

Hemelwaterafvoer in een veranderend klimaat

Gevolgen voor de norm in 2050



Friso Dam
4487796

Begeleid door:
S. Pasterkamp
R. Abspoel

23 april – 25 juni 2018

Voorwoord

Dit onderzoek is een Bachelor Eindwerk voor het afronden van mijn Bachelor Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft. Het werk is gemaakt naar aanleiding van mijn interesses voor constructies van gebouwen, de vloeistofleer en het klimaat. Mijn dank gaat uit naar dr.ir. S. Pasterkamp en dr.ir. R. Abspoel, voor de begeleiding die zij mij hebben gegeven gedurende het project. Ook wil ik de KNMI Klimaatdesk en Pieters Bouwkunde bedanken voor het verstrekken van nuttige informatie.

Samenvatting

De meest gebruikte manier om regenwater van de daken af te voeren naar de riolering is door middel van een hemelwaterafvoersysteem. De huidige regelgeving voor leidingen van een dergelijk afvoersysteem is te vinden in hoofdstuk 6 van de norm NEN 3215+C1. De eisen die hierin worden genoemd, zijn gebaseerd op een regenintensiteit van 0.030 (l/s)/m². Echter, door klimaatveranderingen is deze regenintensiteit in de toekomst mogelijk niet meer geschikt. Het is belangrijk om de norm op tijd aan te passen, zodat de alternatieve noodafvoer voor regenwater niet te vaak in werking hoeft te treden.

Het doel van dit onderzoek is het effect vinden van een aangepaste regenintensiteit op de huidige norm. Voor dit doel is de volgende onderzoeksvraag opgesteld: *In hoeverre moet hoofdstuk 6 van de norm NEN 3215+C1 worden aangepast op basis van de klimaatverwachtingen rond 2050?* Onder de klimaatverwachtingen rond 2050 wordt een veranderde regenintensiteit verstaan, met dezelfde herhalingstijd als de huidig geldende regenintensiteit. De mate van aanpassing is gebaseerd op het effect van deze verandering op de norm.

Voor het beantwoorden van de onderzoeksvraag is eerst onderzocht wat de herhalingstijd is van de regenintensiteit die nu in de norm staat. Volgens een klimaatmodel van het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut [KNMI] (Buishand en Wijngaard, 2007) en de norm NTR 3216 (Nederlands Normalisatie-instituut, 2012) is deze herhalingstijd 5 jaar. Vervolgens is deze herhalingstijd op een ander klimaatmodel van de Stichting Onderzoek Toegepast Waterbeheer [STOWA] (Beersma et al., 2015) toegepast, waar de twaalf verschillende KNMI'14-klimaatscenario's in verwerkt zijn. Hieruit volgen nieuwe regenintensiteiten, waarvan de hoogste en gebruikte waarde 0.034 (l/s)/m² is, een stijging van 16.54 %.

Daarna is gekeken naar het verband tussen de diameter van hemelwaterafvoerleidingen en de regenintensiteit volgens de norm. Dit verband is voor alle onderzochte leidingen te beschrijven als: $diameter = C * regenintensiteit^{0.4}$. Een verandering in de regenintensiteit van 16.54 % levert zo een verandering van de buisdiameter van 6.031 %. Tot slot is deze verandering gebruikt om een schatting van het aantal aangepaste hemelwaterleidingen te kunnen maken. Met enige onzekerheid komt dit neer op een aanpassing van 30 % van alle hemelwaterleidingen.

Op basis van de gevonden resultaten wordt aanbevolen om op tijd een nieuwe regenintensiteit aan te houden voor NEN 3215+C1, zodat veranderingen aan de bestaande leidingen geleidelijk kunnen verlopen. Een eventueel vervolgonderzoek zou zich kunnen richten op het beste moment voor de aanpassing van de norm.

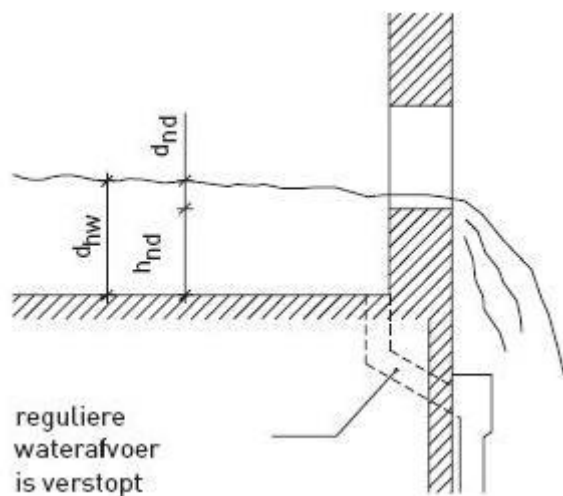
Inhoudsopgave

Voorwoord.....	1
Samenvatting.....	2
1. Inleiding.....	5
1.1. Probleemdefinitie.....	6
1.2. Afbakening.....	6
1.3. Onderzoeksvraag.....	7
2. Plan van aanpak.....	8
3. Neerslagintensiteit in de huidige norm.....	9
3.1. Onderbouwing in de huidige norm.....	9
3.2. GEV-verdeling.....	9
3.3. Neerslaggegevens van twintigste eeuw.....	11
3.4. Intensiteiten en frequenties volgens het KNMI.....	12
3.5. Conclusie.....	13
4. Ontwerpintensiteit voor het jaar 2050.....	14
4.1. KNMI'14-klimaatscenario's voor 2050.....	14
4.2. Neerslagintensiteit en luchtvochtigheid.....	15
4.3. Aanpassingen in het GEV-model.....	16
4.4. Maatgevende neerslagintensiteit voor 2050.....	18
5. Doorrekenen van reguliere hemelwaterafvoeren.....	19
5.1. Belasting op afvoerleidingen.....	19
5.2. Afvoercapaciteit hemelwaterstandleiding.....	19
5.3. Afvoercapaciteit verzamelleiding.....	21
5.4. Neerslagintensiteit en ontwerp-middellijn.....	23
6. Doorrekenen van UV-hemelwaterafvoeren.....	24
6.1. Drukverlies.....	24
6.2. Debiet en stroomsnelheid.....	26
6.3. Neerslagintensiteit en ontwerp-middellijn.....	26
7. Afmetingen hemelwaterleidingen.....	27
8. Conclusies.....	29
8.1. Regenintensiteit.....	29
8.2. Verband tussen regenintensiteit en leidingafmetingen.....	29
8.3. Gevolgen voor bestaande hemelwaterleidingen.....	30
8.4. Aanbevelingen.....	30

9. Discussie.....	31
Literatuurlijst.....	32
Bijlage A	34
Bijlage B	36
Bijlage C.....	38
Bijlage D	39

1. Inleiding

Daken zijn essentiële onderdelen van allerlei soorten gebouwen. Ze dienen als isolatie, houden de wind tegen en zorgen ervoor dat het binnen droog blijft. Om het regenwater tegen te houden, is meer nodig dan een waterkerende laag, het water zal immers afgevoerd moeten worden. Hiervoor bestaan twee soorten afvoersystemen. Allereerst is er de gewone hemelwaterafvoer, die ontworpen is voor de gemiddelde regenintensiteiten. Kenmerkende onderdelen van de hemelwaterafvoer van gebouwen zijn de dakgoten en regenpijpen, of leidingen. De functie van het leidingsysteem is om het regenwater van de dakgoot naar de riolering te brengen. Voor buitengewoon hoge intensiteiten of een verstopte hemelwaterafvoer zijn er noodoverlopen. Het verschil tussen beide systemen is weergegeven in figuur 1.1.



Figuur 1.1 Hemelwaterafvoer (rechtsonder) en noodoverloop (rechtsboven) (De Vree, 2018)

Wanneer een regenbui plaatsvindt, blijft er zo nu en dan regenwater achter op de daken. In het geval dat dit een harde regenbui betreft, gaat het gewicht van dit water een rol spelen. Net als bij alle andere belastingen dient de dakconstructie te voldoen aan sterkte, stijfheid en stabiliteit. Voor de stijfheid zijn er doorgaans enige kleine vervormingen toegestaan. Als er vervormingen ten gevolge van het regenwater optreden, zal een dal ontstaan op de plaats waar de vervormingen het grootst zijn. Het regenwater zal nu gaan stromen naar dit laagste punt. In dit laagste punt kan het water zich verzamelen, zodat de waterbelasting hier toeneemt. Dit levert een grotere vervorming op: het dal in het dak wordt dieper, waardoor nog meer regenwater zich hier kan verzamelen. Bij aanhoudende regen en weinig verdamping kunnen de belastingen zo groot worden dat de dakconstructie zal falen. Dit beschreven fenomeen wordt wateraccumulatie genoemd. Het is een belangrijke reden waarom een goede waterafvoer op daken vereist is. De regelgeving voor dakconstructies met betrekking tot wateraccumulatie is terug te vinden in NEN 6703.

In de volgende paragraaf zal het probleem voor de regelgeving voor het hemelwaterafvoersysteem, verder worden toegelicht. Hierna volgt een afbakening waarin de grenzen voor dit onderzoek vermeld staan. Als laatste komen de onderzoeksvraag en de bijbehorende deelvragen aan bod.

1.1. Probleemdefinitie

Bij het bepalen van de afvoercapaciteit voor de hemelwaterafvoer wordt de belasting van het leidingsysteem berekend. Dit wordt gedaan aan de hand van formule 1.1.

$$Q_h = \alpha \cdot i \cdot \beta \cdot A_d \quad (1.1)$$

Gebruik makend van deze formule wordt de hemelwaterbelasting Q_h berekend met de reductiefactor voor de regenintensiteit α , de regenintensiteit i , de reductiefactor voor de dakbreedte β en de effectieve dakoppervlakte A_d . De capaciteit van de leiding dient minstens gelijk te zijn aan de hemelwaterbelasting (Nederlands Normalisatie-instituut, 2014).

Voor de regenintensiteit wordt een constante waarde gebruikt van 0.030 (l/s)/m^2 (Nederlands Normalisatie-instituut, 2014). Deze hoeveelheid is bepaald met behulp van een statistische verdeling van de neerslagintensiteit. De verdeling die hiervoor gebruikt wordt, is mogelijk al meer dan tien jaar oud. Ook is onduidelijk met welke frequentie deze neerslag voorkomt.

Tijdens de afgelopen decennia is gebleken dat wereldwijd het klimaat in rap tempo verandert. Voor Nederland zijn de belangrijkste veranderingen een stijging van de gemiddelde temperatuur en een toename van de extreme neerslag, met name in de zomers. De totale hoeveelheid neerslag zal vooral in de winters toenemen (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut [KNMI], 2015)

De verandering in neerslagintensiteit heeft uiteindelijk consequenties voor de daken. Bij ongewijzigde afvoersystemen maar hogere neerslagintensiteiten neemt de kans op wateraccumulatie toe. Echter, het effect van een veranderde intensiteit op de regelgeving is nog onduidelijk.

1.2. Afbakening

Omdat de uitvoering van het onderzoek in een beperkte tijd plaatsvindt, zijn grenzen vastgesteld. Deze grenzen worden hieronder genoemd.

Dit onderzoek richt zich op de reguliere hemelwaterafvoer, waarvoor de richtlijnen zijn opgesteld in NEN 3215 (Nederlands Normalisatie-instituut, 2014). De meeste richtlijnen voor leidingsystemen voor regenwater zijn te vinden in hoofdstuk 6 van deze norm. Voor meer informatie over de noodoverlopen wordt verwezen naar het Bachelor Eindwerk van Adriaan Bac (2018).

Er wordt geconcentreerd op de klimaatverwachtingen rond het jaar 2050. Het gaat hierbij enkel om regenintensiteiten. Veranderingen in de verdamping door temperatuurverschillen valt buiten beschouwing. Ook mogelijk verdere verzuring van het regenwater, waardoor elementen van de constructie worden aangetast, wordt niet onderzocht.

Voor de dimensionering van het leidingsysteem wordt geen rekening gehouden met ander afvalwater afkomstig uit het betreffende gebouw. Het gescheiden afvoersysteem wordt pas in de grond mogelijk samengevoegd. Er wordt dus alleen gekeken naar het bovengrondse gedeelte van de leidingen voor hemelwaterafvoer, zoals beschreven staat in hoofdstuk 6 van NEN 3215.

1.3. Onderzoeksvraag

Nu het probleem bekend is en de grenzen zijn gesteld aan het onderzoek, kan de onderzoeksvraag worden opgesteld. Deze is als volgt.

In hoeverre moet hoofdstuk 6 van de norm NEN 3215+C1 worden aangepast op basis van de klimaatverwachtingen rond 2050?

De onderzoeksvraag levert de volgende deelvragen op:

- Wat is de frequentie die hoort bij de regenintensiteit waarop dit moment gedimensioneerd wordt?
- Welke verwachting van de regenintensiteit voor 2050 moet worden aangehouden?
- Welke gevolgen heeft de nieuwe regenintensiteit op de eisen die gelden voor reguliere hemelwaterafvoersystemen (volgens het overlaatprincipe)?
- Welke gevolgen heeft de nieuwe regenintensiteit op de eisen die gelden voor UV-hemelwaterafvoersystemen?
- Zijn de verschillen groot genoeg om de norm aan te passen en wat is deze aanpassing?

2. Plan van aanpak

Met de gekozen onderzoeksvraag en deelvragen staat hieronder de tijdsplanning van het onderzoek. Per deelvraag wordt ook de wijze van uitvoering genoemd.

Deelvraag 1: Wat is de frequentie die hoort bij de regenintensiteit waarop dit moment gedimensioneerd wordt?

Als eerste wordt achterhaald aan de hand van literatuuronderzoek waarop de regenintensiteit gebaseerd is die gebruikt wordt in de huidige norm NEN 3215+C1. De procentuele kans op deze neerslag wordt aangehouden voor het vervolg van het onderzoek. De uitvoering vindt plaats in week 2.

Deelvraag 2: Welke verwachting van de regenintensiteit voor 2050 moet worden aangehouden?

Vervolgens worden verschillende klimaatscenario's van het KNMI met elkaar vergeleken, ook dit gedeelte gebeurt op basis van een literatuuronderzoek. De nieuwe neerslagintensiteiten en de bijbehorende kansen op voorkomen worden in een statistische verdeling weergegeven. Hierop volgt een keuze welk klimaatscenario voor 2050 het beste gebruikt kan worden voor dit onderzoek. De beantwoording van deze deelvraag vindt plaats in de weken 3 en 4.

Deelvraag 3: Welke gevolgen heeft de nieuwe regenintensiteit op de eisen die gelden voor reguliere hemelwaterafvoersystemen (volgens het overlaatprincipe)?

Deelvraag 4: Welke gevolgen heeft de nieuwe regenintensiteit op de eisen die gelden voor UV-hemelwaterafvoersystemen?

Deze nieuwe neerslagintensiteit wordt toegepast op de bestaande norm, door de berekeningen uit de norm na te lopen. Hieruit blijkt in hoeverre de huidige eisen die gelden voor hemelwaterafvoer-systemen strenger worden. Dit wordt gedaan door eerst naar reguliere afvoersystemen te kijken (in week 5) en vervolgens de UV-leidingen te analyseren (week 6).

Deelvraag 5: Zijn de verschillen groot genoeg om de norm aan te passen en wat is deze aanpassing?

Week 7 en 8 worden gebruikt voor de uitloop van voorgaande deelvragen en het maken van een conclusie, aanbevelingen en samenvatting. Uit dit laatste deel van het onderzoek blijkt welke aanpassing er, indien nodig, wordt aanbevolen voor de norm NEN 3215+C1.

3. Neerslagintensiteit in de huidige norm

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van het literatuuronderzoek dat is verricht naar aanleiding van de deelvraag *Wat is de frequentie die hoort bij de regenintensiteit waar op dit moment mee gedimensioneerd wordt?* Eerst wordt nagegaan welke toelichting in de huidige normen gegeven is bij de gebruikte regenintensiteit. Daarna wordt met een berekening door het KNMI onderzocht hoe deze ontwerpneerslag tot stand is gekomen. Ten slotte komen recente neerslaggegevens aan bod, om uiteindelijk een conclusie te kunnen trekken over de geschikte neerslagfrequentie.

3.1. Onderbouwing in de huidige norm

In de huidige norm NEN 3215+C1 staat naast de vermelding van de ontwerpregenintensiteit geen uitleg gegeven, ook gebruikte literatuur ontbreekt. Echter, in de norm NTR 3216 staat dit wel beschreven. Deze norm is een combinatie van de regelgeving over rioleringen.

De verklaring die in de norm staat is als volgt: "Toelichting: Theoretische beschouwingen tonen aan dat op onze geografische breedte geen hogere regenintensiteit kan optreden dan 0.0540 – 0.0600 (l/s)/m². Slechts eenmaal per 50 jaar treedt een regenintensiteit op van 0.0500 (l/s)/m² en eenmaal per 5 jaar een regenintensiteit van 0.0300 (l/s)/m²." (Nederlands Normalisatie-instituut, 2012). Hiermee is duidelijk dat de makers van de normen rekening gehouden hebben met een overstromingsfrequentie van 1 keer per 5 jaar, en hier met behulp van neerslagstatistieken een waarde van 0.030 (l/s)/m² aan hebben gekoppeld. Onzeker is of deze intensiteit en frequentie daadwerkelijk bij elkaar horen, gelet op de neerslaggegevens. Dit wordt onderzocht in de volgende paragraaf.

3.2. GEV-verdeling

Voor de bepaling van de herhalingstijden van extreme neerslagen wordt gebruik gemaakt van een GEV (Generalized extreme value) verdeling. De functie die hoort bij deze statistische verdeling is weergegeven in vergelijking 3.1.

$$x(T) = \lambda + \frac{\beta}{\theta} (1 - T^{-\theta}) \quad (3.1)$$

Met behulp van deze functie wordt de neerslaghoeveelheid $x(T)$ berekend. In de functie is λ de locatieparameter, θ de vormparameter, β de schaalparameter en T de herhalingstijd van de regenbui.

De vormparameter in het model is bepaald door gebruik te maken van een grote hoeveelheid meetgegevens van weerstations in Nederland en België. De waarde van deze parameter is weliswaar afhankelijk van de duur van de neerslag, maar voor duren korter dan 24 uur mag

hiervoor een constante waarde van $\theta = -0.090$ worden aangehouden vanwege minimale verschillen (Buishand en Wijngaard, 2007).

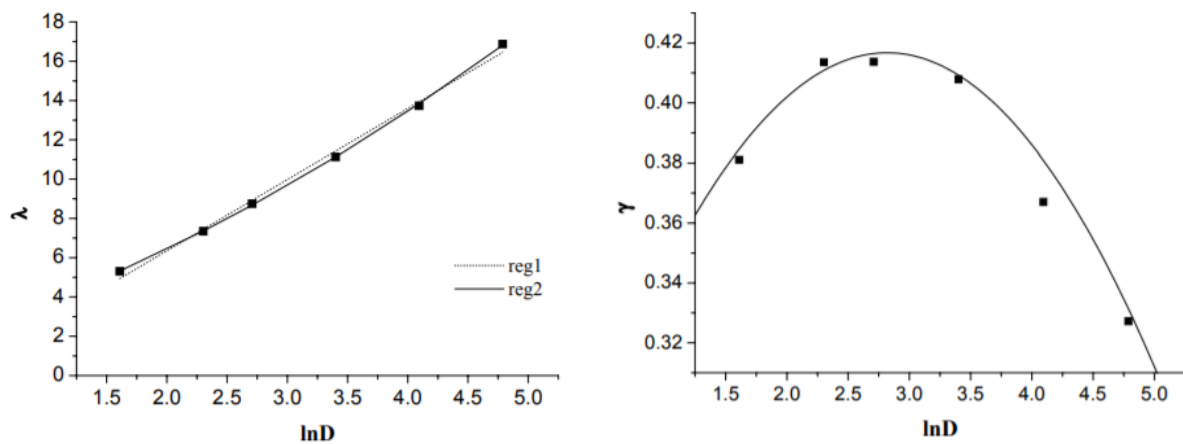
Ook de parameters β en λ hangen af van de regenduur (D). Voor verschillende regenduren zijn maximum likelihood schattingen gemaakt voor λ en γ ($\gamma = \beta/\lambda$). In figuur 3.1 zijn deze schattingen als datapunten te zien. Voor het verband tussen λ en $\ln(D)$ bestaan twee verbanden, hoewel in de figuur te zien is dat de doorgetrokken lijn (reg2) de beste fit geeft. Dit is een kwadratisch verband:

$$\lambda = 1.618 + 1.862 \ln(D) + 0.274 (\ln(D))^2 \quad (3.2)$$

Het regressieverband tussen γ en $\ln(D)$ is ook kwadratisch:

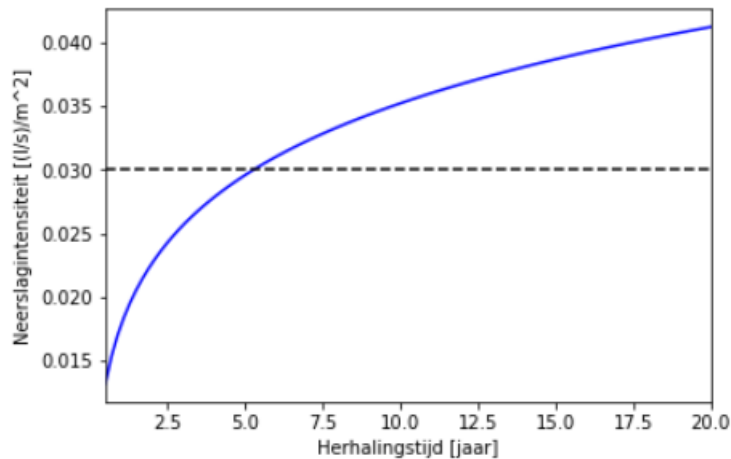
$$\gamma = 0.242 + 0.124 \ln(D) - 0.022 (\ln(D))^2 \quad (3.3)$$

In de formules 3.2 en 3.3 is D uitgedrukt in minuten en zijn λ en γ uitgedrukt in millimeters.



Figuur 3.1 Regressielijnen voor λ (links) en γ (rechts) als functie van $\ln(D)$ (Buishand en Wijngaard, 2007).

Nu de parameters voor de benodigde GEV-verdeling bekend zijn, kan de herhalingstijd T voor de gegeven regenintensiteit van 0.030 (l/s)/m² worden bepaald. De aanname die hierbij wordt gedaan, is dat deze intensiteit slechts voor vijf minuten aan zal houden. Wanneer deze intensiteit zich namelijk voor zou doen voor een uur lang, is de regenintensiteit gelijk aan 108 mm/uur. Dit is ongeveer een achtste (!) van de jaarlijkse hoeveelheid neerslag in Nederland. Een kortere duur is vanwege een onbetrouwbare (kwadratische) extrapolatie niet nauwkeurig genoeg.



Figuur 3.2 Verband tussen de herhalingstijd en de neerslagintensiteit volgens de GEV-verdeling

Voor $D = 5$ geldt volgens de regressieverbanden dat $\lambda = 5.325$ en $\gamma = 0.3845$. De bijbehorende β ($\beta = \lambda \cdot \gamma$) kan nu worden gevonden en is $\beta = 2.048$. De vormparameter wordt constant gehouden ($\theta = -0.09$). Als laatste wordt de regenintensiteit uit NEN 3215+C1 ingevuld ($x(T) = 0.030 \text{ (l/s)/m}^2 = 9.0 \text{ (l/5 min)/m}^2$). Dit levert de volgende vergelijking op:

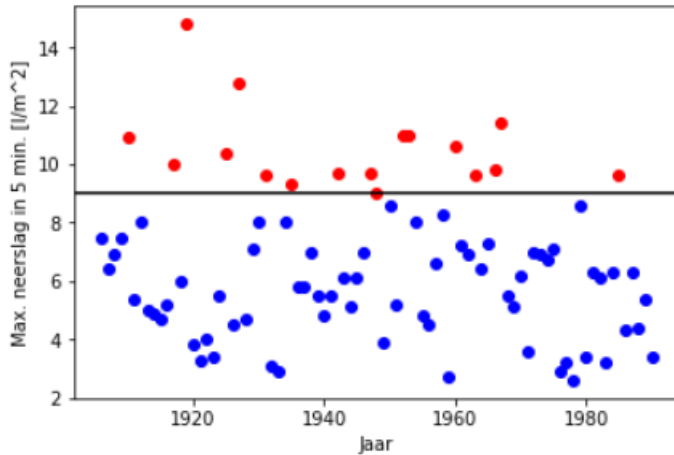
$$9.0 = 5.325 + \frac{2.048}{-0.090} (1 - T^{0.090}) \quad (3.4)$$

Uit vergelijking 3.4 volgt dat $T = 5.3$ jaar, dit is ook te zien in figuur 3.2. Deze gevonden herhalingstijd is vergelijkbaar met de genoemde frequentie in NTR 3216.

3.3. Neerslaggegevens van twintigste eeuw

Om te kijken of de theorie in de praktijk ook geldt, kan er het beste gekeken worden naar de statistieken van de afgelopen eeuw. Vanuit het KNMI (1991) zijn er gegevens beschikbaar over de jaarlijkse maximale neerslagintensiteit per neerslagduur van de afgelopen eeuw (1906-1990). Er zal hierbij wederom de nadruk gelegd worden op neerslagduren van 5 minuten.

Met behulp van Python zijn deze uitgezet in een grafiek. Deze is te zien in figuur 3.3, de bijbehorende uitwerking is terug te vinden in bijlage B. De overschrijvingskans volgens de theorie is eens per 5 jaar. Dit zou in de grafiek terug te zien moeten zijn. Als gekeken wordt naar het aantal meetpunten wat boven de grens van 9.0 (l/s)/m^2 ligt, is er te zien dat er 17 punten boven liggen. Omdat de meting van 1906 tot 1990 loopt, zijn er in totaal 85 meetjaren, dus totaal 85 punten. Dit komt neer op een overschrijding van 0.2 (17/85) . Hierbij hoort een frequentie van eens per 5 jaar. Dit lijkt perfect te kloppen met de theorie. Echter is er in de gebruikte gegevens geen rekening mee gehouden dat de grens van 9.0 (l/s)/m^2 meerdere keren per jaar overschreden kan zijn, omdat er met de jaarmaxima gerekend is. De daadwerkelijke overschrijdingskans zal dus hoger liggen dan 0.2 . De afgelopen eeuw is waarschijnlijk de maximale intensiteit van 0.030 mm/s vaker overschreden dan eens per 5 jaar.



Figuur 3.3 Grafische weergave van maximale neerslagintensiteiten voor duren van 5 minuten

3.4. Intensiteiten en frequenties volgens het KNMI

Zeer recent is door het KNMI een nieuwe neerslagstatistiek opgesteld voor neerslagen van korte duur. Deze is weergegeven in figuur 3.4 (KNMI, 2018). Hierin zijn de waarden de hoeveelheid van de neerslag in millimeters, op basis van de frequentie en de neerslagduur in minuten. De locatie in Nederland is voor korte neerslagduren niet van belang. Zoals in de paragraaf 3.2 is beschreven, is de neerslaghoeveelheid na vijf minuten gelijk aan 9.0 mm bij een regenintensiteit van 0.030 mm/s. De tabel in figuur 3.3 geeft hiervoor een frequentie van 1 keer per 2 jaar.

Uit de eerder behandelde bronnen bleek voor de ontwerpintensiteit steeds dat de frequentie 1 keer per 5 jaar zou moeten zijn. De neerslaggegevens die hiervoor gebruikt zijn, zijn afkomstig uit de jaren 1906 tot en met 1990. Inmiddels kan er gebruik worden gemaakt van gegevens van bijna dertig jaar later, een periode waarin de frequentie van de ontwerpneerslag blijkbaar meer dan verdubbeld is.

	minuten			
	5	15	30	60
2 x per jaar	6	9	10	13
1 x per jaar	7	11	14	16
1 x per 2 jaar	9	14	17	20
1 x per 5 jaar	11	17	21	26
1 x per 10 jaar	12	20	25	31
1 x per 20 jaar	14	24	30	37
1 x per 50 jaar	17	29	38	48
1 x per 100 jaar	20	35	46	58

Figuur 3.4 Neerslagstatistiek voor duren korter dan 24 uur (KNMI, 2018)

De gegevens uit figuur 3.4 zijn afkomstig uit een rapport van de Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer [STOWA] (Beersma et al, 2018). In dit rapport wordt gebruik gemaakt van een andere statistische verdeling, namelijk de GLO-verdeling. Het verschil tussen deze verdeling en de eerder gebruikte GEV-verdeling is dat de GLO-verdeling hogere intensiteiten geeft, zodat de neerslagmetingen van de laatste jaren beter in het model passen. Dit geeft inderdaad aan dat er zich, sinds de norm NEN 3215 is opgesteld, al veranderingen in de neerslagmetingen hebben

voorgedaan. Het klinkt logisch om toch gebruik te maken van het beter fittende model, maar een controleberekening met een neerslagduur van 5 minuten geeft een zeer onnauwkeurig resultaat. Alleen voor neerslagduren langer dan 10 minuten is het nieuwe model wel geschikt, maar is te langdurig voor de regenintensiteit waarop in de norm gedimensioneerd is.

3.5. Conclusie

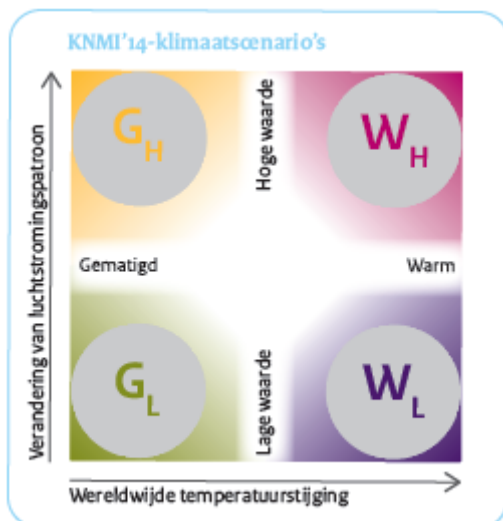
Er zijn verschillen te ontdekken in de frequentie die hoort bij een neerslagintensiteit van 0.030 (l/s)/m^2 . Met behulp van gegevens uit de vorige eeuw wordt een frequentie gevonden van 1 keer per 5 jaar. Dit is ook de frequentie waarnaar gestreefd wordt in de normen NEN 3215 en NTR 3216. Nieuwere gegevens van neerslag tonen aan dat er sindsdien al veranderingen zijn opgetreden in de frequenties van korte, intensieve regenbuien. Dit is belangrijk om mee te nemen in de toekomstvoorspellingen. Daarentegen is het duidelijk dat er voor het ontwerpen van hemelwaterafvoer een regenintensiteit nodig is die 1 keer per 5 jaar wordt overschreden.

4. Ontwerpintensiteit voor het jaar 2050

In dit hoofdstuk wordt de deelvraag *Welke verwachting voor de regenintensiteit voor 2050 moet worden aangehouden?* beantwoord. Eerst worden de algemene gevolgen van de bestaande scenario's belicht. Daarna volgt een uitleg over de algemene invloed die de scenario's op de extreme neerslag zullen hebben. Vervolgens wordt per scenario nagegaan tot welke regenintensiteit dit zal leiden in de toekomstige norm. Dit zal gebeuren door te kijken naar rekenmethoden die het KNMI hiervoor gebruikt. Tot slot wordt er een keuze gemaakt welke intensiteit het meest relevant zal zijn. Hiermee kan in het vervolg van dit onderzoek verder mee worden gerekend in de normen.

4.1. KNMI'14-klimaatscenario's voor 2050

Het KNMI heeft voor het jaar 2050 vier verschillende klimaatscenario's opgesteld. Deze zijn G_L (Gematigd Laag), G_H (Gematigd Hoog), W_L (Warm Laag) en W_H (Warm Hoog), weergegeven in figuur 4.1. De eerste letter (G of W) geeft aan wat de waarde is van de wereldwijde temperatuurstijging. Gematigd betekent dat dit 1 °C zal zijn, Warm betekent 2 °C. De tweede letter (L of H) is de indicatie voor de mate van verandering van het luchtstromingspatroon. Bij Laag is deze verandering klein, maar bij Hoog zal de wind in de zomer vaker uit het oosten komen en in de winter vaker uit het westen. Dit levert relatief droge zomers en natte winters op.



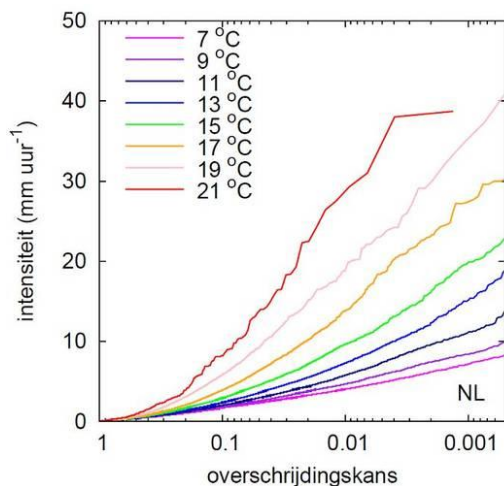
Figuur 4.1 KNMI'14-klimaatscenario's (KNMI, 2015)

Binnen diese scenario's bestaan subscenario's voor de neerslagextremen. Voor elk afzonderlijk scenario worden deze aangeduid als laag, midden en hoog. De aanduidingen staan voor de mate van toename van de neerslagextremen: per scenario bestaat een gebied waarin de toename zich zal bevinden. Het lage subscenario geeft de ondergrens van dit gebied aan, het hoge subscenario de bovengrens en het middelste subscenario de gemiddelde waarde. In totaal bestaan er dus twaalf subscenario's, met ieder zijn eigen berekende tijdreeks.

4.2. Neerslagintensiteit en luchtvochtigheid

Wat is het verband tussen de neerslagintensiteit en luchtvochtigheid, waar de temperatuur een rol in speelt? Dit verband staat bekend als de Clausius-Clapeyron relatie en is een belangrijke wet in de thermodynamica. Het belangrijkste principe van deze wet is dat warme lucht meer waterdamp kan bevatten door de lagere dichtheid. Dit betekent dat de verzadigingswaarde (de hoeveelheid waterdamp die kan worden opgenomen) van lucht hoger is bij een toenemende temperatuur. Tegelijkertijd laat dit zien dat bij toenemende temperatuur en een constante verzadigingsgraad de hoeveelheid waterdamp moet toenemen. De verzadigingsgraad is de verhouding tussen de hoeveelheid vocht in de lucht en de verzadigingswaarde. Per graad opwarming levert het een toename van de waterdamp van 7 % op. Daarom werd vroeger aangenomen dat de neerslagintensiteit dan ook met 7 % zal toenemen per graad opwarming. Na onderzoek van het KNMI (Lenderink et al., 2011) blijkt dit een onderschatting, vooral voor temperaturen boven de 12 °C.

Figuur 4.2 toont de overschrijdingskansen voor neerslagintensiteiten die horen bij verschillende dauwpunttemperaturen. De dauwpunttemperatuur is de temperatuur waarbij de lucht volledig verzadigd is en er condens of dauw ontstaat. Aan de ruimtes tussen de lijnen is te zien dat bij temperaturen boven de 12 °C de verschillen tussen de lijnen in gelijke mate groter worden. Met behulp van grafieken zoals in deze figuur is aangetoond dat per graad opwarming de neerslagintensiteit met 14 % toeneemt. Deze constatering wordt de 2CC-relatie genoemd, omdat de relatie twee keer zo hoog is als de Clausius-Clapeyron relatie (Lenderink et al., 2011).



Figuur 4.2 Overschrijdingskansen van neerslagintensiteiten voor verschillende dauwpunttemperaturen (Lenderink et al., 2011)

Wanneer het gevonden verband gekoppeld zou worden aan de KNMI'14-klimaatscenario's voor 2050, zou de neerslagintensiteit in de G-scenario's stijgen met 14 %. De temperatuurstijging is in deze scenario's immers 1 °C. Voor de W-scenario's is de stijging 2 °C, dus zou de neerslagintensiteit met ongeveer 28 % moeten stijgen. Belangrijk is wel dat er bij deze 2CC-relatie geen rekening wordt gehouden met verschillende neerslagduren, en dus totale hoeveelheden neerslag. In de volgende paragraaf is dit wel het geval en wordt er een duidelijker onderscheid tussen alle subscenario's gemaakt.

4.3. Aanpassingen in het GEV-model

In de vorige paragraaf is beschreven dat er behoorlijke toenames in de neerslagextremen worden verwacht. Deze paragraaf geeft een concreter beeld van deze verwachtingen. Zoals beschreven in paragraaf 3.2 is het GEV-model een veelgebruikte manier om de neerslagstatistiek in kaart te kunnen brengen. Het model is niet alleen voor hedendaagse statistiek geschikt, maar ook voor toekomstvoorspellingen. De formules 3.2 en 3.3 laten zien dat de variabelen in het model afhankelijk zijn van de regenduur. Echter, in de variant gebruikt voor de toekomst zijn de parameters ook afhankelijk van het jaar van optreden. Op deze manier wordt een trend toegevoegd aan het model:

$$\lambda(D, t) = [a_\lambda + b_\lambda \cdot \ln(D)]^{1/c_\lambda} \quad (4.1)$$

$$\gamma(D, t) = a_\gamma + b_\gamma \cdot \ln(D) + c_\gamma \cdot \ln(D)^2 \quad (4.2)$$

Deze notatie lijkt op de notatie die gebruikt werd in hoofdstuk 3. Afwijkend aan de formules 4.1 en 4.2 is dat de parameters a_λ , b_λ , c_λ , a_γ , b_γ , en c_γ afhankelijk zijn van het jaar en het scenario. Omdat voor dit onderzoek enkel geconcentreerd wordt op de gebeurtenissen in het jaar 2050, kan het jaar als constant worden aangehouden. Per scenario zijn de waarden van de parameters geschat (tabel 4.1).

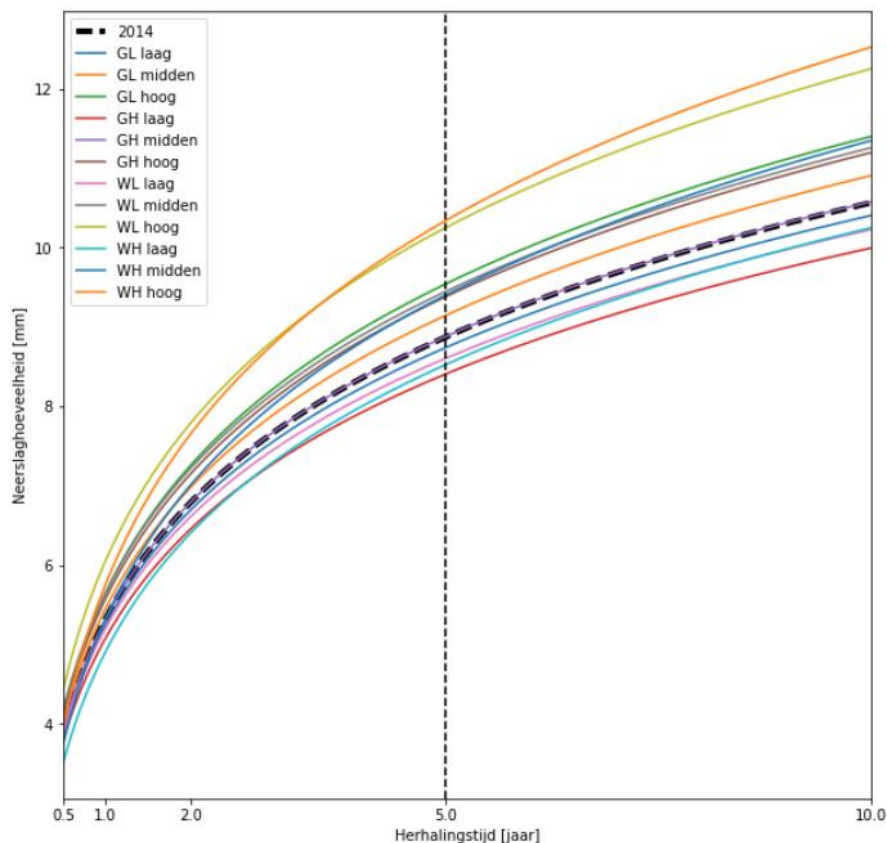
Tabel 4.1 Schattingen van de benodigde parameters voor het GEV-model in elk van de KNMI'14-klimaatscenario's (Beersma et al., 2015)

Subscenario	a_λ	b_λ	c_λ	a_γ	b_γ	c_γ
2014	0.239	-0.0250	-0.512	0.378	-0.0578	0.0054
GL laag	0.247	-0.0258	-0.501	0.377	-0.0577	0.0053
GL midden	0.241	-0.0250	-0.504	0.384	-0.0589	0.0054
GL hoog	0.236	-0.0243	-0.506	0.391	-0.0600	0.0055
GH laag	0.269	-0.0272	-0.474	0.374	-0.0563	0.0051
GH midden	0.260	-0.0263	-0.479	0.382	-0.0574	0.0051
GH hoog	0.252	-0.0254	-0.483	0.390	-0.0586	0.0052
WL laag	0.262	-0.0266	-0.480	0.375	-0.0557	0.0049
WL midden	0.249	-0.0252	-0.485	0.386	-0.0572	0.0050
WL hoog	0.241	-0.0240	-0.486	0.398	-0.0591	0.0052
WH laag	0.289	-0.0287	-0.451	0.400	-0.0698	0.0064
WH midden	0.276	-0.0271	-0.456	0.416	-0.0728	0.0066
WH hoog	0.265	-0.0257	-0.459	0.432	-0.0755	0.0069

Met de gegeven parameters kunnen de locatieparameter λ en de dispersie-coëfficiënt γ worden berekend, gebruik makend van de formules 4.1 en 4.2. De resultaten worden vervolgens geschaald, zodat de GEV-parameters voor 2014 dezelfde waardes hebben als gevonden in paragraaf 3.2. De uitkomsten hiervan zijn weergegeven in tabel 4.2. De reden dat de niet-geschaalde getallen verschillend zijn, is omdat het voorspellend GEV-model van STOWA (Beersma et al., 2015) gemaakt is voor neerslagduren tussen de 2 uur en 20 dagen. Extrapolatie van het model naar een duur van 5 minuten levert dus onnauwkeurigheden op. Een gedetailleerde uitwerking is te vinden in bijlage B.

Tabel 4.2 Berekende modelparameters met behulp van de gegevens uit tabel 4.1

Subscenario	Locatieparameter (λ)	Dispersie-coëfficiënt (γ)
2014	5.325	0.3845
GL laag	5.253	0.3832
GL midden	5.455	0.3906
GL hoog	5.469	0.3977
GH laag	5.081	0.3779
GH midden	5.325	0.3853
GH hoog	5.580	0.3933
WL laag	5.207	0.3767
WL midden	5.653	0.3873
WL hoog	6.057	0.3997
WH laag	4.911	0.4247
WH midden	5.326	0.4418
WH hoog	5.761	0.4588



Figuur 4.3 Verband tussen de neerslaghoeveelheid na 5 minuten en de herhalingstijd per subscenario

Met de eerder gebruikte formule 3.1 (waarin $\beta = \lambda \cdot \gamma$) is het nu mogelijk om voor elk subscenario de neerslagintensiteit te berekenen die 1 keer per 5 jaar voorkomt ($T = 5$ jaar). Deze waarde kan eenvoudig worden omgerekend naar de neerslagintensiteit in mm/s. In figuur 4.3 is de spreiding van de neerslag te zien tussen de subscenario's voor verschillende herhalingstijden.

Tabel 4.3 Neerslagintensiteiten voor de subscenario's volgens het geschaalde GEV-model

Subscenario	Neerslag in mm ($D = 5$ minuten) met een herhalingsstijd van 5 jaar ($T = 5$ jaar)	Neerslagintensiteit in mm/s	Procentuele verandering
2014	8.871	0.02957	
GL laag	8.739	0.02913	-1.489
GL midden	9.144	0.03048	3.081
GL hoog	9.541	0.03180	7.552
GH laag	8.405	0.02802	-5.247
GH midden	8.878	0.02959	0.076
GH hoog	9.380	0.03127	5.743
WL laag	8.603	0.02868	-3.017
WL midden	9.445	0.03148	6.477
WL hoog	10.25	0.03416	15.54
WH laag	8.254	0.02841	-3.915
WH midden	9.401	0.03134	5.971
WH hoog	10.34	0.03446	16.54

Voor een neerslagduur van 5 minuten geeft het subscenario W_H hoog de grootste toename van de neerslaghoeveelheid. Om te controleren of de geschaalde variant van het model daadwerkelijk logische resultaten geeft, zijn ook de procentuele verschillen per subscenario berekend, ten opzichte van de waarde in 2014. Hier komt een maximale toename van 16.54 % uit (tabel 4.3). Dit wordt vergeleken met de procentuele verschillen volgens het niet-geschaalde model bij een neerslagduur van 2 uur. Hieruit volgt een maximale toename van 16.53 %, wat nagenoeg identiek is.

4.4. Maatgevende neerslagintensiteit voor 2050

Met de gevonden voorspellingen van de nieuwe neerslagintensiteiten moet er een keuze worden gemaakt in de meest geschikte waarde om delen van de norm NEN 3215 door te rekenen. De toekomstintensiteiten verschillen van een afname van bijna 6 procent tot een toename van ruim 16 procent. Ondanks dit grote gebied waarin de uitkomsten van de subscenario's zich bevinden, lijkt de invloed die deze verschillen op de neerslagintensiteit uit de norm NEN 3215 zal hebben, redelijk beperkt. Er zal daarom worden verder gerekend met een nieuwe neerslagintensiteit van 0.034 (l/s)/m^2 , waar in het volgende hoofdstuk de resultaten van te zien zijn.

5. Doorrekenen van reguliere hemelwaterafvoeren

In dit hoofdstuk staat de eerste paragraaf van hoofdstuk 6 van NEN 3215+C1 centraal. De paragraaf is bedoeld voor het dimensioneren voor de afvoercapaciteit van leidingsystemen van hemelwater volgens het principe van overlaatstroming. Een overlaatstroming houdt in dat het regenwater onder vrij verval wordt afgevoerd; er wordt dus enkel gebruik gemaakt van de zwaartekracht. De dimensioneringsformules uit hoofdstuk 6.1 van de norm worden eerst toegelicht en vervolgens getest op gevoeligheid voor een verandering van de regenintensiteit. Uiteindelijk wordt de voorspelde regenintensiteit uit hoofdstuk 4 in de formules ingevuld.

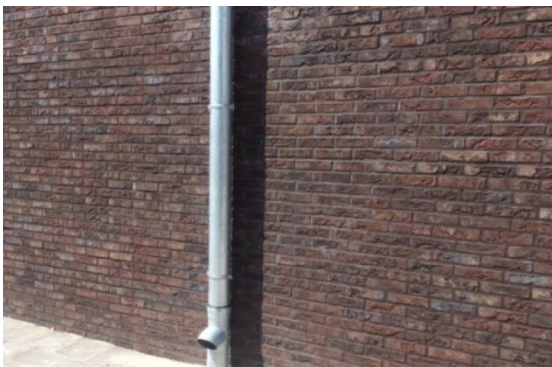
5.1. Belasting op afvoerleidingen

Voor het berekenen van de belasting op de afvoerleidingen, wordt gebruik gemaakt van de formule die al genoemd werd in de probleemdefinitie:

$$Q_h = \alpha \cdot i \cdot \beta \cdot A_d \quad (5.1)$$

Met formule 5.1 (Nederlands Normalisatie-instituut, 2014) wordt de hemelwaterbelasting Q_h berekend in l/s, gegeven de reductiefactoren α en β , de regenintensiteit i in (l/s)/m² en het effectieve dakoppervlak A_d in m². Het is een logische formule, omdat aan de eenheden duidelijk te zien is wat er berekend wordt. Deze formule geldt voor alle soorten afvoerleidingen voor hemelwater die in dit onderzoek aan bod komen. De algemene eis is dat de afvoercapaciteit van de leidingen minimaal gelijk is aan de belasting op de leidingen.

5.2. Afvoercapaciteit hemelwaterstandleiding



Figuur 5.1 Hemelwaterstandleiding (Loromeij-Goor bv, 2017)

Een hemelwaterstandleiding is een verticale leiding voor het transport van het regenwater. Hemelwaterstandleidingen staan beter bekend als regenpijpen, zie ook figuur 5.1. De formule die gebruikt wordt voor het berekenen van de afvoercapaciteit van dergelijke leidingen is als volgt:

$$Q_a = \mu \cdot F_r \cdot F_g \cdot d^{2.5} \quad (5.2)$$

Door gebruik te maken van formule 5.2 (Nederlands Normalisatie-instituut, 2014) kan de afvoercapaciteit Q_a berekend worden in l/s, als de factoren F_r en F_g (voor in- en uitstroom) en de ontwerpmiddellijn van de hemelwaterstandleiding d in m gegeven zijn. Wanneer er een profiel voor een regenpijp gekozen moet worden, is de ontwerpmiddellijn (d) maatgevend. Voor μ geldt een constante waarde van 4100. Gelet op de eenheden moet deze constante een eenheid hebben van $10^3 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$. De factor is afkomstig uit de wet van Darcy-Weisbach:

$$\Delta H_w = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (5.3)$$

In vergelijking 5.3 (Darcy-Weisbach) is ΔH_w het stijghoogteverschil, f de wrijvingscoëfficiënt, L de lengte van de buis/leiding, v de stroomsnelheid en g de gravitatieversnelling. Als deze vergelijking wordt toegepast op de hemelwaterafvoer, is het debiet wat door de leiding stroomt van belang. Daarom moet vergelijking 5.3 zodanig worden aangepast dat de stroomsnelheid links komt te staan, en de vergelijking wordt vermenigvuldigd met de doorsnede van de regenpijp (A). Deze doorsnede is gerelateerd aan de ontwerpmiddellijn d ($A = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2$), evenals de diameter van de buis in de wet van Darcy-Weisbach ($D = d$). Wanneer deze gegevens in vergelijking 5.3 worden ingevuld, is de afvoer als volgt te berekenen:

$$Q = \sqrt{\frac{\Delta H_w}{L}} \cdot \sqrt{\frac{\frac{1}{16} \pi^2 \cdot 2g}{f}} \cdot d^{2.5} = \pi \cdot \sqrt{\frac{g}{8f}} \cdot d^{2.5} \quad (5.4)$$

In vergelijking 5.4 is de verdere herleiding weergegeven. Het weerstandsverhang $\frac{\Delta H_w}{L}$ uit de vergelijking is voor een verticale hemelwaterstandleiding gelijk aan 1 en kan daarom worden weggelaten. Nu is aan de eenheid van g (m/s^2) te zien waar de eenheid van μ uit vergelijking 5.2 vandaan komt. De grootte van dit getal wordt ook bepaald door de wrijvingscoëfficiënt f . Ook belangrijk is dat de afvoercapaciteit Q_a dus niet (indirect) afhankelijk is van de regenintensiteit i .

Wanneer formule 5.2 wordt omgeschreven, ziet deze er als volgt uit:

$$d = \left(\frac{Q_a}{F_r \cdot F_g \cdot \mu} \right)^{0.4} \quad (5.5)$$

Omdat de afvoercapaciteit Q_a minstens gelijk moet zijn aan de belasting Q_h , ontstaat de volgende eis:

$$d \geq \left(\frac{\alpha \cdot i \cdot \beta \cdot A_d}{F_r \cdot F_g \cdot \mu} \right)^{0.4} \quad (5.6)$$

In vergelijking 5.6 is de regenintensiteit i in verband gebracht met de minimaal benodigde ontwerpmiddellijn van de leiding d . Wanneer de regenintensiteit in de toekomst zal veranderen met een factor X , is aan de vergelijking te zien dat de minimale ontwerpmiddellijn zal veranderen met een factor $X^{0.4}$. Nu bekend is met welke factor de minimale ontwerpmiddellijn zal veranderen bij een aangepaste regenintensiteit, kan de maatgevende regenintensiteit uit hoofdstuk 4 worden gebruikt om de maatgevende factor voor de verandering van de ontwerpmiddellijn berekend worden. Het verschil tussen de maatgevende en de huidige regenintensiteit bedraagt 16.54 %. Dit betekent dat factor X gelijk is aan 1.1654, wat zal leiden

tot een toename van de minimale ontwerpmiddellijn met een factor 1.0631. In bijlage D is een voorbeeld te vinden van de dimensionering van hemelwaterstandleidingen met de oude en nieuwe regenintensiteit.

5.3. Afvoercapaciteit verzamelleiding



Figuur 5.2 Verzamelleiding regenwater (Jovas, 2016)

Naast hemelwaterstandleidingen zijn er ook verzamelleidingen die het regenwater transporteren. Deze leidingen liggen horizontaal (met een kleine helling) en dienen als verbinding tussen standleidingen, zie figuur 5.2. Voor het berekenen van de afvoercapaciteit van een verzamelleiding geldt een andere formule:

$$Q_a = 400 \cdot C \cdot d^{2.5} \cdot \Delta H_i^{0.5} \cdot L_i^{-0.5} \quad (5.7)$$

Door gebruik te maken van formule 5.7 (Nederlands Normalisatie-instituut, 2014) kan de afvoercapaciteit Q_a berekend worden in l/s, mits de Chézy-coëfficiënt C , de ontwerpmiddellijn d , het stijghoogteverschil over het leidingtraject ΔH_i en de lengte van het leidingtraject ΔL_i bekend zijn. Wederom is de ontwerpmiddellijn d belangrijk als het gaat om de afmetingen van de leiding. De constante factor en de machten maken deze formule interessant. Om te achterhalen waar de formule vandaan komt, wordt gekeken naar een eenparige stroming. Hierin moet gelden dat er een evenwicht is tussen de schuifkracht ($c_f \rho v^2$) en de netto drukkracht ($\rho g R i_w$). Dit leidt tot de volgende vergelijking:

$$v = \sqrt{g \cdot R \cdot i_w / c_f} = C \cdot \sqrt{R \cdot i_w} \quad (5.8)$$

In vergelijking 5.8 is de stroomsnelheid v gerelateerd aan de Chézy-coëfficiënt C , de hydraulische straal R en het weerstandsverhang i_w . Omdat geïnteresseerd is in de afvoercapaciteit (een debiet) wordt de stroomsnelheid v vermenigvuldigd met de doorsnede A . Vervolgens worden ook de relaties tussen A en d ($A = \frac{1}{4} \pi d^2$) en tussen R en d ($R = \frac{d}{4}$) ingevuld.

$$Q = v \cdot A = C \cdot A \cdot \sqrt{R \cdot i_w} = C \cdot \frac{1}{4} \pi d^2 \cdot \sqrt{i_w \cdot \frac{d}{4}} = \frac{1}{8} \pi \cdot C \cdot d^{2.5} \cdot \sqrt{i_w} \quad (5.9)$$

De uiteindelijke relatie die in vergelijking 5.9 gevonden wordt, lijkt erg op de dimensioneringsformule die in NEN 3215 staat. Het weerstandsverhang i_w is namelijk ook anders uit te drukken: $\sqrt{i_w} = \sqrt{\frac{\Delta H_i}{L_i}} = \Delta H_i^{0.5} \cdot L_i^{-0.5}$. Het getal dat hoort bij $\frac{1}{8}\pi$ is 0.393, wat een factor duizend verschilt met de dimensioneringsformule. Deze factor wordt verklaard door het verschil in eenheden, want Q_a wordt berekend in l/s en niet in m³/s.

Het weerstandsverhang uit vergelijking 5.9 wordt berekend met de volgende dimensioneringsformule:

$$i_w = \frac{\Delta H_i}{L_i} = \frac{Q_i^2 \cdot 10^{-6}}{A_i^2 \cdot C_i^2 \cdot R_i} \leq 0.07 \quad (5.10)$$

Formule 5.10 (Nederlands Normalisatie-instituut, 2014) heeft als input de hemelwaterbelasting Q_i , de oppervlakte van de buis A_i , de Chézy-coëfficiënt C_i en de hydraulische straal R_i . Opnieuw is bekend dat de waarden A_i en R_i kunnen worden uitgedrukt in de ontwerp-middellijn d . Bovendien kan voor de hemelwaterbelasting formule 5.1 worden gebruikt. Het herleide resultaat is vergelijking 5.11:

$$64 \frac{(\alpha \cdot i \cdot \beta \cdot A_d)^2}{\pi^2 \cdot C^2 \cdot d^5} \leq 0.07 \quad (5.11)$$

Nu wordt de vergelijking omgeschreven, zodat d links komt te staan:

$$d \geq 2.467 \cdot \left[\frac{(\alpha \cdot i \cdot \beta \cdot A_d)^2}{\pi^2 \cdot C^2} \right]^{0.2} \quad (5.12)$$

Vergelijking 5.12 is de omgeschreven dimensioneringsformule, waaruit het verband tussen de regenintensiteit i en de ontwerp-middellijn d duidelijk wordt. Een toename van de regenintensiteit met factor X leidt tot een toename in de ontwerp-middellijn met factor $X^{0.4}$. Gelet op het WH hoog scenario, waarbij $X = 1.1654$, geldt dus dat de ontwerp-middellijn zal toenemen met een factor 1.0631. Een belangrijke kanttekening bij deze dimensioneringsformule is wel dat de afvoercapaciteit van de verzamelleiding afhankelijk blijkt van de hemelwaterbelasting (zie vergelijking 5.7 en 5.10). De afvoercapaciteit moet minstens gelijk zijn aan diezelfde hemelwaterbelasting, dit maakt deze totaaleis discutabel.

De laatste eis die geldt voor de verzamelleidingen is de volgende formule:

$$\sum_n \Delta H_i = \sum_n \frac{Q_i^2}{A_i^2 \cdot C_i^2 \cdot R_i} \cdot L_i \leq a - 0.10 \quad (5.13)$$

In vergelijking 5.13 mag het totale stijghoogteverschil niet groter zijn dan de hoogte van de bovenkant van het dakvlak a min 10 centimeter. Op deze manier zal de stijghoogte aan het begin van de leiding altijd onder het dakvlak blijven, wat overstroming voorkomt. De formule kan verder worden uitgewerkt, wat leidt tot vergelijking 5.14:

$$\frac{(\alpha \cdot i \cdot \beta \cdot A_d)^2}{\left(\frac{1}{4}\pi d^2\right)^2 \cdot C^2 \cdot \frac{d}{4}} \leq a - 0.10 \quad (5.14)$$

Herleid naar de ontwerp-middellijn d leidt deze vergelijking tot:

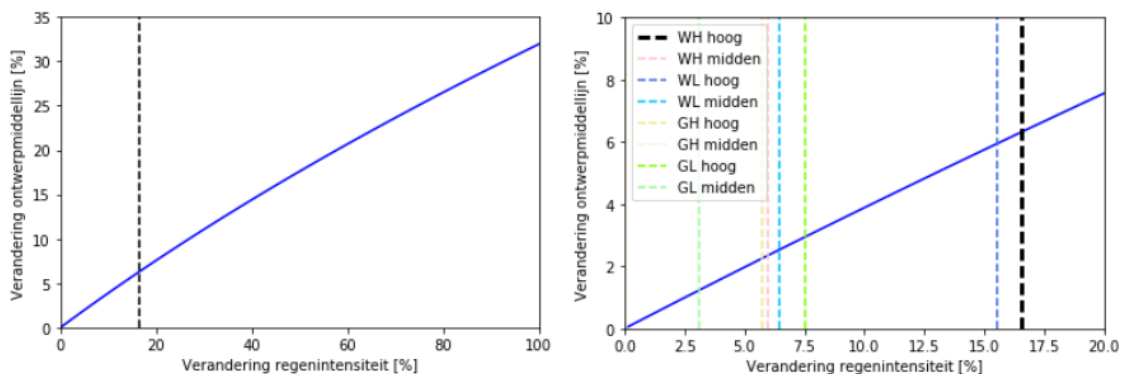
$$d \geq 2.297 \cdot \left[\frac{(\alpha \cdot i \cdot \beta \cdot A_d)^2 \cdot L}{\pi^2 \cdot C^2 \cdot (a - 0.10)} \right]^{0.2} \quad (5.15)$$

In vergelijking 5.15 wordt opnieuw een factor $X^{0.4}$ gevonden voor de verandering van de ontwerpmiddellijn, indien de regenintensiteit met een factor X verandert. Voor $X = 1.1654$ wordt de verandering van de ontwerpmiddellijn dus wederom een factor 1.0631.

De aanname die bij de eisen voor de verzamelleidingen wordt gedaan, is dat de Chézywaarde C onafhankelijk is van de ontwerpmiddellijn d . In werkelijkheid is dit niet zo: volgens hoofdstuk 5 van NEN 3215 is $C = 18 \cdot \log(3000 \cdot d)$. Ontwerpmiddellijnen die in praktijk worden gebruikt liggen tussen de 30 en 300 mm, wat betekent dat de Chézywaarde tussen de 35 en 53 $m^{0.5}/s$ ligt. Vergeleken met het verschil in ontwerpmiddellijn liggen de waarden dus redelijk dicht bij elkaar. Daarnaast zou een logaritmische uitdrukking van de Chézywaarde de vergelijkingen 5.12 en 5.15 onnodig gecompliceerd maken.

5.4. Neerslagintensiteit en ontwerpmiddellijn

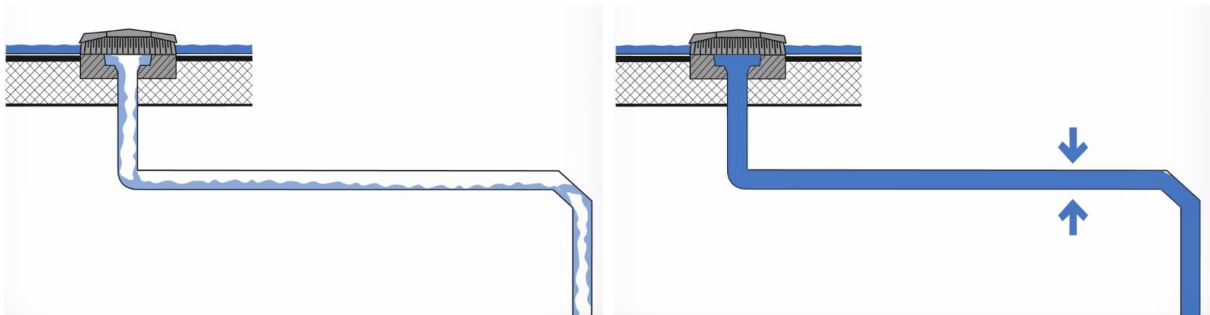
Zoals uit de onderzochte formules is gebleken, bestaat er voor elk van de dimensioneringseisen voor traditionele hemelwaterafvoersystemen een soortgelijk verband. Wanneer alle andere grootheden uit de dimensioneringsformules gelijk blijven en dus enkel de neerslagintensiteit verandert, is het verband tussen de verandering van de neerslagintensiteit en de verandering van de ontwerpmiddellijn te beschrijven als $y = x^{0.4}$ (waarbij x de factor is waarmee de neerslagintensiteit verandert en y de factor is waarmee de ontwerpmiddellijn van de leiding verandert). Figuur 5.3 geeft een duidelijk beeld van dit verband. Hierin zijn voor het overzicht de procentuele veranderingen te zien in plaats van vergrotingsfactoren. Rechts zijn de procentuele neerslagveranderingen van de overige scenario's met een intensiteitsverhoging te zien.



Figuur 5.3 Verband tussen de verandering in regenintensiteit en verandering in ontwerpmiddellijn

6. Doorrekenen van UV-hemelwaterafvoeren

In dit hoofdstuk worden de dimensioneringsregels van de tweede paragraaf van hoofdstuk 6 uit de norm NEN 3215 nagelopen met een veranderde regenintensiteit. De dimensioneringsregels die aan bod komen, zijn opgesteld voor UV-systemen, ook wel Pluvia-systemen genoemd. Deze systemen werken, in tegenstelling tot vrij verval, op basis van onderdruk in de leidingen om het regenwater af te voeren. Over het algemeen zijn de diameters van de UV-leidingen kleiner dan die van standaard hemelwaterleidingen. De dimensioneringsformules uit hoofdstuk 6.2 van de norm worden wederom eerst toegelicht en vervolgens getest op gevoeligheid voor een verandering van de regenintensiteit. Uiteindelijk wordt de voorspelde regenintensiteit uit hoofdstuk 4 ingevuld in de formules.



Figuur 6.1 Verschil tussen conventionele afvoer (links) en UV-afvoer (rechts) (Geberit, 2018)

6.1. Drukverlies

Omdat de UV-systemen het regenwater afvoeren met behulp van drukverschillen, speelt het drukverlies in de leidingen een grote rol. Het drukverlies in een UV-systeem wordt berekend met de volgende formule:

$$\Delta p_{w,x} = \sum(L_i \cdot R_b + \Delta p_z) \quad (6.1)$$

In vergelijking 6.1 (Nederlands Normalisatie-instituut, 2014) wordt het drukverlies $\Delta p_{w,x}$ in Pa berekend met behulp van de lengte van het leidingtraject L_i in m, de weerstand per meter leiding R_b in Pa/m en het drukverlies door plaatselijke weerstanden Δp_z in Pa. Bij de laatste term moet gedacht worden aan bochten, trechters en afvoerpunten. Deze term is onder meer afhankelijk van lokale stroomsnelheden en dus indirect van de hemelwaterbelasting. Desondanks wordt dit buiten beschouwing gelaten, aangezien dit het verband tussen de ontwerpmiddellijn en de regenintensiteit veel ingewikkelder zal maken. Voor het berekenen van de weerstand per meter leiding (R_b uit vergelijking 6.1) geldt de volgende formule:

$$R_b = \frac{\lambda}{d_i} \cdot v_i^2 \cdot \frac{\rho}{2} \quad (6.2)$$

In vergelijking 6.2 (Nederlands Normalisatie-instituut, 2014) is R_b afhankelijk van de dimensieloze weerstandsfactor λ , de ontwerpmiddellijn d_i in m, de stroomsnelheid v_i in m/s en de massadichtheid van water ρ ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$). Eenvoudig is terug te redeneren dat de

vergelijking afkomstig is van de formule van Darcy-Weisbach (vergelijking 5.3). Het stijghoogteverschil ΔH_w in deze formule is namelijk gerelateerd aan het drukverschil ($\Delta p_w = \Delta H_w \cdot \rho g$), wat verkregen wordt door R_b en L_i in vergelijking 6.1 met elkaar te vermenigvuldigen.

Het drukverlies, berekend volgens vergelijking 6.1, mag maximaal gelijk zijn aan het beschikbare drukverschil. Dit drukverschil wordt berekend volgens:

$$\Delta p_{w,i-u} \leq \rho \cdot g \cdot \Delta H_{i-u} \quad (6.3)$$

Vergelijking 6.3 (Nederlands Normalisatie-instituut, 2014) maakt het mogelijk om het beschikbaar drukverschil $\Delta p_{w,i-u}$ te berekenen met de massadichtheid van water ρ , de zwaartekrachtversnelling g en het beschikbaar hoogteverschil tussen het in- en uittreepunt van het UV-afvoersysteem ΔH_{i-u} . Door de vergelijkingen van het drukverlies en het beschikbaar drukverschil voor het totale UV-systeem aan elkaar gelijk te stellen, kan de relatie tussen de ontwerpmiddellijn en de regenintensiteit worden gevonden:

$$\frac{\lambda}{d} \cdot v^2 \cdot \frac{\rho}{2} \cdot L + \Delta p_z \leq \rho \cdot g \cdot \Delta H_{i-u} \quad (6.4)$$

Hierin is het belangrijk dat de stroomsnelheid v uit te drukken is in debiet Q en doorsnede A ($v = \frac{Q}{A}$). Vervolgens is het debiet Q de hemelwaterbelasting volgens vergelijking 5.1 en is de doorsnede A uit te schrijven naar de ontwerpmiddellijn d ($A = \frac{1}{4} \pi d^2$). Het herleiden van de uitdrukking die hierbij wordt gevonden, leidt tot:

$$d \geq 2 \left[\frac{\rho \cdot L \cdot \lambda \cdot (\alpha \cdot i \cdot \beta \cdot A_d)^2}{\pi^2 \cdot (\rho \cdot g \cdot \Delta H_{i-u} - \Delta p_z)} \right]^{0.2} \quad (6.5)$$

Net als in hoofdstuk 5 geeft de gevonden uitdrukking (vergelijking 6.5) de verandering van de ontwerpmiddellijn, voor een factor X als neerslagverandering, een factor $X^{0.4}$. Voor het WH hoog scenario is deze factor 1.1654, wat leidt tot een verandering van de ontwerpmiddellijn met een factor 1.0631.

Bij dit verband is de aanname gedaan dat het lokale drukverlies Δp_z onafhankelijk is van de ontwerpmiddellijn d , terwijl dit eigenlijk niet het geval is. Het lokale drukverlies bestaat namelijk uit een sommatie van de snelheidsdruk van de (lokale) stroming vermenigvuldigd met factoren gerelateerd aan bochten, invoer en uitvoer. De snelheidsdruk bevat de stroomsnelheid, waar het debiet en de ontwerpmiddellijn in verborgen zitten. Daarentegen bestaat het totale leidingsysteem uit meerdere leidingen die een deel van het totale debiet afvoeren. Er bestaat dus geen algemeen verband tussen het lokale drukverlies Δp_z en de ontwerpmiddellijn d , omdat het lokale debiet varieert. Daarom is het lokale drukverlies in vergelijking 6.5 blijven staan.

6.2. Debiet en stroomsnelheid

Naast eisen voor de druk die heerst in het UV-afvoersysteem, zijn er ook dimensioneringsregels voor het debiet en de stroomsnelheid in de UV-leidingen. Voor het goed functioneren van het systeem moeten de leidingen volledig gevuld zijn met regenwater. Dit zorgt ervoor dat er ondergrenzen bestaan voor de stroomsnelheid en het debiet. De minimale stroomsnelheid voor alle UV-leidingen is 0.7 m/s (Nederlands Normalisatie-instituut, 2014). Hierbij kan de volgende uitdrukking worden gevonden:

$$v = \frac{Q_h}{A_i} = \frac{\alpha \cdot i \cdot \beta \cdot A_d}{\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2} \geq 0.7 \quad (6.6)$$

De uitwerking van de stroomsnelheid naar de regenintensiteit i en de ontwerpmiddellijn d is ook in vergelijking 6.6 meegenomen. Herschrijven van deze ongelijkheid levert een maximumeis voor de ontwerpmiddellijn:

$$d \leq 2.390 * \left[\frac{\alpha \cdot i \cdot \beta \cdot A_d}{\pi} \right]^{0.5} \quad (6.7)$$

Vanzelfsprekend neemt ook deze maximumeis toe bij een toenemende neerslagintensiteit. De eis zal echter versoepelen bij een hogere neerslagintensiteit en is daarom niet relevant voor dit onderzoek.

Voor het debiet in een UV-verzamelleiding geldt ook een ondergrens. Deze is gerelateerd aan stijghoogteverschillen:

$$Q_{start} = Q_h * \sqrt{\frac{\Delta H_A}{\Delta H_{i-u}}} \geq 1.2 * Q_{min} \quad (6.8)$$

De minimaal vereiste afvoer van de verzamelleiding naar de standleiding Q_{start} wordt door vergelijking 6.8 (Nederlands Normalisatie-instituut, 2014) gevonden met de hemelwaterbelasting Q_h , het hoogteverschil tussen dakvlak en verzamelleiding ΔH_A en het hoogteverschil tussen in- en uittreepunt van het UV-afvoersysteem ΔH_{i-u} . In de eis rechts in de vergelijking is Q_{min} de minimaal vereiste afvoer in de standleiding, die logaritmisches evenredig gesteld is aan de ontwerpmiddellijn. Zonder deze uitdrukking verder uit te werken, is al te zien dat deze eis opnieuw een bovengrens vormt voor de ontwerpmiddellijn. Dit betekent dat de eis versoepelt als de regenintensiteit zal toenemen, wat voor dit onderzoek niet interessant is.

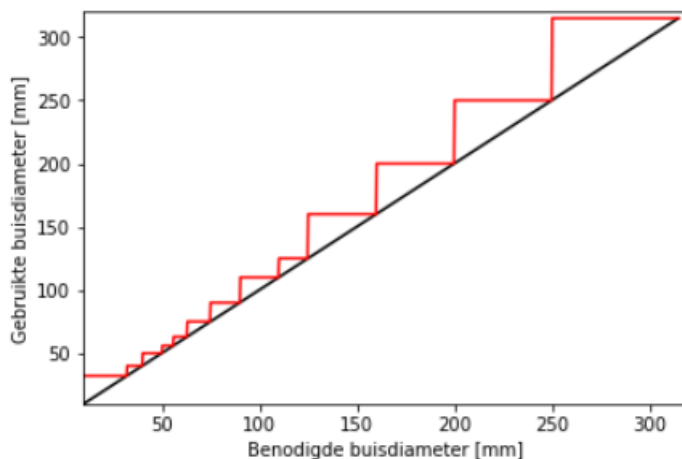
6.3. Neerslagintensiteit en ontwerpmiddellijn

Van de genoemde eisen in NEN 3215 is slechts één eis een ondergrens voor de ontwerpmiddellijn en dus relevant. Deze ondergrens geeft hetzelfde verband tussen de verandering van de neerslagintensiteit en de verandering van de ontwerpmiddellijn als gevonden voor de reguliere hemelwaterafvoer (volgens het overlaatprincipe, terug te vinden in hoofdstuk 5). Figuur 5.3 kan dus ook geraadpleegd worden als het gaat om UV-afvoersystemen.

7. Afmetingen hemelwaterleidingen

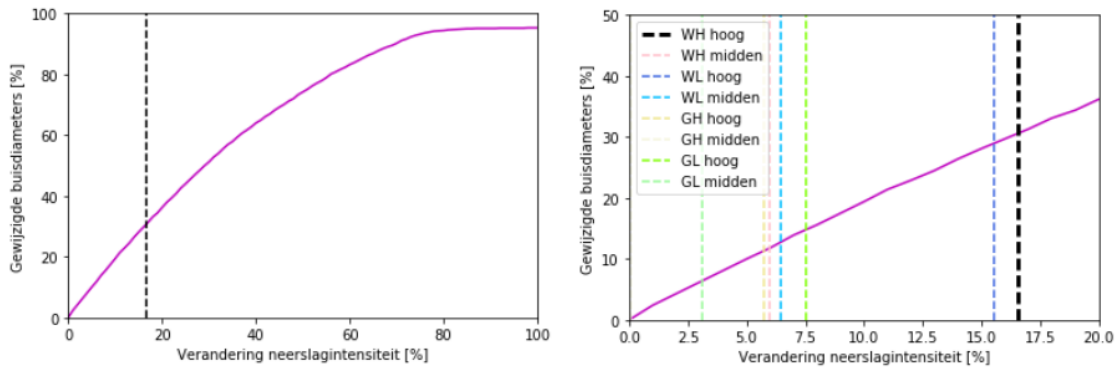
Wat zijn de beschikbare afmetingen van hemelwaterleidingen? Niet elke afmeting is beschikbaar, mogelijk heeft een verandering van de ontwerp-middellijn-eis gevolgen voor de bestaande afmetingen.

Na het dimensioneren op ontwerp-middellijn is het voor de investeerders uiteraard het aantrekkelijkst om een voor een leiding te kiezen met exact dezelfde diameter. Dit is in figuur 7.1 door de zwarte lijn te zien. Voor de leveranciers van de hemelwaterleidingen is dit echter erg kostbaar, wat ervoor zorgt dat er maar een paar verschillende groottes van leidingen beschikbaar worden gesteld. Om een indicatie te geven, zijn de afmetingen die bij leverancier Geberit (2018) verkrijgbaar zijn, in figuur 7.1 gebruikt om de gebruikte buisdiameter als functie van de benodigde buisdiameter te krijgen. De rode lijn laat deze functie zien.



Figuur 7.1 Verschillen tussen de benodigde en gebruikte buisdiameter

Door de trapvormige lijn in figuur 7.1 valt te concluderen dat voor specifieke gevallen een kleine verzwaring van de eisen uit NEN 3215 kan leiden tot een andere beschikbare leiding. Daarentegen zijn er andere gevallen waarbij een grotere verzwaring van de eisen mogelijk is zonder dat de afmetingen wijzigen. Om een schatting te maken om hoeveel gewijzigde gevallen het gaat, is aangenomen dat de benodigde buisdiameter uniform verdeeld is tussen 10 en 315 mm. Vervolgens is voor verschillende veranderingen van de regenintensiteit een verandering van de ontwerp-middellijn/diameter vastgesteld (deze relatie is terug te vinden in hoofdstuk 5 en 6). Per buisdiameter is tot slot nagegaan of de wijziging van de regenintensiteit leidt tot een andere gebruikte buisdiameter. De uitwerking hiervan kan worden gevonden in bijlage C. Het gevonden resultaat is weergegeven in figuur 7.2.



Figuur 7.2 Veranderde neerslagintensiteiten vergeleken met gewijzigde buisdiameters

Het verband uit figuur 7.2 geeft aan dat het aantal gewijzigde buisdiameters al bijna maximaal is bij een toename van de regenintensiteit met 80 %. Voor het W_H hoog scenario voor 2050 is de nieuwe regenintensiteit 0.034 (l/s)/m^2 , een verandering van 16.54 %, wat volgens de grafiek een wijziging van 30.6 % van de buisdiameters betekent. Aan de rechterkant zijn de gevolgen voor de andere scenario's met een verhoogde regenintensiteit te zien. Opmerkelijk is dat zelfs het G_L midden scenario – een klimaatscenario met weinig klimaatveranderingen – nog tot ongeveer 5 % gewijzigde buisdiameters leidt.

8. Conclusies

De hoofdstukken 2 tot en met 6 gingen dieper in op het uitgevoerde onderzoek. Dit hoofdstuk geeft de gevonden antwoorden op de gestelde hoofdvraag en deelvragen.

8.1. Regenintensiteit

De statistische verdeling die opgesteld is door Buishand en Wijngaard (2007) vormt een belangrijk onderdeel van de gevonden uitkomsten. Naar alle waarschijnlijkheid heeft het Nederlands Normalisatie-instituut gebruik gemaakt van dit model voor het opstellen van de regenintensiteit. De herhalingsperiode van de regenintensiteit waarop gedimensioneerd wordt bij de hemelwaterafvoer is vijf jaar.

Onder de door het KNMI (2015) opgestelde KNMI'14-klimaatscenario's zijn in totaal twaalf verschillende subscenario's voor het klimaat rond 2050 te onderscheiden. Voor elk van deze subscenario's zijn nieuwe parameters opgesteld die passen in de statistische verdeling van Buishand en Wijngaard. De veranderde regenintensiteit met eenzelfde herhalingsperiode loopt voor het klimaat rond 2050 op tot 0.034 (l/s)/m², een toename van maximaal 16.54 %. Deze maximale toename wordt gehanteerd als de ontwerpregenintensiteit voor de toekomst.

8.2. Verband tussen regenintensiteit en leidingafmetingen

Gelet op de afmetingen van de hemelwaterleidingen is voor de norm NEN 3215+C1 met name de ontwerpmiddellijn of leidingdiameter van belang. Deze ontwerpmiddellijn kan met behulp van de dimensioneringsformules gerelateerd worden aan de neerslagintensiteit, die in de norm voornamelijk als constant werd aangehouden. Voor de reguliere hemelwatersystemen (volgens het overlaat-principe) is het verband tussen beide grootheden *ontwerpmiddellijn = neerslagintensiteit*^{0.4}. Op deze manier kan ook de verandering van de ontwerpmiddellijn worden gevonden.

Voor UV-afvoersystemen (hemelwaterafvoer onder hoge druk) is het gevonden verband tussen regenintensiteit en ontwerpmiddellijn gelijk aan het verband bij reguliere hemelwatersystemen. Wel gelden er enkele bovengrenzen aan de ontwerpmiddellijn. Deze grenzen versoepelen wanneer de neerslagintensiteit toeneemt, dus deze bovengrenzen zijn niet relevant voor het onderzoek.

8.3. Gevolgen voor bestaande hemelwaterleidingen

Gezien de kosten voor het maken van hemelwaterleidingen bestaan slechts enkele leidingafmetingen. Hierdoor hebben sommige leidingen tegenwoordig grotere afmetingen dan nodig en zijn andere leidingen precies goed. Met een toenemende eis voor de ontwerp-middellijn van deze leidingen kunnen verschillen ontstaan in welke afmetingen het meest geschikt zijn. Een toename van de regenintensiteit van 16.54 % geeft hiervoor een wijziging in afmetingen van 30.6 % van alle gevallen.

8.4. Aanbevelingen

Door het hoge aandeel hemelwaterleidingen dat met de nieuwe regenintensiteit aangepast moet worden, is het belangrijk om de regenintensiteit op tijd te verhogen in de norm. Tegelijkertijd maakt dit duidelijk dat het gebruik van de huidige regenintensiteit voor het klimaat rond 2050 niet aan te raden is. Ook mildere klimaatscenario's laten dit zien. Gelukkig zal de huidige eis rond 2050 niet zorgen voor meer dakinstortingen. Echter, het zal vaker voorkomen dat er afvoer plaats moet vinden via noodoverlopen. Hierdoor zal de waarschuwing voor afvoerproblemen minder effectief zijn. Het ligt daarom voor de hand om de aangepaste norm alleen voor nieuw aangelegde hemelwaterafvoersystemen te laten gelden.

De levensduur voor hemelwaterafvoersystemen ligt rond de dertig jaar, ongeveer even lang als de periode waarvoor een klimaat wordt berekend. Het klimaat rond 2050 is het gemiddelde voor de jaren 2035 tot 2065. Een normaanpassing in 2020 zal grofweg leiden tot een verbetering van de helft van de afvoersystemen bij ingang van dit klimaat en volledige verbetering in 2050. Omdat het KNMI nu al hogere waarden voor de regenintensiteit laat zien, is dit geen overdreven maatregel.

9. Discussie

Gedurende dit onderzoek is met name gebruik gemaakt van gepubliceerde data door het KNMI en het Nederlands Normalisatie-instituut. De klimaatgegevens volgen uit het meest recente klimaatmodel van het KNMI dat geschikt is voor het berekenen van herhalingstijden van neerslagintensiteiten met een regenduur van 5 minuten (Buishand en Wijngaard, 2007). Latere klimaatmodellen, zoals het model van STOWA (Beersma et al., 2018) werken minder nauwkeurig met deze korte regenduur. Bovendien kan in nieuwere modellen gebruik worden gemaakt van recentere neerslagdata. Deze data was voor het opstellen van de huidige norm nog niet gemeten. Indien vast wordt gehouden aan een regenduur van 5 minuten, zoals in de huidige norm (NEN 3215+C1) ook is gedaan, zou een herhaling van dit gedeelte van het onderzoek hetzelfde resultaat leveren.

De klimaatmodellen voor extreme neerslag die voor het klimaat rond 2050 worden gebruikt, zijn in 2015 door het STOWA voor het laatst bijgewerkt. De laatste bijwerking komt voort uit de in 2014 gepubliceerde KNMI'14-klimaatscenario's. De verwachting is dat het KNMI in 2020 officiële nieuwe klimaatscenario's naar buiten zal brengen. Daarmee is het gebruik van de gegevens uit het rapport van STOWA (Beersma et al., 2015) de beste manier om een beeld te krijgen van de klimaatscenario's rond 2050. Een belemmering voor het gebruik van deze gegevens is wel dat ook dit klimaatmodel onnauwkeurig werkt voor korte regenduren. De toegepaste wijze van schalen van dit model is wat betreft procentuele verschillen met langere regenduren in orde. Omdat er daarnaast geen exacte voorspelling voor het klimaat rond 2050 te maken is, is ervoor gekozen om de mate van veranderingen in de norm NEN 3215 als functie van de neerslagverandering in een aantal figuren weergegeven.

Het gemaakte onderzoek is een suggestie op een aanvulling voor de norm NEN 3215 als het gaat om de toekomstige regenintensiteit. Uit het gevonden resultaat bleek dat een aanpassing van de huidige norm zal leiden tot veel aanpassingen aan de afmetingen voor in gebruik genomen hemelwaterafvoersystemen. Gezien de beperkte toename van de neerslagintensiteit was dit tegen de verwachtingen in. Een verklaring hiervoor is dat er veel keuze is in afmetingen voor leidingen. Dit creëert een groter aantal grensgevallen, die bij een kleine normwijziging al niet langer voldoen.

Zaken die niet aan bod kwamen in dit onderzoek zijn de verdere afvoer van het hemelwater in het rioleringsstelsel en de alternatieve afvoerwijze (noodoverlopen). Ook is er geen gebruik gemaakt van geavanceerde rekenprogramma's. Deze programma's zouden gebruikt kunnen worden om gecompliceerdere relaties tussen de buisdiameter en de Chézywaarde en lokale drukverliezen in de gevonden uitdrukkingen mee te kunnen nemen. Indien hiermee ook rekening zou worden gehouden, volgen mogelijk andere resultaten.

Een advies voor een vervolgonderzoek is om over enkele jaren gebruik te kunnen maken van nieuwere, nog gedetailleerdere toekomstmodellen van het KNMI voor neerslagextremen. Bij voorkeur werken deze modellen wel met neerslagduren van 5 minuten, zodat dezelfde lijn als getrokken in de huidige norm kan worden gehanteerd. Een nog beter alternatief zou zijn om van neerslagduren van 1 minuut gebruik te kunnen maken, al bestaan hier momenteel nog geen modellen voor.

Literatuurlijst

Artikelen

Lenderink G., Van Oldenborgh, G.J., Van Meijgaard, E., & Attema, J. (2011). Intensiteit van extreme neerslag in een veranderend klimaat. *Meteorologica*, 2 (2011), 17-20.
Geraadpleegd van de KNMI website:
<https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/achtergrond/intensiteitvan-extreme-neerslag-in-een-veranderend-klimaat>.

Berekening hemelwaterafvoersysteem

Avenco de Bondt. (2016, 8 november). *Westelijk Havengebied Amsterdam VCK AWT terminal, Berekening HWA riolering* (projectcode 160266, versie 2.0). Utrecht, Nederland: W.Brouwer.

Neerslaggegevens

Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut. (1991, 1 januari). *Jaarmaxima van de neerslag in De Bilt (mm), afkomstig uit pluviograafstroken* [Data set]. Geraadpleegd van <https://projects.knmi.nl/klimatologie/achtergrondinformatie/jaarmaxneerslagbilt.txt>

Normen

Nederlands Normalisatie-instituut. (2014). *Gebouwriolering en buitenriolering binnen de perceelgrenzen - Bepalingsmethoden voor de afvoercapaciteit, water- en luchtdichtheid en afstand van dakuitmondingen NEN 3215+C1:2014*. Delft, Nederland: M. Lurvink.

Nederlands Normalisatie-instituut. (2012). *Riolering van bouwwerken, Richtlijnen voor ontwerp, uitvoering en beheer; NTR 3216:2012*. Delft, Nederland: W. Bosch.

Nederlands Normalisatie-instituut. (2006). *Wateraccumulatie - Aanvullende rekenregels en vereenvoudigingen voor het belastingsgeval regenwater in NEN 6702; NPR 6703:2006*. Delft, Nederland: W. Bosch.

Rapporten

Beersma, J., Bessembinder, J., Brandsma, T., Hakvoort, H., & Versteeg, R. (2015). *Actualisatie meteogegevens voor waterbeheer 2015* (STOWA 2015-10, ISBN 978-90-5773-706-0). Geraadpleegd van de WUR website: <http://edepot.wur.nl/367804>.

Beersma, J., Hakvoort, H., & Versteeg, R. (2018). *Neerslagstatistieken voor korte duren, actualisatie 2018* (STOWA 2018-12, ISBN 978-90-5773-785-5). Geraadpleegd van de STOWA website:

<http://m.stowa.nl/Upload/Publicaties%202018/STOWA%202018-12%20HR.pdf>

Buishand, T.A., & Wijngaard, J.B. (2007). *Statistiek voor extreme neerslag voor korte neerslagduren* (KNMI technisch rapport TR-295) Geraadpleegd van de KNMI website: https://cdn.knmi.nl/system/data_center_publications/files/000/067/808/original/tr295.pdf?1495620910.

Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut. (2015). *KNMI '14 klimaatscenario's voor Nederland* (Herziene uitgave 2015). Geraadpleegd op 30 april 2018 van http://www.klimaatscenarios.nl/images/Brochure_KNMI14_NL.pdf.

Websites

De Vree, J. (2018). *Noodafvoer, noodoverloop, nooduitloop, overloop, noodoverstort*. Geraadpleegd op 25 april 2018 van <http://www.joostdevree.nl/shtmls/noodafvoer.shtml>.

Geberit. (2018). *Geberit PE, Leidingsystemen*. Geraadpleegd op 5 juni 2018 van <https://www.geberit.nl/producten/leidingsystemen-voor-afvoer/leidingsystemen/geberit-pe/>

Geberit. (2018). *Geberit PE, Pluvia hemelwaterafvoer*. Geraadpleegd op 15 juni 2018 van <https://www.geberit.nl/producten/leidingsystemen-voor-afvoer/geberit-pluvia/>

Jovas. (2016). *Hemelwaterafvoer (HWA)-systemen*. Geraadpleegd op 15 juni 2018 van <http://www.jovas.nl/producten/hwa-systemen>

Loromeij-Goor bv. (2017). *Lidl, projecten*. Geraadpleegd op 15 juni 2018 van <https://www.loromeij.nl/10/project/lidl.html>

Sounds of Nature. (2014). *Sound of Raindrops on Rooftop - Thunderstorm Recording (w/bird chatter in background)*. Geraadpleegd op 24 april 2018 van <https://www.youtube.com/watch?v=ZlxNH459Gg>.

Bijlage A

Zoekformulier	
Dit formulier hoort bij de instructie Informatievaardigheden 2. Je kunt het gebruiken als hulpmiddel bij het zoeken in verschillende informatiebronnen.	
Mijn zoekvraag was:	Welke frequentie hoort bij een neerslagintensiteit van 0.030 mm/s?
De aspecten van mijn zoekvraag waren:	Frequentie, neerslag, neerslagintensiteit, herhalingsstijd

WorldCat Discovery

Gezocht naar welk documenttype?	Artikelen
Mijn zoektermen waren (aspecten, synoniemen, Booleaanse operatoren):	"Precipitation intensity" AND "frequency" AND "KNMI"
Gevonden (mogelijk) relevante publicatie(s) (gebruik volledige referenties):	Buishand, T.A., Holleman, I., & Overeem, A. (2009). Extreme rainfall analysis and estimation of depth-duration-frequency curves using weather radar. <i>Water Resources Research</i> , v45 n10, oktober 2009.

Web of Science

Gezocht naar welk documenttype?	Artikelen
Mijn zoektermen waren (aspecten, synoniemen, Booleaanse operatoren):	("precipitation" OR "rain*") AND "intensity" AND "Netherlands" AND "frequency"
Gevonden (mogelijk) relevante publicatie(s) (gebruik volledige referenties):	

Andere informatiebron, namelijk:

Welke informatiebron? (Google Scholar, Scopus, Espacenet, Google, ...?)	Google Scholar
Gezocht naar welk documenttype?	Artikelen
Mijn zoektermen waren (aspecten, synoniemen, Booleaanse operatoren):	("precipitation" OR "rain*") AND "intensity" AND "Netherlands" AND ("frequency" OR "repeating time") AND "KNMI"

Gevonden (mogelijk) relevante publicatie(s) (gebruik volledige referenties):	Lenderink, G., & Meijgaard, E. (2008). Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes. <i>Nature Geoscience</i> , 1-2008, 511-514. doi: https://www.nature.com/articles/ngeo262
---	---

Bijlage B

Uitwerking van de metingen verricht door het KNMI voor de maximale neerslagintensiteit per jaar met een neerslagduur van 5 minuten

Uit een door het KNMI beschikbaar gesteld bestand zijn de maximale regenintensiteiten voor verschillende uren per jaar te verkrijgen. Vervolgens wordt door een loop nagegaan welke van deze maximale intensiteiten hoger liggen dan de regenintensiteit die in de norm vermeld staat. Hier wordt een sommatie van gemaakt: dit blijkt het geval in 17 van de 85 jaren.

```
data = np.genfromtxt('jaarmaxneerslagbilt.txt', dtype=float, delimiter = '')

t = data[:, 0]
hoeveelheid = data[:, 1]

tc = []
critical = []
tnc = []
noncritical = []
count = 0
for i in range(len(data[:,1])):
    if data[i, 1] >= 9:
        critical.append(data[i, 1])
        tc.append(data[i, 0])
        count = count + 1
    else:
        noncritical.append(data[i, 1])
        tnc.append(data[i, 0])

print("Aantal jaren dat de maximale neerslaghoeveelheid in 5 minuten meer dan 9.0 mm is, is", count)
print('Geschatte frequentie is', count/len(data[:,0]), 'wat neerkomt op 1 keer per', len(data[:,0])/count, 'jaar.')
plt.plot(tc, critical, 'ro')
plt.plot(tnc, noncritical, 'bo')
plt.axhline(9, color='k')
plt.xlabel('Jaar')
plt.ylabel('Max. neerslag in 5 min. [mm]');
```

Uitwerking van de gegeven parameters van Beersma et al. (2015) in de GEV-verdeling voor 2050

De gegevens uit het rapport worden eerst ingeladen. Daarna wordt een correctiefactor opgesteld voor de variabelen λ en γ uit het GEV-model. De reden hiervoor is dat het model voor het klimaat rond 2050 onnauwkeurig is voor neerslagduren korter dan 2 uur. De correctiefactoren zijn gebaseerd op de waarden van λ en γ voor het in hoofdstuk 3 gebruikte model, vergeleken met de waarden van het toekomstmodel in het jaar 2014.

Nu kunnen de nieuwe modelparameters worden opgesteld. Dit wordt gedaan door deze eerst uit te rekenen volgens de relaties uit het rapport van Beersma et al. (2015) en deze vervolgens te vermenigvuldigen met de eerder berekende correctiefactoren.

```

a1 = [0.239, 0.247, 0.241, 0.236, 0.269, 0.260, 0.252, 0.262, 0.249,
      0.241, 0.289, 0.276, 0.265]
b1 = [-0.0250, -0.0258, -0.0250, -0.0243, -0.0272, -0.0263, -0.0254,
      -0.0266, -0.0252, -0.0240, -0.0287, -0.0271, -0.0257]
c1 = [-0.512, -0.501, -0.504, -0.506, -0.474, -0.479, -0.483, -0.480,
      -0.485, -0.486, -0.451, -0.456, -0.459]
a2 = [0.378, 0.377, 0.384, 0.391, 0.374, 0.382, 0.390, 0.375, 0.386,
      0.398, 0.400, 0.416, 0.432]
b2 = [-0.0578, -0.0577, -0.0589, -0.0600, -0.0563, -0.0574, -0.0586,
      -0.0557, -0.0572, -0.0591, -0.0698, -0.0728, -0.0755]
c2 = [0.0054, 0.0053, 0.0054, 0.0055, 0.0051, 0.0051, 0.0051, 0.0052, 0.0049,
      0.0050, 0.0052, 0.0064, 0.0066, 0.0069]
l = np.zeros(13)
g = np.zeros(13)
D = 5/60
l_ref = 5.325
g_ref = 0.3845
l0 = (a1[0] + b1[0] * np.log(D)) ** (1/c1[0])
g0 = a2[0] + b2[0] * np.log(D) + c2[0] * (np.log(D)) ** 2
labels = ['2014', 'GL laag', 'GL midden', 'GL hoog', 'GH laag', 'GH midden', 'GH hoog', 'WL laag', 'WL midden',
          'WL hoog', 'WH laag', 'WH midden', 'WH hoog']

for i in range(len(a1)):
    l[i] = ((a1[i] + b1[i] * np.log(D)) ** (1/c1[i])) * l_ref / l0
    g[i] = (a2[i] + b2[i] * np.log(D) + c2[i] * (np.log(D)) ** 2) * g_ref / g0

```

Tot slot worden de gevonden modellen in een grafiek weergegeven en wordt gecontroleerd aan de hand van relatieve veranderingen tussen 2050 en nu of de correctiefactoren goed werken.

```

T = np.linspace(0.5, 10, 100)
year5 = np.zeros(13)
plt.figure(figsize=(10,10))

for i in range(len(l)):
    r = l[i] + (l[i] * g[i]) / -0.09 * (1 - T ** 0.09)
    if i == 0:
        plt.plot(T, r, 'k--', linewidth=4, label=labels[i])
    else:
        plt.plot(T, r, label=labels[i])
    year5[i] = l[i] + (l[i] * g[i]) / -0.09 * (1 - 5 ** 0.09)

print('Procentuele maximale verandering:', (year5.max() - year5[0]) / year5[0] * 100, '%.')
plt.xticks([0, 0.5, 1, 2, 5, 10])
plt.xlabel('Herhalingstijd [jaar]')
plt.ylabel('Neerslaghoeveelheid [mm]')
plt.legend(loc = 'best');

```

Bijlage C

Grafiek figuur 7.1

De beschikbare buisdiameters worden vergeleken met 'benodigde' buisdiameters die variëren van 10 tot 315 mm. Zolang het gebruikte profiel groter of gelijk is aan het benodigde profiel, voldoet het profiel. Door van klein naar groot te werken, wordt altijd voor het kleinst mogelijke profiel gekozen.

```
buisdiameters = np.array([32, 40, 50, 56, 63, 75, 90, 110, 125, 160, 200, 250, 315])
d_benodigd = np.linspace(10, 315, 1000)
d_gewenst = d_benodigd
d_gebruikt = np.zeros(len(d_benodigd))

for i in range(len(d_benodigd)):
    for j in range(len(buisdiameters)):
        if d_benodigd[i] <= buisdiameters[j]:
            d_gebruikt[i] = buisdiameters[j]
            break
```

Grafiek figuur 7.2

Voor het schatten van het aantal gewijzigde buisdiameters wordt de complete set van 'benodigde' buisdiameters uit figuur 7.1 vermenigvuldigd met een factor die gerelateerd is aan de neerslagverandering (zie hoofdstuk 5 en 6). Vervolgens wordt dezelfde procedure ondergaan als bij figuur 7.1. Daarna wordt de controle uitgevoerd: door een loop wordt elke gekozen buisdiameter vergeleken met de eerder gekozen buisdiameter. Hiervan wordt een opsomming gemaakt, dit resultaat wordt uiteindelijk gedeeld door het totaal aantal 'benodigde' buisdiameters dat voor deze berekening gebruikt is (in dit geval is dat 1000).

```
y = np.zeros(101)
x = np.linspace(0, 100, 101)
for u in range(len(y)):
    d_nieuw = ((x[u] / 100 + 1) ** 0.4) * d_benodigd
    d_gebruikt2 = np.zeros(len(d_nieuw))

    for i in range(len(d_nieuw)):
        for j in range(len(buisdiameters)):
            if d_nieuw[i] <= buisdiameters[j]:
                d_gebruikt2[i] = buisdiameters[j]
                break

    count = 0
    for i in range(len(d_gebruikt)):
        if d_gebruikt[i] != d_gebruikt2[i]:
            count = count + 1
    y[u] = count / 10
```

Bijlage D

In deze bijlage is een uitwerking te vinden van de berekeningen van het hemelwaterafvoersysteem van de All Weather Terminal in Amsterdam.

Voor de berekeningen zijn twee varianten te onderscheiden, de AWT (links in figuur D.1) en de AWT terminal (rechts in figuur D.1). Tussen de berekeningen van de AWT en de AWT terminal zit een factor in het debiet van 0.7. Vermoedelijk komt dit door de reductiefactor β , die afhangt van de hoek van het dakvlak met de horizon. Deze hoek kan in het geval van de terminal 60° zijn.

Het betreft hemelwaterstandleidingen en daarom wordt voor de dimensionering gebruik gemaakt van formule 5.2. Vanwege kostenbesparing is gekozen om voor beide gevallen dezelfde profielen te gebruiken. Hiermee is het geval zonder terminal maatgevend. De berekende hemelwaterbelasting volgens formule 5.1 in l/s is weergegeven in de 'debiet'-kolom. Nu is de afvoercapaciteit te berekenen volgens formule 5.2. Voor dit geval is de factor F_r gelijk aan 1, er is geen conische instroming. De factor F_g is gelijk aan 0.6, omdat de standleiding niet direct na een verzamelleiding komt. In tabel D.1 is een overzicht gegeven van de leidingen, getest op deze formule. Slechts in één geval zal er in de toekomst gekozen moeten worden voor een grotere buisdiameter, al voldoet dit geval volgens de huidige neerslagintensiteit eigenlijk nu al net niet. De betreffende leiding is in de tabel geel gearceerd. Mogelijk volgt deze leiding wel direct na een verzamelleiding, wat ervoor zorgt dat er geen wijziging in buisdiameter nodig zal zijn.

Blijkbaar zijn er voor het ontwerpen van dit hemelwaterafvoersysteem ruime maten gekozen voor de leidingen. Zodoende zijn er geen grensgevallen die bij een verhoging van de neerslagintensiteit niet meer aan de eis zullen voldoen.

Tabel D.1 Gekozen buisdiameters voor en na verandering van de regenintensiteit

Put 1	Put 2	Afstromend dakoppervlak [m ²]	Hemelwaterbelasting [l/s]	Gekozen buisdiameter (inwendig) [m]	Toekomstige hemelwaterbelasting [l/s]	Toekomstig gekozen buisdiameter (inwendig) [m]
3	2	495.00	14.850	0.188	17.306	0.188
2	1	865.00	25.950	0.188	30.242	0.188
4	5	5225.00	156.750	0.376	182.676	0.376
5	6	1175.00	35.250	0.235	41.080	0.235
6	8	1175.00	35.250	0.235	41.080	0.235
5	7a	1992.00	59.760	0.376	69.644	0.376
5	7b	1813.00	54.390	0.296	63.386	0.296
13	14	3770.00	113.100	0.376	131.807	0.376
14	15a	1996.67	59.900	0.376	69.807	0.376
14	15b	1773.33	53.200	0.296	61.999	0.296
16	17	2295.00	68.850	0.235	80.238	0.296
17	18	800.00	24.000	0.235	27.970	0.235
17	19	600.00	18.000	0.235	20.977	0.235

put 1	put 2	Lengte in m	Diameter uitw. in mm	Diameter inw. in m	afschot	Bob 1 in m NAP	Bob 2 in m NAP	Maaiweld 1 in m NAP	Maaiweld 2 in m NAP	Afstromend oppervlak in m ²	Debiet cumulatief in m ³ /s	Snelheid in m/s	Verhang waterspiegel in m	waterstand put 1 in m NAP	waterstand put 2 in m NAP	wakening 1 m	wakening 2 in m	dekking 1 in m	dekking 2 in m	Nat oppervlak in m ²	k-waarde leiding in m	hydr.straal	Chezy
3	2	26,00	200	0,188		-0,05	-0,05	1,13	1,13	495,00	14,850	0,15	0,73	0,15	0,22	0,98	0,91	0,98	0,98	0,028	0,0015	0,0471	46,363
2	1	20,00	200	0,188		-0,05	-0,05	1,13	1,13	865,00	25,950	0,22	0,172	0,22	0,40	0,91	0,73	0,98	0,98	0,028	0,0015	0,0471	46,363
4	5	7,00	400	0,376		-1,50	-1,50	1,27	1,16	5235,00	156,750	0,157	0,055	-0,40	-0,34	1,67	1,50	2,37	2,26	0,111	0,0015	0,0941	51,782
5	6	4,00	250	0,235		-0,10	-0,10	1,27	1,27	1175,00	35,250	0,035	0,019	0,15	0,17	1,01	1,10	1,01	1,07	0,043	0,0015	0,0588	48,108
6	8	20,00	250	0,235		-0,05	-0,05	1,30	1,30	1175,00	35,250	0,035	0,097	0,17	0,27	1,13	1,03	1,10	1,10	0,043	0,0015	0,0588	48,108
5	7a	10,00	400	0,376		0,30	0,32	1,16	1,30	1982,00	59,760	0,060	0,011	0,610	0,530	0,55	0,67	0,46	0,58	0,111	0,0015	0,0941	51,782
5	7b	10,00	315	0,296		0,30	0,32	1,16	1,30	1813,00	54,390	0,054	0,034	0,596	0,630	0,56	0,67	0,55	0,67	0,069	0,0015	0,0741	49,914
9	10	12,00	250	0,235		-1,50	-1,50	1,27	1,16	30,000	0,930	0,069	0,042	-0,40	-0,36	1,67	1,52	2,52	2,41	0,043	0,0015	0,0588	48,108
10	11	37,00	250	0,235		-0,10	-0,08	1,16	1,25	15,000	0,450	0,34	0,032	0,15	0,18	1,01	1,07	1,01	1,08	0,043	0,0015	0,0588	48,108
10	12	68,00	250	0,235		-0,10	-0,06	1,16	1,25	15,000	0,450	0,34	0,059	0,15	0,21	1,01	1,04	1,01	1,06	0,043	0,0015	0,0588	48,108
13	14	9,00	400	0,376		-1,50	-1,50	1,27	1,16	3770,00	113,100	0,113	0,037	-0,40	-0,36	1,67	1,52	2,37	2,26	0,111	0,0015	0,0941	51,782
14	15a	14,00	400	0,376		0,30	0,33	1,16	1,40	1996,67	59,900	0,060	0,016	0,611	0,641	0,55	0,76	0,46	0,76	0,111	0,0015	0,0941	51,782
14	15b	14,00	315	0,296		0,30	0,33	1,16	1,40	1773,33	53,200	0,053	0,045	0,596	0,641	0,56	0,76	0,55	0,76	0,069	0,0015	0,0741	49,914
16	17	15,00	250	0,235		-0,05	-0,05	1,27	1,35	2295	68,850	1,58	0,276	0,20	0,48	1,07	0,87	1,07	1,15	0,043	0,0015	0,0588	48,108
17	18	28,00	250	0,235		-0,01	-0,01	1,35	1,32	800	24,000	0,024	0,053	0,48	0,54	0,87	0,78	1,11	1,08	0,043	0,0015	0,0588	48,108
17	19	37,00	250	0,235		-0,01	-0,01	1,35	1,45	600	18,000	0,018	0,047	0,48	0,52	0,87	0,93	1,11	1,21	0,043	0,0015	0,0588	48,108
put 1	put 2	Lengte in m	Diameter uitw. in mm	Diameter inw. in m	afschot	Bob 1 in m NAP	Bob 2 in m NAP	Maaiweld 1 in m NAP	Maaiweld 2 in m NAP	Afstromend oppervlak in m ²	Debiet in l/s	Snelheid in m/s	Verhang waterspiegel in m	waterstand put 1 in m NAP	waterstand put 2 in m NAP	wakening 1 in m	wakening 2 in m	dekking 1 in m	dekking 2 in m	Nat oppervlak in m ²	k-waarde leiding in m	hydr.straal	Chezy
3	2	26,00	200	0,188		-0,05	-0,05	1,13	1,13	495,00	10,395	0,10	0,936	0,15	0,19	0,98	0,94	0,98	0,98	0,038	0,0015	0,0471	46,363
2	1	20,00	200	0,188		-0,05	-0,05	1,13	1,13	865,00	18,165	0,018	0,084	0,19	0,27	0,94	0,86	0,98	0,98	0,028	0,0015	0,0471	46,363
4	5	7,00	400	0,376		-1,50	-1,50	1,27	1,16	5235,00	109,725	0,110	0,099	-0,40	-0,37	1,67	1,53	2,37	2,26	0,111	0,0015	0,0941	51,782
5	6	4,00	250	0,235		-0,10	-0,10	1,27	1,27	1175,00	24,675	0,025	0,069	0,15	0,16	1,01	1,11	1,01	1,07	0,043	0,0015	0,0588	48,108
6	8	20,00	250	0,235		-0,05	-0,05	1,30	1,30	1175,00	24,675	0,025	0,047	0,16	0,21	1,14	1,09	1,10	1,10	0,043	0,0015	0,0588	48,108
5	7a	10,00	400	0,376		0,30	0,32	1,16	1,30	1982,00	40,530	0,041	0,036	0,596	0,614	0,57	0,69	0,46	0,58	0,111	0,0015	0,0941	51,782
5	7b	10,00	315	0,296		0,30	0,32	1,16	1,30	1875,00	39,375	0,039	0,018	0,596	0,614	0,56	0,69	0,55	0,67	0,069	0,0015	0,0741	49,914
9	10	12,00	250	0,235		-1,50	-1,50	1,27	1,16	30,000	0,930	0,069	0,042	-0,40	-0,36	1,67	1,52	2,52	2,41	0,043	0,0015	0,0588	48,108
10	11	37,00	250	0,235		-0,10	-0,08	1,16	1,25	15,000	0,450	0,34	0,032	0,15	0,18	1,01	1,07	1,01	1,08	0,043	0,0015	0,0588	48,108
10	12	68,00	250	0,235		-0,10	-0,06	1,16	1,25	15,000	0,450	0,34	0,059	0,15	0,21	1,01	1,04	1,01	1,06	0,043	0,0015	0,0588	48,108
13	14	9,00	400	0,376		-1,50	-1,50	1,27	1,16	4185,00	87,885	0,088	0,022	-0,40	-0,38	1,67	1,54	2,37	2,26	0,111	0,0015	0,0941	51,782
14	15a	14,00	400	0,376		0,30	0,33	1,16	1,40	1970,00	39,100	0,039	0,007	0,591	0,621	0,57	0,78	0,46	0,67	0,111	0,0015	0,0941	51,782
14	15b	14,00	315	0,296		0,30	0,33	1,16	1,40	1800,00	39,100	0,039	0,024	0,596	0,621	0,56	0,78	0,55	0,76	0,069	0,0015	0,0741	49,914
16	17	15,00	250	0,235		-0,05	-0,05	1,27	1,35	2295	48,195	0,048	0,135	0,20	0,34	1,07	1,01	1,07	1,15	0,043	0,0015	0,0588	48,108
17	18	28,00	250	0,235		-0,01	-0,01	1,35	1,32	800	16,800	0,017	0,031	0,34	0,37	1,01	0,95	1,11	1,08	0,043	0,0015	0,0588	48,108
17	19	37,00	250	0,235		-0,01	-0,01	1,35	1,45	600	12,600	0,013	0,023	0,34	0,36	1,01	1,09	1,11	1,21	0,043	0,0015	0,0588	48,108

Figuur D.1 Gegevens voor dimensioneren All Weather Terminal Amsterdam (Aveco de Bondt, 2016)