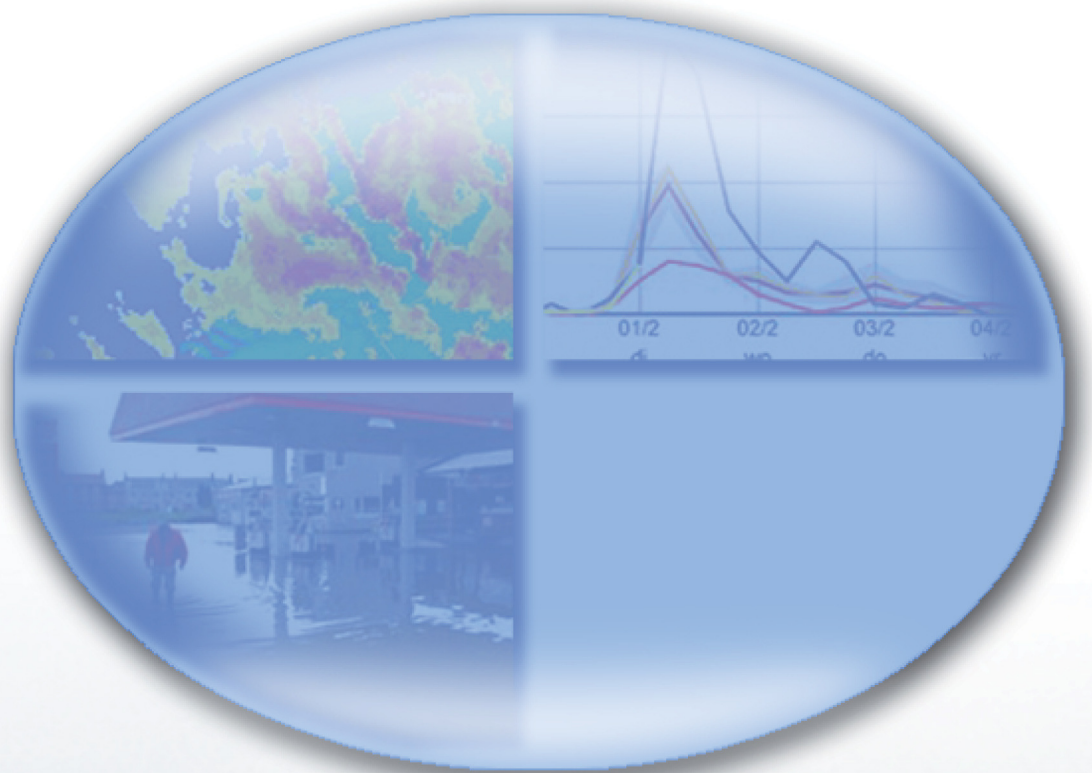


Extreme-neerslagcurven voor de 21e eeuw



Vaststelling van de, voor ontwerptoeepassingen maatgevende,
extreme-neerslagcurven

Ir. D. Malda
Drs. E. Terpstra

Meteo Consult B.V. Wageningen
In opdracht voor Bouwdienst Rijkswaterstaat
Oktober 2006

MeteoConsult
A MeteoGroup Company

Inhoudsopgave

Introductie	2
Data	4
Methode	6
Resultaten	9
Conclusies en aanbevelingen	18
Referenties	19

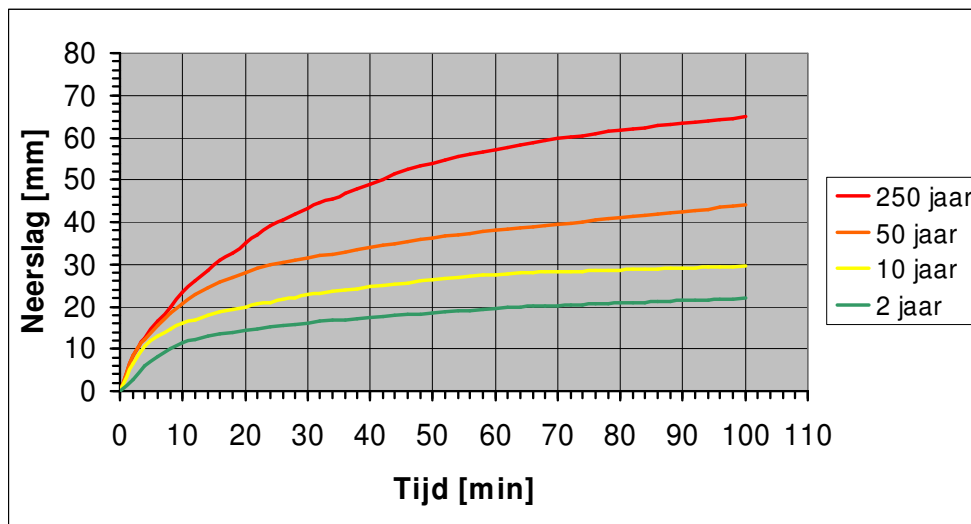
Introductie

In maart van dit jaar zijn de resultaten gepresenteerd van een onderzoek dat als doel had om de krommen van Braak (opgesteld in 1933) te vernieuwen met behulp van recente neerslaggegevens. Vervanging van de curven bleek nodig te zijn. De in maart gepresenteerde resultaten waren echter gebaseerd op gegevens van slechts één Nederlands neerslagstation, namelijk De Bilt. Met behulp van 11 jaar beschikbare neerslagdata werden nieuwe curven berekend voor terugkeerperioden van 50, 100, 250, 500 en 1000 jaar. Al tijdens het vorige onderzoek rees de vraag of een extrapolatie van 11 jaar naar 1000 jaar wel een betrouwbare schatting van de curven op zou leveren. Ook was er de vraag of er misschien grote verschillen binnen Nederland bestaan, waardoor één station niet representatief is voor heel Nederland en of er een splitsing in regio's nodig is.

Uiteindelijk is, in opdracht van Bouwdienst Rijkswaterstaat, besloten om een vervolgonderzoek uit te voeren waarbij neerslaggegevens van alle 10-minuten weerstations in Nederland met voldoende data gebruikt zouden worden. Dit bleken, naast het in het vorig onderzoek gebruikte station De Bilt, 22 stations te zijn. Meer informatie over deze stations, zoals de ligging ervan, is te vinden in het hoofdstuk "Data".

Dit rapport beschrijft de resultaten van het vervolgonderzoek, waarin de uitgebreidere dataset is gebruikt.

Allereerst een korte herhaling van de theorie van de Braak-curve ('kromme van Braak'). De Braak-curve geeft de kans (in jaren) dat een bepaalde neerslaghoeveelheid in een bepaalde tijdseenheid valt. Het gebruik van de curve is geschikt voor bepaling van de kans op neerslaghoeveelheden in kortere tijd. De curven voor neerslaggebeurtenissen die eens in de 2, 10, 50 en 250 jaar voorkomen, zoals samengesteld door Braak, zijn te zien in figuur (1).



Figuur 1. De Braak-curven, zoals samengesteld door Braak (1933).

Voor de bouw van 'kunstwerken' (zoals tunnels, onderdoorgangen en aquaducten) is het van belang te weten wat de terugkeerkans is van extreme neerslaggebeurtenissen. Beschikbaarheidsvereisten van voorzieningen voor afvoer van regenwater dat in het kunstwerk stroomt, kunnen namelijk aan de hand van de curve worden bepaald.

Recente extreme neerslaggebeurtenissen gaven aanleiding tot de vraag of de kromme van Braak nog actueel is en of aanpassingen noodzakelijk zijn. Nieuwe meettechnieken, in dit

geval het automatisch meten van neerslag om de 10 minuten boden de mogelijkheid om dit te onderzoeken en indien nodig nieuwe curven samen te stellen. Naast het gebruik van recente neerslaggegevens is in dit onderzoek ook rekening gehouden met door het KNMI berekende klimaat veranderingen met betrekking tot extreme neerslag. In het hoofdstuk "Resultaten" is hier meer over te lezen.

Data

Het onderzoek is uitgevoerd met behulp van recente 10-minuten neerslaggegevens van 23 officiële KNMI weerstations in Nederland, inclusief het reeds onderzochte station De Bilt. In figuur 2 is de geografische ligging van deze stations te zien. Uit de figuur wordt duidelijk dat niet elk gebied in Nederland gelijkmatig gerepresenteerd wordt door de stations. Dit komt doordat een aantal stations nog een relatief korte meetreeks heeft. Relatief 'lege' gebieden met bijbehorende stations zijn de Waddeneilanden (station Terschelling/Hoorn), Noord-Drenthe/Zuid-Groningen (station Eelde), een groot deel van Noord-Holland (station Schiphol) en Zuid-Limburg (station Eil en Maastricht).



Figuur 2. De geografische ligging van de 10-minuten neerslagstations.

De volgende data zijn voor het onderzoek gebruikt: 1) ongevalideerde 10-minuut neerslaghoeveelheden en 2) gevalideerde 1-uurlijkse neerslaghoeveelheden. De 1-uurlijkse neerslaghoeveelheden zijn, evenals in het voorgaande onderzoek, gebruikt om de 10-minuutwaarden te valideren. Naast de data van de genoemde KNMI-stations zijn ook neerslaggegevens van weeramateurs beschikbaar gesteld, maar vanwege de korte meetreeksen van deze data, is hier geen gebruik van gemaakt.

Gevalideerde data zijn data die gecheckt zijn op de kwaliteit en zonodig door het KNMI zijn gecorrigeerd. Om de ongevalideerde 10-minuten gegevens te corrigeren, zijn de 1-uurlijkse gegevens gebruikt. De 10-minuten gegevens zijn hiervoor omgerekend naar 1-uurlijkse waarden en vervolgens vergeleken met de 1-uurlijkse waarden. Wanneer er een verschil was tussen de gesommeerde 10-minuten gegevens en de 1-uurlijkse waarden, zijn de 10-minuut waarden met een factor vermenigvuldigd. Deze factor is bepaald door de zes opgetelde 10-minuutwaarden te delen door de gemeten uursom. Hierin is dus aangenomen dat deze factor gelijk is voor alle zes 10-minuten waarden. De leverancier van de data (KNMI) heeft bevestigd dat er verschillen kunnen zijn tussen de data, vooral in het tijdvak vóór april 2003; de 10-minuut gegevens kunnen in die periode namelijk enkele minuten in tijd verschoven zijn. De 1-uurlijkse neerslaggegevens zijn overigens alleen gebruikt voor correctie van de 10-minuten gegevens en niet voor berekening van de extreme-neerslagcurven, omdat de resolutie van deze data slechts een zesde is van de 10 minuten gegevens. Als een extreme neerslaggebeurtenis bijvoorbeeld van 6:30 tot 7:30 duurt, wordt vanuit de 10-minuten waarden het totaal als een 1-uurlijkse waarde genoteerd, maar vanuit de 1-uurlijkse waarden zal de neerslagsom verdeeld worden over twee uren en zal de maximale uursom dus worden onderschat.

De perioden waarover de data beschikbaar zijn en zijn gebruikt, staan per station in tabel 1. Zoals uit de tabel valt op te maken, is er voor gekozen om data van hele jaren te gebruiken, zodat alle jaargetijden steeds even vaak voorkomen in de meetreeksen. De zwaarste buien vallen namelijk over het algemeen in de zomerperiode.

Station	Beschikbaar vanaf	Start ge-analyseerde data	Eind ge-analyseerde data
Valkenburg	06/12/1995	16/06/1996	16/06/2006
De Kooy	10/11/1995	16/06/1996	16/06/2006
Stavoren	01/01/1996	16/06/1996	16/06/2006
Lelystad	16/03/1995	16/06/1995	16/06/2006
Leeuwarden	30/06/1995	16/06/1996	16/06/2006
Marknesse	17/03/1995	16/06/1995	16/06/2006
Deelen	03/07/1995	16/06/1996	16/06/2006
Lauwersoog	17/05/1995	16/06/1995	16/06/2006
Heino	03/05/1995	16/06/1995	16/06/2006
Hoogeveen	21/04/1995	16/06/1995	16/06/2006
Hupsel	12/06/1995	16/06/1995	16/06/2006
Nieuw Beerta	01/11/1995	16/06/1996	16/06/2006
Vlissingen	06/06/1995	16/06/1995	16/06/2006
Westdorpe	18/07/1995	16/06/1996	16/06/2006
Wilhelminadorp	03/10/1995	16/06/1996	16/06/2006
Hoek van Holland	01/08/1995	16/06/1996	16/06/2006
Cabauw	27/02/1997	16/06/1997	16/06/2006
Gilze-Rijen	07/06/1995	16/06/1995	16/06/2006
Herwijnen	01/01/1995	16/06/1995	16/06/2006
Eindhoven	18/04/1995	16/06/1995	16/06/2006
Volkel	24/05/1995	16/06/1995	16/06/2006
Arcen	18/03/1995	16/06/1995	16/06/2006

Tabel 1. Overzicht per station van de beschikbaarheid en de gebruikte periode van de 10-minuten neerslagdata.

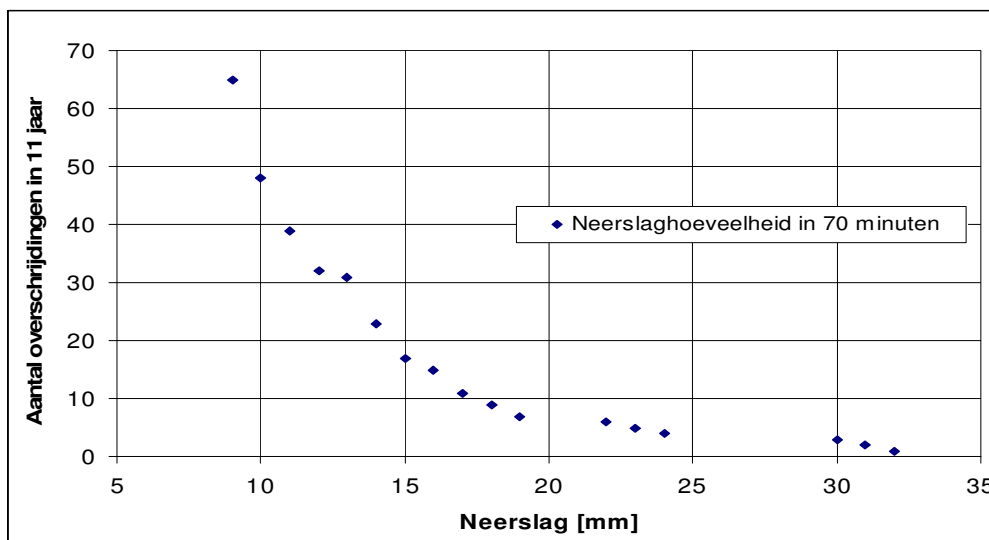
Methode

De selectie van neerslaggebeurtenissen heeft plaatsgevonden op dezelfde manier als in het voorgaande onderzoek ("Extreme neerslagcurven", Meteo Consult, 2006). Voor alle duidelijkheid is de methode hieronder nogmaals beschreven, met hier en daar een toevoeging op het voorgaande rapport. Voor tijdsintervallen van 10 minuten tot 100 minuten met stappen van 10 minuten is gekeken hoe vaak een neerslaggebeurtenis over een bepaalde tijd heeft plaatsgevonden. Alleen onafhankelijke gebeurtenissen worden genoteerd.

Tijd (min)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Neerslag (mm)	0	1	3	3	2	0	2	2	0	4

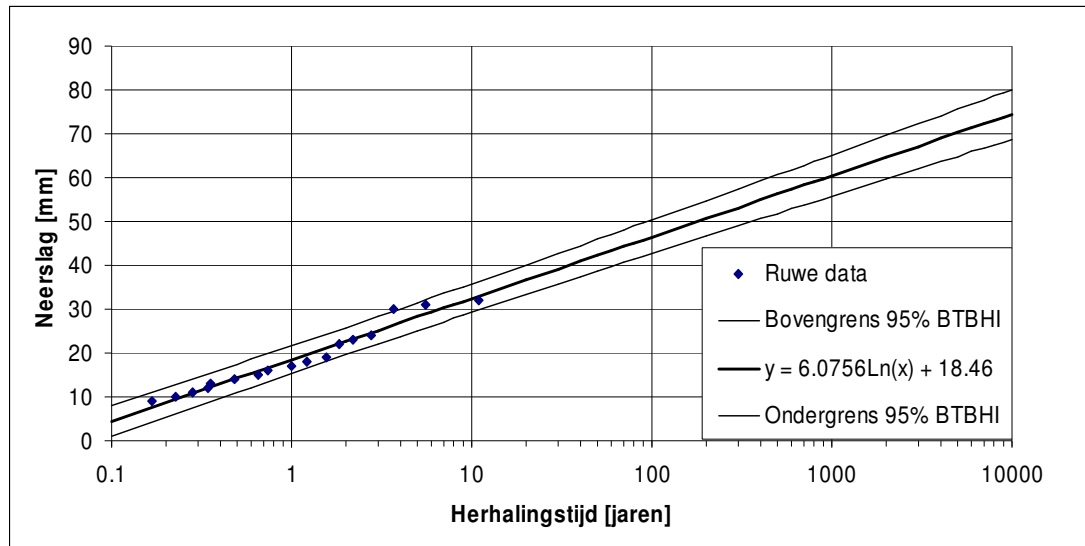
Figuur 3. Een fictief tijdvak van 100 (10 maal 10) minuten neerslagdata.

Om de methode van onafhankelijke gebeurtenissen te verduidelijken is in figuur (3) een korte visualisatie van een fictief tijdvak van 100 minuten samengesteld. Als voorbeeld kijken we naar neerslaggebeurtenissen van 4 mm of meer in 20 minuten. Dit komt drie maal voor tijdens de eerste 50 minuten (20-30, 30-40 en 40-50 minuten). Omdat er geen overlap mag zitten tussen de periodes (onafhankelijkheid) worden er slechts twee van deze situaties genoteerd. 70-80 en 90-100 worden beide genoteerd, omdat het onafhankelijke gebeurtenissen zijn. Hetzelfde is gedaan voor periodes groter dan 20 minuten tot 100 minuten en voor drempelwaarden tot de hoogte die de dataset vereist. Wanneer de drempelwaarde voor 20 minuten op 6 mm wordt gezet, wordt uit figuur (3) als enige de periode 30-40 minuten geselecteerd; 7 mm of meer in 30 minuten zal één keer worden geregistreerd, namelijk de periode 20-40 minuten. De periode 30-50 minuten heeft overlap met die periode en zal dus niet genoteerd worden, maar wel wanneer de drempelwaarde op 8 mm staat. Voor de 10-minuten periodes zijn de gebeurtenissen per definitie onafhankelijk, omdat dit de kleinst mogelijke tijdstap is. Het resultaat van 70-minuten neerslagperiodes, die op dezelfde manier zijn bepaald als de 20-minuten periodes is te zien in figuur (4).



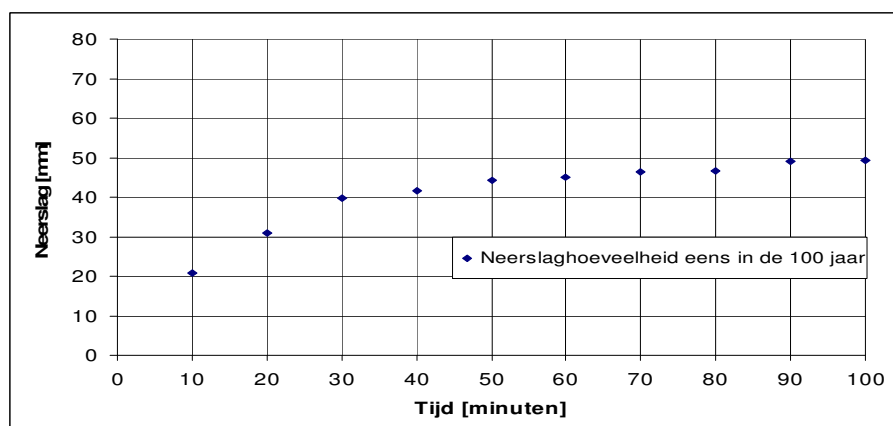
Figuur 4. Het aantal overschrijdingen van een neerslaghoeveelheid in 70 minuten in elf jaar (1995-2005).

In figuur (4) is de neerslaghoeveelheid in 70 minuten tegen de herhalingstijd van die neerslaghoeveelheid uitgezet. Hierbij is een geëxtrapoleerde logaritmische functie geplott met het bijbehorende 95% betrouwbaarheidsinterval. Deze figuur (die gemaakt is voor De Bilt) is gebaseerd op 11 jaar data. Voor stations die een kortere meetreeks hebben, is hier uiteraard rekening gehouden in de berekening van de herhalingstijd.



Figuur 5. Neerslaghoeveelheid in 70 minuten tegen de berekende herhalingstijd van die neerslaghoeveelheid. De losse punten zijn de waarnemingen. De dikke lijn laat de gefitte logaritmische functie zien met de onder- en bovengrens (dunne lijnen) van het 95% betrouwbaarheidsinterval (BTBHI).

De 95% betrouwbaarheidband (figuur 5) is het smalst (circa 6 mm) rond het gemiddelde van de waarnemingsset. Beide kanten op wordt de band breder. Bij een herhalingstijd van 1000 jaar is de band 10 mm breed. De dikke lijn geeft aan dat eens in de 1000 jaar 60 mm en eens in de 10000 jaar 73 mm in 70 minuten kan vallen. Dat zijn meteorologisch gezien realistische waarden; op 2 juni 2003 noteerde station Marknesse 73 mm in 60 minuten. Op dezelfde manier als voor 70 minuten is voor tijdstappen van 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 90 en 100 minuten een lijn bepaald met bijbehorende 95 % betrouwbaarheidsintervallen. Voor een herhalingstijd van 100 jaar levert dat de grafiek van figuur (6) op.



Figuur 6. Punten die de basis vormen voor een nieuwe extreme-neerslagcurve voor neerslaghoeveelheden die eens in 100 jaar voorkomen.

De curve door de punten wordt gemaakt met behulp van een cumulatieve Weibull kansverdelingfunctie, welke er als volgt uitziet (Van der Wielen, 2004):

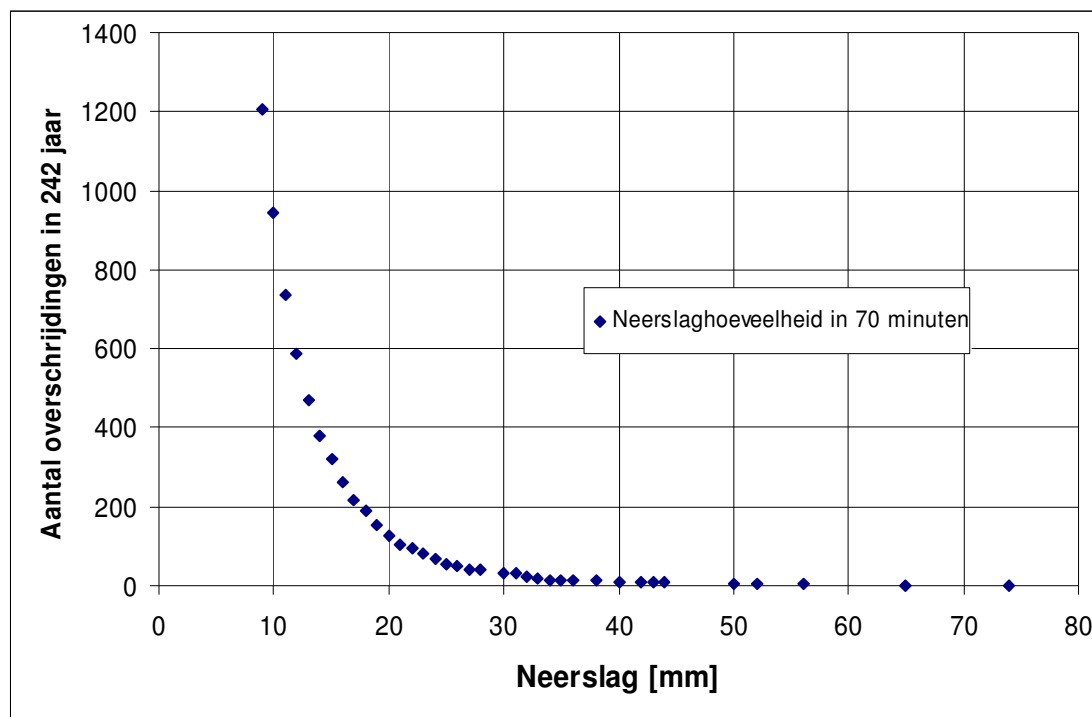
$$f(x) = C * \left(1 - e^{(-\alpha x^\beta)}\right) \quad (1),$$

hierin is $f(x)$ de neerslag in mm, x de tijd in minuten en C , α en β zijn de te fitten parameters.

Combinatiecurve

De hierboven beschreven methode werd tot nu toe steeds toegepast op één station tegelijk. Om een algemener beeld van de curven te krijgen zijn de 10-minuut neerslaggegevens van alle 23 stations, inclusief De Bilt, gecombineerd. Omdat het om grote hoeveelheden neerslag in korte tijd gaat, kunnen neerslaggebeurtenissen van verschillende stations als onafhankelijk van elkaar worden beschouwd. Dit heeft tot gevolg dat het aantal overschrijdingen van een bepaalde neerslagsom in een aantal minuten per aantal jaar van verschillende stations bij elkaar opgeteld mogen worden en ook het aantal jaar waarin die gebeurtenissen plaatsvonden mogen bij elkaar worden opgeteld.

Ter verduidelijking het volgende voorbeeld: wanneer station 'A' 15 overschrijdingen van 17 mm binnen 70 minuten in 11 jaar heeft en station 'B' heeft ook 15 overschrijdingen van 17 mm binnen 70 minuten in 11 jaar, betekent dat opgeteld 30 overschrijdingen van 17 mm binnen 70 minuten in 22 jaar. Dit kan uiteraard ook worden toegepast op meer stations, voor meer overschrijdingshoeveelheden en perioden waarin de neerslag valt. Zo is het aantal 'meetjaren' van de 23 geanalyseerde stations (inclusief De Bilt) totaal 242 jaar. Wanneer er één van de 23 stations één keer meer dan 28 mm binnen 10 minuten heeft gemeten, betekent dat deze gebeurtenis een herhalingstijd van 242 jaar heeft. Voor visualisatie van het aantal overschrijdingen in 242 jaar is figuur (7) getoond; een zelfde soort grafiek als figuur (4).



Figuur 7. Hetzelfde als figuur 4, maar nu voor 23 stations met een totale meetreeks van 242 jaar.

Resultaten

De in het voorgaande hoofdstuk beschreven methode is gebruikt voor het berekenen van zowel extreme-neerslagcurven voor alle stations afzonderlijk, als voor een combinatie van de stationsgegevens. De curven met de bijbehorende 95% betrouwbaarheidsintervallen zijn berekend voor herhalingstijden van 50, 100, 250, 500 en 1000 jaar.

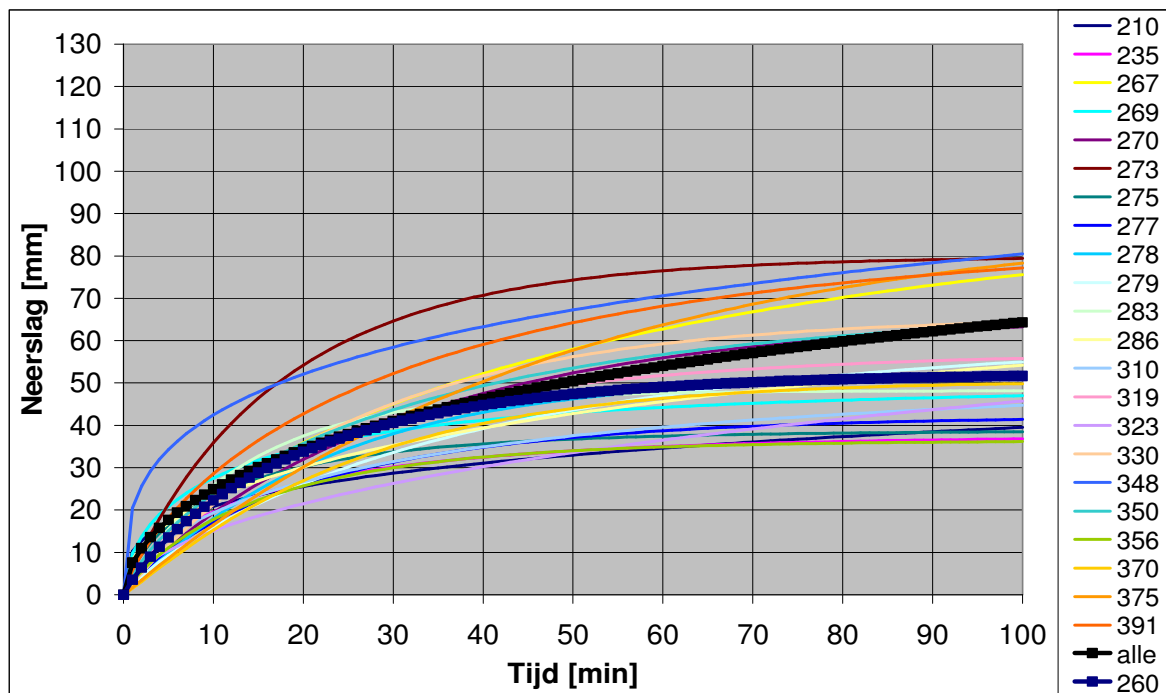
De curven zijn te zien in de figuren (8a) tot en met (8e). De waarden van de getoonde curven zijn de waarden van de berekende curven vermenigvuldigd met 1.175. Het jongste grote wetenschappelijke onderzoek van het KNMI, genaamd "Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands", wat in het voorjaar 2006 is uitgekomen, laat zien dat er vier mogelijke klimaatscenario's voor de 21^e eeuw in Nederland zijn. Alle scenario's laten de gemiddelde temperatuur in de komende eeuw stijgen. Twee scenario's (genaamd "W" en "W+" laten de extreme neerslaghoeveelheden in de zomer met 10 tot 27% (gemiddeld 18.5%) toenemen en in de winter met 8 tot 12% (gemiddeld 10%). De twee overige scenario's ("G" en "G+") laten de extreme neerslaghoeveelheden veel minder toenemen.

De scenario's "W" en "W+" zijn de zogenaamde worst-case scenario's. Vanwege de veiligheid is gerekend met deze twee scenario's. Ongeveer 10% van de neerslaggebeurtenissen die gebruikt zijn voor het onderzoek hebben plaatsgevonden in het winterhalfjaar en 90% in het zomerhalfjaar. Daarom is gekozen voor een weging van de percentages ($0.10 \cdot 10\% + 0.90 \cdot 18.5\%$) met als uitkomst een verwachting van 17.5% toename van extreme neerslaghoeveelheden. In de berekening van de curven in het voorgaande onderzoek, op basis van één station, werd nog rekening gehouden met een toename van 11%, wat nu, na het uitkomen van het KNMI-rapport is aangepast. Voor de vergelijking van de curven uit het vorige onderzoek met de nieuwe curven is uiteraard de toen berekende curve nu ook met 17.5% verhoogd, in plaats van 11%.

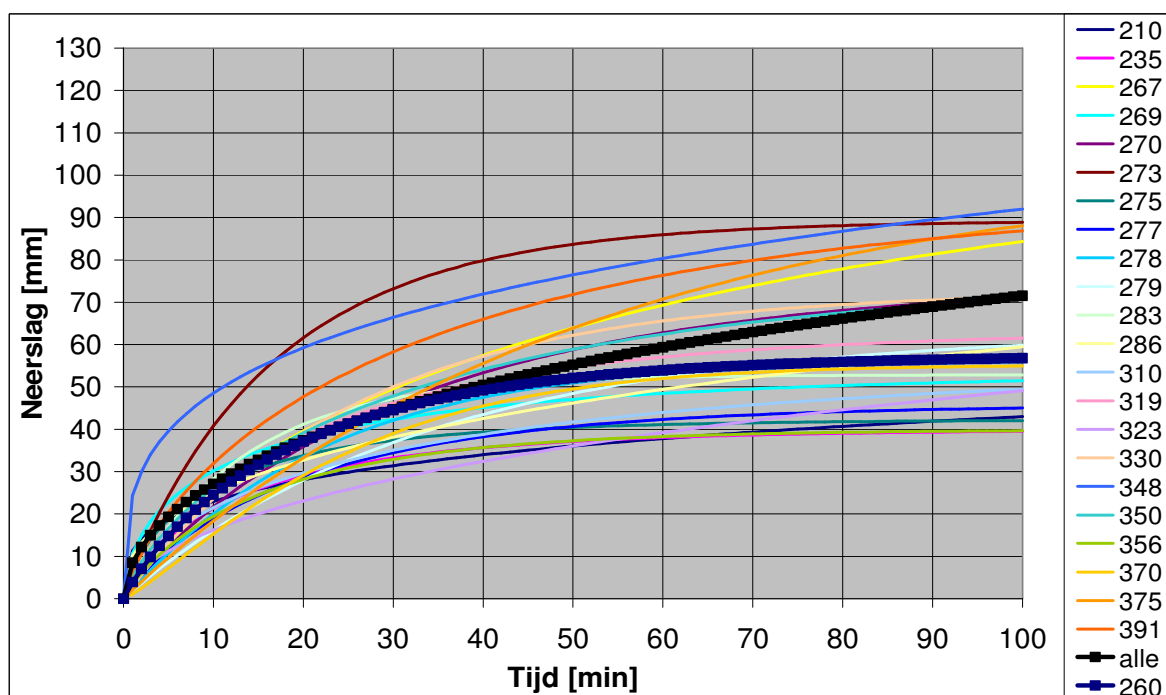
Verschillen tussen stations

De figuren (8a t/m 8e) laten de curven voor alle afzonderlijke stations in één grafiek zien, voor verschillende herhalingstijden (50, 100, 250, 500 en 1000 jaar). In dezelfde grafieken is ook de curve voor station De Bilt geplot (station 260), die in het voorgaande onderzoek is berekend. Verder is de combinatiecurve (voor uitleg hierover, zie het vorige hoofdstuk) ook zichtbaar in de grafieken.

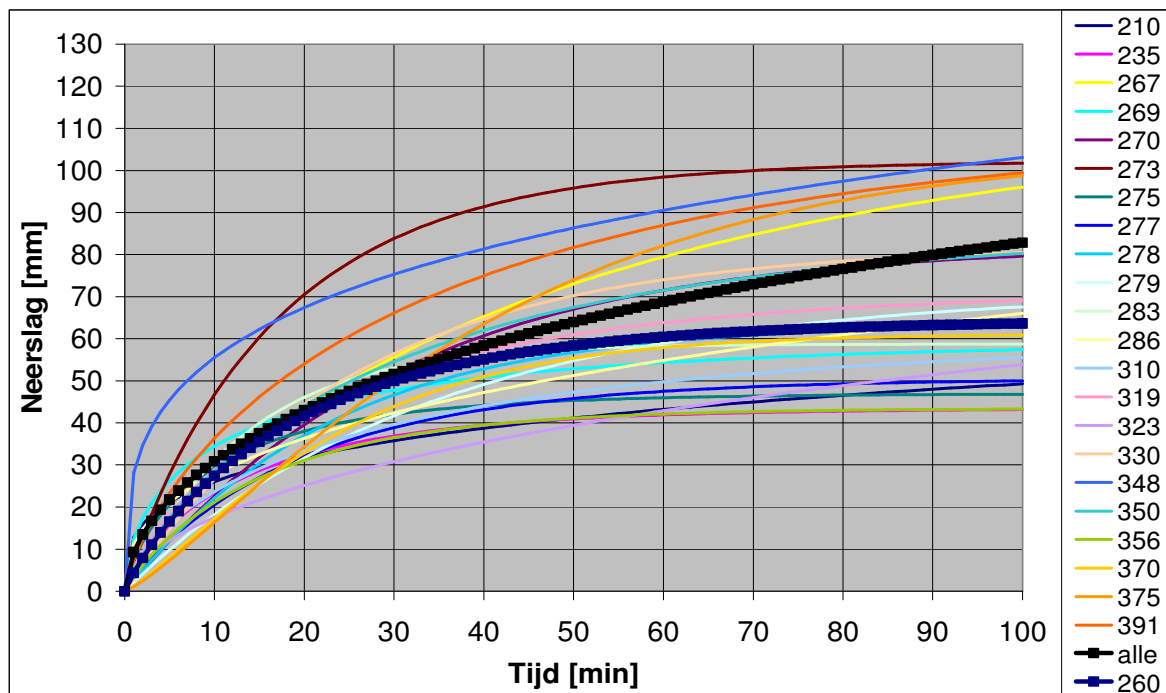
Het is duidelijk te zien dat er tussen de stations onderling veel verschillen zijn. Door een paar zeer extreme buien wijken de curven van Cabauw (station 348) en Marknesse (station 273) sterk af van de overige stations. In Cabauw viel 29 mm in 10 minuten, waardoor de curve voornamelijk voor de zeer korte termijn erg hoog is uitgevallen. In Marknesse viel de extreme neerslaghoeveelheid over een iets langere periode. Toch is het niet mogelijk om aan de hand van deze resultaten een duidelijke indeling in regio's te maken van de kans op extreme neerslag. Station Herwijnen, dat op nog geen 20 kilometer van Cabauw ligt, laat juist weer één van de laagste curven zien. Verder ligt de curve van Lelystad (station 269) voor de langere termijn (30 tot 100 minuten) ver onder de combinatiecurve (dikke zwarte lijn), terwijl het in een zelfde soort gebied als Marknesse ligt.



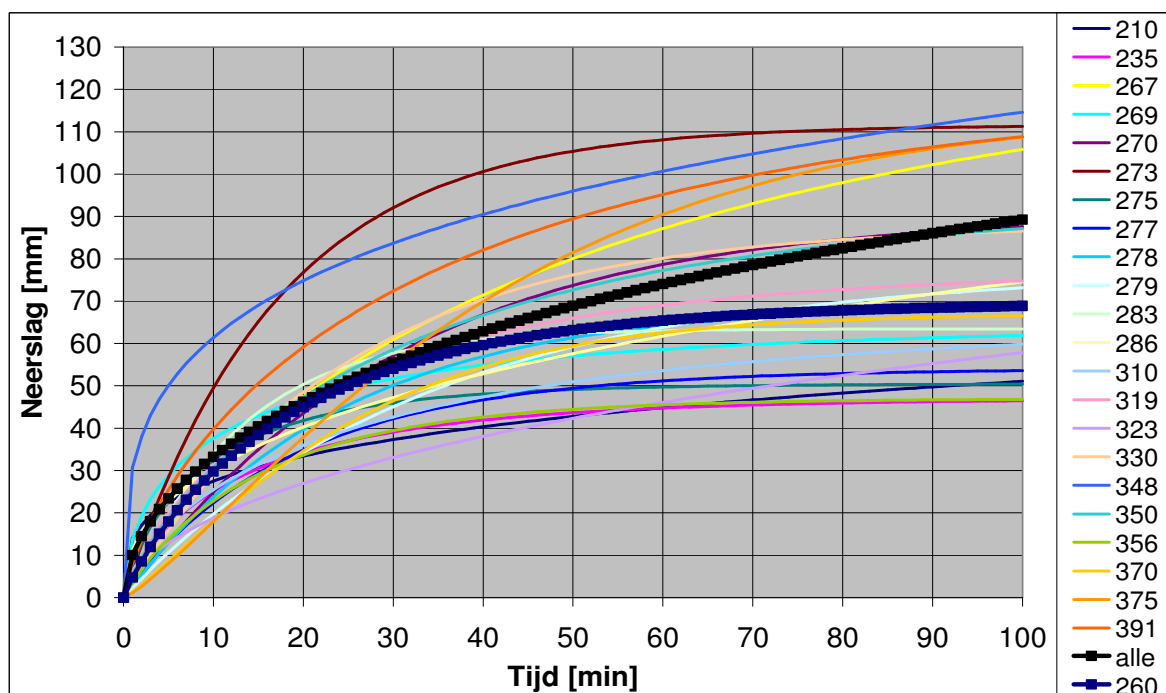
Figuur 8a. Berekende extreme neerslagcurven voor een herhalingsjijd van 50 jaar. De dikke donkerblauwe lijn is de lijn van station De Bilt, die berekend is in het voorgaande onderzoek. De dikke zwarte lijn laat de combinatiecurve van de alle 23 stations zien; de andere curven zijn van de overige 22 afzonderlijke stations.



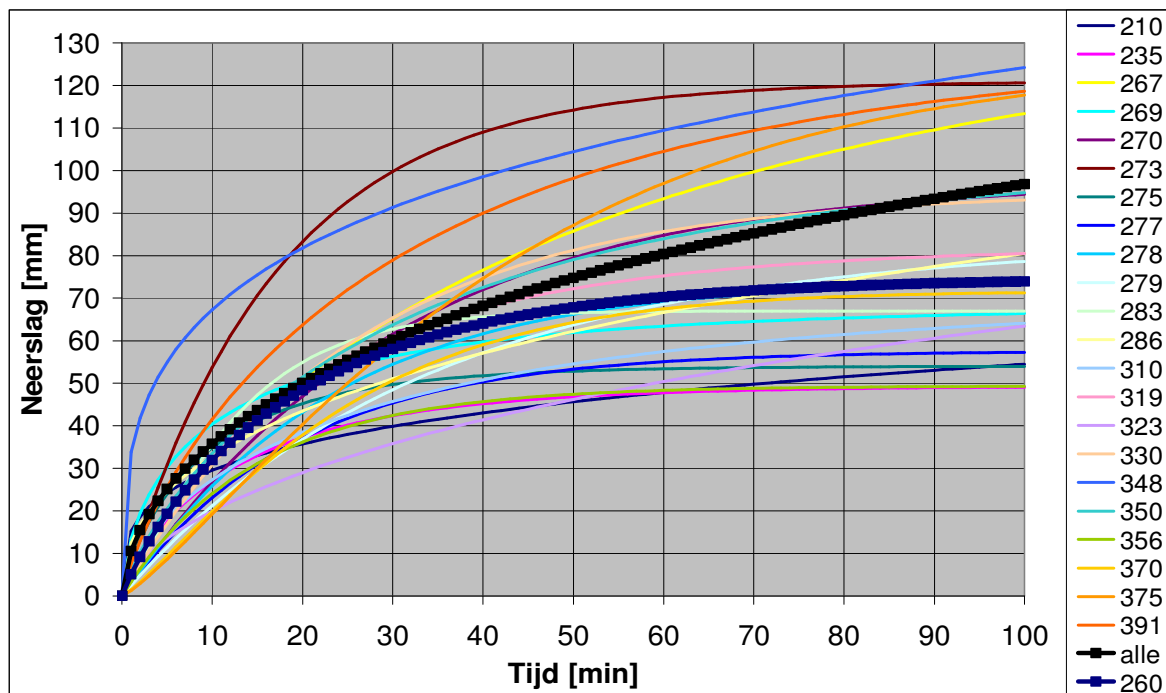
Figuur 8b. Berekende extreme neerslagcurven voor een herhalingsjijd van 100 jaar. De dikke donkerblauwe lijn is de lijn van station De Bilt, die berekend is in het voorgaande onderzoek. De dikke zwarte lijn laat de combinatiecurve van de alle 23 stations zien; de andere curven zijn van de overige 22 afzonderlijke stations.



Figuur 8c. Berekende extreme neerslagcurven voor een herhalingsjijd van 250 jaar. De dikke donkerblauwe lijn is de lijn van station De Bilt, die berekend is in het voorgaande onderzoek. De dikke zwarte lijn laat de combinatiecurve van de alle 23 stations zien; de andere curven zijn van de overige 22 afzonderlijke stations.



Figuur 8d. Berekende extreme neerslagcurven voor een herhalingsjijd van 500 jaar. De dikke donkerblauwe lijn is de lijn van station De Bilt, die berekend is in het voorgaande onderzoek. De dikke zwarte lijn laat de combinatiecurve van de alle 23 stations zien; de andere curven zijn van de overige 22 afzonderlijke stations.

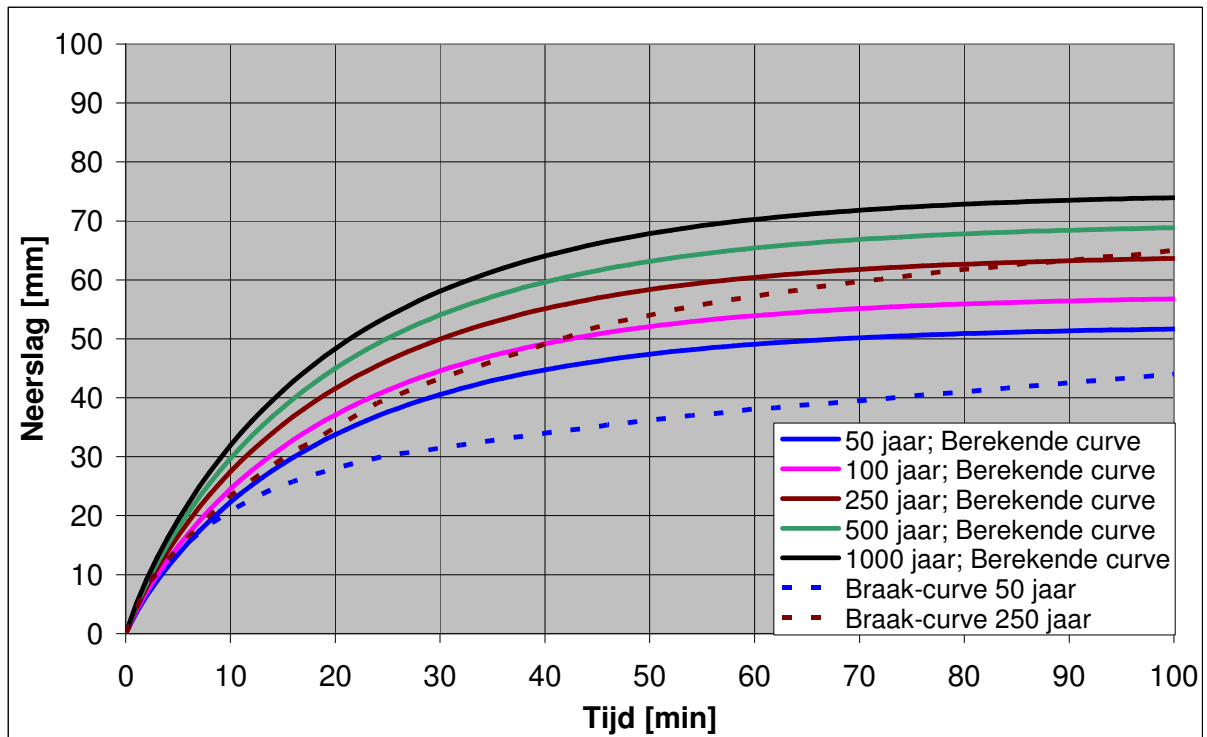


Figuur 8e. Berekende extreme neerslagcurven voor een herhalingsjijd van 1000 jaar. De dikke donkerblauwe lijn is de lijn van station De Bilt, die berekend is in het voorgaande onderzoek. De dikke zwarte lijn laat de combinatiecurve van de alle 23 stations zien; de andere curven zijn van de overige 22 afzonderlijke stations.

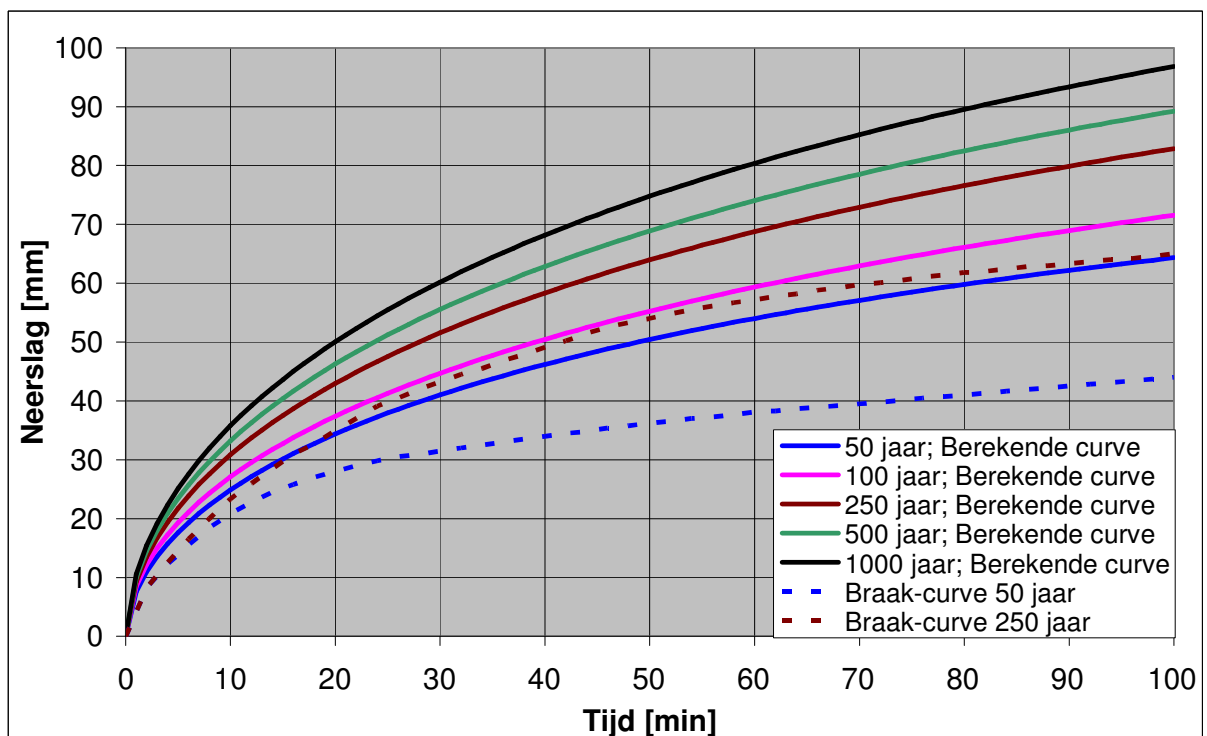
Verschillen tussen station de Bilt en de rest van Nederland

In de figuren (8a t/m e) is te zien dat de combinatiecurve vooral voor langere periodes (meer dan 40 minuten) hoger ligt dan de curve van De Bilt. Dit laat zien dat De Bilt vooral zware buien heeft gehad die niet heel lang aanhielden. In de berekening van de combinatiecurve zijn ook de buien meegenomen die op andere stations voor een langere tijd extreme neerslag gaven.

Voor een duidelijker beeld van de verschillen tussen de combinatiecurve en de curve van De Bilt zijn de figuren (9, 10 en 11) weergegeven. In figuur (9a en b) zijn de curven voor vijf herhalingsjijden van station De Bilt en van de 23 gecombineerde stations weergegeven. Ook zijn ter vergelijking in beide figuren de Braak-curven voor 50 en 250 jaar getoond. Wat opvalt, is dat de Braak-curve van 250 jaar zelfs onder de combinatiecurve van 100 jaar uitkomt (figuur 9b). Dit is een verschil met station De Bilt, waarbij het laatste deel van de curve (80 tot 100 minuten) voor 250 jaar vrijwel gelijk loopt met de originele Braak-curve van dezelfde herhalingsjijd.



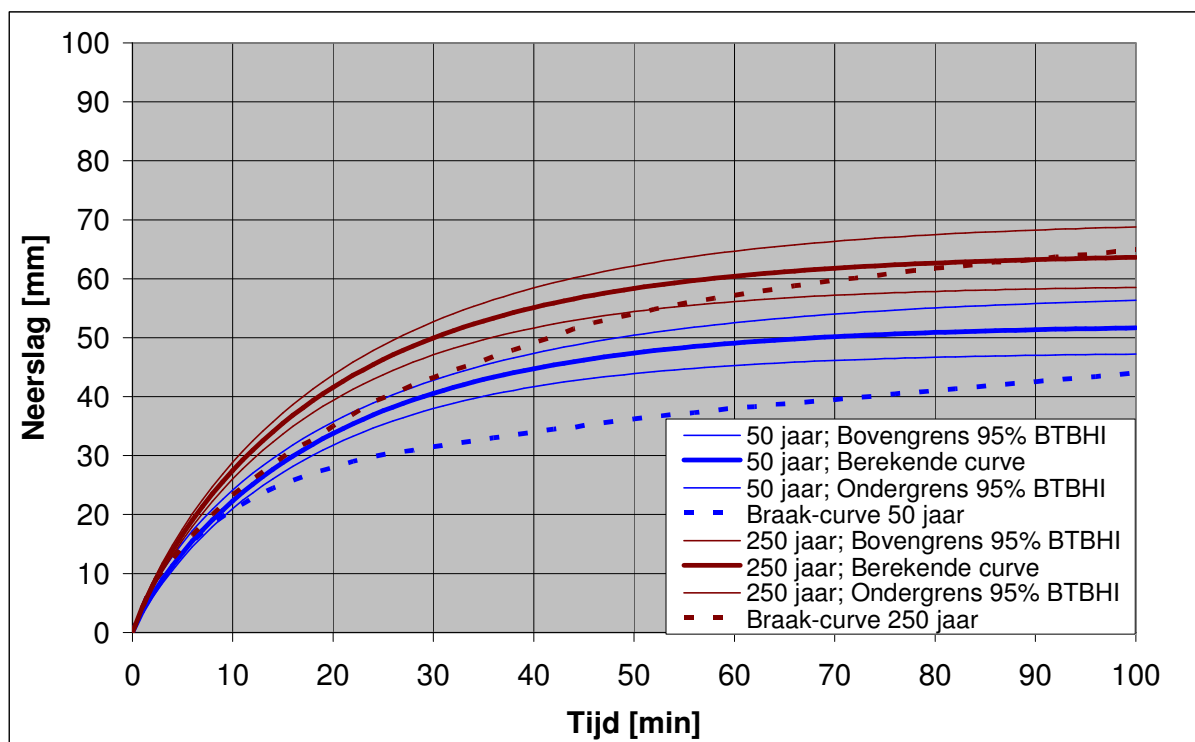
Figuur 9a. Berekende extreme neerslagcurven van station De Bilt voor een herhalingsstijd van 50, 100, 250, 500 en 1000 jaar. De blauwe en de bruine stippellijn laten de originele Braak-curven voor 50 en 250 jaar zien.



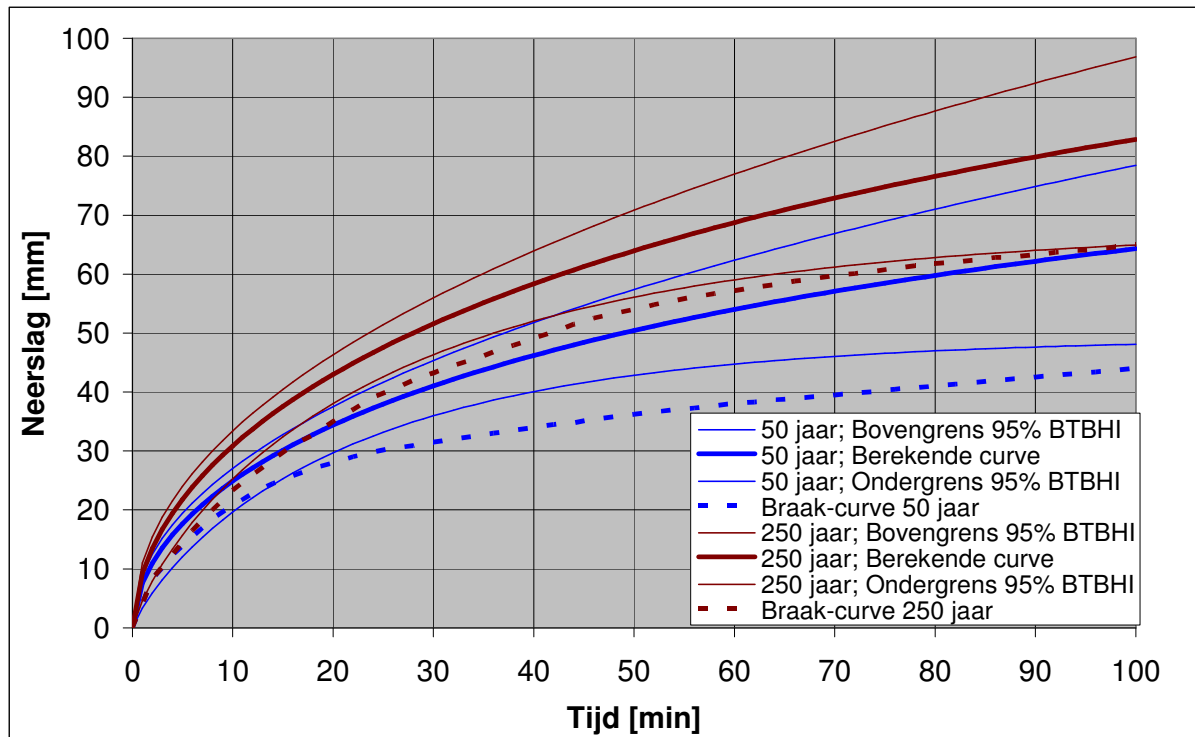
Figuur 9b. Berekende combinatie-extreme-neerslagcurven van de 23 stations voor een herhalingsstijd van 50, 100, 250, 500 en 1000 jaar. De blauwe en de bruine stippellijn laten de originele Braak-curven voor 50 en 250 jaar zien.

In figuur (10a en b) zijn de curven van 50 en 250 jaar opnieuw vergeleken met de originele Braak-curven. In dit geval zonder de andere herhalingstijden, maar met de betrouwbaarheidsintervallen. De 50-jaars curve van Braak, ligt voor De Bilt (figuur 10a) vrijwel geheel beneden de ondergrens van het 95%-betrouwbaarheidsinterval. De ondergrens van het 95% betrouwbaarheidsinterval van de combinatiecurve (figuur 10b) voor 50 jaar ligt op de eerste 10 minuten na, ook boven de Braak-curve voor dezelfde herhalingstijd. In dezelfde figuur is te zien dat de Braak-curve van 250 jaar in zijn geheel beneden het berekende 95% betrouwbaarheidsinterval ligt, in tegenstelling tot De Bilt (figuur 10a), waar het stuk boven de 50 minuten binnen het 95% betrouwbaarheidsinterval ligt.

Samengevat betekent dit het volgende: 1) de 50-jaars curve van Braak ligt significant lager voor zowel de Bilt als voor de 23 stations samen en 2) de 250-jaars curve van Braak ligt voor de Bilt gedeeltelijk significant lager dan de nieuw berekende curve en voor de 23 stations samen ligt de Braak-curve over de hele linie significant lager. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de combinatiecurve nog meer aanleiding geeft tot het aanpassen van de Braak-curve dan de nieuwe curve voor station De Bilt al deed.



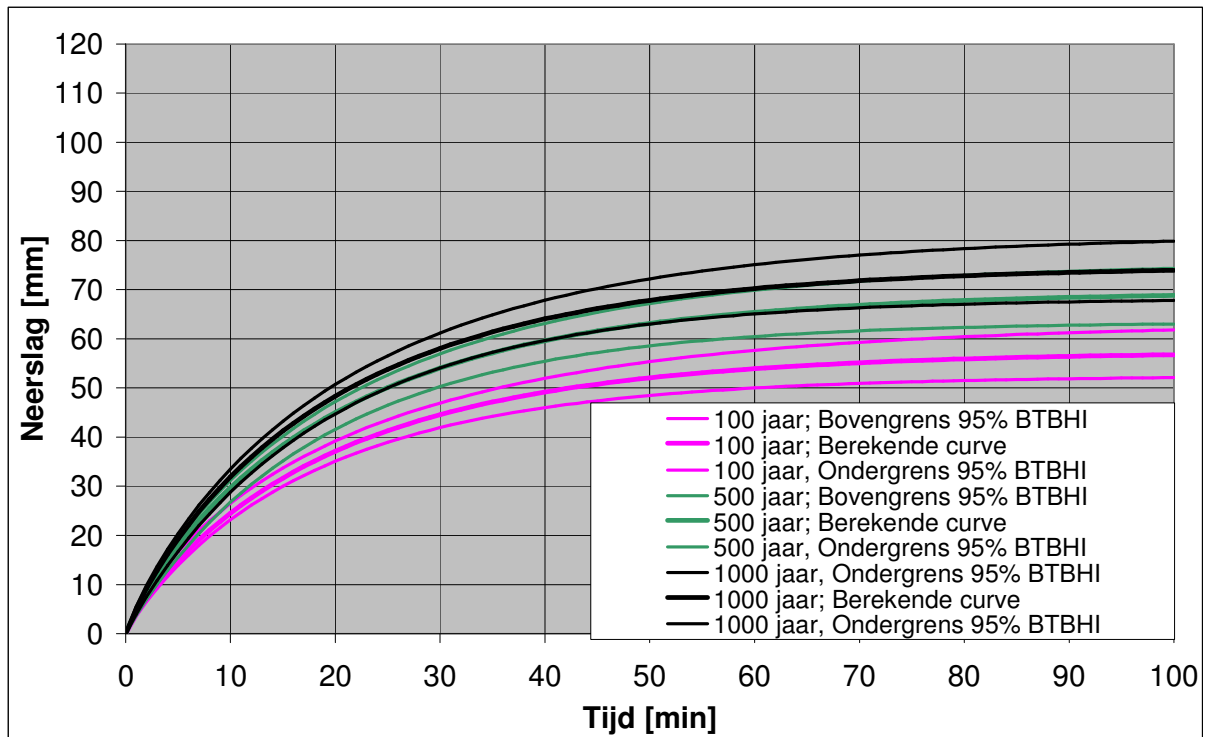
Figuur 10a. Berekende extreme neerslagcurve van station De Bilt voor een herhalingstijd van 50 jaar (blauwe lijnen) en 250 jaar (bruine lijnen), inclusief het 95% betrouwbaarheidsinterval. De blauwe en bruine stippellijnen laten de Braak-curven voor 50 en 250 jaar zien.



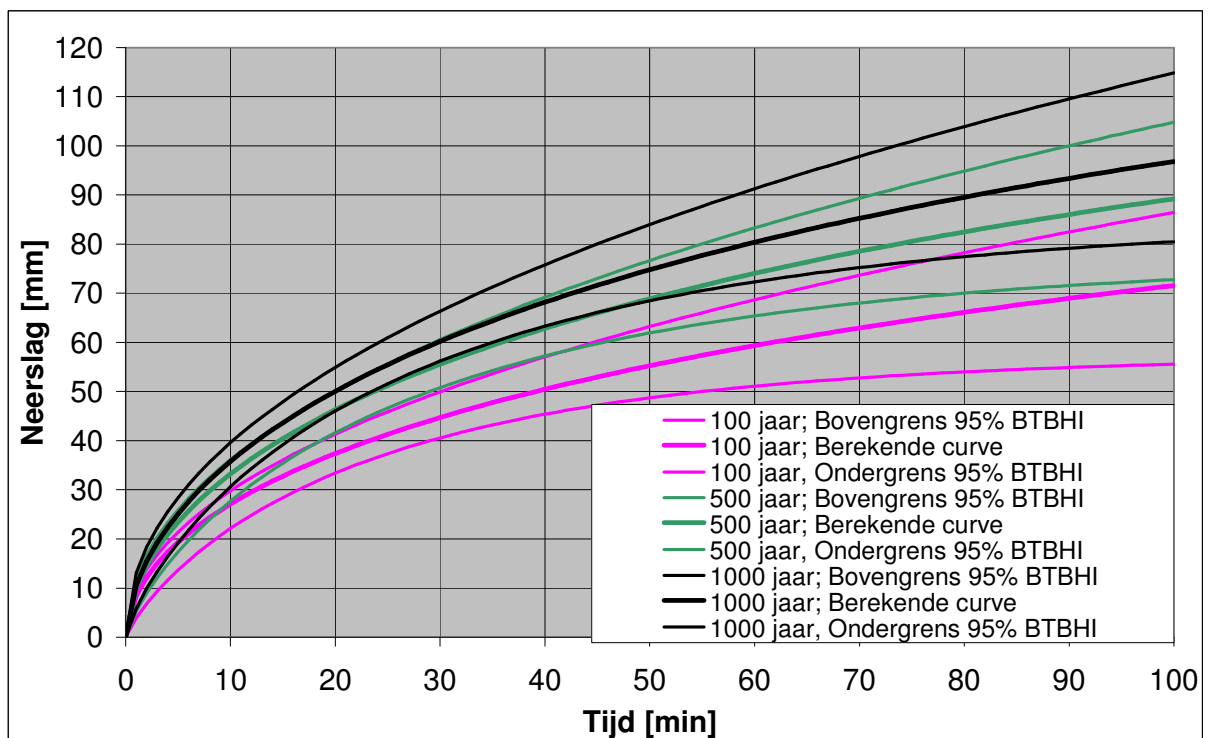
Figuur 10b. Berekende extreme neerslagcurve van de 23 gecombineerde stations voor een herhalings-tijd van 50 jaar (blauwe lijnen) en 250 jaar (bruine lijnen), inclusief het 95% betrouwbaarheidsinterval. De blauwe en bruine stippellijnen laten de Braak-curven voor 50 en 250 jaar zien.

In zowel figuur 10 als figuur 11 is te zien dat de betrouwbaarheidsbanden van de nieuwe combinatiecurven breder zijn dan die van station De Bilt. De oorzaak hiervan is dat door gebruik van data van 23 stations veel meer gemeten extremen zijn meegenomen. Deze extremen zorgen voor een bredere betrouwbaarheidsband. De grote verschillen tussen de stations zorgen ervoor dat extremen ook echt extreem worden en dat daardoor de betrouwbaarheidsbanden smaller zouden worden. In het voorgaande rapport werd gesteld dat de betrouwbaarheidsbanden bij het gebruik van meer stations mogelijk smaller zouden worden. Dit zou het geval zijn geweest wanneer de onderlinge verschillen tussen de stations veel kleiner waren geweest. De brede betrouwbaarheidsbanden geven ook aan dat er een grotere kans is op hogere neerslagsommen.

De bovengrens van het 95% betrouwbaarheidsinterval geeft de maximaal te verwachten hoeveelheid neerslag binnen de bepaalde herhalings-tijd aan. Zo is eens in de 1000 jaar volgens de combinatiecurve ruim 110 millimeter in 100 minuten op een willekeurige plaats in Nederland mogelijk. Daarnaast is uit de curve voor De Bilt af te lezen dat daar voor dezelfde periode 'slechts' ongeveer 80 millimeter neerslag kan vallen.



Figuur 11a. Berekende extreme neerslagcurven van station De Bilt voor een herhalingstijd van 100 jaar (lichtpaarse lijnen), 500 jaar (groene lijnen) en 1000 jaar (zwarte lijnen), inclusief het 95% betrouwbaarheidsinterval.



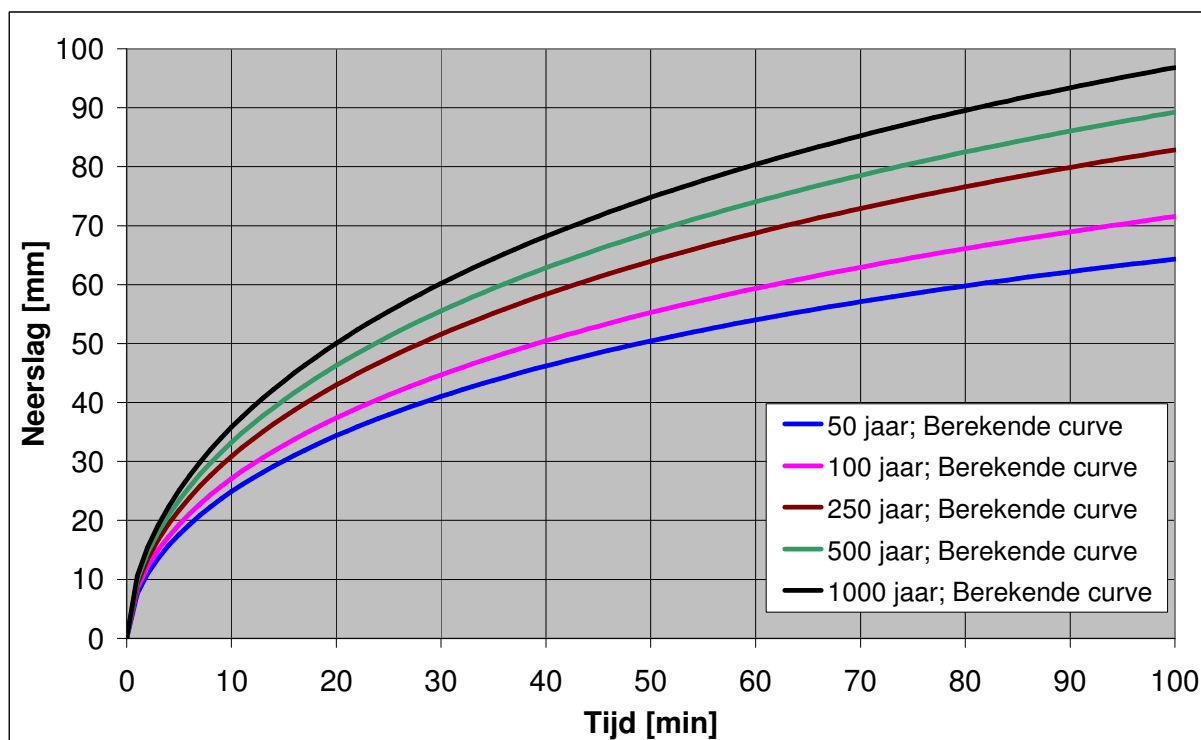
Figuur 11b. Berekende extreme neerslagcurven van de 23 gecombineerde stations voor een herhalingstijd van 100 jaar (lichtpaarse lijnen), 500 jaar (groene lijnen) en 1000 jaar (zwarte lijnen), inclusief het 95% betrouwbaarheidsinterval.

De Bilt is *niet* representatief voor heel Nederland

Voor de representatie van De Bilt voor Nederland betekenen de bevindingen het volgende. Voor korte neerslagperioden zijn de gemiddelde curven (dus zonder 95% betrouwbaarheidsintervallen) representatief voor Nederland (zie de figuren 8a t/m e). Voor twee andere zaken is De Bilt echter niet representatief. Dit gaat in de eerste plaats om perioden met extreme neerslag langer dan veertig minuten. Daar zijn de curven van De Bilt lager dan de combinatiecurven. In de tweede plaats gaat het om de breedte van de betrouwbaarheidsbanden. Deze banden zijn voor station De Bilt smaller, wat zorgt voor een onderschatting van de hoogst mogelijke neerslagsommen binnen het 95% betrouwbaarheidsinterval. Dit geldt voor alle extreme neerslagperioden tot 100 minuten en voor alle berekende herhalingstijden. Het algemene beeld geeft aan dat de eerder berekende curven van De Bilt niet representatief zijn voor Nederland. De combinatiecurven geven betere representatie van de kans op extreme neerslag op een willekeurige plaats in Nederland.

De Braak-curven moeten worden vervangen door nieuwe extreme neerslagcurven voor de 21^e eeuw

De nieuwe berekende extreme neerslagcurven voor heel Nederland liggen significant hoger dan de originele Braak-curven. Zoals blijkt uit de nieuwe curven, zal in de toekomst vaker extreme neerslag in korte perioden vallen. De oude Braak-curven voldoen dan ook niet meer bij de dimensionering en het ontwerp van waterbergingen en pompcapaciteiten door Rijkswaterstaat. De combinatiecurven moeten daarom de Braak-curven vervangen. Deze nieuwe curven moeten voor heel Nederland worden gebruikt. Ze zullen als richtlijn gelden bij het ontwerp en de dimensionering van waterbergingen en pompcapaciteiten door Rijkswaterstaat. In figuur (12) zijn de nieuwe curven nogmaals getoond.



Figuur 12. Berekende extreme-neerslagcurven, voor een herhalingstijd van 50, 100, 250, 500 en 1000 jaar, geldend voor Nederland in de 21^e eeuw.

Conclusies en aanbevelingen

Vooraf aan dit tweede onderzoek over extreme neerslag in Nederland zijn de volgende vragen gesteld: Is de in het vorig onderzoek nieuw berekende extreme neerslag-curve van De Bilt 1) representatief voor Nederland, 2) betrouwbaar genoeg in verband met een onderzochte meetreeks van slechts 11 jaar en 3): bestaan er (grote) verschillen in de neerslagcurven tussen de verschillende meetstations in Nederland?

De *conclusies* die uit de onderzoeksresultaten getrokken kunnen worden zijn de volgende:

1. De Braak-curven voldoen niet meer als richtlijn bij de dimensionering en het ontwerp van waterbergingen en pompcapaciteiten in kunstwerken van Rijkswaterstaat.
2. De in het vorig onderzoek berekende curven met behulp van gegevens van station De Bilt zijn niet representatief voor heel Nederland.
3. Door combinatie van data van meerdere stations zijn de 95% betrouwbaarheidsintervallen van de extreme neerslagcurven breder dan die van station De Bilt. Dit geeft een betere beschrijving van de betrouwbaarheid van de curven.
4. Vergelijking van curven van 23 afzonderlijke stations toont aan dat er grote verschillen in waarschijnlijkheid van extreme neerslag bestaan. Er is echter geen indeling in regio's mogelijk, vanwege de min of meer willekeurige ruimtelijke verdeling van stations die met (zeer) extreme neerslag te maken hebben gehad.
5. De onderzoeksresultaten tonen aan dat ook op basis van gegevens van meerdere stations de originele Braak-curven vervangen moeten worden door nieuwe curven gebaseerd op 23 stations (figuur 9b).

Op basis van dit onderzoek wordt *aanbevolen*:

1. Het laten vervallen van de originele Braak-curven als richtlijn bij de dimensionering en het ontwerp van waterbergingen en pompcapaciteiten in kunstwerken van Rijkswaterstaat.
2. *Eén* extreme-neerslagcurve per herhalingsstijd (50, 100, 250, 500 en 1000 jaar) te gebruiken voor *heel* Nederland.
3. De in punt 2 genoemde en in figuur (12) getoonde curven te kwalificeren als nieuwe "Extreme-neerslagcurven voor de 21^e eeuw".
4. Deze curven te gebruiken als uitgangspunt voor het dimensioneren en ontwerpen van waterbergingen en pompcapaciteiten in kunstwerken van Rijkswaterstaat.

Referenties

Braak, C. 1933: "Het Klimaat van Nederland, Neerslag".

Malda, D. en Terpstra, E., 2006: "Extreme-neerslagcurven". Meteo Consult, 2006:

Smits, I. (KNMI), Wijngaarden, J. (KNMI), Versteeg, R. (HKV), en Kok, M. (HKV), 2004: "Statistieken van extreme neerslag in Nederland". Stowa, Utrecht.

Wielen, J. M. L. van der, 2004: "Statistische methoden en technieken", KIWA N.V.

KNMI, 2006: "Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands".

BIJLAGE 1:

- Tabel met waarden van “Extreme-neerslag curven voor de 21^e eeuw”
- Bijbehorende Weibull-constanten
- Bijbehorende grafiek

μ = Verwachtingswaarde

H =Bovengrens 95% Betrouwbaarheidsinterval

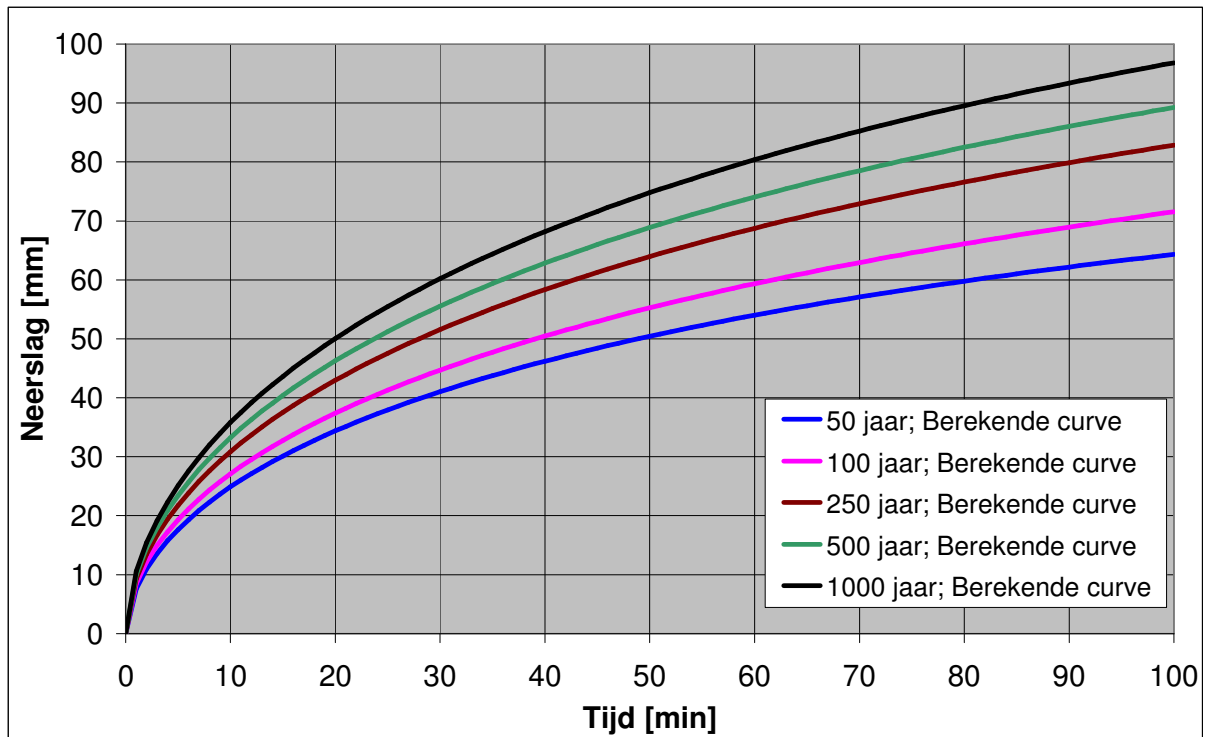
L = Ondergrens 95% betrouwbaarheidsinterval

Tijd (minuten)	50 jaar			100 jaar			250 jaar			500 jaar			1000 jaar		
	Neerslag (mm)			Neerslag (mm)			Neerslag (mm)			Neerslag (mm)			Neerslag (mm)		
	μ	H	L	μ	H	L	μ	H	L	μ	H	L	μ	H	L
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	7.59	8.93	3.34	8.50	9.84	3.89	9.29	11.03	4.61	10.01	11.94	5.24	10.57	13.08	5.80
2	10.98	12.50	5.89	12.17	13.77	6.78	13.48	15.43	7.92	14.52	16.70	8.90	15.42	18.29	9.84
3	13.58	15.20	8.13	14.96	16.74	9.30	16.70	18.76	10.79	17.98	20.30	12.03	19.18	22.24	13.31
4	15.75	17.45	10.16	17.29	19.23	11.57	19.40	21.54	13.36	20.89	23.32	14.83	22.34	25.54	16.40
5	17.65	19.43	12.03	19.33	21.40	13.65	21.77	23.98	15.71	23.44	25.95	17.38	25.11	28.43	19.22
6	19.35	21.20	13.76	21.15	23.35	15.57	23.89	26.17	17.88	25.73	28.32	19.73	27.61	31.02	21.82
7	20.89	22.82	15.37	22.81	25.14	17.36	25.83	28.17	19.89	27.82	30.48	21.91	29.88	33.40	24.23
8	22.32	24.32	16.88	24.34	26.79	19.04	27.62	30.02	21.78	29.75	32.49	23.95	31.99	35.59	26.50
9	23.64	25.72	18.29	25.76	28.33	20.62	29.29	31.75	23.56	31.54	34.36	25.88	33.95	37.64	28.62
10	24.88	27.04	19.63	27.09	29.79	22.10	30.85	33.38	25.23	33.23	36.13	27.69	35.79	39.58	30.62
11	26.05	28.29	20.89	28.35	31.17	23.50	32.33	34.93	26.82	34.82	37.80	29.40	37.52	41.41	32.52
12	27.15	29.49	22.08	29.54	32.48	24.83	33.73	36.40	28.32	36.32	39.39	31.03	39.17	43.15	34.32
13	28.20	30.62	23.21	30.67	33.73	26.09	35.06	37.80	29.74	37.75	40.91	32.58	40.74	44.82	36.03
14	29.20	31.72	24.28	31.75	34.94	27.29	36.33	39.15	31.10	39.12	42.37	34.05	42.23	46.42	37.66
15	30.15	32.77	25.30	32.78	36.09	28.43	37.54	40.44	32.39	40.43	43.77	35.45	43.67	47.95	39.21
16	31.06	33.78	26.26	33.77	37.21	29.51	38.71	41.69	33.62	41.69	45.12	36.79	45.04	49.44	40.69
17	31.94	34.76	27.18	34.73	38.29	30.55	39.83	42.90	34.80	42.89	46.43	38.07	46.36	50.87	42.11
18	32.78	35.70	28.06	35.64	39.33	31.54	40.91	44.07	35.92	44.06	47.70	39.30	47.64	52.25	43.47
19	33.60	36.62	28.89	36.53	40.34	32.48	41.95	45.20	37.00	45.18	48.92	40.48	48.86	53.60	44.77
20	34.38	37.51	29.69	37.38	41.32	33.38	42.96	46.31	38.03	46.27	50.12	41.61	50.05	54.90	46.02
21	35.14	38.38	30.45	38.21	42.28	34.24	43.94	47.38	39.02	47.32	51.28	42.69	51.20	56.17	47.22
22	35.87	39.23	31.18	39.02	43.21	35.07	44.88	48.42	39.96	48.34	52.40	43.73	52.32	57.41	48.37
23	36.58	40.05	31.87	39.80	44.12	35.86	45.80	49.44	40.87	49.32	53.51	44.73	53.40	58.62	49.48
24	37.27	40.86	32.53	40.55	45.01	36.61	46.69	50.43	41.74	50.28	54.58	45.70	54.45	59.79	50.54
25	37.94	41.64	33.17	41.29	45.87	37.34	47.56	51.40	42.58	51.22	55.63	46.62	55.47	60.94	51.57
26	38.60	42.41	33.78	42.00	46.72	38.04	48.40	52.35	43.39	52.13	56.66	47.52	56.47	62.07	52.56
27	39.23	43.16	34.36	42.70	47.55	38.70	49.22	53.28	44.16	53.01	57.66	48.38	57.44	63.17	53.51
28	39.85	43.90	34.92	43.38	48.36	39.35	50.03	54.19	44.91	53.87	58.65	49.21	58.38	64.25	54.43
29	40.45	44.62	35.45	44.05	49.15	39.96	50.81	55.08	45.63	54.72	59.61	50.01	59.30	65.31	55.31
30	41.03	45.33	35.96	44.70	49.94	40.55	51.57	55.96	46.32	55.54	60.56	50.78	60.20	66.34	56.17
31	41.60	46.03	36.45	45.33	50.70	41.12	52.32	56.81	46.99	56.34	61.49	51.53	61.08	67.36	56.99
32	42.16	46.71	36.92	45.95	51.45	41.67	53.04	57.66	47.63	57.12	62.40	52.25	61.93	68.36	57.79
33	42.71	47.38	37.37	46.55	52.19	42.20	53.76	58.49	48.25	57.89	63.30	52.94	62.77	69.34	58.56
34	43.24	48.04	37.80	47.15	52.92	42.71	54.45	59.30	48.85	58.64	64.18	53.62	63.59	70.31	59.30
35	43.76	48.69	38.22	47.73	53.63	43.19	55.14	60.10	49.43	59.38	65.05	54.27	64.40	71.26	60.02
36	44.27	49.33	38.62	48.30	54.34	43.66	55.80	60.89	49.98	60.10	65.90	54.90	65.18	72.19	60.72
37	44.77	49.96	39.00	48.85	55.03	44.12	56.46	61.66	50.52	60.80	66.74	55.51	65.95	73.11	61.39
38	45.26	50.57	39.37	49.40	55.71	44.55	57.10	62.43	51.04	61.49	67.56	56.10	66.71	74.02	62.05
39	45.73	51.18	39.73	49.94	56.38	44.97	57.73	63.18	51.54	62.17	68.38	56.67	67.45	74.91	62.68
40	46.20	51.79	40.07	50.46	57.04	45.38	58.35	63.92	52.03	62.84	69.18	57.22	68.18	75.79	63.29
41	46.66	52.38	40.39	50.98	57.70	45.77	58.96	64.65	52.49	63.49	69.97	57.76	68.89	76.66	63.88
42	47.11	52.96	40.71	51.49	58.34	46.14	59.55	65.37	52.95	64.13	70.75	58.28	69.59	77.51	64.46
43	47.55	53.54	41.01	51.98	58.98	46.51	60.13	66.09	53.39	64.76	71.52	58.78	70.28	78.35	65.01
44	47.99	54.11	41.30	52.47	59.60	46.86	60.71	66.79	53.81	65.38	72.28	59.27	70.95	79.19	65.55
45	48.41	54.67	41.58	52.96	60.22	47.19	61.27	67.48	54.22	65.99	73.03	59.74	71.61	80.01	66.08
46	48.83	55.22	41.85	53.43	60.83	47.52	61.83	68.16	54.62	66.58	73.77	60.20	72.27	80.82	66.58
47	49.24	55.77	42.11	53.90	61.43	47.84	62.37	68.84	55.00	67.17	74.50	60.64	72.91	81.62	67.08
48	49.65	56.31	42.36	54.35	62.03	48.14	62.91	69.51	55.37	67.75	75.23	61.08	73.54	82.41	67.55
49	50.04	56.84	42.60	54.80	62.62	48.43	63.44	70.17	55.73	68.32	75.94	61.50	74.16	83.19	68.02
50	50.43	57.37	42.83	55.25	63.20	48.72	63.96	70.82	56.08	68.88	76.65	61.90	74.77	83.97	68.47

Tijd (minuten)	50 jaar			100 jaar			250 jaar			500 jaar			1000 jaar		
	Neerslag (mm)			Neerslag (mm)			Neerslag (mm)			Neerslag (mm)			Neerslag (mm)		
	μ	H	L	μ	H	L	μ	H	L	μ	H	L	μ	H	L
51	50.82	57.89	43.05	55.69	63.77	48.99	64.47	71.46	56.42	69.43	77.34	62.30	75.37	84.73	68.90
52	51.19	58.41	43.27	56.12	64.34	49.25	64.97	72.10	56.74	69.97	78.03	62.68	75.96	85.48	69.33
53	51.56	58.92	43.47	56.54	64.90	49.51	65.47	72.73	57.06	70.50	78.71	63.05	76.54	86.23	69.74
54	51.93	59.42	43.67	56.96	65.46	49.76	65.96	73.35	57.37	71.03	79.39	63.41	77.11	86.97	70.14
55	52.29	59.92	43.86	57.37	66.01	50.00	66.44	73.97	57.66	71.55	80.05	63.77	77.67	87.70	70.53
56	52.64	60.42	44.05	57.78	66.55	50.23	66.91	74.58	57.95	72.06	80.71	64.11	78.23	88.42	70.91
57	52.99	60.91	44.23	58.18	67.09	50.45	67.38	75.18	58.23	72.56	81.37	64.44	78.78	89.14	71.27
58	53.33	61.39	44.40	58.57	67.63	50.67	67.84	75.78	58.50	73.06	82.01	64.76	79.32	89.85	71.63
59	53.67	61.87	44.57	58.96	68.15	50.87	68.29	76.37	58.76	73.55	82.66	65.07	79.85	90.55	71.98
60	54.01	62.35	44.73	59.35	68.68	51.08	68.74	76.96	59.02	74.03	83.29	65.38	80.37	91.24	72.31
61	54.33	62.82	44.88	59.72	69.19	51.27	69.18	77.54	59.27	74.51	83.92	65.68	80.89	91.93	72.64
62	54.66	63.28	45.03	60.10	69.71	51.46	69.62	78.11	59.50	74.97	84.54	65.96	81.40	92.61	72.96
63	54.98	63.74	45.17	60.47	70.22	51.64	70.05	78.68	59.74	75.44	85.15	66.24	81.90	93.29	73.27
64	55.29	64.20	45.31	60.83	70.72	51.82	70.47	79.25	59.96	75.89	85.77	66.52	82.40	93.96	73.57
65	55.60	64.65	45.44	61.19	71.22	51.99	70.89	79.80	60.18	76.34	86.37	66.78	82.89	94.62	73.87
66	55.91	65.10	45.57	61.55	71.71	52.16	71.30	80.36	60.39	76.79	86.97	67.04	83.37	95.28	74.15
67	56.21	65.54	45.70	61.90	72.20	52.32	71.71	80.91	60.60	77.23	87.56	67.29	83.85	95.93	74.43
68	56.50	65.99	45.82	62.24	72.69	52.47	72.12	81.45	60.80	77.66	88.15	67.54	84.32	96.57	74.70
69	56.80	66.42	45.93	62.59	73.17	52.62	72.51	81.99	61.00	78.09	88.74	67.77	84.79	97.21	74.96
70	57.09	66.86	46.04	62.93	73.65	52.77	72.91	82.52	61.18	78.51	89.31	68.01	85.24	97.85	75.22
71	57.37	67.29	46.15	63.26	74.12	52.91	73.29	83.06	61.37	78.93	89.89	68.23	85.70	98.47	75.47
72	57.65	67.71	46.26	63.59	74.59	53.05	73.68	83.58	61.55	79.34	90.46	68.45	86.15	99.10	75.71
73	57.93	68.13	46.36	63.92	75.05	53.18	74.06	84.10	61.72	79.75	91.02	68.66	86.59	99.72	75.95
74	58.21	68.55	46.45	64.24	75.52	53.31	74.43	84.62	61.89	80.16	91.58	68.87	87.02	100.33	76.18
75	58.48	68.97	46.55	64.56	75.97	53.43	74.80	85.13	62.05	80.55	92.14	69.08	87.46	100.94	76.40
76	58.75	69.38	46.64	64.87	76.43	53.55	75.17	85.64	62.21	80.95	92.69	69.27	87.88	101.54	76.62
77	59.01	69.79	46.73	65.19	76.88	53.67	75.53	86.15	62.36	81.34	93.24	69.47	88.30	102.14	76.83
78	59.27	70.20	46.81	65.49	77.33	53.78	75.88	86.65	62.51	81.72	93.78	69.65	88.72	102.74	77.04
79	59.53	70.60	46.89	65.80	77.77	53.89	76.24	87.15	62.66	82.10	94.32	69.84	89.13	103.33	77.24
80	59.79	71.00	46.97	66.10	78.21	54.00	76.59	87.64	62.80	82.48	94.85	70.01	89.54	103.91	77.44
81	60.04	71.40	47.05	66.40	78.65	54.10	76.93	88.13	62.94	82.85	95.38	70.19	89.94	104.49	77.63
82	60.29	71.79	47.12	66.70	79.08	54.20	77.27	88.62	63.07	83.22	95.91	70.36	90.34	105.07	77.82
83	60.53	72.18	47.19	66.99	79.52	54.29	77.61	89.10	63.20	83.58	96.43	70.52	90.73	105.64	78.00
84	60.78	72.57	47.26	67.28	79.94	54.39	77.94	89.58	63.33	83.94	96.95	70.68	91.12	106.21	78.18
85	61.02	72.96	47.33	67.56	80.37	54.48	78.27	90.06	63.45	84.30	97.47	70.84	91.51	106.78	78.35
86	61.25	73.34	47.39	67.85	80.79	54.57	78.60	90.53	63.57	84.65	97.98	70.99	91.89	107.34	78.52
87	61.49	73.72	47.45	68.13	81.21	54.65	78.92	91.00	63.69	85.00	98.49	71.14	92.26	107.90	78.68
88	61.72	74.10	47.51	68.41	81.63	54.74	79.24	91.47	63.80	85.34	98.99	71.28	92.63	108.45	78.84
89	61.95	74.48	47.57	68.68	82.04	54.82	79.56	91.93	63.91	85.68	99.50	71.43	93.00	109.00	79.00
90	62.18	74.85	47.63	68.95	82.45	54.89	79.87	92.39	64.02	86.02	99.99	71.56	93.37	109.54	79.15
91	62.40	75.22	47.68	69.22	82.86	54.97	80.18	92.85	64.12	86.35	100.49	71.70	93.73	110.09	79.30
92	62.63	75.59	47.73	69.49	83.26	55.04	80.49	93.30	64.22	86.68	100.98	71.83	94.08	110.63	79.45
93	62.85	75.95	47.79	69.75	83.67	55.11	80.80	93.75	64.32	87.01	101.47	71.96	94.44	111.16	79.59
94	63.06	76.32	47.83	70.01	84.07	55.18	81.10	94.20	64.42	87.33	101.95	72.08	94.79	111.69	79.73
95	63.28	76.68	47.88	70.27	84.46	55.25	81.39	94.65	64.51	87.66	102.44	72.20	95.13	112.22	79.86
96	63.49	77.04	47.93	70.53	84.86	55.31	81.69	95.09	64.60	87.97	102.92	72.32	95.48	112.75	79.99
97	63.70	77.39	47.97	70.79	85.25	55.38	81.98	95.53	64.69	88.29	103.39	72.44	95.82	113.27	80.12
98	63.91	77.75	48.02	71.04	85.64	55.44	82.27	95.97	64.78	88.60	103.86	72.55	96.15	113.79	80.25
99	64.12	78.10	48.06	71.29	86.03	55.50	82.56	96.40	64.86	88.91	104.33	72.66	96.48	114.30	80.37
100	64.32	78.45	48.10	71.53	86.42	55.56	82.84	96.83	64.94	89.21	104.80	72.77	96.81	114.81	80.49

Weibull-constanten

	50 jaar			100 jaar			250 jaar			500 jaar			1000 jaar		
	μ	H	L	μ	H	L	μ	H	L	μ	H	L	μ	H	L
alpha	0.08	0.02	0.07	0.07	0.02	0.07	0.07	0.02	0.07	0.07	0.02	0.07	0.07	0.02	0.07
beta	0.56	0.49	0.86	0.54	0.49	0.84	0.56	0.49	0.82	0.56	0.49	0.80	0.57	0.49	0.80
C	98.7	451.2	49.4	125.7	497.0	57.6	137.5	557.0	68.2	148.1	602.8	77.6	156.3	660.4	85.8



Berekende extreme-neerslagcurven, voor een herhalingsjijd van 50, 100, 250, 500 en 1000 jaar, geldend voor Nederland in de 21^e eeuw.