hoge of lage grondwaterstanden hangt af van de kwetsbaarheid van de landsgebruikfuncties (Hoogvliet et al., 2020).

2.5. Beleid

In veel gebieden wordt droogte in stedelijk gebied nog niet als een urgent probleem beschouwd omdat de schade langzaam ontstaat en nauwelijks zichtbaar is (Buma et al., 2018). Dit gebrek aan zichtbaarheid zorgt ervoor dat het onderwerp onvoldoende prioriteit krijgt van de politiek (Buma et al., 2018). Terwijl agendering van droogte (en hitte) in bebouwd gebied een noodzakelijke stap is voor grootschalige implementatie van actief grondwaterpeilbeheer (Buma et al., 2018).

Communicatie speelt hierin een belangrijke rol. Het gaat daarbij niet alleen om het vergroten van bewustzijn van de urgentie, maar ook om het begrijpelijk maken van de hydrologische processen (Buma et al., 2018). Daarnaast is duidelijke communicatie over de gedeelde verantwoordelijkheden tussen gemeenten en particuliere eigenaren essentieel (Buma et al., 2018). Het besef dat particuliere eigenaren zelf verantwoordelijk zijn voor het beheer van het grondwater op hun eigen perceel is nog onvoldoende doorgedrongen (Hoogvliet et al., 2020). Uitgebreide communicatie vanuit gemeenten is nodig om dit bewustzijn te vergroten (Buma et al., 2018). Een voorbeeld van zo'n communicatie- en bewustwordingsinitiatief is het *NK Tegelvippen*, dat ook in Rotterdam actief wordt gepromoot (Rotterdams WeerWoord, z.d.). Hierbij worden bewoners gestimuleerd om verharding in tuinen te vervangen door groen. Dit initiatief is primair op het vergroten van infiltratiecapaciteit en het beperken van hittestress.

Het aantal gemeenten dat actief grondwaterpeilbeheer omarmt is nog beperkt. Dit komt deels door juridische terughoudendheid: in wijken met verschillende funderingstypen is het moeilijk om een eenduidige, gewenste grondwaterstand te realiseren. Gemeenten kiezen er dan vaak voor om helemaal niet in te grijpen, uit angst voor aansprakelijkheid (Hoogvliet et al., 2020). De aanleg van een drainage-

infiltratiesysteem brengt bovendien een langdurige beheertaak met zich mee, en het is vaak onduidelijk wie verantwoordelijk is als het systeem niet naar behoren functioneert (Buma et al., 2018). Daarnaast heeft een actief grondwaterpeilbeheer tijdens droge perioden invloed op de stedelijke vraag naar zoet water. Het aanvullen van het grondwater vereist immers toevoer vanuit het oppervlaktewatersysteem. Dit maakt afstemming met het waterschap essentieel bij de planning en uitvoering van actief grondwaterpeilbeheer (Hoogvliet et al., 2020).

Voor effectief grondwaterbeheer is een betere coördinatie tussen beleid en uitvoering noodzakelijk. Door nauwere samenwerking tussen gemeenten, waterschappen en huiseigenaren kunnen grondwaterstanden beter worden gemonitord, kunnen risico's eerder worden herkend, en kunnen maatregelen tijdig worden genomen om schade te beperken en de effecten van klimaatverandering te verzachten (Hoogvliet et al., 2020).

2.6. Conclusie Literatuuranalyse

De literatuur maakt duidelijk dat actief grondwaterpeilbeheer een veelbelovende maatregel is om fluctuaties in de grondwaterstand te beperken en daarmee funderingsschade, bodemdaling en grondwateroverlast in stedelijk gebied te verminderen. Dit geldt vooral voor gebieden met slappe veen- en kleigronden.

Tegelijkertijd wordt uit de literatuur ook duidelijk dat de grootschalige toepassing van actief grondwaterpeilbeheer in de praktijk achterblijft. De voornaamste belemmeringen liggen op juridisch, organisatorisch en financieel vlak, maar belangrijker door een gebrek aan kennis. Het belangrijkste kennishiaat is het effect van gebiedskenmerken als verharding, groen, bodemtype en ondergrondse infrastructuur op de stedelijke grondwaterstand. Ook blijkt er weinig nauwkeurige informatie te zijn welk deel van de neerslag ten goede komt aan de aanvulling van het grondwater. Hierdoor is de effectiviteit van maatregelen op de grondwaterstand, zoals een DIT leiding, moeilijk te onderbouwen. Daarnaast zijn de bestuurlijke en juridische verantwoordelijkheden voor het grondwaterbeheer op de grens tussen publiek en privaat terrein vaak onduidelijk, wat gemeenten terughoudend maakt om actie te ondernemen. Ook komen de baten van actief grondwaterpeilbeheer vaak terecht bij particuliere eigenaren, terwijl de kosten vaak bij de gemeente liggen, wat financiering en besluitvorming bemoeilijkt.

Deze literatuuranalyse bevestigt de kennishiaten waarop dit onderzoek zich richt. Vooral het effect van stedelijke gebiedskenmerken op de grondwaterstand en het gebrek aan inzicht in de stedelijk grondwaterbalans. De onduidelijke verantwoordelijkheidsverdeling vormt een extra belemmering. Deze thesis onderzoekt hoe deze kennishiaten kunnen worden overbrugd, als basis voor doelgericht beleid en beheer.

2.7. Hypothesen

Deze kennishiaten vormen de basis voor de volgende hypothesen, die de veronderstelde invloed van stedelijke gebiedskenmerken op de grondwaterstand concreet maken en als toetsingskader dienen voor de verdere analyse.

- H1** Gebieden met meer vegetatie vertonen een grotere seizoensamplitude in de grondwaterstand dan gebieden met overwegend verhard oppervlak.
- H2** Bomen veroorzaken een sterkere daling van de grondwaterstand tijdens droge perioden dan grasvegetatie, vanwege aanhoudende verdamping.
- H3** Een toplaag van klei beperkt de infiltratiecapaciteit tijdens hevige neerslag ten opzichte van een zandige toplaag, en zorgt daarom voor een lagere amplitude.
- H4** De aanwezigheid van een drainage-infiltratieleiding (DIT-leiding) of drainageleiding dempt de fluctuaties in de grondwaterstand.
- H5** Peilbuizen in de nabijheid van oppervlaktewater laten kleinere seizoensfluctuaties zien dan peilbuizen op grotere afstand.
- H6** Oude riolen kunnen drainerend werken, waardoor de grondwaterstand in de buurt minder fluctueert.
- H7** Bij een grotere drooglegging is de amplitude kleiner, omdat de grondwaterstand dieper ligt en minder gevoelig is voor kortdurende fluctuaties.

3

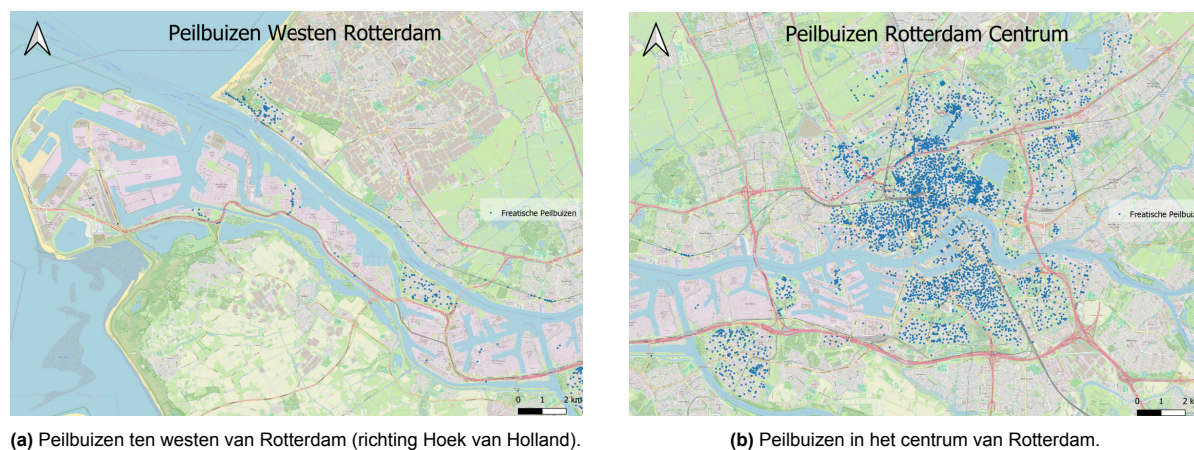
Methode

Dit hoofdstuk beschrijft de methode die is toegepast om de onderzoeksvragen te beantwoorden en de in hoofdstuk 2.7 geformuleerde hypothesen te toetsen. Allereerst wordt ingegaan op de selectie en verwerking van de beschikbare peilbuisdata. Vervolgens wordt beschreven hoe de amplitude van de grondwaterstand is bepaald, als kernvariabele voor het analyseren van fluctuaties. Daarna wordt uiteengezet hoe gebiedskenmerken zoals verharding, boomdekking, drooglegging, bodemopbouw en ondergrondse infrastructuur zijn gekoppeld aan de meetreeksen. Tot slot wordt toegelicht hoe de methodiek kan worden toegepast op wijkniveau, als basis voor beleidsmatige interpretatie en actief grondwaterpeilbeheer.

3.1. Data Peilbuizen

Voor dit onderzoek is gebruikgemaakt van grondwatermeetgegevens uit peilbuizen in de gemeente Rotterdam. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen peilbuizen uit het achtergrondmeetnet en projectpeilbuizen. Het achtergrondmeetnet bestaat uit peilbuizen die vaak al langere tijd meten en inzicht geven in het structurele gedrag van de grondwaterstand in de stad. Projectpeilbuizen zijn daarentegen slechts tijdelijk actief gedurende de looptijd van een specifiek project. Beide categorieën zijn meegenomen in de dataselectie om de beschikbare meetreeksen zo volledig mogelijk te benutten. Verder wordt in Rotterdam gemeten in freatische, holocene en pleistocene grondwaterlagen. In dit onderzoek is uitsluitend gekeken naar de freatische grondwaterstanden, omdat deze zich direct onder het maaiveld bevinden en daarom het meest relevant zijn voor grondwaterproblemen.

Figuur 3.1 laat de distributie van de freatische peilbuizen in Rotterdam zien. Subfiguur 3.1a toont de peilbuizen ten westen van Rotterdam, richting Hoek van Holland, en subfiguur 3.1b toont de peilbuizen in het centrum van de stad. Het gaat om een totaal van rond de 4880 peilbuizen.



Figuur 3.1: Overzicht van de distributie van de freatische peilbuizen in Rotterdam: (a) westzijde en (b) centrum.

3.1.1. Dataverwerking

De aangeleverde dataset bevat in totaal 4880 freatische peilbuizen, afkomstig uit zowel het achtergrondmeetnet als projectmetingen. Hierin zitten ook peilbuizen die inmiddels niet meer actief zijn.

De meeste peilbuizen worden handmatig uitgelezen en hebben een maandelijkse meetfrequentie. Sinds 2020 plaatst de gemeente Rotterdam ook dataloggers in peilbuizen. Deze loggers leveren hoogfrequente metingen van de grondwaterstand, met minstens één meting per dag. Op het moment van dit onderzoek zijn er 522 loggers geïnstalleerd, waarvan 486 freatische grondwaterstanden meten. Deze loggers zijn onderdeel van de 4880 freatische peilbuizen.

Wanneer een peilbuis zowel loggerdata als eerdere handmatige metingen bevat, zijn deze gegevens samengevoegd tot één tijdreeks per peilbuis. Het resultaat is een complete tijdreeks voor alle freatische peilbuizen in Rotterdam. In de volgende stap is bepaald welke peilbuizen voldoende data bevatten om te worden gebruikt in de analyse.

3.1.2. Selectie van Grondwaterreeksen

Voor de selectie van geschikte peilbuizen is gebruikgemaakt van de Pastastore-functionaliteit binnen het pythonpakket Pastas. Pastas is een open-source Python-pakket voor de analyse van hydrogeologische tijdreeksen (Collenteur et al., 2019), Pastastore is de bijbehorende module die Pastas-reeksen en -modellen beheert en het werken met grote aantallen peilbuizen vereenvoudigt. In de eerste filterstap zijn alleen reeksen opgenomen die over de volledige meetperiode ten minste tien meetpunten bevatten. Deze ondergrens is bewust laag gekozen om peilbuizen met slechts enkele metingen, die niet bruikbaar zijn, op voorhand uit te sluiten. Zo wordt voorkomen dat onvolledige of foutgevoelige tijdreeksen in de verdere analyse worden meegenomen. Hierdoor vielen 278 peilbuizen af, wat resulteerde in een totaal van 4602 freatische peilbuizen. De volgende stap is om tijdreeksen te selecteren die voor langere tijd een regelmatige meting bevatten. Voor deze selectie is onderscheid gemaakt tussen dagelijkse en maandelijkse tijdreeksen. Onderstaand wordt beschreven hoe de selectie is gemaakt.

Dagelijkse tijdreeksen

De selectie van peilbuizen met een dagelijkse meetfrequentie is uitgevoerd in vier stappen:

1. Minimale lengte van tijdreeks

Aangezien de loggers in Rotterdam pas recent zijn geplaatst, is een relatief mild filter toegepast om zoveel mogelijk loggers in de analyse te behouden. Daarom is in deze stap gesteld dat peilbuizen meetpunten moeten hebben voor 2023 en na 2024. Dit leverde 1896 peilbuizen op.

2. Meetdichtheid per maand

Voor de selectie van geschikte peilbuizen is een ondergrens van minimaal 20 metingen per maand gehanteerd. Deze drempel is gekozen om reeksen met te weinig data uit te sluiten, maar tegelijkertijd peilbuizen met incidentele hiaten te behouden. Stap 4 laat zien hoe is omgegaan met

deze hiaten. Een strengere grens van 30 metingen per maand zou het aantal bruikbare peilbuizen beperken tot circa 300 peilbuizen, terwijl bij de gekozen drempel 405 peilbuizen beschikbaar blijven.

3. Visualisatie van meetdichtheid

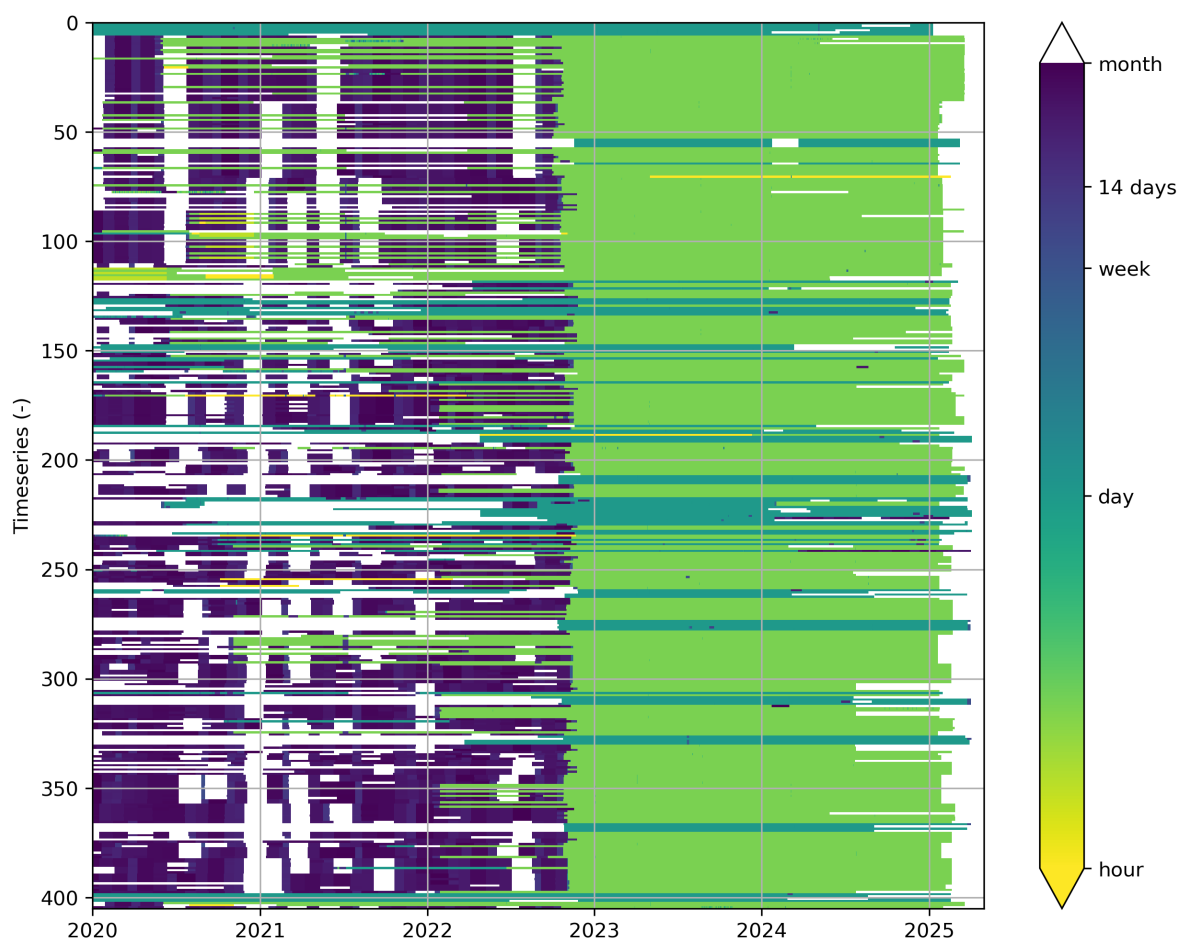
Met behulp van Pastastore is de meetdichtheid van de tijdreeksen gevisualiseerd (Brakenhoff, 2020), zie figuur 3.2. De kleurbalk geeft de meetfrequentie weer, donkerpaars–blauw correspondeert met een maandelijks tot wekelijks meetfrequentie, groen met een (half)dagelijkse meetfrequentie en geel met uurlijke meetfrequentie. Witte vlakken geven een gat van de metingen aan. Hieruit blijkt dat de meeste hoogfrequente metingen vanaf eind 2022 zijn gestart, terwijl eerder de meetfrequentie meestal maandelijks was en vaak hiaten bevatte.

4. Vast tijdsinterval

Voor uniforme verwerking is gekozen voor een vaste meetfrequentie van één dag. De tijdreeksen zijn, met behulp van Pandas, gestandaardiseerd naar een vast daginterval. Daarbij is gebruikgemaakt van de functie `pandas.equidistant_asfreq`, die alle tijdstempels afrondt naar de dichtstbijzijnde dag en vervolgens een dagelijkse tijdreeks construeert. Dit heeft de volgende gevolgen:

- Op dagen met meerdere metingen wordt alleen de eerste meting behouden, de overige worden verwijderd.
- Op dagen zonder metingen wordt een lege waarde (NaN) ingevoegd.

Het resultaat is een dataset met 405 peilbuizen, waarin elke dag precies één waarde is opgenomen. Ontbrekende dagen zijn weergegeven als lege waarden (NaN). De periode bestrijkt november 2022 tot 2025.



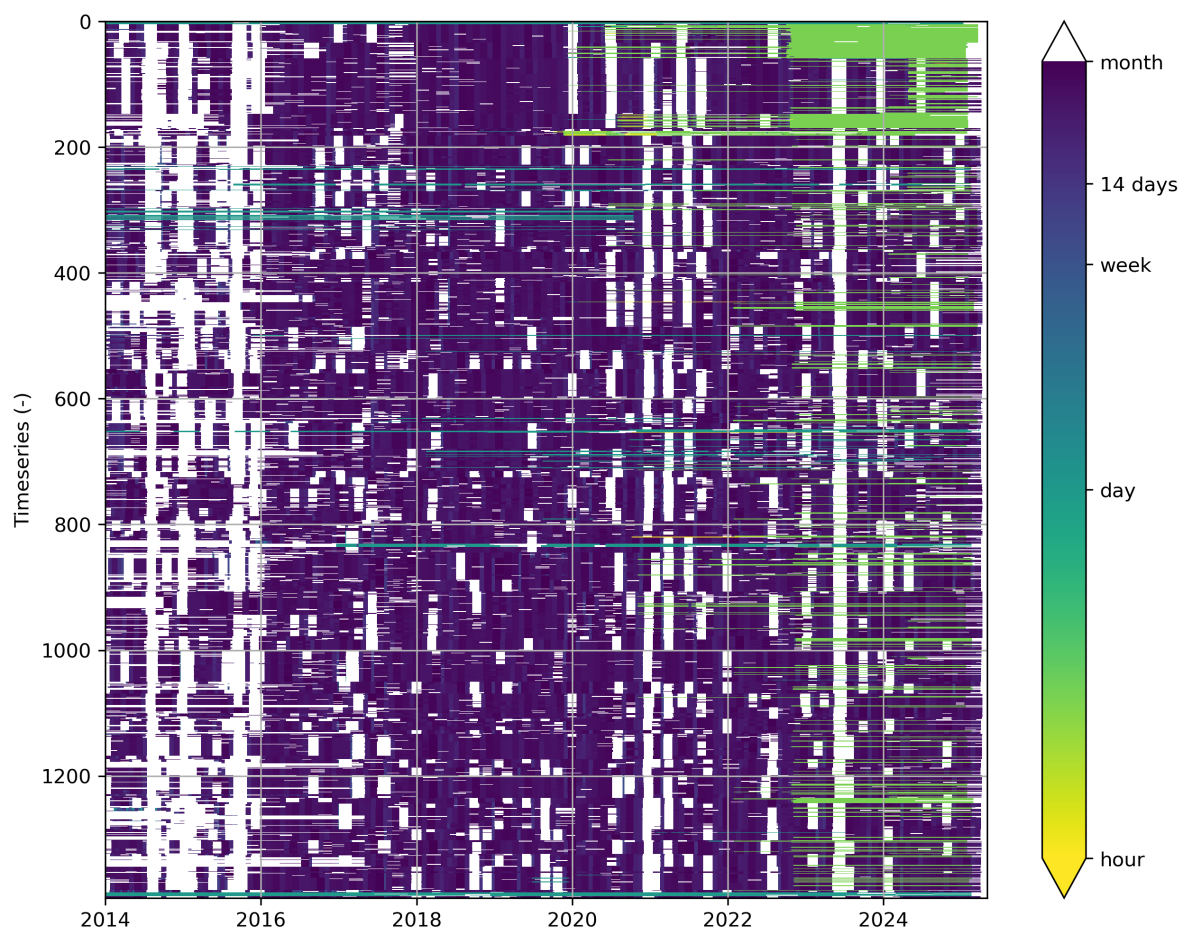
Figuur 3.2: Visualisatie van dagelijkse peilbuizen.

Maandelijkse tijdreeksen

De selectie van peilbuizen met een maandelijkse meetfrequentie is vergelijkbaar uitgevoerd:

1. Minimale lengte van tijdreeks
Gezien er een groot aantal peilbuizen is met een maandelijkse frequentie is er gekozen voor een langere tijdreeks. Alleen peilbuizen met meetpunten vóór 2017 en ná 2024 zijn meegenomen. Dit resulteerde in 1541 peilbuizen.
2. Meetdichtheid per jaar
Voor maandelijkse metingen is gesteld dat een peilbuis minimaal 8 meetpunten per jaar moet bevatten. Deze drempel waarborgt een voldoende continue reeks, maar sluit peilbuizen met te veel hiaten uit. Na deze filter bleven 1394 peilbuizen over. Een strengere grens van 12 metingen per jaar, wat op één meting per maand wijst, zou dit aantal beperken tot slechts 170 peilbuizen.
3. Visualisatie van meetdichtheid
Ook voor deze set is de datadichtheid gevisualiseerd met Pastastore. Figuur 3.3 toont de beschikbaarheid van de maandelijkse metingen. Hieruit blijkt dat vanaf 2016 de meetdichtheid toeneemt. Voor 2016 zijn veel witte vlakken zichtbaar, wat duidt op maanden zonder metingen.
4. Vast tijdsinterval
Voor een uniforme verwerking is gekozen voor een vaste frequentie van één meetpunt per 30 dagen. De uiteindelijke periode loopt van 2016 tot en met 2025. Ook hier zijn ontbrekende tijdstappen leeg gelaten. Om de reeksen onderling goed te kunnen vergelijken, zijn de tijdstappen met behulp van Pandas gestandaardiseerd naar een vaste frequentie van één meetpunt per 30 dagen. Dit heeft dezelfde werking als bij de dagelijkse reeksen:
 - Als er meerdere metingen in een periode van 30 dagen vallen, wordt alleen de eerste behouden.
 - Voor perioden zonder metingen wordt een lege waarde (NaN) ingevoegd.

Het resultaat is een dataset met 1394 peilbuizen, waarin elke maand precies één waarde is opgenomen. Ontbrekende maanden zijn weergegeven als lege waarden (NaN). De periode bestrijkt 2016 tot en met 2025.



Figuur 3.3: Visualisatie van maandelijks peilbuizen.

3.2. Tijdseriekenmerk Peilbuizen

Het kenmerk waarop de grondwaterreeksen worden beoordeeld is de amplitude. De amplitude is gekozen omdat dit een maat is om het gedrag van het grondwater op een locatie te beschrijven. De amplitude geeft informatie over de dynamiek van de grondwaterstand, doordat zowel hoge als lage waarden worden meegenomen.

De manier waarop de amplitude is berekend verschilt per meetfrequentie. Voor de maandelijks tijdreeks is de methode gebaseerd op de Gemiddelde Hoogste Grondwaterstand (GHG) en de Gemiddelde Laagste Grondwaterstand (GLG) per jaar, terwijl voor de dagelijkse tijdreeks een methode op basis van percentielen is toegepast.

3.2.1. Maandelijks tijdreeksen: GHG en GLG

De amplitude voor maandelijks reeksen is bepaald als het verschil tussen de GHG en de GLG. Volgens de methode Wageningen Environmental Research is hiervoor een tijdreeks van minimaal acht jaar nodig (Knotters, z.d.). De GHG wordt bepaald door per hydrologisch jaar (1 april tot en met 31 maart) de drie hoogste metingen (HG3) te nemen, en deze vervolgens te middelen over alle jaren. De GLG wordt op dezelfde manier bepaald, maar dan met de drie laagste metingen (LG3) (van der Gaast et al., 2010). Deze methode gaat uit van een halfmaandelijks meetfrequentie, wat in dit onderzoek niet het geval is.

In dit onderzoek is daarom gekozen voor een aangepaste werkwijze op de maandelijks reeksen. Voor elk jaar zijn de drie hoogste en drie laagste maandwaarden geselecteerd. Deze zijn gemiddeld per jaar en vervolgens over alle jaren. Ondanks dat deze methode minder meetpunten bevat dan de

oorspronkelijke, bleek ze in dit onderzoek toepasbaar. De verkregen amplitudes gaven een realistisch beeld en sloten aan bij resultaten van andere methodes, zoals de percentielbenadering.

Er is ook onderzocht of een frequentie van twee metingen per maand toepasbaar zou zijn, om dichter bij de oorspronkelijke GHG/GLG-methode te blijven. Uit de dataset bleek echter dat slechts vijf peilbuizen met deze frequentie voldeden aan de vereiste lengte van acht jaar. Vanwege dit lage aantal is besloten om deze verder niet te gebruiken.

3.2.2. Dagelijkse tijdreeksen: percentiële methode

Voor de dagelijkse tijdreeksen is de meetreeks te kort om de standaard GHG/GLG-methode toe te passen. De peilbuizen bevatten ongeveer twee jaar aan metingen. Voor dit soort hoogfrequente data is door Wareco Ingenieurs een methode ontwikkeld waarmee in één jaar tijd een representatieve hoogste en laagste grondwaterstand kan worden bepaald. Deze methode gebruikt het 90ste percentiel als representatieve hoogste grondwaterstand (RHG) en het 10de percentiel als representatieve laagste grondwaterstand (RLG) (Averink, 2013).

In een vervolgonderzoek door een student aan de Universiteit Twente, in samenwerking met Wareco, is onderzocht hoe deze methode kan worden aangepast om de GHG/GLG beter te benaderen. Daaruit kwam naar voren dat het gebruik van het 93ste en 7de percentiel leidt tot de beste benadering van de traditionele GHG/GLG-methode (Averink, 2013).

In dit onderzoek is daarom gekozen om voor de dagelijkse reeksen de amplitude te berekenen door per jaar het 93ste en het 7de percentiel van de meetreeks per peilbuis te bepalen, en vervolgens het gemiddelde van deze jaarlijkse amplitudes over twee jaar te nemen.

3.3. Gebiedskenmerken Peilbuizen

Om de invloed van gebiedskenmerken op de grondwaterstand te bepalen is gebruikgemaakt van verschillende databronnen. Er is gekeken naar de volgende kenmerken: boomdekking, verharding, aanwezigheid van DIT of drainage, riool, grondsoort, afstand tot oppervlaktewater en drooglegging. Deze gebiedskenmerken zijn gekozen op basis van de literatuuranalyse in hoofdstuk 2 en uit adviezen van de gemeente Rotterdam. Hieronder wordt per kenmerk uitgelegd hoe de data is verkregen en verwerkt.

3.3.1. Bomen

De boomlocaties zijn afkomstig van de gemeentelijke kaartlaag met het meest actuele bomenbestand. Dit is een openbaar puntbestand met alle bomen in beheer van de gemeente Rotterdam. Deze kaart bevat uitgebreide informatie over de boomkenmerken, waaronder de boomkroondiameter. In QGIS is de straal van de bomen hiernaar aangepast. Volgens onderzoek van de gemeente Rotterdam wordt namelijk gesteld dat de omvang van de boomkroon een maat is voor hoe ver het water verbruik reikt (Mobron, 2023). Het resultaat is een kaartlaag in QGIS met de bomen waarbij de diameter is veranderd naar de boomkroondiameter. Hoe dit is toegepast is uitgelegd in sectie 3.3.7.

3.3.2. Verharding

Voor de mate van verharding is gebruikgemaakt van de Kleinschalige Basiskaart (KBK), met een resolutie van 10x10 meter. Deze kaart bevat gebiedsdekkende informatie over landgebruik. Onderstaande lijst toont hoe de verschillende typen landgebruik zijn ingedeeld in twee categorieën: verhard en onverhard. De categorie *overig* is buiten beschouwing gelaten, omdat het bij deze klasse vaak gaat om particulier terrein waarvan het daadwerkelijke landgebruik onbekend is.

- Verhard: bedrijfsterrein, fietsers, industriegebouw, gebouw, gemengd verkeer, parkeren, voetgangers, overig verhard, spoorbaanlichaam, autosnelweg, autoweg, kas, regionale weg, opslag-tank
- Onverhard: bos, grasland, onverhard, overig groen, zand, duin, ruiters

3.3.3. Afstand tot oppervlaktewater

Oppervlaktewater is in dit onderzoek eveneens afgeleid uit de Kleinschalige Basiskaart (KBK). Uit deze kaart zijn alle klassen oppervlaktewater *waterloop*, *rivier* en *meer* geselecteerd. Deze klassen zijn

samen gevoegd tot één uniforme waterlaag. Op basis hiervan is voor elke peilbuis de afstand tot het dichtstbijzijnde oppervlaktewater bepaald.

3.3.4. Riool, DIT en drainage

De gegevens over de ondergrondse leidingen zijn afkomstig van de gemeente Rotterdam. Deze kaart bevat de ligging en het type van de leidingen in de ondergrond. Binnen dit onderzoek zijn drie hoofd categorieën onderscheiden: riool, drainage en DIT. Het type riool omvat verschillende soorten leidingen, namelijk: Gemengd Riool, Hemelwaterriool, Persleiding en Vuilwaterriool.

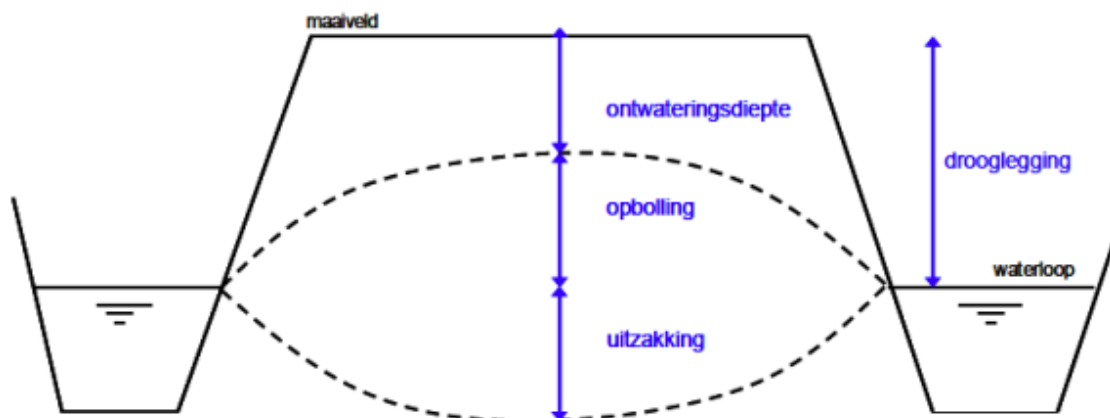
Voor de analyse zijn de drie hoofdtypen leidingen (riool, DIT en drainage) als afzonderlijke lagen opgeslagen. Op deze manier kon per peilbuis worden vastgesteld of, en zo ja welk type leiding in de nabijheid van een peilbuis aanwezig is. Dit maakt het mogelijk om de invloed van verschillende typen leidingen op de grondwaterstanden afzonderlijk te onderzoeken.

3.3.5. Drooglegging

De drooglegging is het hoogteverschil tussen het maaiveld en het oppervlaktewaterpeil (van der Zaag, 2022). Figuur 3.4 geeft een schematische weergave van dit begrip, samen met de betekenis van de ontwateringsdiepte.

De gegevens zijn afkomstig uit een kaartlaag die beschikbaar is via ArcGIS Online omgeving van de Gemeente Rotterdam. Het droogleggingsniveau is hierin vastgelegd op straatniveau en wordt uitgedrukt in meters. Deze kaart maakt het mogelijk om per peilbuis de lokale drooglegging te bepalen en zo te analyseren in hoeverre de grondwaterstanden worden beïnvloed door de afstand tot het oppervlaktewaterpeil.

Daarnaast gelden vanuit de gemeente Rotterdam eisen voor drooglegging en ontwateringsdiepte. Voor nieuwbouw- en herstructureringsgebieden moet de drooglegging minimaal 1,20 meter bedragen ten opzichte van het maaiveld (van der Zaag, 2022). In bestaand stedelijk gebied geldt een minimale drooglegging van 1,00 meter (van der Zaag, 2022). Voor de ontwateringsdiepte zijn de volgende richtlijnen vastgesteld: in bebouwde omgeving minimaal 0,80 meter, in openbaar groen minimaal 0,50 meter, en voor particulier terrein zijn eigenaren zelf verantwoordelijk voor voldoende ontwateringsdiepte (van der Zaag, 2022).



Figuur 3.4: Definitie Drooglegging en Ontwateringsdiepte, overgenomen uit (Dano, 2014)

3.3.6. Grondsoort

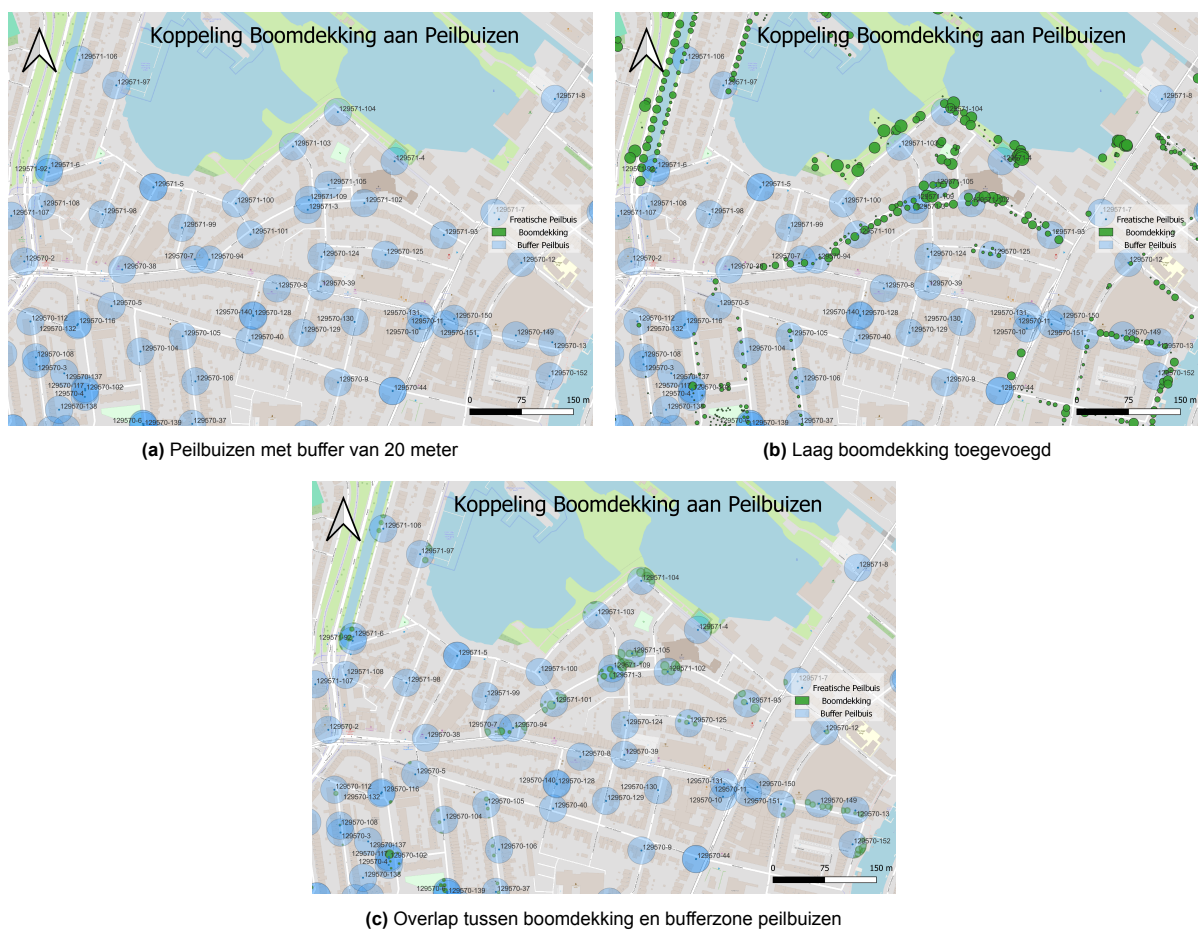
Voor de ondergrond is gebruikgemaakt van een ArcGIS-laag met bodemgegevens die is samengesteld op basis van boringen. Deze kaart geeft uitsluitend informatie over de toplaag van de bodem. De dikte van de toplaag varieert tussen 1,5 en 2,5 m. Het grootste deel van Rotterdam bestaat uit zand, voornamelijk doordat veel delen van de stad in het verleden zijn opgehoogd. Voor elke peilbuis is de

bodemclassificatie bepaald door de dichtstbijzijnde boring uit de kaartlaag te koppelen. Deze aanpak geeft geen informatie over dieperliggende lagen.

Het niveau van het bovenste funderingshout valt niet noodzakelijk binnen de toplaag. Bij oudere op houten palen gefundeerde woningen varieert het per gebied, indicatief ligt het bovenste funderingshout tussen 1,0 en 2,5 m onder maaiveld (Gemeente Rotterdam, z.d.).

3.3.7. Bepalen Gebiedskenmerken per Peilbuis

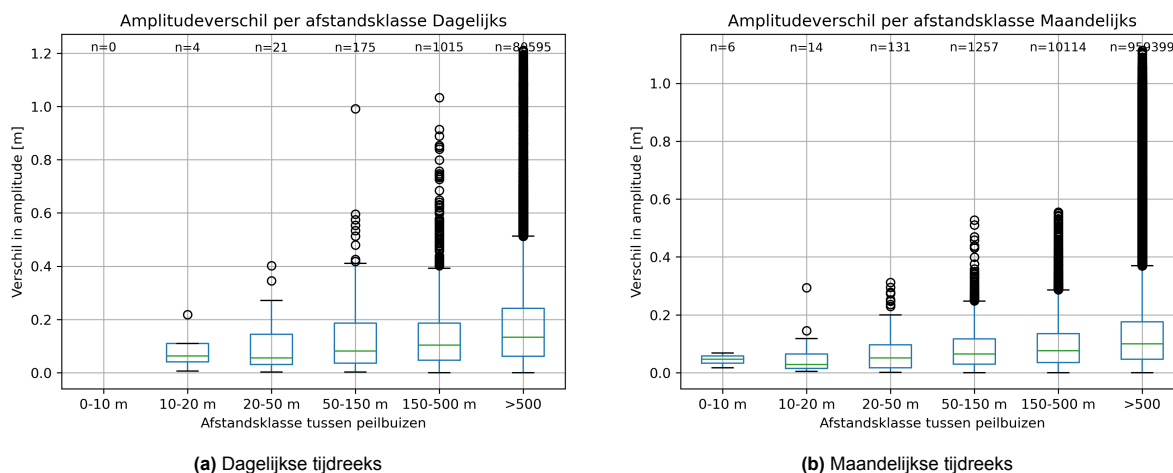
Alle gebiedskenmerken, zoals hierboven beschreven, zijn in QGIS beschikbaar als kaartlaag. Om de gebiedskenmerken aan de peilbuizen te koppelen is een buffer van 20 meter rond elke peilbuis getekend. De buffers zorgen ervoor dat de directe omgeving van de peilbuis wordt meegenomen, aangezien gebiedskenmerken in de nabije omgeving logischerwijs invloed hebben op de grondwaterstand. In QGIS zijn de verschillende kaartlagen over de gebufferde peilbuizen gelegd. Per peilbuis is het door elk kenmerk ingenomen oppervlak bepaald en uitgedrukt als percentage van het totale bufferoppervlak. Figuur 3.5 illustreert deze werkwijze voor boomdekking, voor de overige kenmerken is dezelfde procedure toegepast.



Figuur 3.5: Visualisatie van koppeling gebiedskenmerken, in dit geval boomdekking, aan de peilbuizen.

De keuze voor 20 meter is gebaseerd op twee verschillende methodes. Volgens een rapport over een rioolvervangingsproject wordt aangegeven dat de invloed van een DIT-systeem 10 meter is. Een buffer van 20 meter is dus conservatief, maar blijft binnen dezelfde orde grootte. Om deze keuze verder te onderbouwen is een afstandsanalyse uitgevoerd. Voor elke peilbuis uit de dagelijkse en maandelijkse reeksen is de afstand tot elk andere peilbuis berekend, samen met het verschil in amplitude. Deze koppels zijn verdeeld in afstandsklassen en weergegeven als boxplots (figuur 3.6). Waarbij de y-as het verschil in amplitude tussen de koppels laat zien. Het aantal 'n' boven de boxplots staat voor het aantal koppels binnen de betreffende afstandsklasse.

Uit figuur 3.6 blijkt dat peilbuizen binnen 20 meter over het algemeen een klein verschil in amplitude vertonen, er zijn slechts enkele outliers. Dit patroon is zichtbaar in zowel de dagelijkse als de maandelijkse tijdreeksen. Bij afstanden vanaf de klasse 20 tot 50 meter is de variatie duidelijk groter. Dit suggereert dat peilbuizen binnen 20 meter van elkaar zich vergelijkbaar gedragen, en dat het dus aannemelijk is dat gebiedskenmerken binnen die straal invloed hebben. De aanname is daarom dat de buffer van 20 meter het lokale effectgebied voldoende goed weergeeft.



Figuur 3.6: Amplitudeverschillen per afstandsklasse

3.4. Analyse Peilbuizen en Gebiedskenmerken

De data die volgt uit sectie 3.3.7, waarbij alle peilbuizen zijn gekoppeld aan hun gebiedskenmerken binnen een straal van 20 meter, vormt het uitgangspunt van deze verdere analyse. De analyse bestaat uit drie onderdelen. Eerst is de algemene relatie tussen de amplitude van de grondwaterreeksen en de gebiedskenmerken onderzocht, waarbij alle freatische peilbuizen zijn meegenomen, dit is gedaan voor zowel dagelijkse als maandelijkse tijdreeksen. Vervolgens is gekeken naar de hoogte van de grondwaterstand ten opzichte van het maaiveld en de invloed van bepaalde gebiedskenmerken daarop. Ten slotte is ingezoomd op specifieke wijken met grondwater- en funderingsproblemen. Door gericht te kijken naar deze wijken kan de invloed van individuele gebiedskenmerken worden bepaald en in de context van de wijk situatie worden geïnterpreteerd.

3.4.1. Algemene trend

Om de relatie tussen grondwaterdynamiek en gebiedskenmerken te onderzoeken, is per peilbuis de amplitude gekoppeld aan de kenmerken binnen een straal van 20 meter.

De volgende gebiedskenmerken zijn meegenomen: boomdekking, verhard oppervlak, drooglegging, afstand tot oppervlaktewater, hoeveelheid riolering, aanwezigheid van een DIT-systeem of drainage, en grondsoort. Voor de analyse is elk kenmerk in klassen verdeeld:

- DIT en drainage: onderscheid gemaakt tussen wel of niet aanwezig.
- Grondsoort: indeling volgens de oorspronkelijke labels in de data (zand, klei, veen en slib).
- Boomdekking, verharding, drooglegging en riolering: klassen zijn opgesteld op basis van de verdeling van de kenmerken, waarbij gestreefd is naar een evenwichtige spreiding over de peilbuizen, tenzij de verdeling dat niet toeliet. De verdeling van de gebiedskenmerken is te zien in bijlage B.

Per gebiedskenmerk is een boxplot opgesteld om de verdeling van de amplitudes per klasse inzichtelijk te maken. De analyse is uitgevoerd op zowel dagelijkse als maandelijkse tijdreeksen. Door de hogere meetfrequentie geven de dagelijkse reeksen een scherper beeld, terwijl de maandelijkse reeksen dezelfde patronen bevestigen maar in afgezwakte vorm, zie hoofdstuk 4.

3.4.2. Grondwaterniveaus ten opzichte van maaiveld

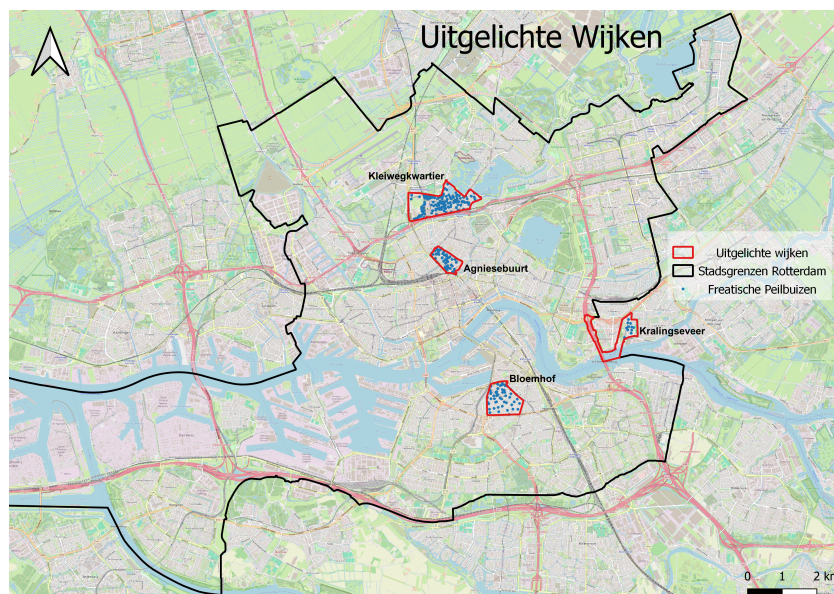
Dit deel vult de amplitude-analyse aan met een niveau-analyse, gericht op twee gebiedskenmerken: drooglegging en verharding. Verharding is meegenomen omdat in de algemene analyse een sterke samenhang met de grondwateramplitude is gevonden. Drooglegging is opgenomen omdat dit de lokale streefdiepte onder maaiveld benadert en verschillen tussen locaties helpt verklaren.

Voor elke peilbuis is op basis van dagelijkse metingen de mediaan van de grondwaterstandsreeks bepaald. De grondwaterdiepte is gedefinieerd als het verschil tussen maaiveldhoogte en deze mediane grondwaterstand. Daarnaast zijn de gemiddeld lage (GLG) en gemiddeld hoge (GHG) grondwaterstand ten opzichte van maaiveld bepaald.

De relatie tussen mediane grondwaterstand en (i) drooglegging en (ii) verharding is weergegeven met boxplots per klasse. Voor verharding zijn eveneens de GLG en GHG ten opzichte van maaiveld per verhardingsklasse gevisualiseerd. De klasse-indeling voor drooglegging en verharding is gelijk aan die uit de algemene analyse.

3.4.3. Wijkspecifiek

De tot dusver uitgevoerde analyse beschrijft de relatie tussen de grondwaterstanden en gebiedskenmerken voor alle peilbuizen in Rotterdam. Voor een specifiek oordeel over afzonderlijke kenmerken is aanvullend een wijkspecifieke analyse uitgevoerd voor vier wijken met bekende funderings- en wateropgaven: Kralingseveer, Bloemhof, Kleiwegkwartier en de Agniesebuurt. Deze zijn uitgelicht in figuur 3.7. In Kralingseveer en Bloemhof is veel bebouwing zonder paalfundering, waardoor woningen kunnen verzakken, scheef komen te staan en wateroverlast ervaren (Gemeente Rotterdam, n.d.-b). In het Kleiwegkwartier staan veel woningen op houten palen die gevoelig zijn voor droogstand en paalrot bij lage grondwaterstanden. De Agniesebuurt kende veel problemen door wateroverlast waarna riolen zijn vervangen en waterbergingen aangelegd, veel bewoners waren bezorgd over de effectiviteit van de maatregelen (Gemeente Rotterdam, n.d.-a). De analyse is uitgevoerd op de dagelijkse meetreeksen omdat de hogere meetfrequentie beter inzicht geeft in lokale fluctuaties van de grondwaterstand.



Figuur 3.7: Ligging van de geselecteerde wijken in Rotterdam.

Eerst zijn per wijk de gemiddelde waarden van de gebiedskenmerken bepaald op basis van de peilbuizen binnen die wijk. Als voorbeeld is een overzicht van de kenmerken voor Kralingseveer weergegeven in tabel 3.1. De kenmerken voor Bloemhof, Agniesebuurt en Kleiwegkwartier zijn opgenomen in bijlage C.

Boomdekking [%]	Verharding [%]	Drooglegging [m]	DIT	Riool [%]	Drainage [%]	Afstand Oppervlaktewater [m]	Grond
0,246	0,812	1,157	0	0,119	0	51,689	klei

Tabel 3.1: Gemiddelde gebiedskenmerken voor Kralingseveer.

Deze waarden vormen het uitgangspunt voor de selectie van vergelijkbare peilbuizen buiten de betreffende wijk. Hieronder wordt stapsgewijs beschreven hoe deze vergelijkbare peilbuizen zijn geselecteerd.

Allereerst is de verdeling van de gebiedskenmerken van alle peilbuizen bepaald en weergegeven met histogrammen (zie bijlage B). Waarna voor elk kenmerk de standaarddeviatie (std) is berekend. De marge rondom de wijkwaarde is vervolgens vastgesteld als de wijkwaarde plus of min een factor maal de standaarddeviatie. Deze factor is zo gekozen dat niet meer dan 50 procent van alle dagelijkse peilbuizen binnen de marge valt. Op die manier blijft de selectie specifiek genoeg om de wijkomstandigheden te representeren, maar groot genoeg om voldoende peilbuizen over te houden. Tabel 3.2 toont hiervan een voorbeeld voor Kralingseveer, inclusief de onder- en bovengrens van de marges en het percentage peilbuizen dat binnen de marge valt. Omdat de gebiedskenmerken per wijk verschillen, zijn ook de toegepaste factoren per wijk aangepast. Bijlage C bevat de tabellen met de marges voor deze wijken.

Kenmerk	Gemiddelde	Std	Factor	Waarde Wijk	Ondergrens (wijk)	Bovengrens (wijk)	% binnen marge (wijk)
Boomdekking %	0,260	0,510	0,350	0,250	0,070	0,430	51,1
Verharding %	0,720	0,260	0,600	0,810	0,660	0,970	46,4
Drooglegging [m]	1,560	1,230	0,250	1,160	0,850	1,460	58,0
Riool %	0,130	0,070	0,700	0,120	0,070	0,170	50,0
Afstand Water [m]	105,01	81,16	0,500	51,69	11,11	92,27	51,5

Tabel 3.2: Overzicht van statistieken Kralingseveer per kenmerk (met marges voor wijkwaarden).

De eerste selectie is gemaakt met de relatief onveranderbare kenmerken: drooglegging en afstand tot oppervlaktewater. Deze kenmerken vormen de basis omdat ze grotendeels vastliggen in de ruimtelijke inrichting en niet eenvoudig te wijzigen zijn. Met de bepaalde marges blijven er, van de 405 dagelijkse peilbuizen, circa 90 tot 100 peilbuizen over.

Om vervolgens het effect van de gebiedskenmerken afzonderlijk te analyseren, zijn deze kenmerken stapsgewijs buiten de filtering gelaten. Dat betekent dat alle kenmerken binnen hun marges zijn gefixeerd, terwijl het te onderzoeken kenmerk vrij kon variëren. Op deze manier kan worden vastgesteld of verschillen in amplitude samenhangen met variatie in dat kenmerk.

Bovenstaande stap bleek voor drainage niet werkbaar, omdat binnen de vergelijkbare set geen onderscheidende groepen of voldoende aantallen overbleven. Voor dit kenmerk is daarom na de basisselectie, op basis van drooglegging en afstand tot oppervlaktewater, een eenvoudiger onderscheid gemaakt tussen aanwezigheid en afwezigheid van drainage.

Grondsoort is niet meegenomen in de analyse, omdat de toplaag in Rotterdam grotendeels uit zand bestaat. Hierdoor zijn er te weinig verschillen om een betekenisvol verband met de amplitude vast te stellen. Dit wordt ook ondersteund door de resultaten in hoofdstuk 4.

Samenvattend is per wijk, met drooglegging en afstand tot oppervlaktewater als vaste basis, onderzocht welk effect variaties in afzonderlijke gebiedskenmerken hebben op de amplitude. De resultaten hiervan zijn opgenomen in hoofdstuk 4.

3.5. Toetsing aan Funderings- en Grondwaterrichtlijnen

Belangrijk voor het beperken van grondwaterover- en onderlast is dat de grondwaterstand binnen een acceptabel bereik blijft. Een te hoge grondwaterstand kan leiden tot optrekkend vocht en schade aan gebouwen, terwijl een te lage stand risico's oplevert voor paalrot en zettingen. In dit onderdeel wordt beoordeeld of de huidige grondwaterstanden, gegeven de aanwezige gebiedskenmerken, binnen een veilige bandbreedte vallen en in welke mate overschrijdingen met deze kenmerken samenhangen. Deze toetsing vormt de basis om, in samenhang met de wijkgerichte analyse, te bepalen welke ingrepen het meest kansrijk zijn om risico's te verminderen.

De beoordeling is stapsgewijs uitgevoerd:

1. Bepalen van de bandbreedte

Hiervoor is aangesloten bij de richtlijnen die de gemeente Rotterdam hanteert voor ontwateringsdiepte en drooglegging (van der Zaag, 2022), en is tevens gekeken naar het niveau van het bovenste funderingshout.

- Ontwateringsdiepte: minimaal 0,80 m in bebouwde omgeving, 0,50 m in openbaar groen; particuliere percelen vallen onder eigen verantwoordelijkheid.
- Funderingshout: per peilbuis is het niveau van het bovenste funderingshout binnen een straal van 20 meter vastgesteld, op basis van de funderingskaart van de gemeente Rotterdam (Gemeente Rotterdam, z.d.). Telkens is de hoogste waarde gekozen om een strenge toetsing te hanteren.
- Singelpeil: Het singelpeil fungeert als sturingsniveau voor de grondwaterstand. De diepte van het singelpeil ten opzichte van het maaiveld is de drooglegging. Wanneer de grondwaterstand structureel onder dit peil ligt is de kans groter op bodemdaling

2. Selectie van wijken

De analyse is toegepast op de vier eerder uitgelichte wijken: Kralingseveer, Bloemhof, de Agniesebuurt en het Kleiwegkwartier.

- Kralingseveer: voornamelijk niet-onderheide woningen, geen funderingshoutgegevens voor selectie peilbuizen.
- Bloemhof: grotendeels niet-onderheide woningen, maar enkele peilbuizen liggen nabij paalfunderingen.
- Agniesebuurt en Kleiwegkwartier: voornamelijk woningen op houten palen, daarom geschikt voor toetsing op hoogte funderingshout.

3. Toetsingscriteria

Per peilbuis is getoetst op:

- GHG te ondiep: ontwateringsdiepte is kleiner dan 0,80 meter onder maaiveld.
- GLG onder het niveau van het bovenste funderingshout (indien beschikbaar).
- Mediane grondwaterstand onder singelpeil.

4. Invloed van gebiedskenmerken op overschrijdingen

Voor elk criterium uit (3) is de relatie met drie gebiedskenmerken geanalyseerd: verharding, DIT en drainage. Peilbuizen zijn per kenmerk geclassificeerd volgens de eerder gehanteerde klassen. Per klasse is het aandeel peilbuizen met een overschrijding weergegeven door middel van boxplots.

4

Resultaten

Dit hoofdstuk presenteert de resultaten van de analyses waarmee de onderzoeksvragen zijn beantwoord en de hypothesen (H1–H7) uit hoofdstuk 2.7 zijn getoetst. De resultaten geven inzicht in de relatie tussen stedelijke gebiedskenmerken en de amplitude van de grondwaterstand, en laten zien welke factoren de grootste invloed hebben op fluctuaties die kunnen leiden tot funderingsproblemen.

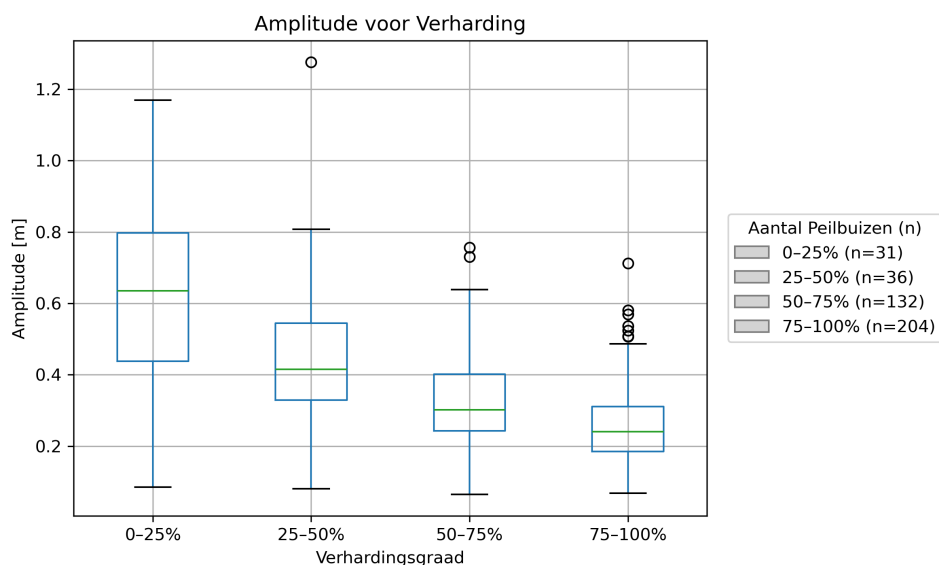
Het hoofdstuk is opgebouwd in vier delen. In het eerste deel worden de algemene relaties weergegeven tussen de grondwateramplitude en de belangrijkste gebiedskenmerken, op basis van alle geselecteerde peilbuizen. Het tweede deel vult de amplitude analyse aan met een niveau analyse. Het derde deel richt zich op wijkniveau en laat zien hoe afzonderlijke kenmerken doorwerken in wijken met grondwater- en funderingsproblemen. Het laatste deel toetst de grondwaterstand aan de vastgestelde ontwateringsdiepte en het niveau van het funderingshout, om inzicht te geven in waar de huidige situatie risico's oplevert en waar verbetering mogelijk is.

4.1. Algemene Relatie

In dit eerste onderdeel worden de resultaten gepresenteerd van de relatie tussen de amplitude en de verschillende gebiedskenmerken, zoals beschreven in sectie 3.4.1. De getoonde resultaten zijn op basis van de dagelijkse tijdreeksen. Daarnaast is dezelfde analyse herhaald voor de maandelijkse tijdreeksen; de resultaten hiervan zijn opgenomen in bijlage A. Hoewel de uitkomsten grotendeels dezelfde trends laten zien, bieden de maandelijkse reeksen door hun lagere meetfrequentie een minder gedetailleerd beeld. De resultaten worden hieronder gepresenteerd per gebiedskenmerk.

4.1.1. Verhard oppervlak

Figuur 4.1 toont de boxplot van de relatie tussen de mate van verharding en de amplitude. De resultaten laten zien dat een groter aandeel verhard oppervlak samenhangt met een lagere amplitude van de grondwaterstand. Dit duidt erop dat een hogere mate van verharding de variatie in grondwaterstanden dempt. Daarmee wordt de hypothese ondersteund dat vegetatierijke gebieden een grotere seizoensamplitude vertonen in de grondwaterstand dan sterk verharde gebieden.

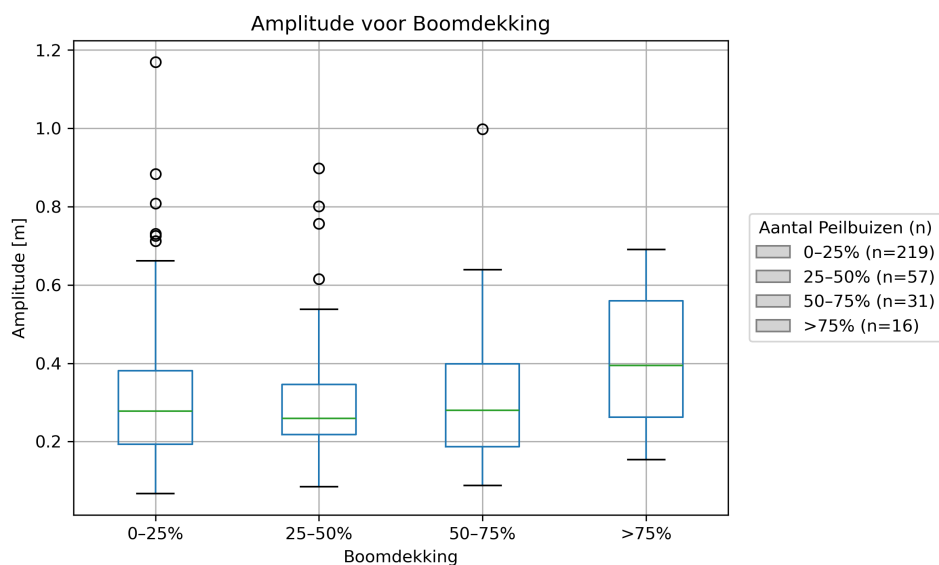


Figuur 4.1: Boxplot van de amplitude per categorie verhard oppervlak (dagelijkse tijdseries).

4.1.2. Boomdekking

Figuur 4.2 toont de relatie tussen de mate van boomkroonoppervlak boven de peilbuis en de amplitude. Over het geheel genomen is er geen duidelijke samenhang zichtbaar. Wel lijkt bij een boomdekking van meer dan 75% sprake te zijn van een grotere variatie in de grondwaterstand.

De hypothese dat een hogere boomdekking, via verhoogde verdamping, leidt tot sterkere fluctuaties in de grondwaterstand wordt met deze resultaten slechts gedeeltelijk ondersteund. Alleen bij een zeer hoge mate van boomdekking lijkt een dergelijk effect zichtbaar, terwijl bij lagere waarden geen systematisch verband wordt aangetoond.



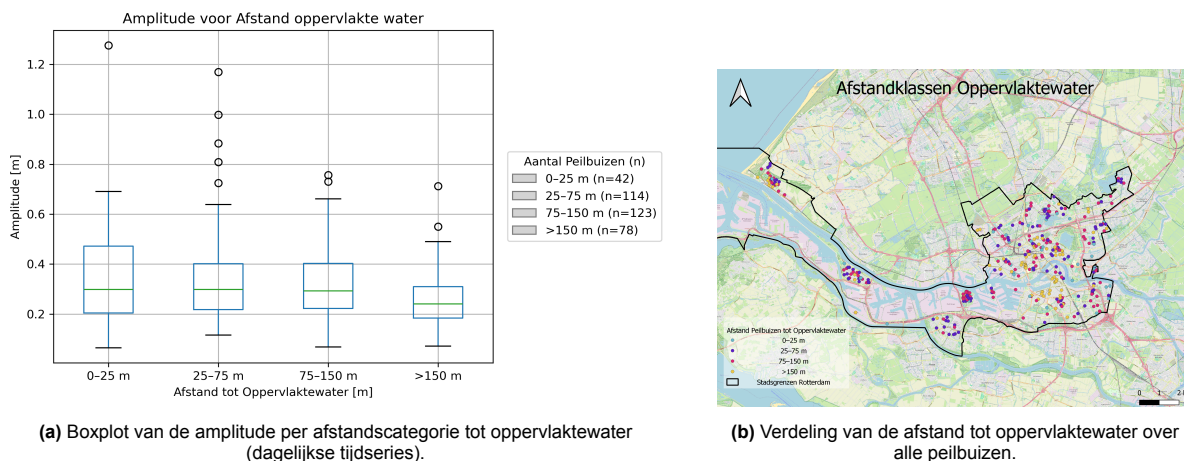
Figuur 4.2: Boxplot van de amplitude per categorie boomdekking (dagelijkse tijdseries).

4.1.3. Afstand tot oppervlaktewater

Figuur 4.3 laat de relatie zien tussen de afstand van een peilbuis tot het dichtstbijzijnde oppervlaktewater en de amplitude van de grondwaterstand. Op basis van de boxplot is geen eenduidig verband

zichtbaar. De hypothese dat peilbuizen dicht bij oppervlaktewater kleinere fluctuaties zouden vertonen, wordt met deze analyse niet bevestigd. Integendeel, er lijkt eerder een lichte trend aanwezig waarbij grotere afstanden tot oppervlaktewater juist samengaan met kleinere amplitudes.

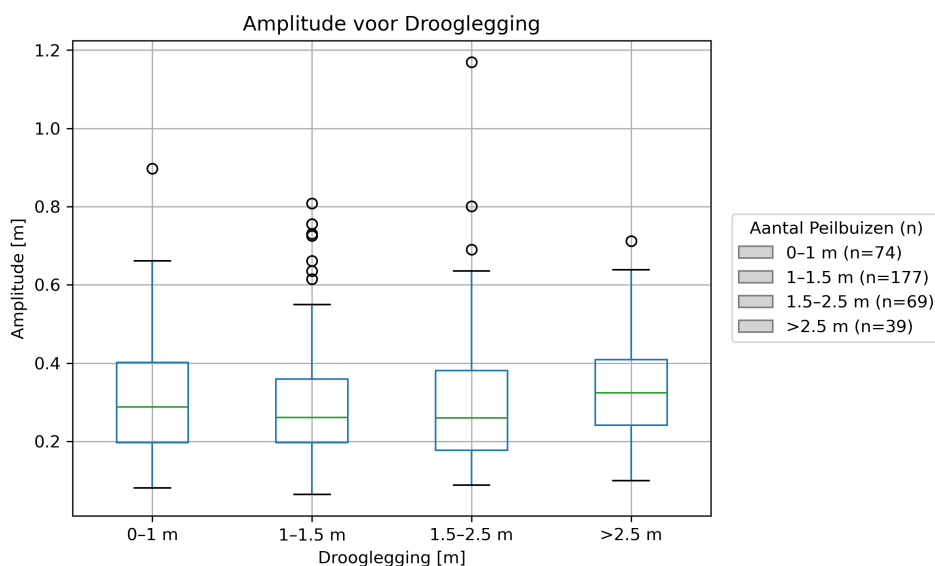
Een mogelijke verklaring zou de invloed van het getij kunnen zijn voor peilbuizen nabij de Nieuwe Maas. De verdeling van de afstanden (rechts in Figuur 4.3) laat hiervoor echter geen duidelijk patroon zien.



Figuur 4.3: Relatie tussen amplitude en afstand tot oppervlaktewater. Links: Boxplot per afstandscategorie. Rechts: Kaart van de afstanden tot oppervlaktewater.

4.1.4. Drooglegging

Figuur 4.4 toont de relatie tussen drooglegging en de amplitude van de grondwaterstand. Uit de resultaten blijkt geen duidelijk verband tussen beide variabelen. De hypothese dat een grotere drooglegging leidt tot kleinere fluctuaties in de grondwaterstand wordt met deze analyse niet bevestigd. De spreiding in amplitudes is vergelijkbaar voor verschillende niveaus van drooglegging, zonder een consistent afnemende of toenemende trend.

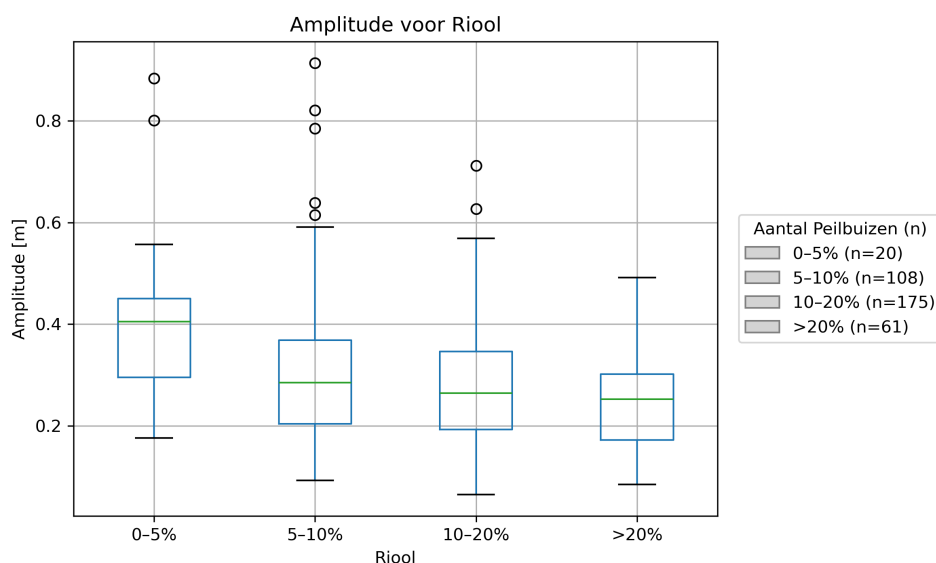


Figuur 4.4: Boxplot van de amplitude per categorie drooglegging (dagelijkse tijdseries).

4.1.5. Riool

Figuur 4.5 toont de relatie tussen de aanwezigheid van riolering, in de straal van 20 meter rond de peilbuizen, en de amplitude van de grondwaterstand. Uit de resultaten blijkt dat peilbuizen die omgeven

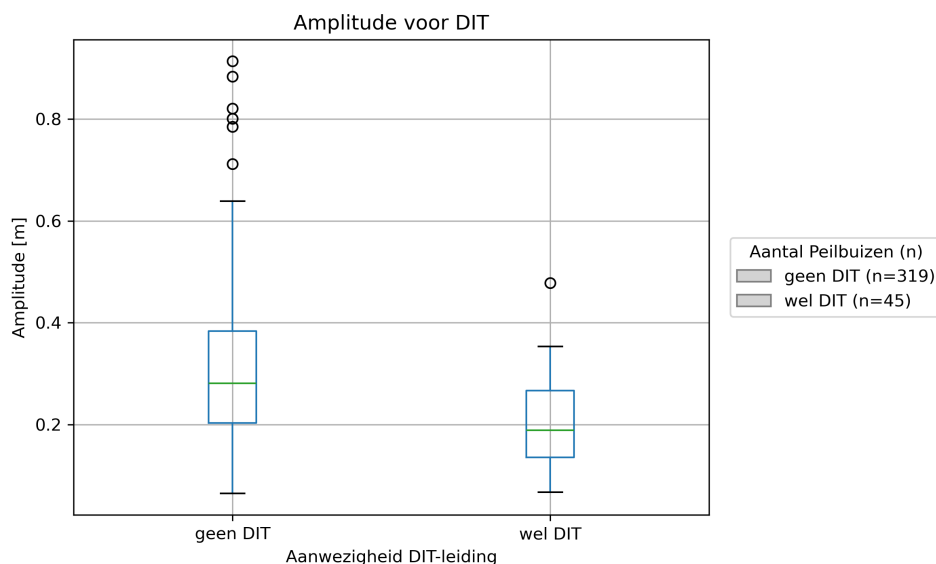
zijn door een groter aandeel riolering gemiddeld een kleinere amplitude vertonen. De x-as toont het percentage riooloppervlak binnen de invloedssfeer van 20 meter rond de peilbuis. Dit kan erop wijzen dat riolen, met name oudere of lekkende systemen, functioneren als drainage. Daarmee zou de hypothese worden ondersteund dat riolering lokaal een stabiliserend effect kan hebben op de grondwaterstand.



Figuur 4.5: Boxplot van de amplitude per categorie riool (dagelijkse tijdseries).

4.1.6. DIT-Systeem

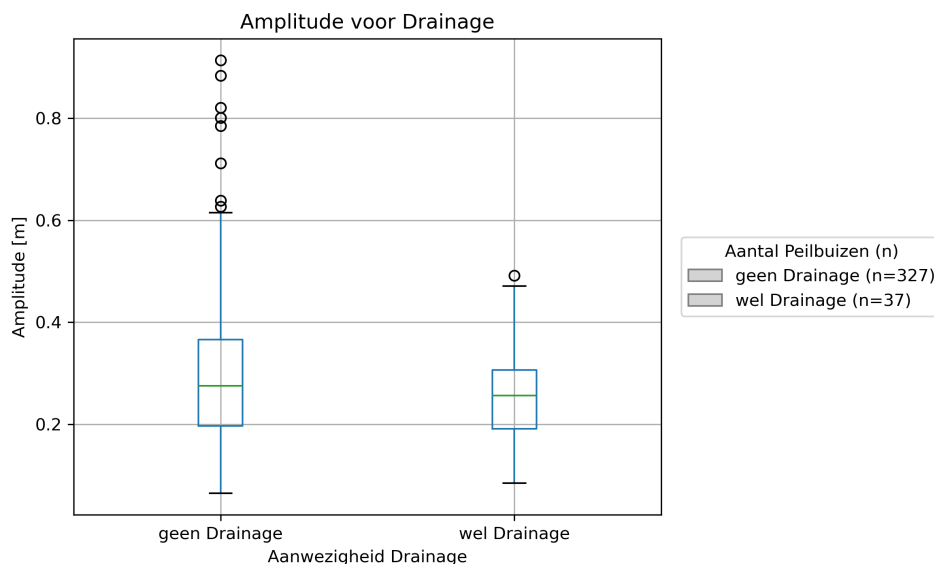
Figuur 4.6 toont de relatie tussen de aanwezigheid van een DIT-systeem en de amplitude van de grondwaterstand. Er is een duidelijk onderscheid zichtbaar tussen peilbuizen met en zonder DIT in de omgeving. Peilbuizen nabij een DIT-systeem vertonen gemiddeld een kleinere amplitude, wat aansluit bij de hypothese dat DIT-systemen bijdragen aan het reguleren van de grondwaterstand en daarmee de fluctuaties dempen.



Figuur 4.6: Boxplot van de amplitude voor aanwezigheid DIT (dagelijkse tijdseries).

4.1.7. Drainage

Figuur 4.7 laat zien dat de aanwezigheid van drainage samenhangt met een kleinere amplitude van de grondwaterstand. Dit resultaat ondersteunt de hypothese dat drainage een stabiliserend effect heeft, doordat overtollig grondwater versneld wordt afgevoerd en fluctuaties in de grondwaterstand worden beperkt. Het effect is kleiner dan voor de DIT leiding, dit is in lijn met de hypothese gezien een DIT systeem ook nog infiltreert.

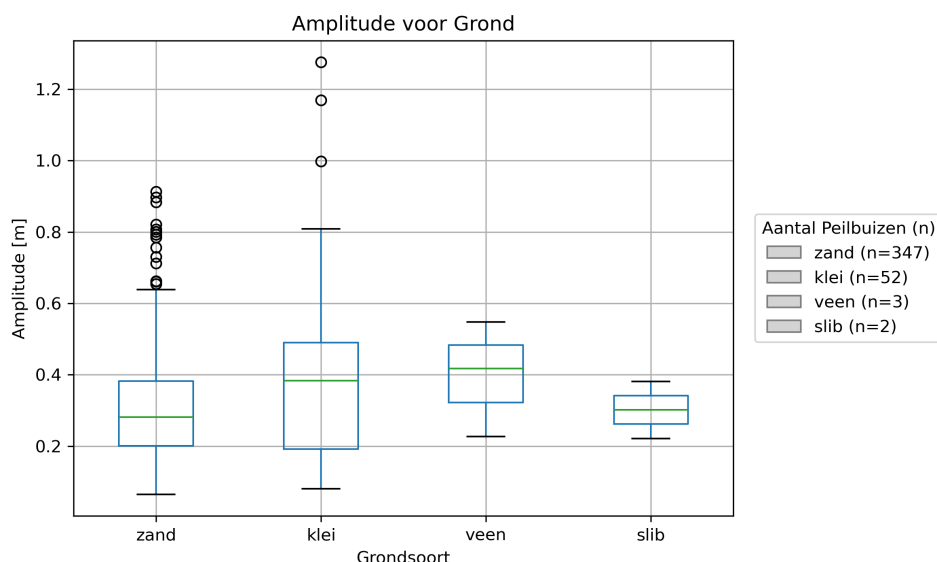


Figuur 4.7: Boxplot van de amplitude voor aanwezigheid drainage (dagelijkse tijdseries).

4.1.8. Grondsoort

Figuur 4.8 laat zien dat er geen duidelijk verband is tussen grondsoort en de amplitude van de grondwaterstand. De dataset bevat voornamelijk peilbuizen met een zandige toplaag (n = 347) en slechts een beperkt aantal met een kleiige toplaag (n = 52). Hierdoor is de variatie te gering om een robuuste vergelijking te maken tussen de verschillende grondsoorten.

De oorspronkelijke hypothese was dat een kleiige toplaag de infiltratiecapaciteit tijdens hevige neerslag beperkt ten opzichte van een zandige toplaag. Wat zou kunnen leiden tot een kleinere amplitude van de grondwaterstand in gebieden met kleigronden. Deze hypothese wordt echter niet bevestigd met de huidige analyse. Met deze analyse kan ook niks gezegd worden over de horizontale werking van grondsoort.

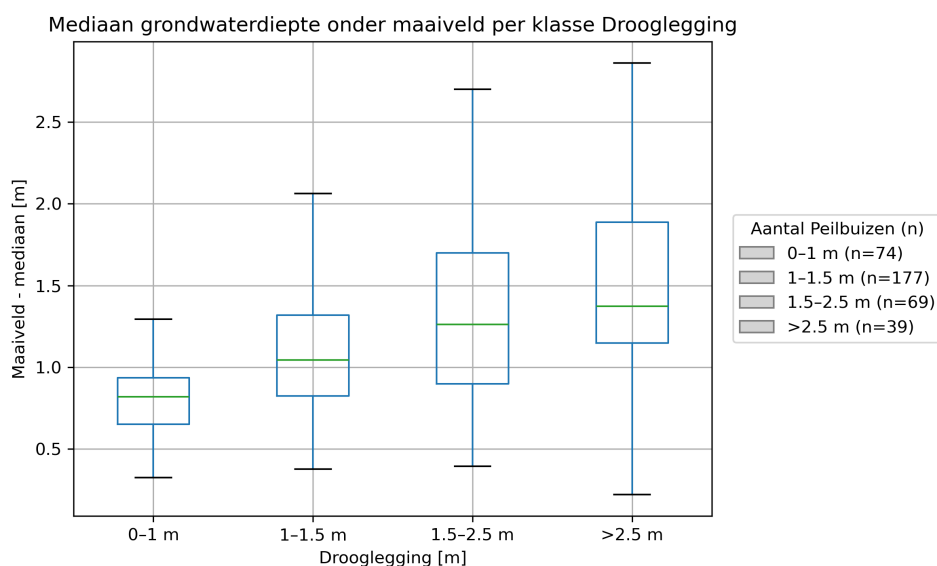


Figuur 4.8: Boxplot van de amplitude per categorie grondsoort (dagelijkse tijdseries).

4.2. Grondwaterniveaus ten opzichte van maaiveld

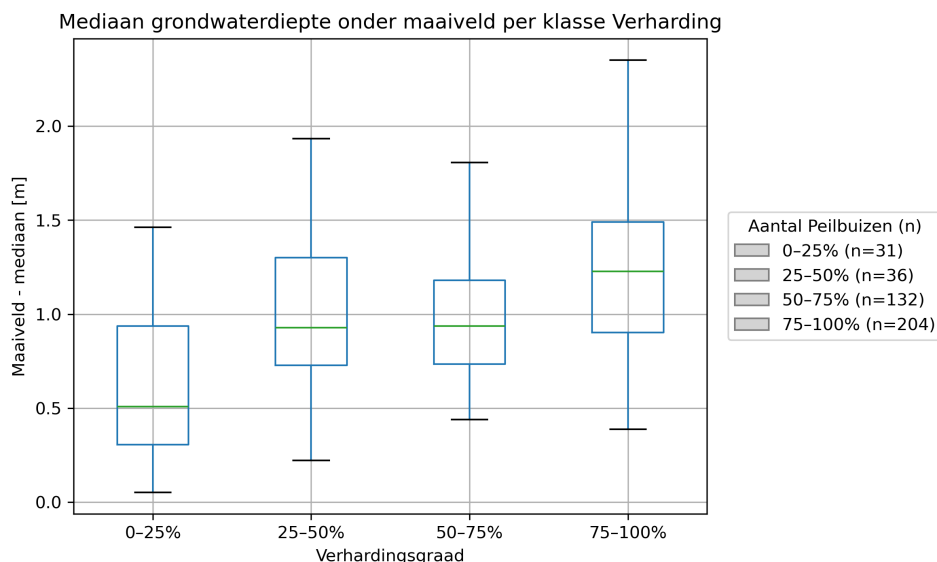
De analyse van de invloed van gebiedskenmerken op het grondwaterniveau ten opzichte van maaiveld is uitgevoerd voor drooglegging en verharding. Voor de mediane grondwaterstand is naar beide kenmerken gekeken. De GHG en de GLG zijn geanalyseerd naar verhardingsklasse.

Uit de resultaten blijkt dat drooglegging van grote invloed is. Een grotere drooglegging gaat samen met een grotere diepte van de mediane grondwaterstand onder het maaiveld (Figuur 4.9). Dit resultaat is te verwachten, omdat de drooglegging het grondwaterniveau naar het beoogde singelpeil stuurt. De verticale as geeft de diepte onder maaiveld in meters weer.



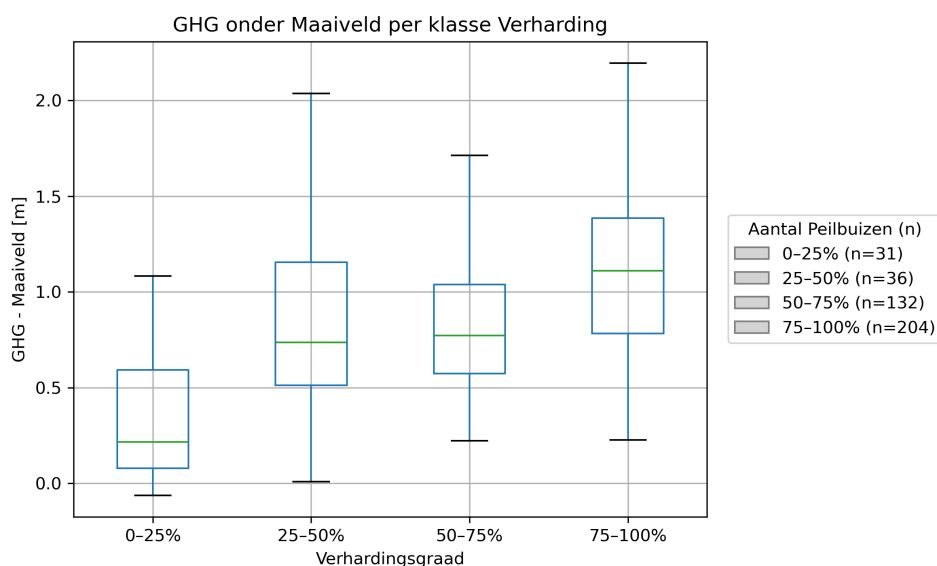
Figuur 4.9: Mediaan van de grondwaterstand t.o.v. maaiveld per klasse drooglegging.

Verharding hangt duidelijk samen met de mediane grondwaterstand (Figuur 4.10). In de laagste verhardingsklasse (meeste groen) ligt de mediane grondwaterstand het dichtst bij het maaiveld. Vanaf 25–50 % verharding neemt de afstand tot het maaiveld geleidelijk toe tot en met de hoogste klasse. Dit wijst op een diepere grondwater in sterker verharde gebieden. Tussen de laagste verhardingsklasse en de overige klassen is een duidelijke sprong zichtbaar, wat kan duiden op een andere oorzaak (zie hoofdstuk 5).



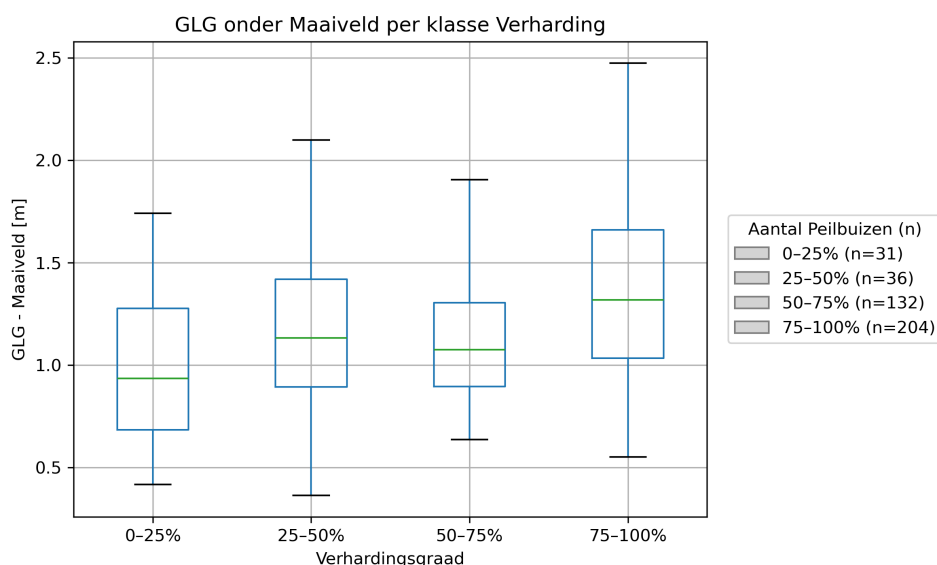
Figuur 4.10: Mediaan van de grondwaterstand t.o.v. maaiveld per verhardingsklasse.

Voor verharding zijn daarnaast de GHG en de GLG ten opzichte van het maaiveld geanalyseerd. Figuur 4.11 toont de GHG. In de groenste gebieden ligt de GHG rond 0,20 m onder maaiveld, terwijl in de hoogste verhardingsklassen waarden tussen circa 0,70 en 1,20 m onder maaiveld voorkomen. Ook hier is een duidelijke sprong zichtbaar tussen de laagst verharde klasse en de overige klassen. Binnen de drie meest verharde klassen blijft een lichte trend met grotere ontwateringsdiepte zichtbaar.



Figuur 4.11: GHG t.o.v. maaiveld per verhardingsklasse.

Figuur 4.12 laat voor de GLG een vergelijkbaar, maar minder uitgesproken patroon zien. De stap tussen de laagst verharde klasse en de overige klassen is nog aanwezig, maar kleiner. In de minst verharde klasse ligt de GLG gemiddeld op circa 0,90 m onder maaiveld. Tussen de hoogste drie klassen bedraagt het meest voorkomende verschil ongeveer 30 cm, waarbij de grondwaterstand in de hoogste verhardingsklasse gemiddeld dieper onder maaiveld ligt.



Figuur 4.12: GLG t.o.v. maaiveld per verhardingsklasse.

4.3. Wijkspecifiek

De bovenstaande resultaten laten voor alle peilbuizen zien hoe de grondwaterstand samenhangt met de verschillende gebiedskenmerken. In dit deel van de resultaten wordt de invloed van afzonderlijke kenmerken nader onderzocht door de analyse toe te passen op de wijken waar grondwater- en funderingsproblemen optreden. De getoonde resultaten zijn gebaseerd op de dagelijkse tijdreeksen, omdat deze de duidelijkste verbanden laten zien in vergelijking tot de maandelijkse tijdreeksen.

De analyse volgt de methode zoals beschreven in sectie 3.4.3. Daarbij worden per wijk peilbuizen geselecteerd die vergelijkbaar zijn qua gebiedskenmerken, zodat het effect van één specifiek kenmerk afzonderlijk kan worden onderzocht. De boxplots tonen steeds het effect van dit kenmerk, waarbij de overige kenmerken zijn gelijkgesteld aan de waarden van de betreffende wijk. De oranje punten binnen de boxplots zijn de individuele peilbuizen. De rode marker representeert de gemiddelde wijkwaarde van de amplitude en het desbetreffende gebiedskenmerk. Hiermee wordt inzicht verkregen in de vraag welke veranderingen in gebiedskenmerken binnen een wijk de grootste invloed kunnen hebben op de grondwateramplitude. De resultaten zijn, net als in de algemene analyse, geordend per gebiedskenmerk.

4.3.1. Boomdekking

In dit onderdeel wordt bekeken hoe de mate van boomdekking rond peilbuizen samenhangt met de amplitude van de grondwaterstand. De resultaten suggereren dat boomdekking in sommige wijken kan bijdragen aan een grotere amplitude van de grondwaterstand, terwijl dit verband in andere wijken minder goed herkenbaar is. Het effect lijkt daarmee niet eenduidig, maar kan in specifieke situaties een rol spelen. Hieronder worden de uitkomsten per wijk besproken.

Agniesebuurt

In de Agniesebuurt bedraagt de huidige boomdekking circa 30 % (tabel C.2). Deze waarde valt in de hogere klasse van figuur 4.13a en maakt daarmee zichtbaar waar de wijk zich bevindt binnen de verdeling. De resultaten suggereren dat een verlaging van de boomdekking naar onder de 14 % kan leiden tot een reductie van de amplitude met ongeveer 10 cm, wanneer wordt gekeken naar de medianen van

de boxplots.

Bloemhof

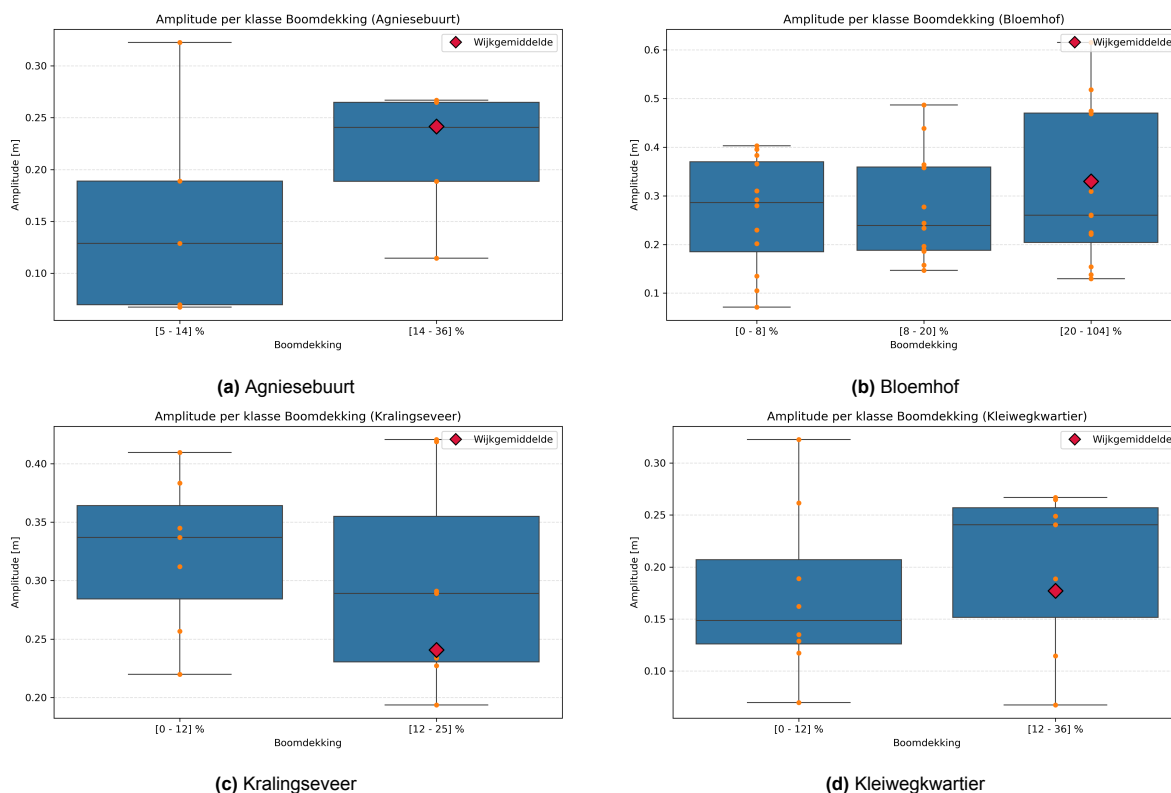
Voor Bloemhof zijn, door de toegepaste filters, meer peilbuizen beschikbaar dan voor de andere wijken. Hierdoor toont figuur 4.13b drie boxplots. De huidige boomdekking in Bloemhof bedraagt circa 21 % (tabel C.1), wat binnen de hoogste klasse valt. Uit de verdeling blijkt dat een verlaging of een verhoging van de boomdekking in deze wijk geen duidelijk effect heeft op de amplitude van de grondwaterstand.

Kralingseveer

De huidige boomdekking in Kralingseveer bedraagt circa 25 % (tabel 3.1), wat overeenkomt met de hogere klasse in figuur 4.13c. Op basis van de mediaan lijkt een verdere afname van de boomdekking samen te gaan met een grotere amplitude van de grondwaterstand. Tegelijkertijd laat de grote spreiding binnen de klassen zien dat dit verband niet eenduidig is, waardoor geen harde conclusie kan worden getrokken over het effect van meer of minder boomdekking in Kralingseveer.

Kleiwegkwartier

De huidige boomdekking in het Kleiwegkwartier bedraagt circa 17 % (tabel C.3). Hoewel de boxplots in figuur 4.13d een brede spreiding laten zien, wijzen de medianen erop dat een verdere verlaging van de boomdekking kan samenhangen met een afname van de amplitude met iets minder dan 10 cm.



Figuur 4.13: Amplitude in relatie tot boomdekking per wijk.

4.3.2. Verhardingsgraad

In dit onderdeel wordt onderzocht hoe de mate van verharding rondom de peilbuizen samenhangt met de amplitude van de grondwaterstand. In tegenstelling tot boomdekking laat de verhardingsgraad een duidelijker patroon zien: een groter aandeel verhard oppervlak gaat samen met een kleinere amplitude van de grondwaterstand. Dit wijst erop dat verharding een dempende werking heeft op de fluctuaties. In de onderstaande paragrafen worden de resultaten per wijk besproken.

Agniesebuurt

De huidige verhardingsgraad in de Agniesebuurt bedraagt circa 94 %, wat valt in de hoogste klasse van

figuur 4.14a. De resultaten suggereren dat een afname van rond de 10 % totale verharding kan leiden tot een verhoging van de amplitude met ongeveer 10 cm, kijkend naar de mediaan van de boxplots.

Bloemhof

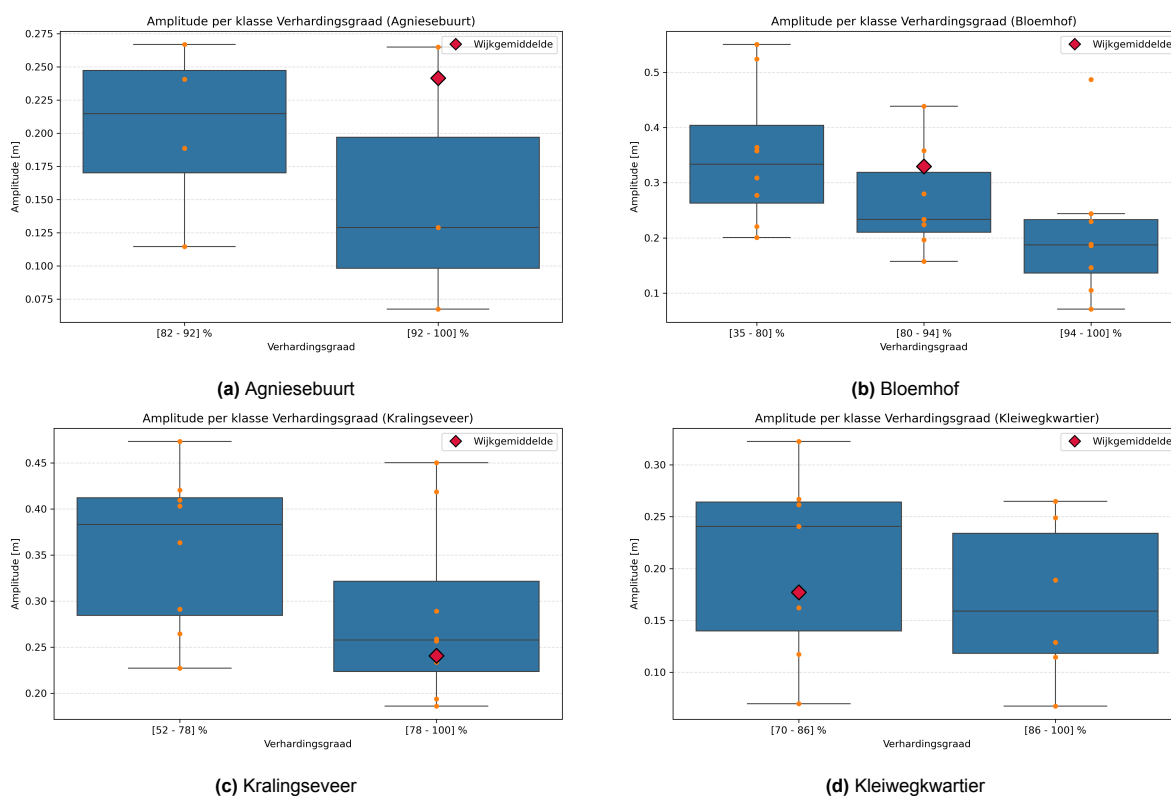
In Bloemhof is de huidige verhardingsgraad circa 86 % (tabel C.1), wat in de middelste klasse van figuur 4.14b valt. De resultaten laten zien dat een toename van 10 % verharding gepaard gaat met een reductie van de amplitude van ongeveer 3 cm, terwijl een afname van 10% verharding een verhoging van de amplitude met circa 10 cm zou kunnen veroorzaken.

Kralingseveer

Voor Kralingseveer bedraagt de huidige verhardingsgraad ongeveer 81 % (tabel 3.1), eveneens in de hogere klasse van figuur 4.14c. De boxplots suggereren dat een lagere verhardingsgraad van tussen de 52 en 78 % kan samenhangen met een kleinere amplitude van circa 12 cm. Gezien de brede spreiding binnen de klassen moet dit resultaat echter met voorzichtigheid worden geïnterpreteerd.

Kleiwegkwartier

In het Kleiwegkwartier bedraagt de huidige verhardingsgraad ongeveer 83 % (tabel C.3). Figuur 4.14d laat zien dat een toename van de verhardingsgraad kan leiden tot een reductie van de amplitude met circa 8 cm.



Figuur 4.14: Amplitude in relatie tot verhard oppervlak per wijk.

4.3.3. DIT-systeem

De aanwezigheid van een DIT-systeem is in de analyse opgenomen als wel aanwezig of niet aanwezig binnen de straal van 20 meter rond de peilbuis. Voor alle wijken is een duidelijk patroon zichtbaar, de aanwezigheid van een DIT-systeem gaat samen met kleinere fluctuaties in de grondwaterstand. Dit effect wordt hieronder per wijk toegelicht.

Agniesebuurt

In de Agniesebuurt is een DIT-systeem aanwezig (tabel C.2). Figuur 4.15a laat zien dat het wegnemen van dit systeem kan leiden tot een toename van de amplitude met circa 4 cm.

Bloemhof

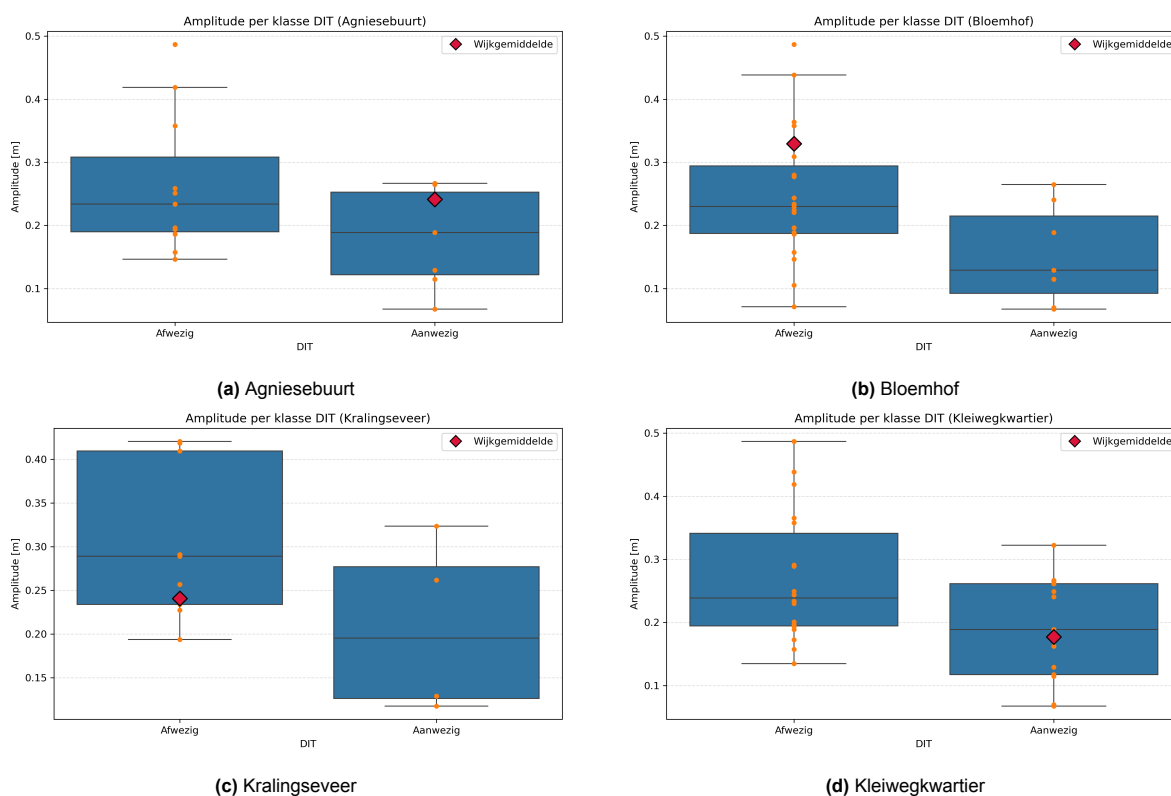
In Bloemhof is momenteel geen DIT-systeem aanwezig (tabel C.1). Uit figuur 4.15b blijkt dat de aanleg van een DIT-systeem kan zorgen voor een afname van de fluctuaties met ongeveer 10 cm.

Kralingseveer

Ook in Kralingseveer is geen DIT-systeem aanwezig (tabel 3.1). Figuur 4.15c suggereert dat de aanwezigheid van een DIT-systeem een reductie van de amplitude met circa 10 cm zou kunnen opleveren.

Kleiwegkwartier

In het Kleiwegkwartier is wel een DIT-systeem aanwezig (tabel C.3). Figuur 4.15d laat zien dat ook hier de aanwezigheid van een DIT-systeem samenhangt met kleinere fluctuaties in de grondwaterstand.



Figuur 4.15: Amplitude in relatie tot aanwezigheid van een DIT-systeem per wijk.

4.3.4. Riool

De invloed van riolering is in de analyse uitgedrukt als het percentage riooloppervlak binnen de straal van 20 meter rond de peilbuis. In algemene zin is er geen eenduidige relatie zichtbaar tussen de mate van riolering en de amplitude van de grondwaterstand. De spreiding binnen de boxplots is vaak groot en in veel gevallen spelen geringe aantallen datapunten een rol. Hieronder wordt dit per wijk toegelicht.

Agniesebuurt

In de Agniesebuurt bedraagt het aandeel riolering circa 14 % (tabel C.2). Figuur 4.16a toont dat beide boxplots een brede spreiding vertonen, grotendeels veroorzaakt door het geringe aantal datapunten. Hierdoor kan geen betrouwbare conclusie worden getrokken over het effect van verandering van riolering in deze wijk.

Bloemhof

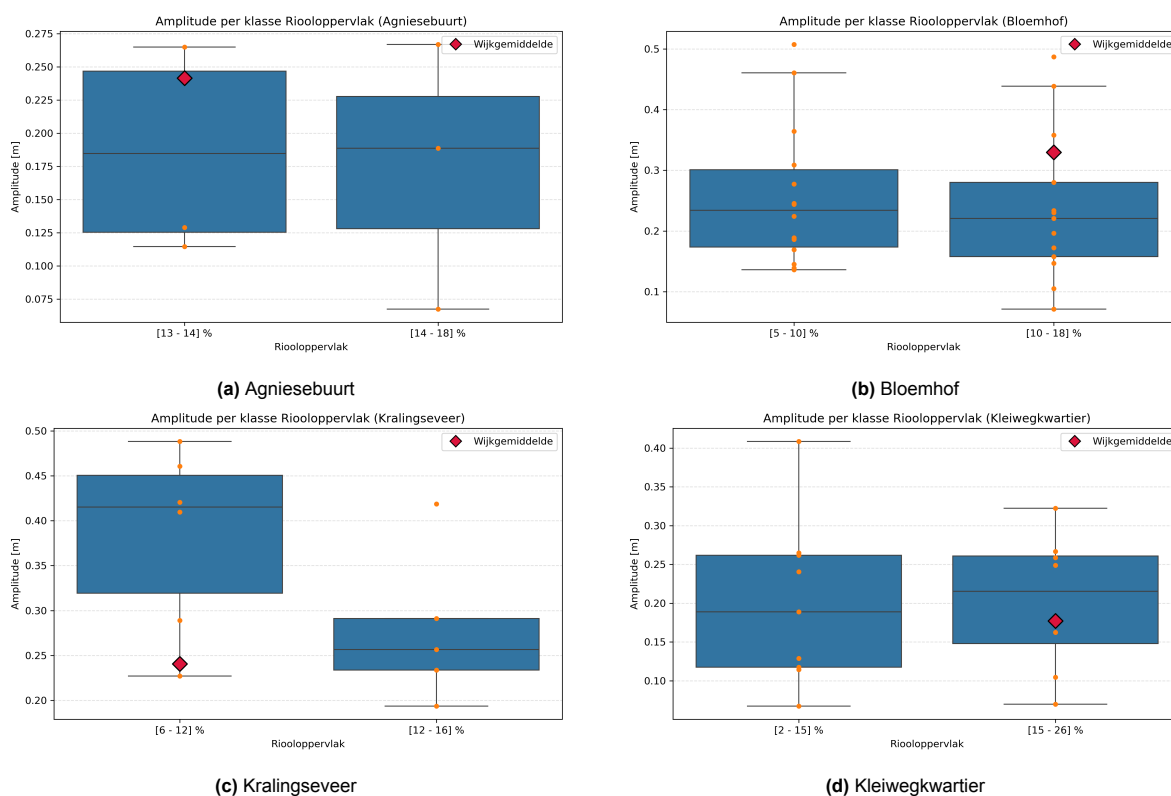
In Bloemhof bedraagt het aandeel riolering circa 13 % (tabel C.1). Figuur 4.16b bevat aanzienlijk meer datapunten dan in de Agniesebuurt, maar laat een vergelijkbaar beeld zien: de spreiding is groot en een duidelijk patroon ontbreekt.

Kralingseveer

In Kralingseveer bedraagt het aandeel riolering circa 12 % (tabel 3.1). Figuur 4.16c is de enige waarin een mogelijk verband zichtbaar is. Deze boxplot suggereert dat bij peilbuizen met vergelijkbare kenmerken de aanwezigheid van ongeveer de helft van de riolering kan samenhangen met een verschil in amplitude van circa 15 cm. Dit verband dient echter met voorzichtigheid te worden geïnterpreteerd vanwege de spreiding en het beperkte aantal waarnemingen.

Kleiwegkwartier

In het Kleiwegkwartier bedraagt het aandeel riolering circa 16 % (tabel C.3). Ook hier (figuur 4.16d) ontbreekt een duidelijk patroon: de spreiding is groot, met name in de lagere klasse, waardoor geen eenduidige conclusies kunnen worden getrokken.

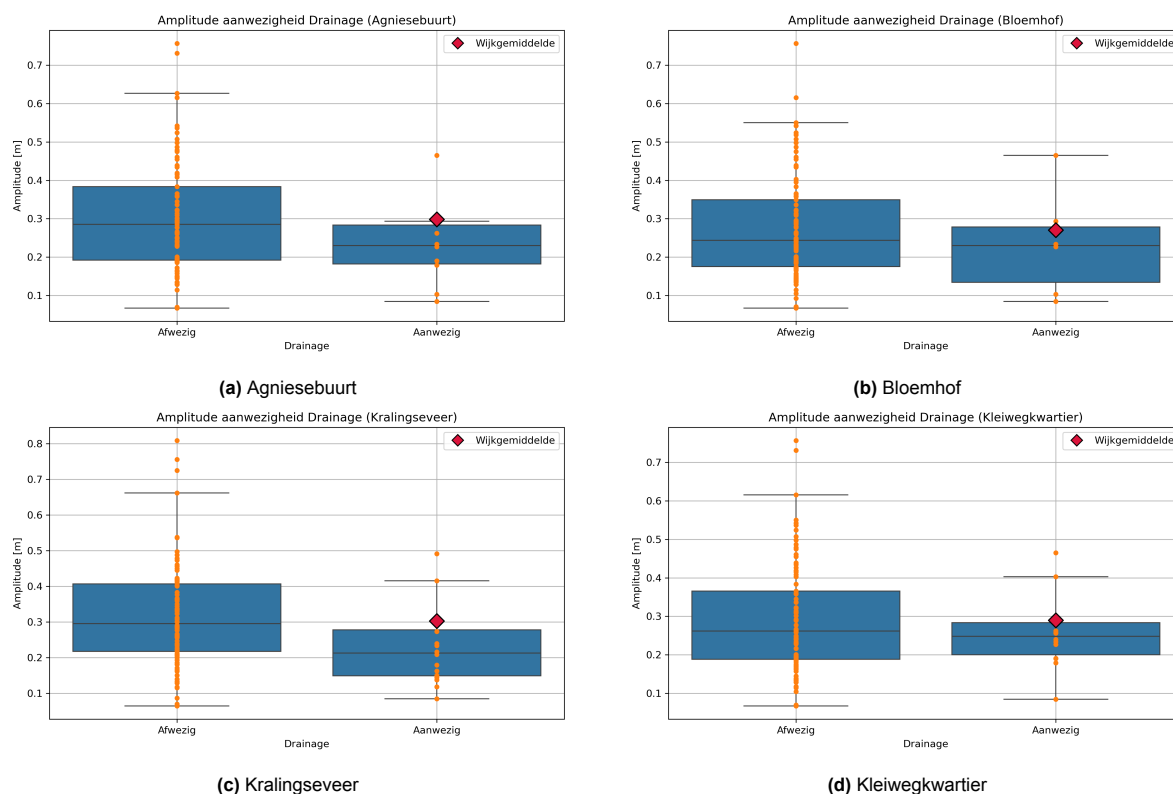


Figuur 4.16: Amplitude in relatie tot aanwezigheid van riolering per wijk.

4.3.5. Drainage

Voor drainage kon met de reguliere filters geen onderscheid worden gemaakt tussen peilbuizen mét en zonder drainage, aangezien binnen de dataset onvoldoende beide categorieën aanwezig waren. Om dit kenmerk toch te kunnen analyseren, is binnen de set van vergelijkbare peilbuizen, geselecteerd op basis van drooglegging en afstand tot oppervlaktewater, expliciet gekeken naar de aanwezigheid van drainage.

Figuur 4.17 toont de boxplots voor de vier wijken. Hieruit blijkt dat de spreiding van de amplitudes kleiner is bij peilbuizen waar drainage aanwezig is dan bij peilbuizen zonder drainage. Dit duidt erop dat drainage een stabiliserende werking heeft op de grondwaterstand, doordat extreme fluctuaties worden beperkt. Te zien is dat dit patroon in alle onderzochte wijken consistent zichtbaar is.

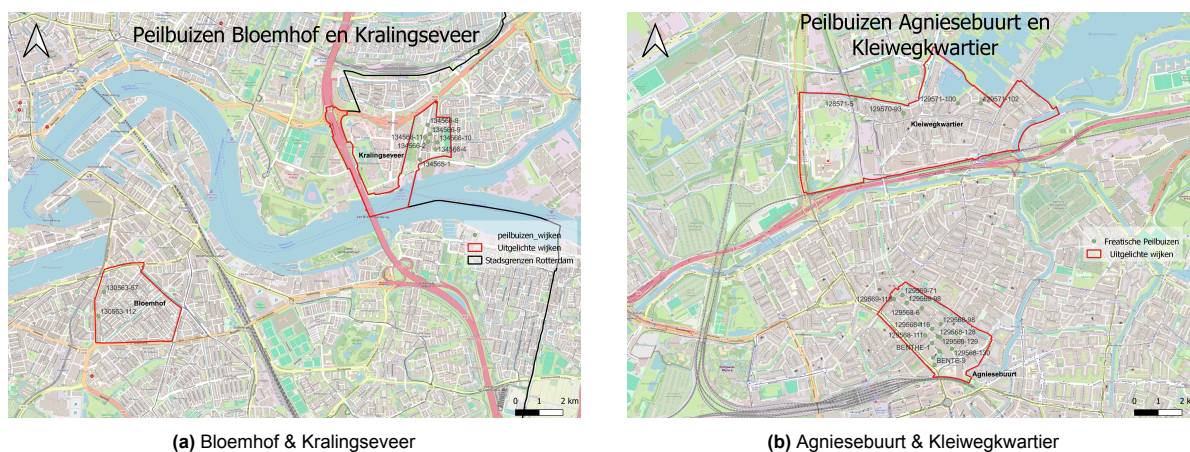


Figuur 4.17: Amplitude in relatie tot aanwezigheid van drainage per wijk.

4.4. Toetsing aan funderings- en grondwaterrichtlijnen

De onderstaande resultaten geven per wijk inzicht in de mate waarin de huidige grondwaterstanden voldoen aan de geldende richtlijnen voor drooglegging, ontwateringsdiepte en of de grondwaterstand boven het niveau van het bovenste funderingshout uitkomt. Daarvoor zijn uitsluitend de peilbuizen gebruikt waarvoor dagelijkse tijdreeksen beschikbaar waren (405 in totaal). Het verschil in aantallen per wijk wordt hierdoor verklaard. Als laatste wordt gekeken of er een samenhang is tussen de gebiedskenmerken (verharding, DIT en Drainage) met de overschrijdingen van de geldende bandbreedte.

Figuur 4.18 toont de ligging van de geselecteerde peilbuizen in de vier onderzochte wijken.



Figuur 4.18: Locatie van freatische peilbuizen in de geselecteerde wijken.

4.4.1. Toetsing grondwaterstanden per wijk

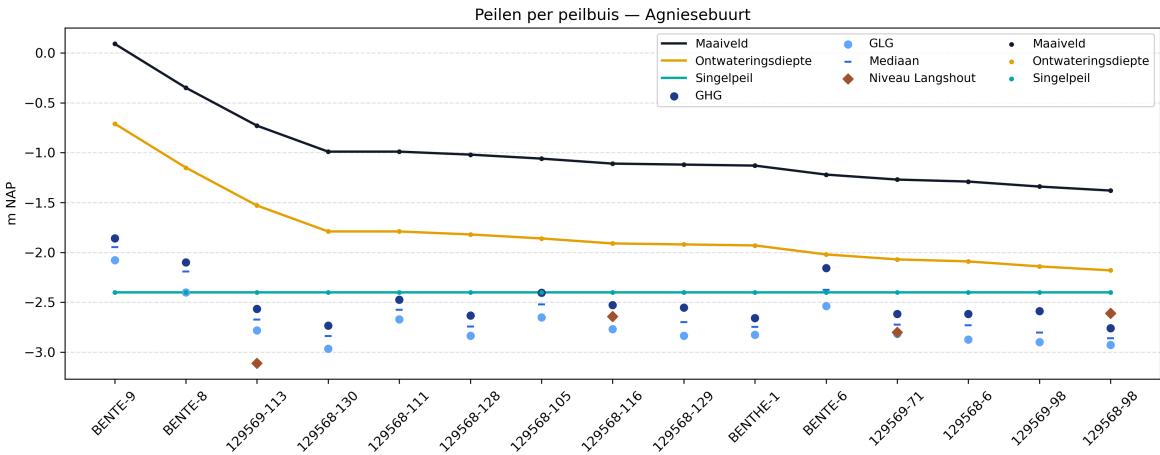
Deze sectie laat per wijk de huidige grondwaterstanden zien. Eerst volgt een tabel per peilbuis met maaiveld, singelpeil, het niveau van het bovenste funderingshout (indien beschikbaar), de mediaan van de grondwaterstand, de GHG en de GLG, inclusief de toetsen op de vastgestelde bandbreedte. De figuur onder de tabel visualiseert dezelfde informatie.

Agniesebuurt

In de Agniesebuurt voldoen alle peilbuizen aan de eis van een minimale ontwateringsdiepte van 0,80 m. Bij de peilbuizen die zich in de nabijheid van houten paalfunderingen bevinden, blijkt echter dat de GLG in drie van de vier gevallen onder het funderingshoutniveau ligt. Dit duidt op droogstand. Bij één peilbuis ligt de GLG echter vrijwel gelijk aan het niveau funderingshout. Opvallend is dat de mediane grondwaterstand voor de meeste peilbuizen onder het singelpeil ligt, dit kan leiden tot meer bodemdaling.

Peilbuis	Maaiveld	Singelpeil	Niveau Langshout	Mediaan	GHG	GLG	Mediaan boven singelpeil	Ontwateringsdiepte 0,8 m (t.o.v. GHG)	GLG boven hout
	[m NAP]	[m NAP]	[m NAP]	[m NAP]	[m NAP]	[m NAP]			
BENTE-9	0,09	-2,400	–	-1,948	-1,859	-2,077	Ja	Ja	–
BENTE-8	-0,35	-2,400	–	-2,190	-2,100	-2,399	Ja	Ja	–
129569-113	-0,73	-2,400	-3,110	-2,673	-2,565	-2,780	Nee	Ja	Ja
129568-130	-0,99	-2,400	–	-2,838	-2,732	-2,965	Nee	Ja	–
129568-111	-0,99	-2,400	–	-2,575	-2,473	-2,669	Nee	Ja	–
129568-128	-1,02	-2,400	–	-2,742	-2,631	-2,834	Nee	Ja	–
129568-105	-1,06	-2,400	–	-2,520	-2,402	-2,651	Nee	Ja	–
129568-116	-1,11	-2,400	-2,640	-2,645	-2,528	-2,768	Nee	Ja	Nee
129568-129	-1,12	-2,400	–	-2,699	-2,553	-2,833	Nee	Ja	–
BENTHE-1	-1,13	-2,400	–	-2,748	-2,658	-2,825	Nee	Ja	–
BENTE-6	-1,22	-2,400	–	-2,375	-2,155	-2,538	Ja	Ja	–
129569-71	-1,27	-2,400	-2,800	-2,725	-2,615	-2,815	Nee	Ja	Nee
129568-6	-1,29	-2,400	–	-2,731	-2,615	-2,874	Nee	Ja	–
129569-98	-1,34	-2,400	–	-2,804	-2,586	-2,897	Nee	Ja	–
129568-98	-1,38	-2,400	-2,610	-2,860	-2,758	-2,928	Nee	Ja	Nee

Tabel 4.1: Toetsing van bandbreedte grondwaterstand in de Agniesebuurt



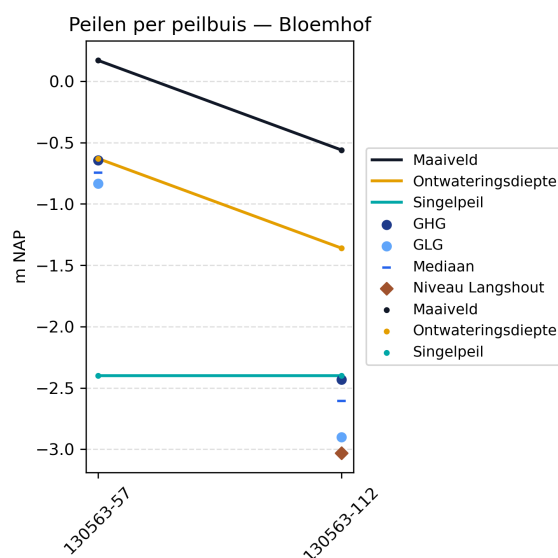
Figuur 4.19: Visualisatie van de grondwaterstand in de Agniesebuurt

Bloemhof

In Bloemhof zijn twee peilbuizen met voldoende data beschikbaar. Beide voldoen aan de minimale ontwateringsdiepte. Voor één van de peilbuizen geldt dat de GLG lager ligt dan het funderingshout-niveau, wat duidt op een risico voor droogstand. Daarbij ligt de grondwaterstand bij één peilbuis ook structureel onder het singelpeil.

Peilbuis	Maaiveld	Singelpeil	Niveau Langshout	Mediaan	GHG	GLG	Mediaan boven singelpeil	Ontwateringsdiepte 0,8 m (t.o.v. GHG)	GLG boven hout
	[m NAP]	[m NAP]	[m NAP]	[m NAP]	[m NAP]	[m NAP]			
130563-57	0,17	-2,400	–	-0,744	-0,643	-0,834	Ja	Ja	–
130563-112	-0,56	-2,400	-3,030	-2,604	-2,431	-2,899	Nee	Ja	Ja

Tabel 4.2: Toetsing van bandbreedte grondwaterstand in Bloemhof.



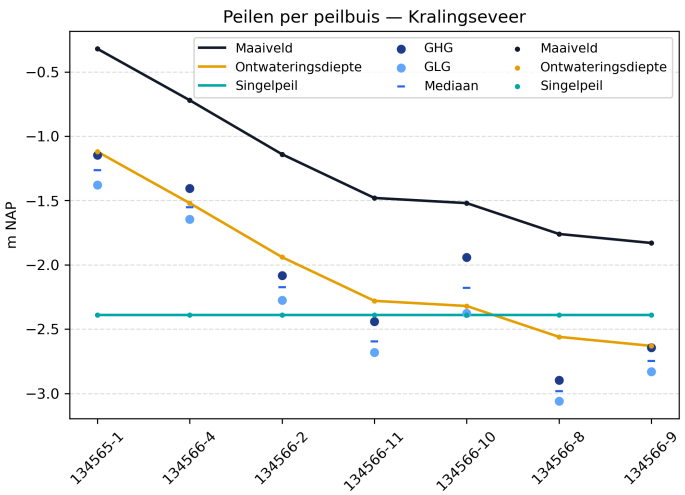
Figuur 4.20: Visualisatie van de grondwaterstand in Bloemhof

Kralingseveer

In Kralingseveer zijn slechts enkele onderheide woningen aanwezig, waardoor funderingshoutgevens ontbreken. De grondwaterstand van de meeste peilbuizen ligt boven singelpeil, wat gunstig is met betrekking tot bodemdaling. Bij twee peilbuizen wordt de ontwateringsdiepte echte fors overschreden, respectievelijk 20 en 40 cm, wat kan zorgen voor grondwateroverlast.

Peilbuis	Maaiveld	Singelpeil	Mediaan	GHG	GLG	Mediaan boven singelpeil	Ontwateringsdiepte 0,8 m (t.o.v. GHG)
	[m NAP]	[m NAP]	[m NAP]	[m NAP]	[m NAP]		
134565-1	-0,32	-2,390	-1,265	-1,147	-1,377	Ja	Ja
134566-4	-0,72	-2,390	-1,552	-1,404	-1,645	Ja	Nee
134566-2	-1,14	-2,390	-2,175	-2,083	-2,275	Ja	Ja
134566-11	-1,48	-2,390	-2,595	-2,440	-2,682	Nee	Ja
134566-10	-1,52	-2,390	-2,180	-1,941	-2,376	Ja	Nee
134566-8	-1,76	-2,390	-2,981	-2,898	-3,059	Nee	Ja
134566-9	-1,83	-2,390	-2,748	-2,643	-2,829	Nee	Ja

Tabel 4.3: Toetsing van bandbreedte grondwaterstand in Kralingseveer.



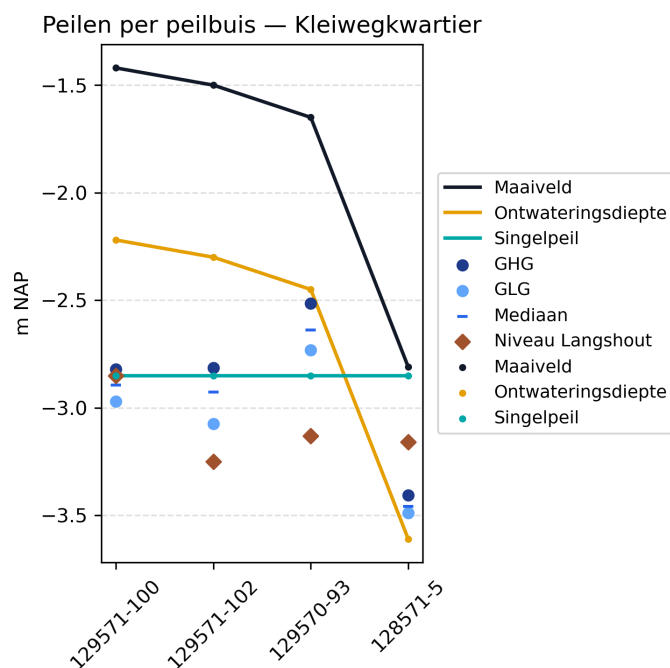
Figuur 4.21: Visualisatie van de grondwaterstand in Kralingseveer

Kleiwegkwartier

In het Kleiwegkwartier overschrijdt peilbuis 128571-5 alle voorwaarden: de ontwateringsdiepte is kleiner dan 0,80 m, de GLG ligt lager dan het funderingshoutniveau en het singelpeil wordt structureel onderschreden. Bij peilbuis 129571-100 ligt de GLG eveneens onder het funderingshoutniveau, maar de afwijking is beperkt. De overige peilbuizen voldoen aan de richtlijnen.

Peilbuis	Maaiveld	Singelpeil	Niveau Langshout	Mediaan	GHG	GLG	Mediaan boven singelpeil	Ontwateringsdiepte 0,8 m (t.o.v. GHG)	GLG boven hout
	[m NAP]	[m NAP]	[m NAP]	[m NAP]	[m NAP]	[m NAP]			
129571-100	-1,420	-2,850	-2,850	-2,894	-2,820	-2,970	Nee	Ja	Nee
129571-102	-1,500	-2,850	-3,250	-2,926	-2,815	-3,076	Nee	Ja	Ja
129570-93	-1,650	-2,850	-3,130	-2,639	-2,515	-2,731	Ja	Ja	Ja
128571-5	-2,810	-2,850	-3,160	-3,458	-3,408	-3,488	Nee	Nee	Nee

Tabel 4.4: Toetsing van bandbreedte grondwaterstand in het Kleiwegkwartier.



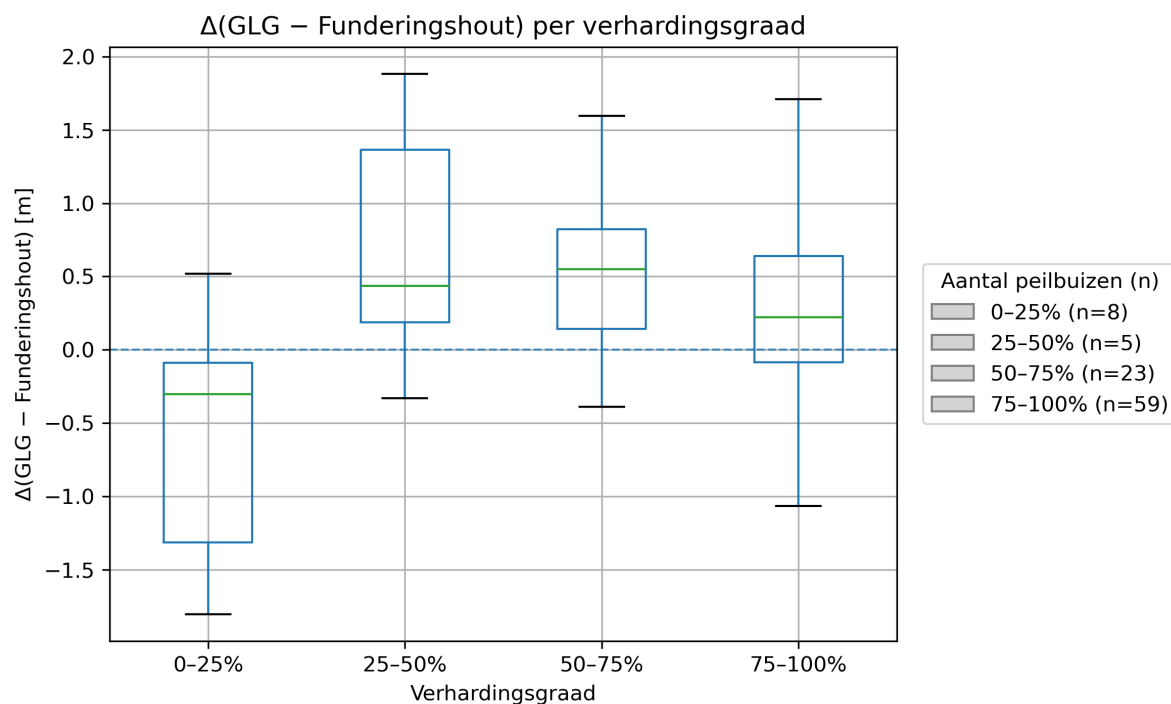
Figuur 4.22: Visualisatie van de grondwaterstand in het Kleiwegkwartier

4.4.2. Toetsing samenhang overschrijdingen en gebiedskenmerken

Aanvankelijk zijn de gebiedskenmerken DIT, drainage en verharding beoordeeld op de drie toetsingscriteria. Alleen bij verharding was een duidelijk onderscheid zichtbaar; voor DIT en drainage werd op de getoetste criteria geen relevant verschil gevonden. Daarom is in het vervolg uitsluitend verharding verder geanalyseerd.

GLG ten opzichte van funderingshout

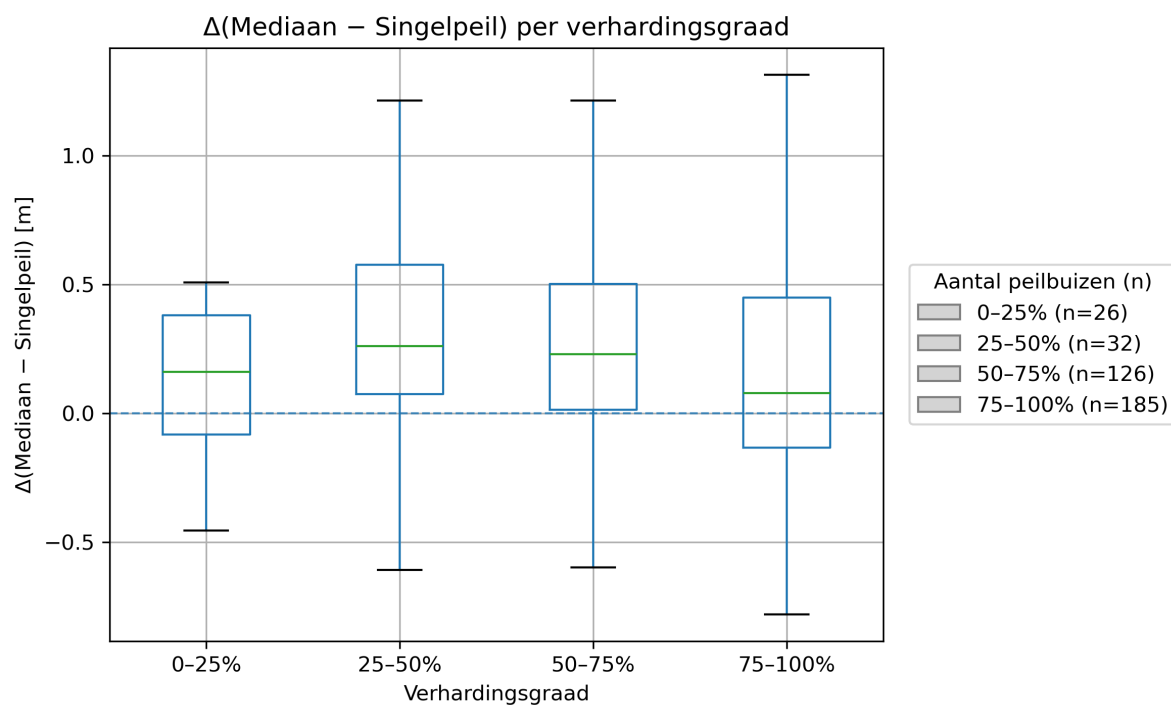
Figuur 4.23 laat de GLG ten opzichte van het funderingshout per verhardingsklasse zien. Waarden onder nul duiden op droogstand. Droogstand treedt vrijwel alleen op in de laagste verhardingsklasse; in hogere verhardingsklassen ligt de GLG doorgaans enkele tot tientallen centimeters boven het funderingshout. Ook hier is een duidelijk verschil zichtbaar tussen de laagste klasse van verharding en de andere, dit kan duiden op een andere reden dan alleen verharding.



Figuur 4.23: GLG – funderingshout per verhardingsklasse.

Mediaan ten opzichte van singelpeil

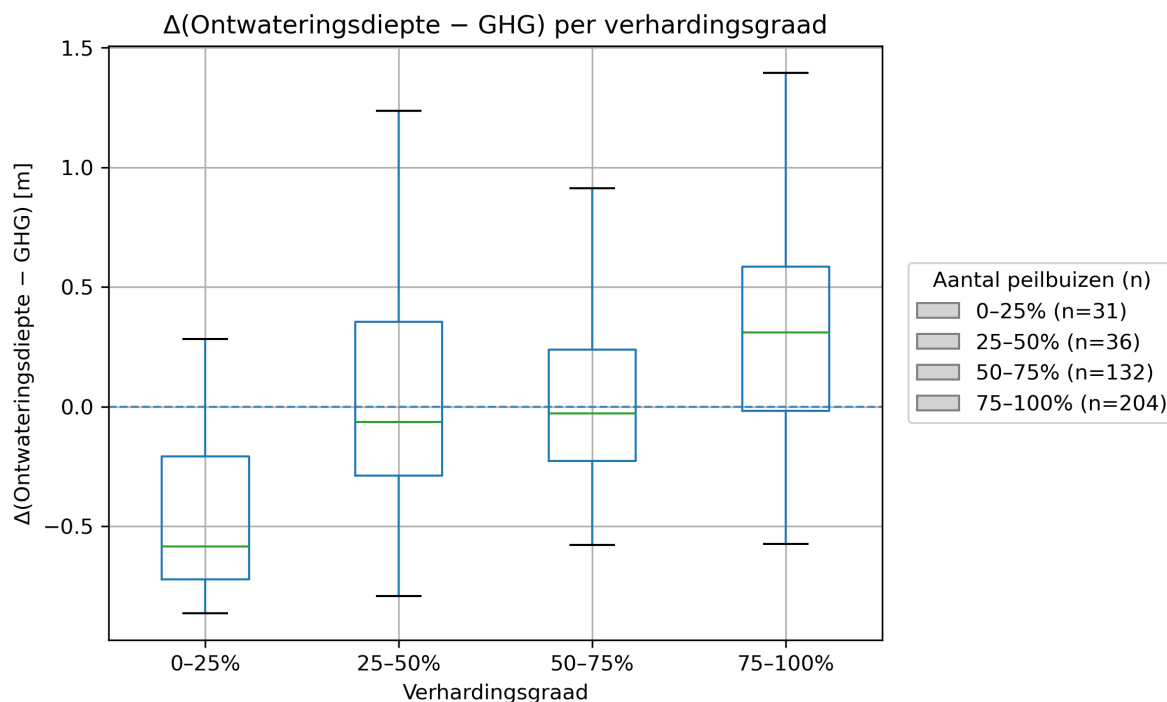
Voor het criterium mediaan ten opzichte van singelpeil is geen duidelijk verband met de verhardingsgraad zichtbaar. Figuur 4.24 laat zien dat de mediane grondwaterstand in alle verhardingsklassen gemiddeld circa 0,20 m boven het singelpeil ligt. Er is geen aanwijzing dat een hogere verhardingsgraad samenhangt met een structurele over- of onderschrijding van het singelpeil.



Figuur 4.24: Mediaan – singelpeil per verhardingsklasse.

Ontwateringsdiepte ten opzichte van GHG

Figuur 4.25 toont per verhardingsklasse het verschil tussen de ontwateringsdiepte (0,8 m onder maaiveld) en de GHG. Een waarde van nul betekent dat de GHG precies op 0,8 m onder maaiveld ligt. Negatieve waarden duiden op een ontwateringsdiepte kleiner dan 0,8 m. Positieve waarden geven aan dat de GHG dieper dan 0,8 m onder maaiveld ligt. De mediaan neemt toe met de verhardingsgraad. In de klasse 0–25% wordt de ontwateringsdiepte bijna voor alle peilbuizen overschreden, maar naarmate de verharding toeneemt neemt ook de ontwateringsdiepte toe. Dit sluit aan bij de resultaten uit Sectie 3.4.2 waar is aangetoond dat de GHG bij een lage mate van verharding gemiddeld een kleinere ontwateringsdiepte heeft.



Figuur 4.25: Ontwateringsdiepte t.o.v. GHG per verhardingsklasse.

5

Discussie

5.1. Verklaring van de resultaten

Verharding, drainage en de aanwezigheid van DIT-systemen hebben in de analyse een consistente, dempende invloed op de amplitude van de grondwaterstand. Verharding beperkt infiltratie en verdamping, waardoor pieken en dalen worden afgevlakt. Drainage voert water af vanaf een drempelniveau en beperkt hoge standen. DIT-systemen combineren afvoer en infiltratie en reguleren daardoor het grondwaterpeil actief. Boomdekking laat slechts een beperkt en wisselend effect zien, alleen bij zeer hoge dekking (meer dan 75%) lijkt de amplitude groter, maar het aantal peilbuizen in die klasse is klein ($n = 16$), waardoor lokale omstandigheden relatief zwaar wegen. De veronderstelling dat nabijheid van oppervlaktewater tot kleinere fluctuaties zou leiden is niet bevestigd, er is zelfs een licht tegengesteld beeld gevonden. Een aannemelijke verklaring is dat de ondergrond van grote invloed is op de hydraulische verbinding tussen waterlichaam en peilbuis, terwijl grondsoort in deze analyse niet in detail is meegenomen. Voor grondsoort zelf is geen relatie met de amplitude aangetoond. De reden is hiervoor is dat alleen de toplaag is gebruikt en deze in Rotterdam vaak uit ophoogzand bestaat, hierdoor is de variatie te beperkt om een statistisch verband zichtbaar te maken. De mogelijke drainerende werking van oudere riolen wordt in de totale analyse deels zichtbaar, maar blijkt in de wijken wisselend en dus sterk contextafhankelijk. De hypothese dat een grotere drooglegging zou samenhangen met kleinere fluctuaties is niet aangetoond.

Daarentegen heeft drooglegging een duidelijk effect op de grondwaterstand ten opzichte van maaiveld. Een grotere drooglegging gaat samen met een dieper liggende mediane grondwaterstand onder maaiveld (Figuur 4.9). Dit is in lijn met de verwachting omdat het singelpeil een sturende rol heeft op de grondwaterstand. In de klasse met een drooglegging groter dan 2,5 m is de spreiding van de ontwateringsdiepte groot. Een waarschijnlijke verklaring is dat het singelpeil in deze situaties soms een fictief peil is door het ontbreken van nabijgelegen oppervlaktewater, waardoor de feitelijke sturing ontbreekt. Verharding beïnvloedt eveneens de ontwateringsdiepte. In weinig verharde gebieden ligt de grondwaterstand gemiddeld dicht bij maaiveld (Figuur 4.10). Een opvallend beeld is zichtbaar tussen de 0–25% verhardingsklasse en de overige klassen. Een waarschijnlijke verklaring is contextueel: peilbuizen in de klasse 0–25% verharding liggen allemaal in parken die niet bouwrijp zijn gemaakt en dus niet zijn opgehoogd. Daardoor ligt het maaiveld dicht bij het singelpeil en is de drooglegging kleiner, wat de grondwaterstand relatief hoog houdt. Dat de GHG dicht bij maaiveld ligt in minder verharde gebieden is goed te verklaren met meer infiltratie. Op basis van extra verdamping zou vervolgens een dieper liggende GLG verwacht kunnen worden, maar dat blijkt niet uit de gegevens. Mogelijke verklaring is dat de aanwezigheid van meer groen zorgt voor een grotere waterbuffer waardoor de GLG niet verder uitzakt dan in meer verhard gebied.

De wijkspecifieke analyse bevestigt het effect van verharding, drainage en DIT op de amplitude, maar amplitudeplots zijn niet direct te koppelen aan kritieke niveaus. Daarom is aanvullend getoetst aan een bandbreedte met drie criteria: de ontwateringsdiepte ten opzichte van de GHG, de positie van de GLG ten opzichte van het niveau van het bovenste funderingshout en de positie van de mediane

grondwaterstand ten opzichte van het singelpeil. Voor de mediane grondwaterstand ten opzichte van het singelpeil is geen duidelijk verband met verharding zichtbaar. Over alle verhardingsklassen ligt de mediane waarde rond 0,20 m boven het singelpeil en er is geen aanwijzing dat toenemende verharding tot een structurele over- of onderschrijding leidt (Figuur 4.24). Dit past bij de verwachting. Rotterdam is overwegend nat en daardoor komt de grondwaterstand vaak boven het singelpeil uit. Voor de GLG ten opzichte van het funderingshout komt droogstand vooral voor in de laagste verhardingsklasse. Dit duidt niet op een intrinsiek effect van lage verharding op droogstand van houten palen maar op situering. De betreffende peilbuizen liggen in parken, waardoor de gemeten grondwaterstand niet representatief is voor paalfunderingen naast het park. Voor de ontwateringsdiepte ten opzichte van de GHG neemt de mediane waarde toe met de verhardingsgraad. In 0–25% wordt de vereiste 0,8 m vaak niet gehaald; in 75–100% meestal wel. Het aandeel peilbuizen met een ontoereikende ontwateringsdiepte neemt daarmee af bij lagere verharding (Figuur 4.25).

5.2. Vergelijking met literatuur

De bevindingen rond drainage en DIT-systemen sluiten nauw aan bij de literatuur, waarin actief grondwaterpeilbeheer als een effectieve maatregel wordt beschouwd om grondwaterfluctuaties te beperken en funderingsrisico's te reduceren. Ook de relatie tussen verharding en amplitude is in overeenstemming met eerdere studies, meer verharding leidt tot minder infiltratie en verdamping en daarmee tot een kleinere fluctuatie.

Afwijkingen ten opzichte van de literatuur zijn gevonden bij boomdekking. Waar in de literatuur een sterke relatie wordt verwacht tussen bomen en seizoensfluctuaties, liet dit onderzoek een wisselend beeld zien. Deze verschillen kunnen mede verklaard worden door de beperkingen in data en methode (zie paragraaf 5.3). Voor afstand tot oppervlaktewater is het uitblijven van een dempend effect waarschijnlijk te verklaren door verschillen in ondergrond en hydraulische verbinding, die in deze studie niet zijn meegenomen.

5.3. Beperkingen en onzekerheden

De beperkingen en onzekerheden van dit onderzoek worden hieronder besproken en zijn verdeeld in drie onderdelen: data beschikbaarheid, data verwerking en de gehanteerde methode. Het doel hiervan is om duidelijk te maken welke keuzes en aannames invloed kunnen hebben gehad op de uitkomsten van dit onderzoek. Tegelijkertijd helpt dit om te verklaren waarom sommige resultaten afwijken van wat in de literatuur wordt beschreven.

Databeschikbaarheid

De databeschikbaarheid was niet in alle lagen gelijk. De database met peilbuisreeksen is volledig benut en bevat alle beschikbare metingen, maar de kaarten waarop gebiedskenmerken zijn bepaald kennen hiaten. Het bomenbestand is naar verwachting onvolledig, bomen op particulier terrein ontbreken, waardoor de totale boomdekking wordt onderschat. Deze bomen kunnen de grondwaterstand beïnvloeden en daarmee de funderingscondities. De effecten van bomen zijn in deze analyse daarom waarschijnlijk conservatief ingeschat. De Kleinschalige Basiskaart (10 × 10 m) bevat geen particuliere percelen en is daarmee niet vlakdekkend, desondanks bleef de relatie met verharding in de resultaten duidelijk zichtbaar. De KBK is ook gebruikt voor oppervlaktewater en komt goed overeen met andere kaarten. De kaart van ondergrondse infrastructuur is zo volledig mogelijk samengesteld, maar kan onjuistheden of hiaten in ligging en aanwezigheid van leidingen bevatten; de informatie is indicatief. Drooglegging is afgeleid van puntsgewijze uitgiftepeilen en vlakdekkend gemaakt, wat een expliciete aanname introduceert.

Grondsoort is in dit onderzoek alleen via de top laag betrokken, die in Rotterdam door ophoogzand weinig varieert. Informatie op filterdiepte ontbreekt en is wenselijk, omdat juist die laag zeer bepalend is voor de gemeten grondwaterstand in de peilbuis. Eveneens ontbreekt de grondsoortkarakterisatie in de directe omgeving van de peilbuis, terwijl die via de hydraulische verbinding met omliggende pakketten sterk van invloed kan zijn op de grondwaterstand.

Dataverwerking

In de dataverwerking zijn keuzes gemaakt die de uitkomsten kunnen beïnvloeden. Dagelijkse reeksen zijn geconstrueerd door een ondergrens van minimaal twintig metingen per maand te hanteren, dit ver-

onderstelt dat twintig meetpunten het maandgedrag voldoende beschrijven. Bij meerdere metingen per dag is alleen de eerste meting gebruikt, waardoor kortdurende effecten zoals getij of neerslagpieken niet expliciet zijn meegenomen. De periode met dagelijkse reeksen is relatief kort (november 2022–2025) en wordt als representatief voor seizoensgedrag verondersteld, extreme situaties buiten deze periode blijven buiten beeld en beperken de generaliseerbaarheid naar langere tijdschalen. De bepaling van de GHG en GLG is per jaar gebaseerd op een beperkte steekproef en representeert de hoge en lage waarden van dat jaar, bij korte reeksen zijn deze indicatoren gevoeliger voor toevallige omstandigheden. Gebiedskenmerken zijn in QGIS bepaald binnen een buffer van 20 m rond elke peilbuis, deze straal is onderbouwd maar de feitelijke invloedssfeer kan per kenmerk verschillen.

Methode

De gehanteerde methode bestond uit het analyseren van alle beschikbare peilbuizen om relaties te zoeken met de gebiedskenmerken. Deze aanpak op grote schaal heeft zowel voordelen als nadelen. Het voordeel is dat door de omvangrijke dataset een algemener beeld ontstaat van trends in de stad. Het nadeel is dat lokale omstandigheden, die invloed kunnen hebben op de grondwaterstand, daardoor minder goed zichtbaar zijn. Dit leidt ertoe dat er outliers in de resultaten verschijnen die lastig te interpreteren zijn, al komen de algemene trends wel duidelijk naar voren.

De wijkspecifieke aanpak brengt op zijn beurt ook beperkingen en onzekerheden met zich mee. Allereerst de marges die zijn gebruikt bij de filters, wat direct invloed heeft op het aantal beschikbare peilbuizen per boxplot. Er moest steeds een balans gevonden worden tussen voldoende datapunten om een significant beeld te krijgen en de mate van vergelijkbaarheid. Dit resulteerde vaak in een marge van 50 %. Dit is geen strenge selectie wat kan zorgen voor ruis binnen de resultaten voor de geïsoleerde gebiedskenmerken in de wijkgerichte analyse. Voor sommige wijken, zoals Bloemhof, leverde deze aanpak nog een goed aantal peilbuizen op. In andere wijken bleven er echter, zelfs bij deze ruime marge, minder peilbuizen over (rond de 10 à 15). Dat aantal is laag om op basis van boxplots stevige conclusies te trekken. Dit is vooral een probleem wanneer wijken verschillend gedrag laten zien, bijvoorbeeld bij de kenmerken boomdekking en riool.

Daarnaast bevatten de resultaten uit de wijkspecifieke analyse ook ruis doordat detailinformatie over de grondsoort op filterdiepte en in de directe omgeving ontbreekt. Uit de literatuur en uit meerdere gesprekken met de Gemeente Rotterdam blijkt dat grondsoort een zeer bepalend kenmerk is; het niet meenemen daarvan in de wijkgerichte analyse vergroot de onzekerheid in de resultaten. Bovendien hangen kenmerken onderling samen, sterk groene gebieden hebben vaak geen DIT of drainage. Door deze samenloop is het lastig om effecten eenduidig toe te schrijven aan één afzonderlijk kenmerk.

6

Conclusie

Het doel van dit onderzoek was om inzicht te verkrijgen in de wijze waarop stedelijke gebiedskenmerken de grondwaterstand beïnvloeden, om risico's zoals funderingsschade, maaivelddalings, wateroverlast en wateronderlast te voorkomen. Daarvoor is het beter kunnen bepalen hoe de grondwaterstand reageert op veranderingen van specifieke gebiedskenmerken essentieel.

Om de doelstelling te bereiken zijn de volgende deelvragen opgesteld. Hieronder worden deze vragen beantwoord op basis van de uitgevoerde analyses en literatuurstudie.

1. Welke stedelijke gebiedskenmerken beïnvloeden de grondwaterstand?

Op basis van de literatuurstudie en aanvullende gesprekken met de gemeente zijn verschillende gebiedskenmerken geselecteerd die mogelijk invloed uitoefenen op de grondwaterstand. Deze kenmerken zijn vervolgens onderzocht. Dat zijn: verharding, boomdekking, riool, DIT, drainage, drooglegging, afstand tot oppervlaktewater en grondsoort.

De resultaten, uit de algemene relatie, laten zien dat verharding, drainage en de aanwezigheid van DIT-systemen een duidelijke bijdrage leveren aan het verklaren van fluctuaties in de grondwaterstand. Minder eenduidige verbanden zijn gevonden voor boomdekking, de aanwezigheid van riolen, de afstand tot oppervlaktewater en drooglegging. Daarentegen is de drooglegging een belangrijke maat voor de hoogte van de grondwaterstand ten opzichte van maaiveld, dit geldt eveneens voor de mate van verharding. Met de huidige data is geen verband aangetoond tussen grondsoort en grondwaterfluctuaties, de verwachting is echter dat grondsoort de grondwaterstand wel degelijk sterk beïnvloed maar dat de data in dit onderzoek niet toereikend was.

Samenvattend kan worden gesteld dat vooral de mate van verharding, drainage en DIT-systemen bepalend zijn voor fluctuaties van de grondwaterstand. Drooglegging is een belangrijke sturingsfactor voor de grondwaterstand ten opzichte van maaiveld. De andere factoren zijn slechts lokaal of beperkt van invloed.

2. In welke mate draagt elk kenmerk bij aan fluctuaties van de grondwaterstand?

De mate waarin de gebiedskenmerken bijdragen aan fluctuaties is hierboven beschreven op basis van de analyse over de gehele dataset. Om te beoordelen hoeveel elk kenmerk bijdraagt aan de amplitude is wijk gerichte aanpak gebruikt. Daarbij is het effect ten opzichte van maaiveld meegewogen. Deze analyses laten zien dat de sterkte en richting van de bijdrage per gebiedskenmerk verschillen. Hieronder kort beschreven:

- **Verharding** Werkt overwegend dempend en gaat in meer verharde gebieden samen met een grotere ontwateringsdiepte. Afhankelijk van de mate van verharding kan de mediane grondwaterstand 30 cm verschillen ten opzichte van maaiveld. Een verandering van circa 10% verharding hangt in de Agniesebuurt samen met ongeveer 10 cm verschil in amplitude, in Bloemhof is een vergelijkbare orde zichtbaar en in het Kleiwegkwartier en Kralingseveer wordt het dempende verband bevestigd. Minder verharding hangt samen met een hogere grondwaterstand ten opzichte

van maaiveld en grotere schommelingen.

- **Drooglegging** Beïnvloedt sterk de niveaus ten opzichte van maaiveld. Een grotere drooglegging gaat, volgens een bijna lineair verband, samen met een dieper liggende mediane grondwaterstand ten opzichte van het maaiveld.
- **Boomdekking** Laat een gemengd beeld zien. In de Agniesebuurt betekent minder boomdekking een afname van de amplitude met ongeveer 10 cm. In het Kleiwegkwartier is dit effect kleiner, in Bloemhof is geen duidelijk verband gevonden en in Kralingseveer is de spreiding te groot voor harde conclusies.
- **DIT-systemen** Hebben een stabiliserende werking. In wijken zonder DIT-systeem zoals Bloemhof en Kralingseveer wijst de analyse op een potentiële reductie van de amplitude met ongeveer 10 cm bij aanleg. In wijken met DIT zoals de Agniesebuurt en het Kleiwegkwartier neemt de amplitude toe wanneer een DIT-systeem zou ontbreken.
- **Drainage** Laat in alle onderzochte wijken een consistente dempende werking zien. Verschillen per wijk zijn lastig te duiden. In alle gevallen is de spreiding van de amplitudes kleiner bij aanwezigheid van drainage. Dit wijst op minder extreme fluctuaties.
- **Riolen** Tonen een wisselend beeld. In Kralingseveer lijkt aanwezigheid van circa de helft van de riolering samen te hangen met een verschil in amplitude van ongeveer 15 cm, maar in de andere wijken is het verband zwak of afwezig. Dit suggereert dat riolen lokaal een drainerend effect kunnen hebben, maar dit niet structureel optreedt.

Hieruit wordt nogmaals bevestigd dat verharding, drainage en DIT-systemen de sterkste en meest consistente dempende invloed hebben, met effecten die tot ongeveer 10 cm reductie in de amplitude kunnen zorgen. Verharding hangt bovendien samen met grotere ontwateringsdiepte en kan tussen klassen tot circa 0,30 m verschil in mediane grondwaterstand ten opzichte van maaiveld geven. Boomdekking en riolen kunnen lokaal eveneens bijdragen, maar het effect is wisselend en lokaal afhankelijk. Drooglegging werkt vooral als niveauvariabele, bij grotere drooglegging ligt de mediane grondwaterstand dieper en het verband is vrijwel lineair, maar dit vertaalt zich niet in kleinere amplitudes.

3. In hoeverre is het mogelijk het bereik van de grondwaterstand te voorspellen op basis van vastgestelde gebiedskenmerken?

Voorspellen van de amplitude van de grondwaterstand uitsluitend op basis van gebiedskenmerken blijkt met deze analyse niet mogelijk. Wel biedt dit onderzoek een voorspellend inzicht in de richting van veranderingen. Door gebruik te maken van de uitgebreide dataset met peilbuizen is zichtbaar geworden welke aanpassingen in gebiedskenmerken samenhangen met grotere of kleinere fluctuaties.

4. Welke inzichten bieden deze resultaten voor maatregelen ter beperking van funderingsschade en grondwaterproblemen?

De resultaten laten zien dat verharding, drainage en DIT de belangrijkste sturingsknoppen zijn om grondwaterfluctuaties te beperken en daarmee potentieel grondwaterproblemen en funderingsrisico's te verkleinen. Deze kenmerken moeten hierom nadrukkelijk meegewogen worden bij inrichting en beheer van het stedelijk gebied en in het lokale grondwaterbeheer.

Vergroening vraagt om zorgvuldige afweging. In groenere, minder verharde gebieden ligt de GHG gemiddeld hoger ten opzichte van maaiveld en wordt de ontwateringsdiepte vaker overschreden. Dit vergroot de kans op wateroverlast. Fluctuaties nemen toe en deze treden dichter onder maaiveld op, mede omdat de GLG in deze gebieden niet verder uitzakt dan in meer verharde gebieden. Een systematisch verband tussen minder verharding en droogstand van houten palen is hierom ook niet aangetoond.

Vergroening initiatieven, zoals het NK Tegelwippen, dienen zorgvuldig te worden afgewogen met name met het oog op wateroverlast. Uit dit onderzoek blijkt namelijk dat minder verharding samenhangt met een hogere grondwaterstand ten opzichte van maaiveld. Daarbij, om te beoordelen of vergroening hiermee zou kunnen bijdragen aan het beperken van funderingsrisico's is maatwerk op wijkniveau essentieel, uit dit onderzoek blijkt namelijk ook dat meer groen zorgt voor meer fluctuaties.

Concluderende opmerkingen

Samenvattend sturen stedelijke gebiedskenmerken het grondwatergedrag in relevante mate. Verharding, drainage en DIT dempen de fluctuaties, een effect dat zowel stadsbreed als per wijk zichtbaar is. Drooglegging bepaalt in grote mate het niveau ten opzichte van maaiveld. In minder verharde, groenere gebieden, schuift de GHG gemiddeld richting maaiveld en wordt de ontwateringsdiepte vaker overschreden, terwijl een algemeen verband met droogstand van houten palen niet is gevonden. Boomdekking en riolen laten een wisselend en locatieafhankelijk beeld zien.

7

Aanbevelingen

Hoewel dit onderzoek waardevolle inzichten heeft opgeleverd, blijven er ook kennishiaten bestaan die in vervolgonderzoek nader onderzocht kunnen worden.

Een belangrijk aandachtspunt is de grondsoort. In dit onderzoek kon dit kenmerk niet overtuigend worden meegenomen doordat de beschikbare data onvoldoende onderscheid bood. Voor vervolgonderzoek is gedetailleerde informatie over de volledige bodemopbouw nodig, met een hogere datadichtheid van de grondsoort om op filterdiepte en in de directe omgeving van de peilbuis de grondsoort te kunnen bepalen. Zodat ook de horizontale variatie beter kan worden geduid. Verwacht mag worden dat de reikwijdte van drainage en DIT kleiner is in klei dan in zand, maar dit vraagt verder onderzoek.

Het zou relevant zijn om in vervolgonderzoek nader te kijken naar de invloed van waterpasserende verharding op de grondwaterdynamiek. Hoewel deze studie niet heeft aangetoond dat de GLG in groene gebieden significant daalt, kan een effect niet worden uitgesloten. Waterpasserende verharding combineert infiltratiemogelijkheden met een relatief lage verdamping, wat mogelijk invloed heeft op de seizoensfluctuaties van het grondwater. Een vergelijking tussen groene zones met en zonder deze waterpasserende verharding kan daarom waardevolle inzichten opleveren in het beperken van grondwaterproblemen.

Aanvullend onderzoek kan zich richten op het verschil in effect tussen oude en nieuwe riolen. Het is relevant om te onderzoeken in hoeverre nieuwere systemen daadwerkelijk minder of niet draineren ten opzichte van oudere riolen.

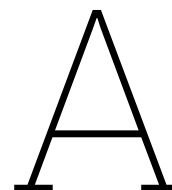
Daarnaast verdient de gekozen invloedssfeer van 20 meter rond peilbuizen verdere toetsing. Hoewel de keuze in dit onderzoek onderbouwd is, blijft de vraag bestaan of dit bereik in alle stedelijke situaties representatief is. Toekomstig onderzoek kan dit verfijnen door systematisch de invloed van verschillende straalgroottes te vergelijken.

Tot slot zijn kwel- en wegzijgingsgebieden niet als afzonderlijk gebiedskenmerk meegenomen. Deze processen kunnen echter een invloed hebben op grondwaterstanden in stedelijk gebied. Het integreren van kwel- en inzijgingsdynamiek in de analyse zou een waardevolle aanvulling zijn en bijdragen aan een vollediger begrip van het stedelijk grondwatersysteem.

Referenties

- Averink, J. (2013, juni). *Methoden voor bepalen hoogste en laagste grondwaterstanden*. Universiteit Twente; Wareco. https://essay.utwente.nl/64285/1/Averink_Arjan.pdf
- Brakenhoff, D. A. (2020). *PastaStore plot and map utilities*. Pastas. Geraadpleegd op september 15, 2025, van https://pastastore.readthedocs.io/en/latest/examples/002_pastastore_plots_and_maps.html
- Buma, J., Kuiper, M., Geurts van Kessel, S., den Nijs, P., Kooijman, W., Lubbers, V., & Profitlich, M. (2017, mei). *Grootschalig actief grondwaterpeilbeheer in bebouwd gebied*. Deltares / Ministerie van Infrastructuur en Milieu.
- Buma, J., Kuiper, M., & Kooijman, W. (2018, april 26). *Grootschalig actief grondwaterpeilbeheer in bebouwd gebied*. Deltares; Wareco; Fugro.
- 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*. <https://doi.org/10.1111/gwat.12925>
- Dano, P. (2014, januari 14). *Peilenplan Hertogswetering*. Waterschap Aa en Maas. 's-Hertogenbosch. <https://voorbeeldlink-naar-rapport.pdf>
- Dekker, G., Handgraaf, S., De Putter, P., & Treffers, T. (2021, april). *Handreiking stedelijk waterbeheer onder de Omgevingswet: Praktisch werk maken van wettelijke taken en maatschappelijke opgaven* (Uitgevoerd in het kader van het Bestuursakkoord Water (addendum 2018)). Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, Directoraat-Generaal Water en Bodem. Den Haag. <https://iplo.nl/@247608/handreiking-stedelijk-waterbeheer-omgevingswet/>
- Gemeente Rotterdam. (z.d.). *Funderingskaart – Funderingsdata Rotterdam*. Geraadpleegd op juli 22, 2025, van <https://www.arcgis.com/apps/instant/sidebar/index.html?appid=c91a1275e1e64f5cbc50cdf0308a42fc>
- Gemeente Rotterdam. (2025a). *Fundering niet-onderheide woning*. Geraadpleegd op maart 2025, van <https://www.rotterdam.nl/fundering-niet-onderheide-woning>
- Gemeente Rotterdam. (2025b). *Funderingsherstel*. Geraadpleegd op maart 2025, van <https://www.rotterdam.nl/funderingsherstel>
- Gemeente Rotterdam. (n.d.-a). *Aanpak Agniesebuurt*. Geraadpleegd op september 8, 2025, van <https://www.rotterdam.nl/aanpak-agniesebuurt>
- Gemeente Rotterdam. (n.d.-b). *Funderingsproblemen*. Geraadpleegd op september 8, 2025, van <https://www.rotterdam.nl/funderingsproblemen>
- Hendriks, D., Passier, H., Marsman, A., Levelt, O., Lamers, N., Valstar, J., Hoogvliet, M., Louw, P. d., Rozemeijer, J., & Ven, F. v. d. (2023, februari 20). *Integrale Grondwaterstudie Nederland module 1: landelijke analyse*. Applied Spatial Research; Wageningen Environmental Research.
- Hoogvliet, M., Van Vliet, L., Schasfoort, F., Van de Ven, F., & Buma, J. (2020, mei). *Klimaatverandering en grondwaterbeheer stedelijk gebied* (Deltafact). Deltares & STOWA. <https://www.stowa.nl/deltafacts/ruimtelijke-adaptatie/klimaatverandering-en-grondwaterbeheer-stedelijk-gebied>
- Laatste update van de oorspronkelijke publicatie uit 2013.
- KCAF. (z.d.). *Bodemdaling*. Geraadpleegd op maart 2025, van <https://www.kcaf.nl/kennisbank/bodemdaling/>
- Knotters, M. (z.d.). *Grondwaterdynamiek*. Geraadpleegd op juli 25, 2025, van <https://www.wur.nl/onderzoek-resultaten/onderzoeksinstituten/environmental-research/faciliteiten-producten/software-en-modellen/grondwaterdynamiek.htm>
- Kok, S., Angelova, L., & Brinkman, T. (2020). *Impact droogte op funderingen*. Deltares. <https://www.verzekeraars.nl/media/7875/20200930-rapport-impact-droogte-op-funderingen.pdf>
- Mobron, N. A. C. (2023, juni 30). *Effect van bomen op de grondwaterstand in de straat*. Gemeente Rotterdam.
- Rotterdams WeerWoord. (z.d.). *NK Tegelwippen*. Geraadpleegd op juni 25, 2025, van <https://rotterdamsweerwoord.nl/nk-tegelwippen/>

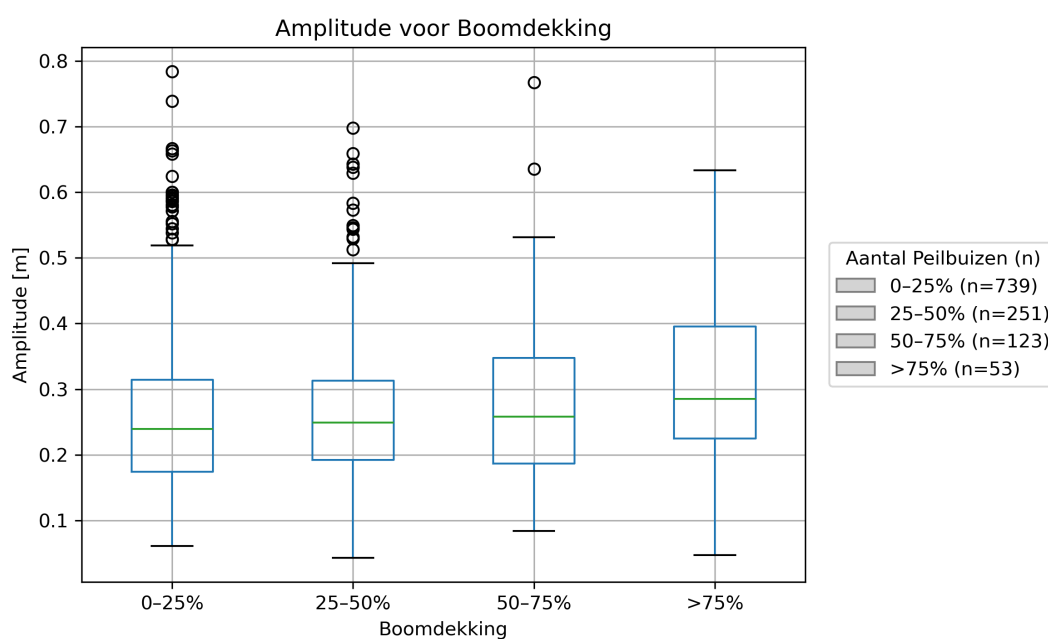
- van der Gaast, J. W. J., Vroon, H. R. J., & Massop, H. T. L. (2010). *Grondwaterregime op basis van karteerbare kenmerken* (tech. rap.). STOWA. <https://www.stowa.nl/sites/default/files/assets/PUBLICATIES/Publicaties%202010/STOWA%202010-41.pdf>
- van der Zaag, H. (2022, februari 7). *Functionele eisen grondwater: onderdeel van kaderstellend PvE stedelijk water* (Afdeling IBR Stedelijk Water en Geotechniek). Gemeente Rotterdam.



Algemene Relatie - Maandelijks

Onderstaande figuren tonen per gebiedskenmerk een boxplot van de amplitude van de grondwaterfluctuatie. De resultaten zijn vergelijkbaar met die uit de dagelijkse series, maar geven een minder uitgesproken beeld.

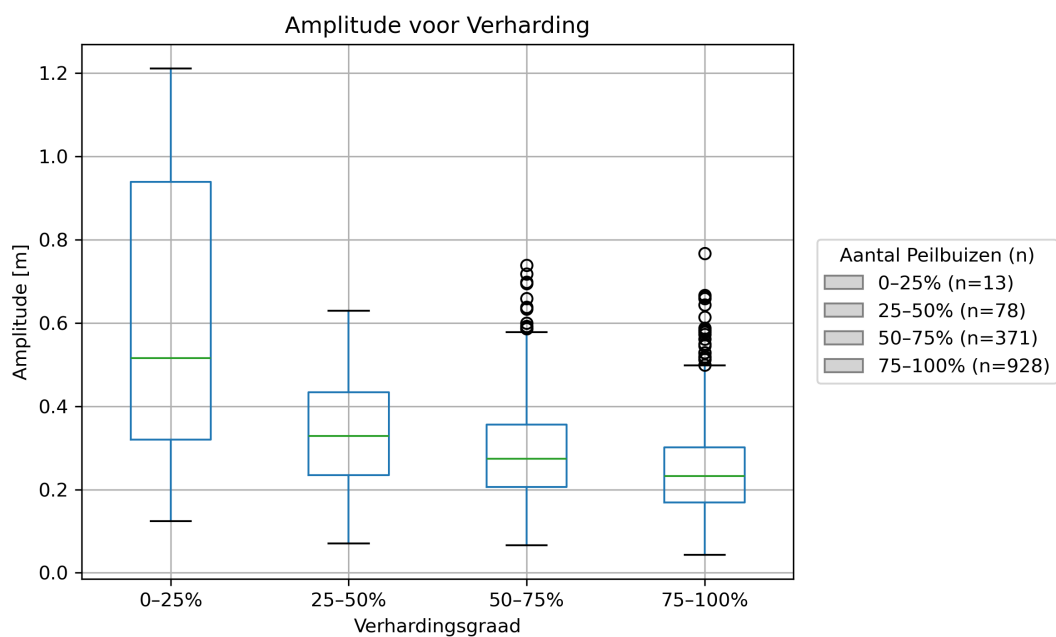
Amplitude voor Boomdekking



Figuur A.1: Amplitude vs. percentage boomdekking

Over het geheel genomen is er geen duidelijk verband zichtbaar, alleen bij een hoge boomdekking lijkt de amplitude groter.

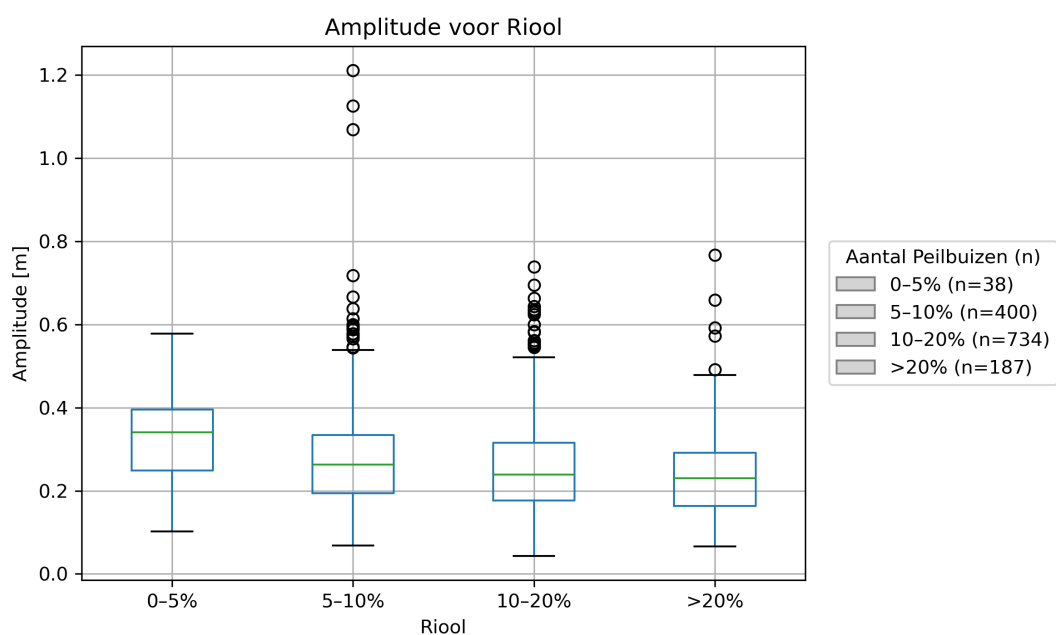
Amplitude voor Verharding



Figuur A.2: Amplitude vs. verharding

Een groter aandeel verhard oppervlak hangt samen met lagere amplitudes.

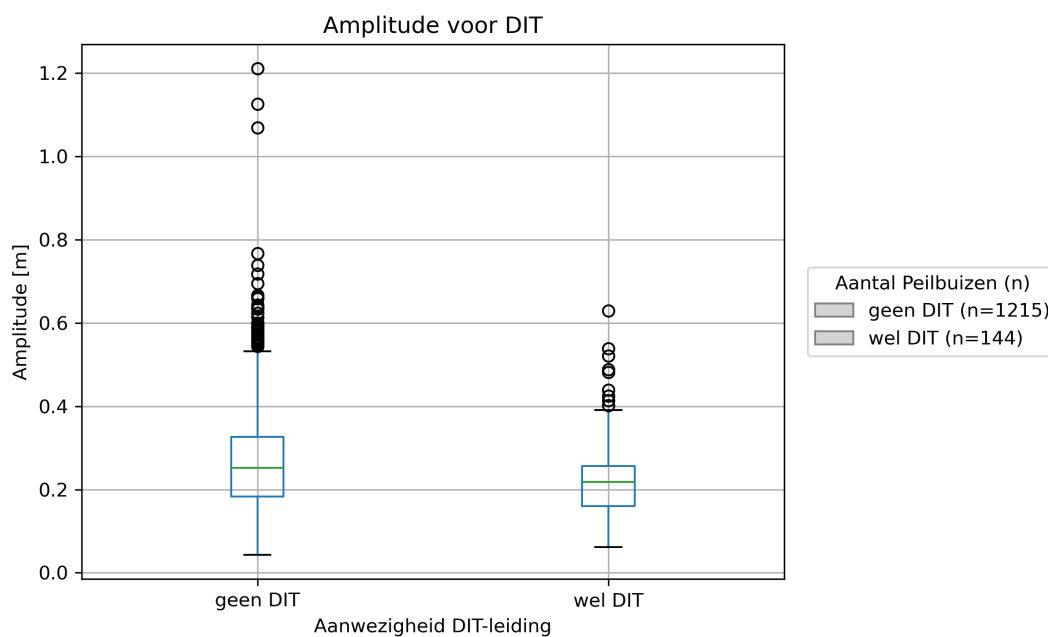
Amplitude voor Riool



Figuur A.3: Amplitude vs. riool

Uit deze boxplots is weinig eenduidig af te leiden, op basis hiervan kan niet geconcludeerd worden dat de aanwezigheid van riolering samenhangt met de amplitude.

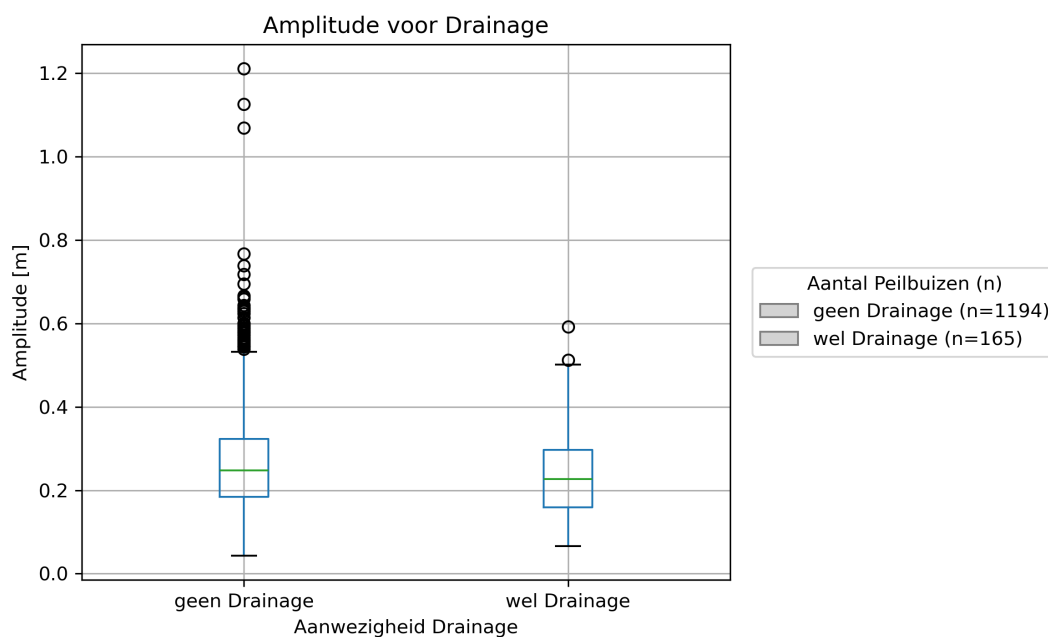
Amplitude voor DIT-systeem



Figuur A.4: Amplitude vs. DIT

De aanwezigheid van een DIT-systeem gaat samen met lagere amplitudes.

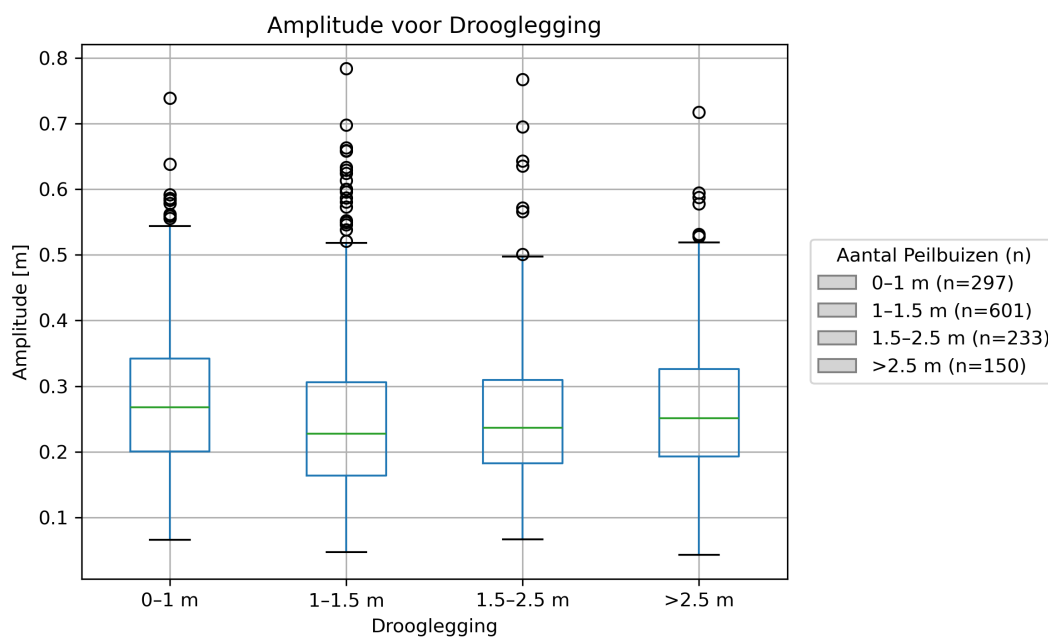
Amplitude voor Drainage



Figuur A.5: Amplitude vs. drainage

Bij aanwezigheid van drainage is de spreiding van de amplitudes kleiner, wat wijst op een stabiliserend effect.

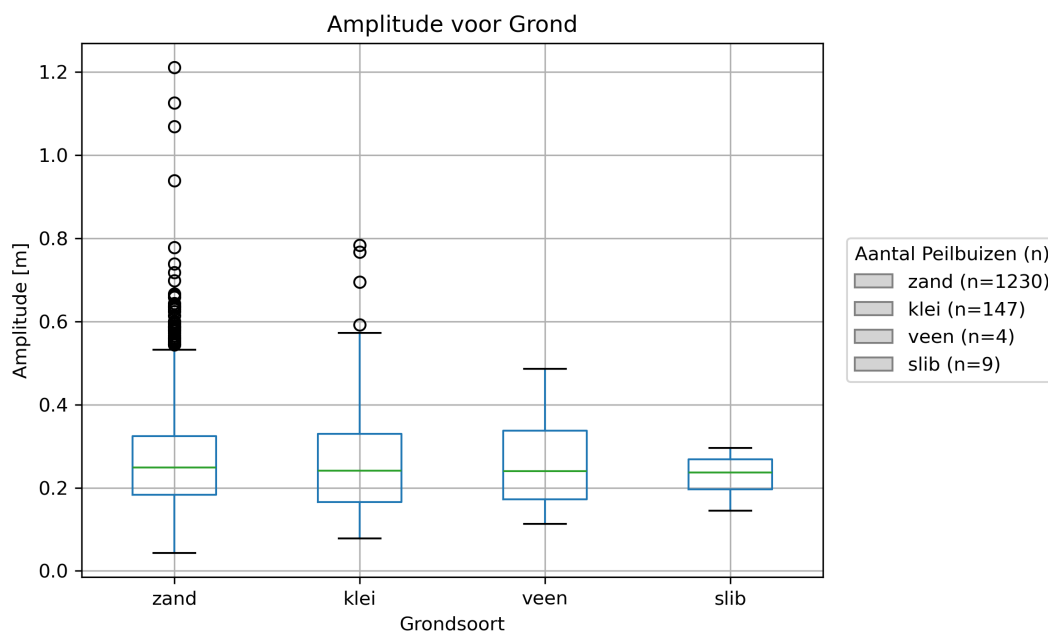
Amplitude voor Drooglegging



Figuur A.6: Amplitude vs. drooglegging

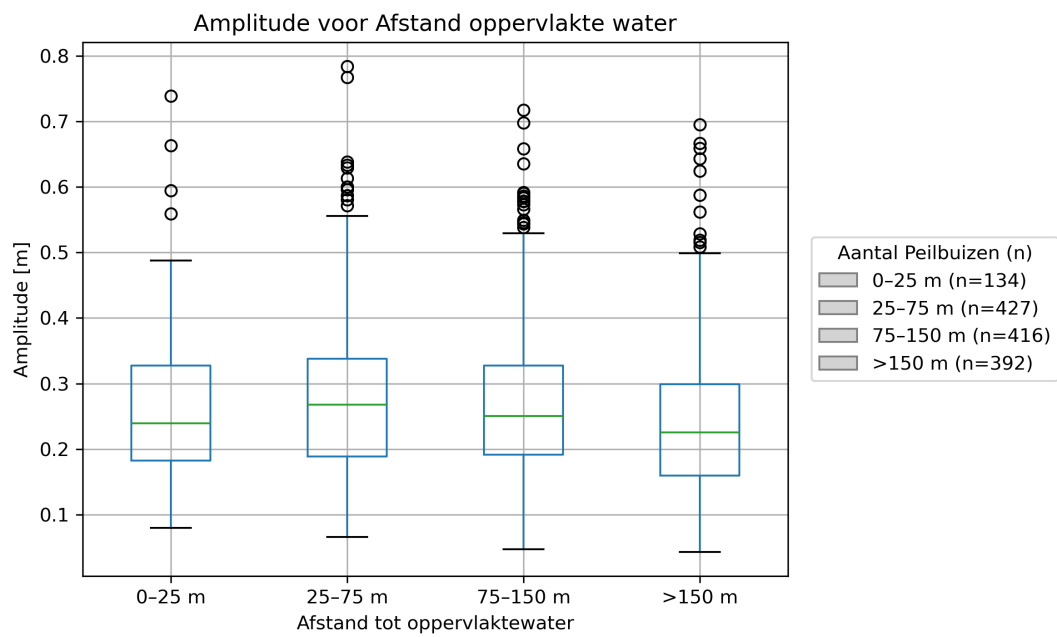
Er is geen duidelijk verband zichtbaar tussen drooglegging en amplitude, de spreiding is vergelijkbaar over de categorieën.

Amplitude voor Grondsoort



Figuur A.7: Amplitude vs. grondsoort

Door de beperkte data laten de resultaten geen overtuigend verschil zien tussen grondklassen.

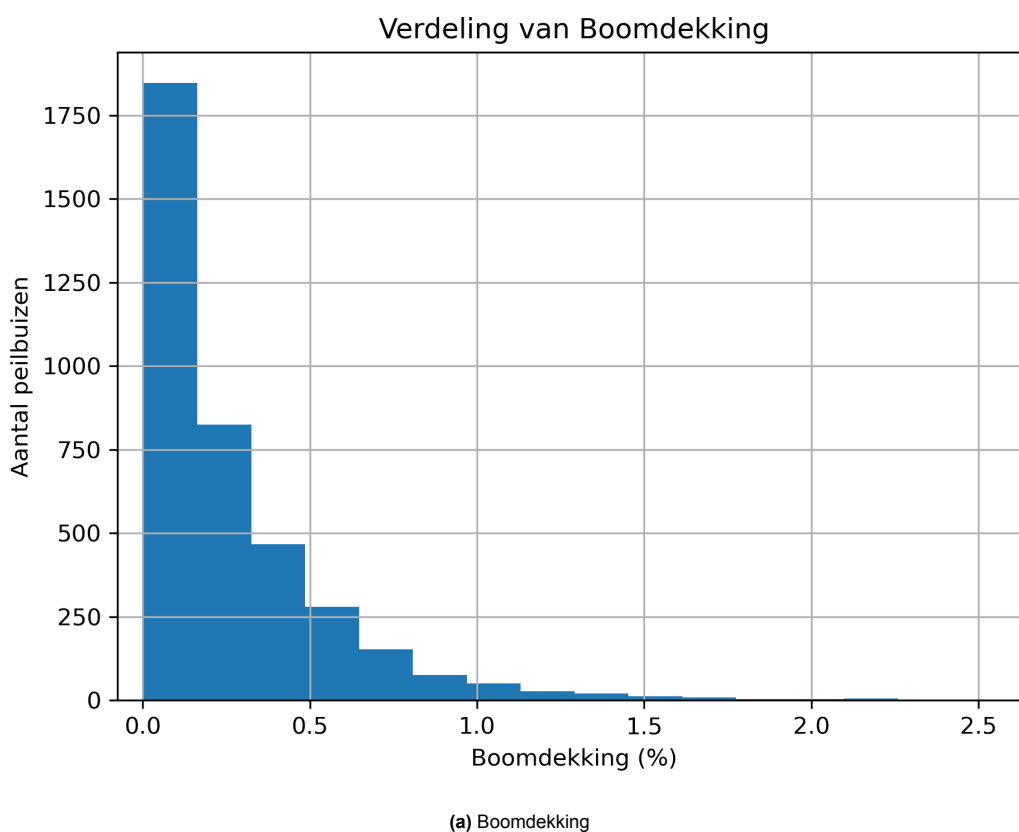
Amplitude voor afstand tot oppervlaktewater**Figuur A.8:** Amplitude vs. afstand tot oppervlaktewater

Er is geen eenduidig verband zichtbaar.

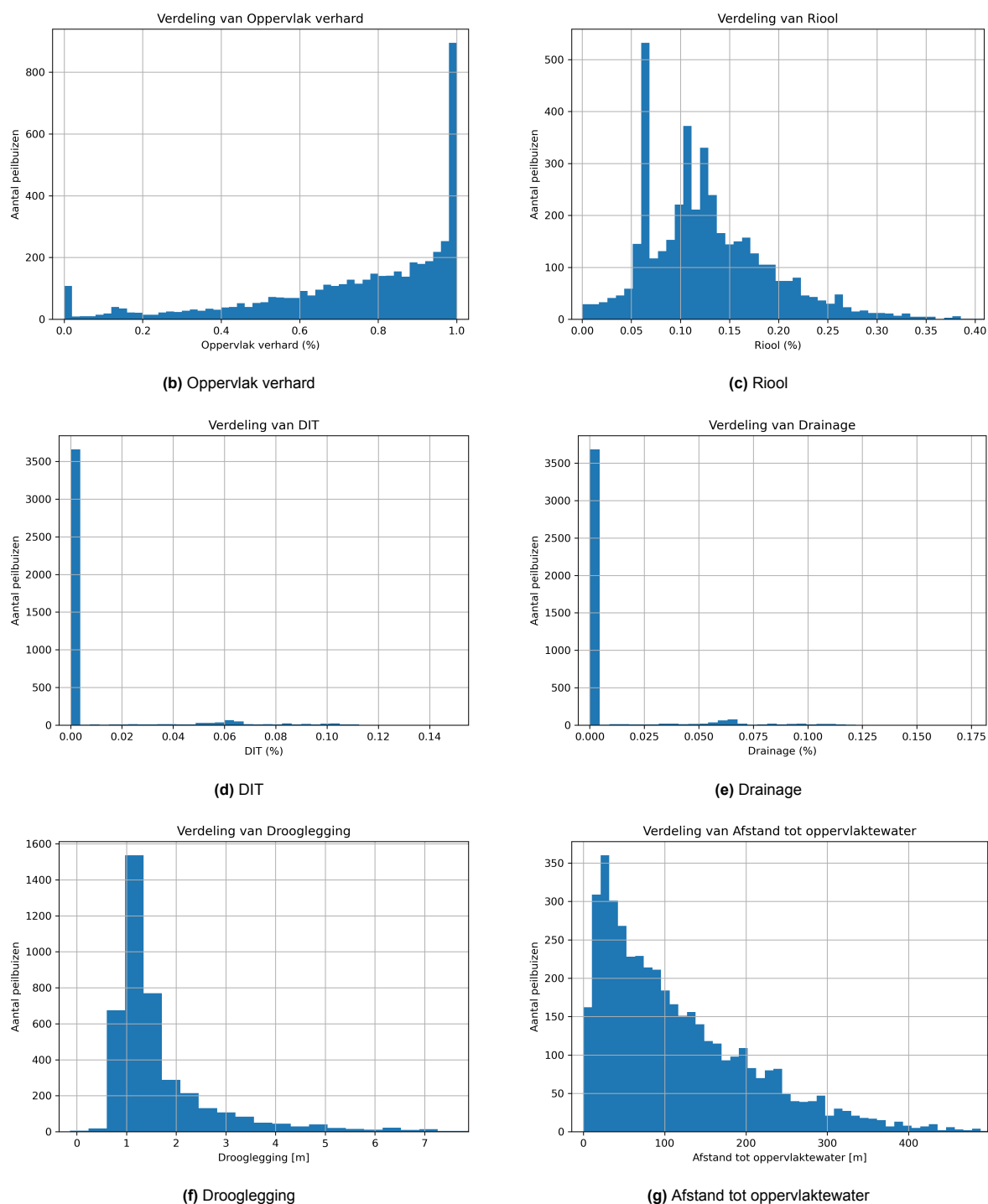
B

Verdeling van gebiedskenmerken

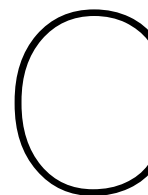
In deze bijlage zijn de histogrammen opgenomen van de gebiedskenmerken die in de analyse zijn gebruikt. De figuren laten de verdeling van de waarden per kenmerk over alle peilbuizen zien. Hierdoor wordt inzichtelijk hoe de kenmerken boomdekking, verhard oppervlak, drooglegging en afstand tot oppervlaktewater in de dataset verdeeld zijn. Deze verdelingen maken de spreiding inzichtelijk en helpen bij het toepassen van geschikte drempelwaarden om vergelijkbare peilbuizen te selecteren in de wijk-specifieke analyse.



Figuur B.1: Histogrammen van de gebiedskenmerken



Figuur B.1: Histogrammen van de gebiedskenmerken



Gebiedskenmerken - Wijkspecifiek

In deze bijlage zijn de tabellen opgenomen met de per wijk toegepaste marges rond de wijkwaarden van de gebiedskenmerken.

Kenmerk	Gemiddelde	Std	Factor	Waarde Wijk	Ondergrens (wijk)	Bovengrens (wijk)	% binnen marge (wijk)
Boomdekking %	0,260	0,510	0,300	0,210	0,050	0,360	51,4
Verharding %	0,720	0,260	0,600	0,860	0,700	1,020	57,3
Drooglegging [m]	1,560	1,230	0,700	1,930	1,070	2,790	59,6
Riool %	0,130	0,070	0,700	0,120	0,070	0,170	50,8
Afstand Water [m]	105,01	81,16	1,300	183,42	77,90	288,93	50,4

Tabel C.1: Overzicht van statistieken Bloemhof per kenmerk (met marges voor wijkwaarden).

Kenmerk	Gemiddelde	Std	Factor	Waarde Wijk	Ondergrens (wijk)	Bovengrens (wijk)	% binnen marge (wijk)
Boomdekking %	0,260	0,510	0,420	0,300	0,090	0,520	50,5
Verharding %	0,720	0,260	0,730	0,940	0,750	1,140	50,1
Drooglegging [m]	1,560	1,230	0,240	1,280	0,990	1,580	53,3
Riool	0,130	0,070	0,700	0,140	0,090	0,190	51,9
Afstand Water [m]	105,01	81,16	0,780	119,96	56,66	183,27	53,2

Tabel C.2: Overzicht van statistieken Agniesebuurt per kenmerk (met marges voor wijkwaarden).

Kenmerk	Gemiddelde	Std	Factor	Waarde Wijk	Ondergrens (wijk)	Bovengrens (wijk)	% binnen marge (wijk)
Boomdekking %	0,260	0,510	0,280	0,170	0,030	0,320	58,5
Verharding %	0,720	0,260	0,650	0,830	0,660	1,000	51,1
Drooglegging [m]	1,560	1,230	0,250	1,170	0,860	1,480	58,0
Riool %	0,130	0,070	0,950	0,160	0,090	0,230	58,2
Afstand Water [m]	105,01	81,16	0,980	140,51	60,97	220,05	55,7

Tabel C.3: Overzicht van statistieken Kleiwegkwartier per kenmerk (met marges voor wijkwaarden).