



Risicoprofielen overstromingen BES eilanden



Opdrachtgever



Ministerie van Infrastructuur
en Waterstaat



Risicoprofielen overstromingen BES eilanden



Eindrapport

Auteurs



PR5165.10
juli 2024

Samenvatting

In 2023 heeft het KNMI de nieuwe klimaatscenario's voor de BES eilanden gepubliceerd. Deze publicatie is de aanleiding geweest om de in 2016 opgestelde quickscan over overstromingsrisico's op de eilanden Bonaire, St. Eustatius en Saba (BES) te actualiseren. Deze studie heeft tot doel om een actueel beeld op te stellen van de kennis uit de literatuur en van de experts over de gevolgen van verschillende soorten overstromingen en de kans hierop. In deze studie wordt gekeken naar de huidige situatie en de mogelijke effecten van klimaatverandering voor de zichtjaren 2050 en 2100. De opgedane inzichten worden gebruikt om de regionale risicoprofielen voor de BES-eilanden te actualiseren. Ook zijn er lokale waterrisicoprofielen opgesteld die de kwetsbaarheid op een specifieke locatie beschrijven en zijn mogelijke maatregelen geïnventariseerd om de risico's te reduceren.

Overstromingen op de BES eilanden kunnen worden veroorzaakt door:

- Zeespiegelstijging, hierdoor komen delen van het areaal continu onder water te staan. Klimaatverandering heeft invloed op de zeespiegelstijging;
- Stormvloeden, tropische stormen of orkanen kunnen overstromingen veroorzaken. Dit gaat vaak gepaard met extreme neerslag en wind. De opstuwning kan lokaal worden versterkt door het draaien van de wind (wind reversal). Door klimaatverandering kunnen deze stormen zwaarder worden. De hoogte van de stormvloed is afhankelijk van de kracht van de wind en is een toeslag op de zeespiegelstijging;
- Neerslag, als losse gebeurtenis of onderdeel van een tropische storm of orkaan. Dit kan leiden tot overstromingen van lageregelegen delen van de eilanden. Daarnaast kan extreme neerslag modderstromen en erosie veroorzaken;
- Tsunami's, veroorzaakt door een vulkaanuitbarsting of aardbeving in de omgeving.

De gevolgen van overstromingen worden in deze studie primair uitgedrukt in een overstroomd areaal. De impact van overstromingen is ook afhankelijk van het landgebruik. Door de verschillende stakeholders op de eilanden kan in een vervolg worden bepaald wat de impact is van de overstromingen als het landgebruik wel wordt meegenomen.

Ophalen van kennis en leemtes in de kennis identificeren

Ten opzichte van de Quickscan uit 2016 is er meer informatie beschikbaar over 1) de opzet van waterstanden bij een stormvloed, 2) de verwachte zeespiegelstijging en 3) de effecten van klimaatverandering bij verschillende klimaatscenario's. Er is echter geen statistiek beschikbaar over tsunami's, wind reversals en extreme neerslag in een toekomstig klimaat. De omvang van de overstromingen uit zee door stormvloeden en tsunami's neemt toe als de zeespiegel stijgt, de gevolgen zijn een toeslag op wat onder normale situaties al overstroomd is. Voor de zeespiegelstijging is de mediaan van het hoge uitstootscenario van de KNMI'23 klimaatscenario's gebruikt, hier zit een onzekerheidsband omheen. Voor het zichtjaar 2050 is de zeespiegelstijging bij het lage en hoge uitstootscenario's bijna gelijk, voor het zichtjaar 2100 is de zeespiegelstijging in het hoge uitstoot scenario gemiddeld 33 cm hoger dan in het scenario met lage uitstoot. Wateroverlast, als gevolg van neerslag, treft ook plaatsen die niet overstromen vanuit zee. Daarnaast kan neerslag modderstromen (zoals op Saba) en sedimentuitspoeling naar zee (schadelijk voor het koraal) veroorzaken.

Voor Bonaire blijkt dat de toekomstige zeespiegelstijging na het zichtjaar 2050 dominanter wordt voor de overstromingsrisico's dan de golfopzet door een stormvloed.

Zowel de overstroming uit zee door zeespiegelstijging (zichtjaar 2050 en 2100) als een eens in de 100 jaar stormvloed (huidig klimaat en toekomstig klimaat) kan leiden tot het overstromen van het zuidelijke deel van Bonaire (de zoutpannen) en een aantal objecten (zoals de slavenhuisjes en een aantal gebouwen) direct langs de kust. Extra schade kan optreden door wind reversals, al is de omvang hiervan onbekend. Cruciale infrastructuur op Bonaire wordt niet getroffen door de overstromingen uit zee, dit geldt voor zowel zeespiegelstijging als stormvloeden voor de lage en hoge uitstootscenario's voor de zichtjaren 2050 en 2100. Echter bij een tropische storm of orkaan kan ook de wind en neerslag leiden tot flinke schade op Bonaire.

Voor Saba en Sint Eustatius zijn de effecten van stormvloeden ongeveer gelijk aan die door overstromingen door alleen zeespiegelstijging. Het gebied, dat kwetsbaar is voor overstromingen vanuit zee, is echter kleiner vanwege de snel oplopende maaiveldhoogte. Wel staan er cruciale objecten op kwetsbare laaggelegen locaties. Over de omvang en kans op tsunami's is weinig informatie bekend.

Tabel 1: Effect van klimaatverandering (gegeven het hoge uitstootscenario voor zeespiegelstijging) op overstromingsdiepte en overstroomd areaal voor Bonaire. Voor tsunami's is rekening gehouden met een kleine kans maar grote impact. Voor neerslag zijn er geen klimaatscenario's beschikbaar. Voor zeespiegelstijging wordt de mediaan van het hoge uitstootscenario getoond, er zit een onzekerheidsband rondom dit getal.

	Overstromingsdiepte t.o.v. huidig zeestand/ neerslaghoeveelheid			Toename areaal overstroomd gebied		
	Huidig	2050	2100	Huidig	2050	2100
Zeespiegelstijging	0 m	0,27m	0,85m	0%	2,4%	3,8%
Overstroming uit zee door stormvloeden (T100)	0,26m	0,53m	1,11m	2,4%	3,0%	5,2%
Overstroming uit zee door Tsunami's (T1000)	5m	5,27m	5,85m	20%	21%	23%
Neerslag eens per jaar	47 mm	Onbekend	Onbekend	11% ¹	-	-
Neerslag eens per 100 jaar	166 mm	Onbekend	Onbekend	25% ¹	-	-

Ten opzichte van de schattingen in de Quicksan in 2016 wordt een tsunami met een hoogte van 20 meter te extreem geacht. In de literatuur is een tsunami van 5 meter hoogte beschreven, deze is al van meerdere eeuwen geleden. In de recente historie is er geen tsunami bekend. Daarom is uitgegaan van een kans van orde grootte 1/1.000 per jaar voor een hoogte van 5 meter.

¹ Voor neerslag is in deze studie voor Bonaire met een globaal model het overstroomd oppervlak geschat om een eerste indruk te krijgen.

Actualisatie van de regionale risicoprofielen

De regionale risicoprofielen, die de risico's duiden voor ieder eiland, voor het huidige klimaat zijn met deze informatie geactualiseerd. In de profielen wordt onderscheid gemaakt in de kans van voorkomen en impact van extreme neerslag, stormvloed (met overstromingen uit zee en neerslag) en tsunami's. Het effect van klimaatverandering op neerslag is niet bekend voor de BES-eilanden. Ook is er geen neerslagstatistiek voor het huidige klimaat doordat er geen langjarige meetreeksen beschikbaar zijn. Uit de resultaten blijkt al dat bij vaak voorkomende situaties er veel sprake is van wateroverlast door neerslag, dat komt ook overeen met de praktijk.

Om de kwetsbaarheid te verkleinen is het dan ook het meest effectief om de afwatering voor vaak voorkomende situaties al te verbeteren.

De impact is gebaseerd op het overstroomd oppervlak in combinatie met het landgebruik. Het overstroomd oppervlak van overstromingen uit zee, is beschikbaar op basis van overstromingssimulaties voor Bonaire. De overige gevolgen zijn bepaald op basis van een (grote) hoogtekartaart. Voor neerslag is er met een eenvoudig model een schatting gemaakt. Met deze informatie is de impact op territoriale, fysieke, economische, ecologische veiligheid, en de sociale en politieke stabiliteit, bepaald. In dit onderzoek is het overstroomd oppervlak bepaald voor overstromingen vanuit zee en door neerslag. Voor de impact op de andere factoren is gebruikgemaakt van de eerdere studies.

Voor Saba en Sint Eustatius geeft dit geen nieuwe inzichten ten opzichte van de quickscan voor de huidige situatie. Alhoewel de omvang van de overstroming uit zee klein is, worden er wel relatief veel cruciale objecten getroffen, waardoor de impact groot is. Voor 2050 en 2100 kan de zeespiegelstijging ertoe leiden dat cruciale infrastructuur dagelijks al overstroomd. De beschikbare gegevens nu zijn te grof om hier gedetailleerde uitspraken over te doen. Hier zal specifiek naar moeten worden gekeken, evenals naar mogelijke maatregelen voor beschermen of verplaatsen naar hogere gronden. Bij neerslag kunnen ook modderstromen optreden, die een (lokaal) gevaar kunnen zijn.

Voor Bonaire is het regionaal risicoprofiel verfijnd door, per klasse van waarschijnlijkheid, de gevolgen in te schatten. Met de KNMI'23 scenario's zijn ook de regionale risicoprofielen opgesteld voor het toekomstige klimaat (zichtjaar 2050 en 2100). Zeespiegelstijging zal ertoe leiden dat gebieden (in het zuiden) overstroomd, echter het gaat hierbij niet om cruciale objecten of grote bebouwde gebieden. Er overstroomd wel enkele gebouwen en toeristische locaties. Voor de overstromingen uit zee, tijdens een stormvloed in 2050 en 2100, gelden dezelfde conclusies. De combinatie met wind en neerslag maken dat de gevolgen bij een tropische storm of orkaan zeer groot kunnen zijn. Deze gevolgen zullen toenemen als het stedelijk gebied op de laaggelegen delen verder zal groeien.

Voor Bonaire zijn ook lokale waterrisicoprofielen opgesteld, deze geven aan wat er op een bepaalde locatie kan gebeuren en zijn relevant voor ruimtelijke ontwikkelingen. Dit was niet mogelijk voor Saba en Sint Eustatius, omdat er voor deze eilanden geen ruimtelijke informatie beschikbaar is over de kansen en gevolgen van overstromingen.

Mogelijke maatregelen

Voor overstromingen vanuit zee kunnen maatregelen worden getroffen in de laag preventie (keringen, mangrove en koraalrif herstellen), gevolgenbeperking (ruimtelijk beleid en aanpassen van bestaande bebouwing), crisisbeheersing en herstel. Sommige maatregelen uit de laag preventie, zoals het versterken van mangroves en het koraalrif, bieden alleen voor stormvloed en meerwaarde omdat ze golven breken. Voor toekomstige zeespiegelstijging is het effect echter beperkt omdat het gebied erachter alsnog volloopt.

Voor extreme neerslag is een eerste stap dat het huidige systeem van rooien, salina's en het afwateringssysteem goed functioneert en mogelijk verbeterd wordt. Denk hierbij aan extra berging of afvoercapaciteit creëren om bottlenecks in het stedelijk gebied te verhelpen.

Voor tsunami's is het heel lastig om preventieve maatregelen te treffen, omdat de kans op een tsunami erg klein is maar de golfhoogte juist heel hoog. Wel kunnen er maatregelen worden getroffen om de gevolgen te beperken (cruciale functies op hoger gelegen delen), crisisbeheersing (vluchtroutes en rampenplan; er is al een early warning procedure van het KNMI) en het bewustzijn verhogen (voorlichting geven).

Conclusies en aanbevelingen

De studie geeft inzicht in de effecten van klimaatverandering op de BES-eilanden en wat mogelijke maatregelen zijn. De inzichten kunnen op korte termijn worden verbeterd op basis van het nieuwe hoogtemodel (AHN) en op langere termijn door (aanbevolen onderzoek naar) nieuwe inzichten in neerslagstatistiek en tsunami's die vertaald kunnen worden naar overstromingsmodellen.

Het is duidelijk dat klimaatverandering impact zal hebben op de BES-eilanden.

Diverse maatregelen hebben betrekking op het ruimtelijke domein, waarmee nu ook aan de slag gegaan kan worden. Hierbij is betrokkenheid van de lokale overheden, de private partijen en de bevolking van belang, bij de keuze van maatregelen. Bij de keuzes van maatregelen gaat het ook om de vraag wat de risico's zijn die men bereid is te accepteren op verschillende niveaus (rijk, gemeente, privaat). Deze keuzes hebben betrekking op ruimtelijk beleid, zoals renovaties en nieuwbouw van hotels, havens en cruciale objecten.

Ook wordt aanbevolen om onderzoek te doen naar het verbeteren van de afwatering van neerslag voor vaak voorkomende situaties. Denk hierbij aan het herstel van rooien, onderhoud van het bestaande afwateringssysteem en voldoende berging behouden in de salina's.

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Aanleiding	1
1.2	Doelstelling	1
1.3	Leeswijzer	1
2	Kenmerken BES eilanden	3
2.1	Saba	3
2.2	Sint Eustatius	4
2.3	Bonaire	5
3	Uitgangspunten	7
3.1	Verschillende type overstromingen	7
3.2	Risicoprofielen	8
4	Inventarisatie beschikbare kennis	11
4.1	Samenvatting beschikbare kennis	11
5	Beschikbare scenario's en kaartmateriaal	17
5.2	Geïnundeerd oppervlak	22
6	Actualisatie risicoprofielen	23
6.1	Regionale risicoprofielen (per eiland)	23
6.2	Locatie specifieke waterrisicoprofielen	27
7	Inventarisatie van maatregelen	31
7.1	Maatregelen tegen overstromingen vanuit zee	32
7.2	Maatregelen tegen wateroverlast door neerslag	34
7.3	Maatregelen tegen tsunami's	34
8	Discussie en aanbevelingen	36
8.1	Conclusies	36
8.2	Discussie	37
8.3	Aanbevelingen	38
9	Referenties	39

	Bijlagen	41
A	Ophalen beschikbare kennis	41
B	Kaartmateriaal	51
C	Waterrisicoprofielen	57

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

In 2016 is een Quickscan over overstromingsrisico's opgesteld voor de eilanden Bonaire, St. Eustatius en Saba (BES). In 2023 zijn door het KNMI de nieuwe klimaatscenario's voor de BES eilanden opgesteld. Dit is aanleiding geweest om de eerdere Quickscan te actualiseren. Hierbij zijn ook nieuwe inzichten in scenario's en gevolgen meegenomen en is een overzicht opgesteld van mogelijke maatregelen.

1.2 Doelstelling

De doelstelling van deze studie is:

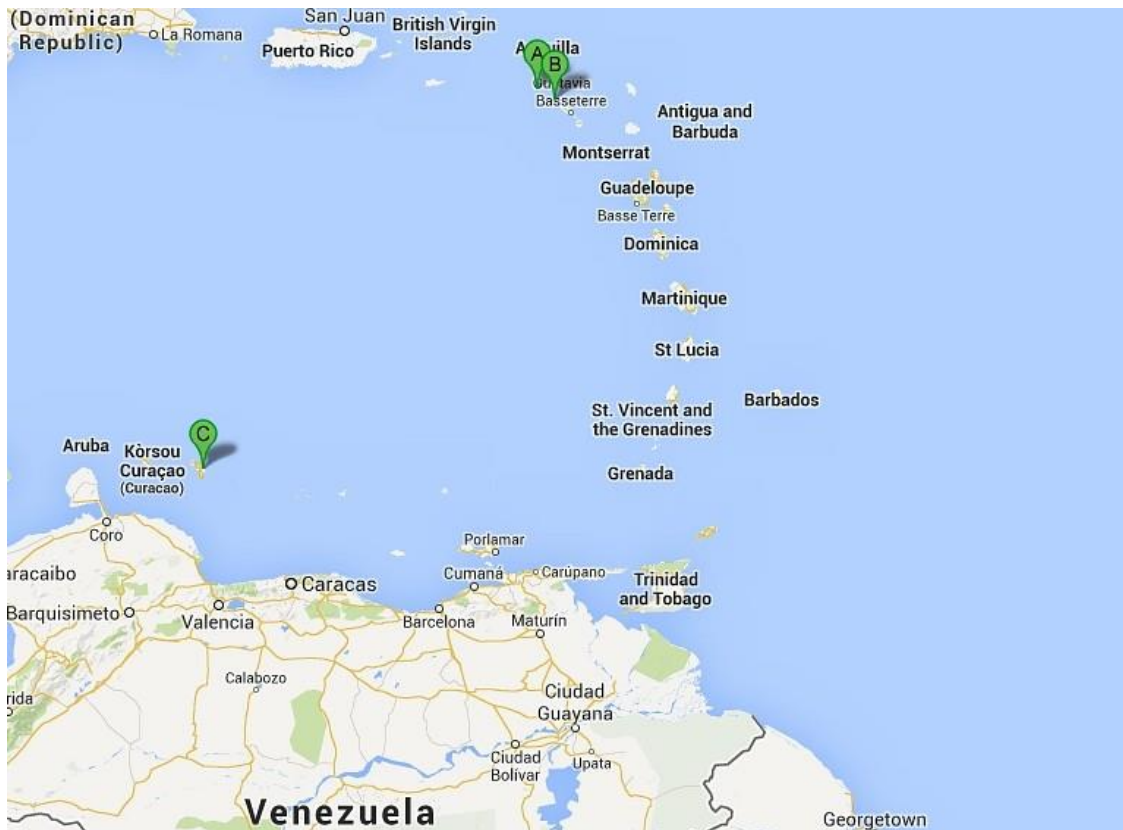
- Het beschrijven van de beschikbare kennis over overstromingsscenario's en de kans van voorkomen voor de BES eilanden in relatie tot klimaatverandering, inclusief leemtes en mogelijke maatregelen om de kans of de gevolgen te reduceren;
- Het actualiseren van risicoprofielen voor verschillende zichtjaren en klimaatscenario's.

1.3 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 worden de BES eilanden beschreven en worden de belangrijkste kenmerken voor deze studie benoemd. In hoofdstuk 3 worden de typen overstromingen die we beschouwen gedefinieerd en wordt het risicoprofiel uitgelegd. Hoofdstuk 4 geeft een beschrijving van de inventarisatie die is uitgevoerd om de meest actuele kennis, literatuur en data te verzamelen over de verschillende overstromingsrisico's. De bijbehorende kaarten worden gepresenteerd in hoofdstuk 5. In hoofdstuk 6 wordt deze informatie gebruikt om de regionale risicoprofielen per eiland en enkele locatie specifieke waterrisicoprofielen voor Bonaire op te stellen. In hoofdstuk 7 worden maatregelen waaronder nature-based solutions geïnventariseerd en geordend volgens het principe van meerlaagseveiligheid. Dit geeft een beeld van welke maatregelen er beschikbaar zijn om de verschillende overstromingsrisico's te verminderen. Deze rapportage wordt afgesloten met een discussie en de aanbevelingen in hoofdstuk 8.

2 Kenmerken BES eilanden

De eilanden Bonaire, Saba en St. Eustatius zijn sinds 10 oktober 2010 bijzondere gemeenten van Nederland. Ze worden ook wel aangeduid als Caribisch Nederland. Bonaire ligt 90 kilometer buiten de kust van Venezuela, op ongeveer 810 kilometer afstand van Saba en St. Eustatius (Figuur 1). De eilanden Saba en St. Eustatius liggen bovenwinds en zijn vulkaaneilanden. Bonaire ligt benedenwinds en bestaat vooral uit koraalkalk.



Figuur 1: Ligging eilanden Caribisch Nederland; Saba (A), St. Eustatius (B) en Bonaire (C).

2.1 Saba

Saba is het kleinste eiland en telt circa 2000 inwoners en een oppervlakte van 13 km². Het eiland is relatief hoog gelegen ten opzichte van de zee. Het hoogste punt van het eiland is de top van de slapende vulkaan Mount Scenery en ligt op 877 meter. Door het hoogteverschil en de steile hellingen is erosie een aandachtspunt op Saba. De ondergrond van het eiland bestaat uit vulkanisch gesteente. Het eiland is bereikbaar via een vliegveld en een haven. Het vliegveld is alleen geschikt voor kleine vliegtuigen en is gesloten voor reguliere vluchten. In de laag gelegen haven zijn een duikschool, een restaurant en het drinkwaterbedrijf gevestigd, van waaruit het gehele eiland van drinkwater wordt voorzien. Er is een nieuwe elektriciteitscentrale gebouwd op de weg naar de haven, op een hogere locatie (ruim 80 meter boven de zeespiegel) dan waar de oude elektriciteitscentrale stond. Deze locatie is mede gekozen om de kwetsbaarheid te verkleinen voor stormen en hoge golven. De oude centrale moest bij slecht weer worden uitgeschakeld om te voorkomen dat het zeezout de motoren beschadigde.

Het eiland kent twee nationale parken: Saba National Marine park, gelegen rondom het eiland en Saba National Park, gelegen op de vulkaan Mount Scenery.



Figuur 2: Overzichtskartaart Saba.

2.2 Sint Eustatius

St. Eustatius is wat groter dan Saba en heeft circa 3600 inwoners en een oppervlakte van 21 km². Het is net als Saba bovenwinds gelegen. St. Eustatius bestaat uit een slapende vulkaan in het zuidoosten van het eiland, The Quill, en een uitgedoofd vulkanisch gebied in het noorden van het eiland met daartussen een betrekkelijk vlak terrein. De hoofdstad Oranjestad telt ongeveer 1000 inwoners en ligt op ongeveer 50 meter hoogte. Een aantal gebouwen staan op een klif. Kliferosie, veroorzaakt door regen, is een aandachtspunt. Lower Town ligt aan de voet van deze klif, direct aan zee. Hier is onder andere belangrijk archeologisch erfgoed gelegen, een aantal hotels en restaurants, een benzinestation en de elektriciteitsfabriek en waterfabriek (STUCO). Een solar park voorziet voor een deel in de elektriciteit op St. Eustatius. Het gaat nu om zo'n 20 à 25% en met de geplande verdubbeling van de capaciteit in de toekomst tot zo'n 50%. Dit maakt de elektriciteitsvoorziening mogelijk iets minder kwetsbaar. De dieselgeneratoren blijven als redundantie wel noodzakelijk. Het vliegveld ligt in het midden van het eiland op de 'cultuurvlakte', op ongeveer 35 meter boven zeeniveau. De olieterminal (NuStar) ligt in het noorden. De meeste delen hiervan liggen op 20 meter hoogte, maar een aantal voorzieningen liggen op en aan zee. NuStar heeft ook een watervoorziening die vergelijkbaar is met de capaciteit van STUCO.

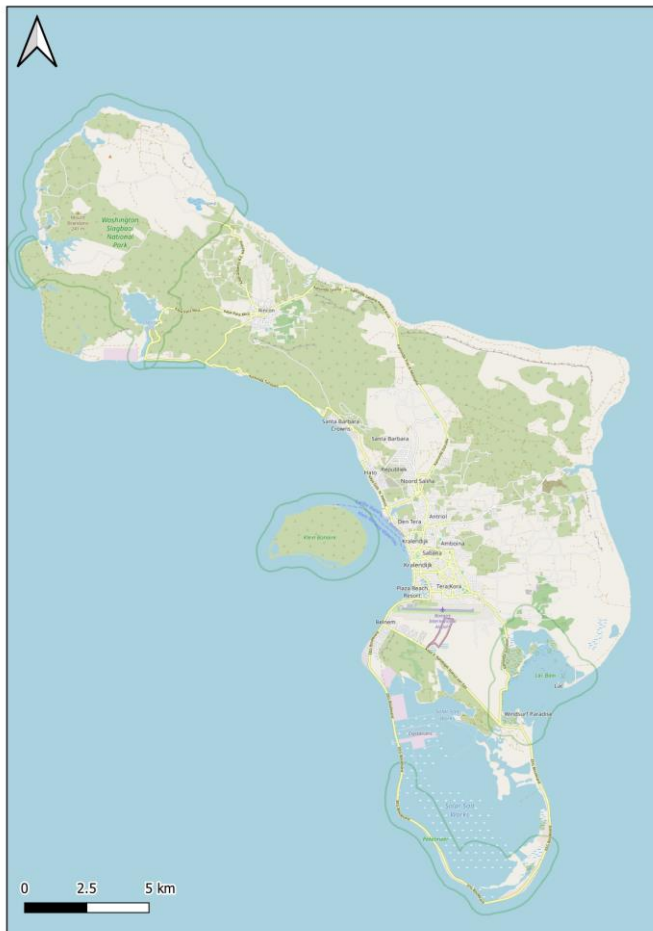
Het eiland kent twee nationale parken: St. Eustatius National Marine Park, gelegen rondom het eiland en Quill/Boven National Park, gelegen op de vulkaan The Quill.



Figuur 3: Overzichtskartaal Sint Eustatius.

2.3 Bonaire

Bonaire is het grootste van de drie eilanden en heeft ca. 24.000 inwoners en een oppervlakte van 288 km². Bonaire is relatief vlak. In het noorden ligt het Washington Slagbaai Nationaal Park, met verschillende bergen. Bergtop de Brandaris is met een hoogte van 241 meter het hoogste punt. Het zuiden van Bonaire ligt lager, veelal lager dan 10 meter. De hoofdstad Kralendijk ligt in het lager gelegen deel van het eiland. Langs de kust bij Kralendijk is veel bebouwing aanwezig. De olieterminal van BOPEC ligt in het noordwesten tussen 10 en 20 meter boven de zeespiegel. De pier met bijhorende voorzieningen zoals pijpleidingen liggen lager. Het terrein van Contour Global (water en energie producent) ten oosten van BOPEC ligt tussen 2 en 10 meter boven zeeniveau. De elektriciteitscentrale en drinkwaterfabriek (Contour Global) ligt naast het terrein van BOPEC (oostzijde), het innamepunt van zeewater t.b.v. de drinkwatervoorziening bevindt zich ten noorden van de haven. Het vliegveld van Bonaire is een internationaal vliegveld. Ook de wateren rondom Bonaire zijn een nationaal park (het Bonaire National Marine Park). In dit park liggen verschillende natuurgebieden: Klein Bonaire (het eiland ten westen van Bonaire), Lac (lagune in het zuidoosten van Bonaire), Pekelmeer (flamingoreservaat bij de zoutwingebieden in het zuiden van Bonaire).



Figuur 4: Overzichtskaart Bonaire.

3 Uitgangspunten

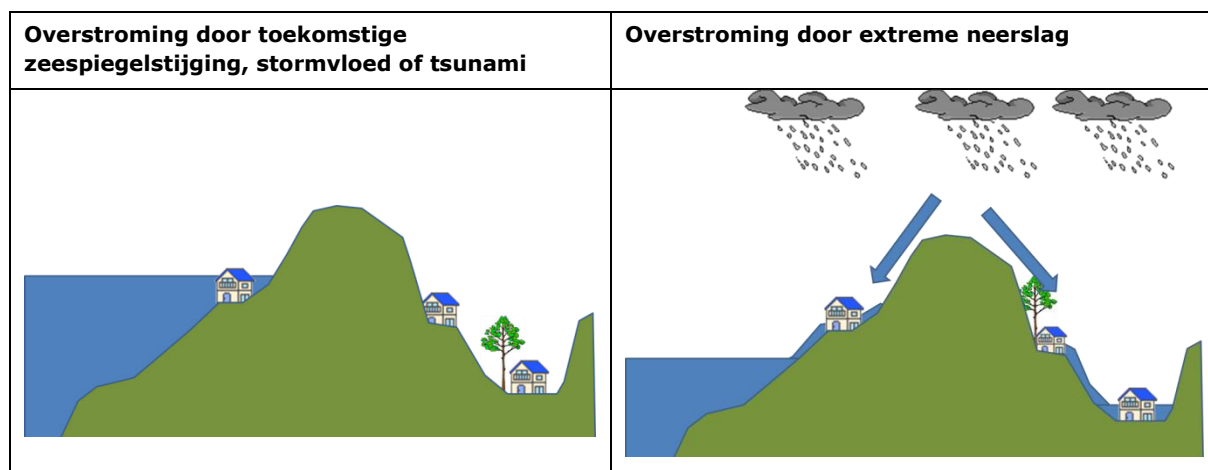
3.1 Verschillende type overstromingen

We volgen in deze rapportage dezelfde definities en oorzaken van overstromingen als in de QuickScan uit 2016 [2]. Onder een overstroming verstaan we in dit rapport: het overstromen van delen van het eiland als gevolg waarvan significante schade optreedt, cruciale voorzieningen en infrastructuur uitvallen, en/of waarbij slachtoffers kunnen vallen. Bij cruciale voorzieningen en infrastructuur gaat het bijvoorbeeld om uitval van drinkwater- en elektriciteitsvoorzieningen, telecomvoorzieningen, schade aan vliegvelden, ziekenhuizen, scholen, olieterminals, havens en wegen. Mogelijke effecten van een overstroming zijn een gebrek aan drinkwater en voedsel, schade aan woningen, slachtoffers, onbereikbaarheid van (delen van) de eilanden, en stilstand van het economische en maatschappelijke verkeer.

In dit rapport maken we onderscheid tussen twee typen overstromingen, weergegeven in Figuur 5:

1. Een overstroming vanuit zee, dit kan worden veroorzaakt door:
 1. Toekomstige zeespiegelstijging, laaggelegen gebieden op de eilanden kunnen dan dagelijks onder water staan voor de zichtjaren 2050 en 2100;
 2. Stormvloed als gevolg van een storm of orkaan (huidig situatie, 2050, 2100), dit is dus een extra opslag op de zeespiegelstijging;
 3. Tsunami veroorzaakt door een vulkaanuitbarsting of aardbeving.
2. Een overstroming door extreme neerslaggebeurtenissen, als gevolg een neerslag die hoort bij een tropische storm of orkaan.

Het is ook mogelijk dat een combinatie van bovenstaande typen overstromingen gelijktijdig optreden, bijvoorbeeld bij een tropische storm of orkaan zal er golfopzet zijn en extreme neerslaghoeveelheden.



Figuur 5: Twee overstromingstypen.

Voor dit onderzoek inventariseren we de effecten van klimaatveranderingen op deze typen overstromingen en brengen we in kaart welke gebieden extra zullen inunderen bij de zichtjaren 2050 en 2100 voor verschillende klimaatscenario's.

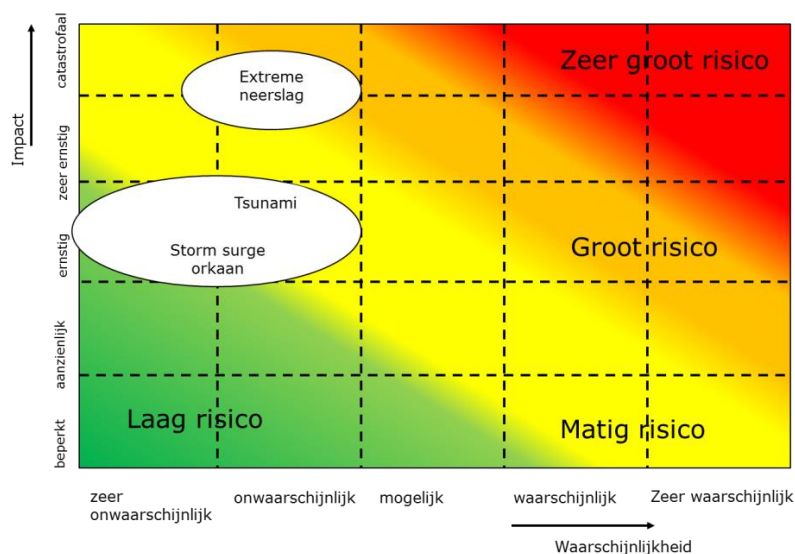
Het landgebruik zal in de toekomst waarschijnlijk veranderen waardoor de gevolgen van een overstroming kunnen veranderen. De gevolgen kunnen bijvoorbeeld groter worden als de bevolking en daarmee het stedelijke gebied in laaggelegen delen groeit. Wij hebben op dit moment geen zicht op deze veranderingen in landgebruik en daarom zijn ze niet in deze studie meegenomen als we naar de zichtjaren 2050 en 2100 kijken. Wel merken we op dat met name op Bonaire er de afgelopen decennia veel bebouwing bij is gekomen.

3.2 Risicoprofielen

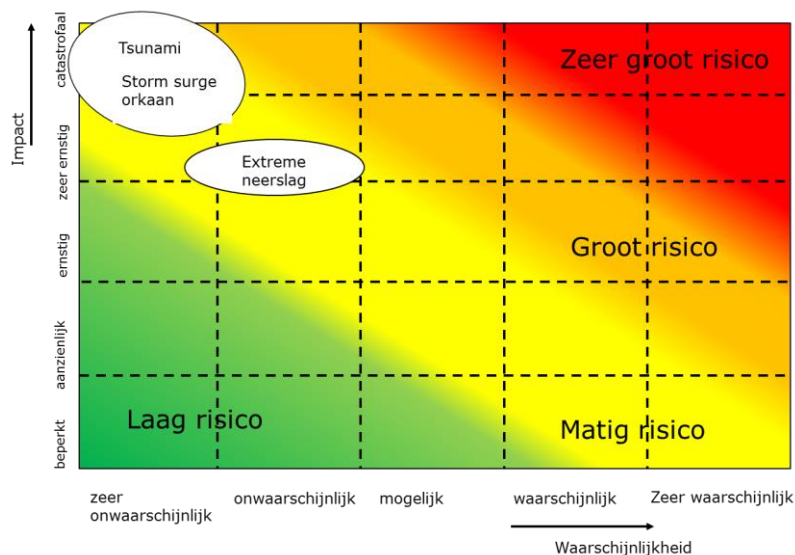
De gecombineerde effecten van de verschillende type overstromingen vertalen we naar risico-profielen. Voor een bepaald zichtjaar (en klimaatscenario) kan een risicoprofiel worden opgesteld waaruit de bijdrage van de verschillende vormen van overstromingen blijken. Deze risicoprofielen geven informatie over kansen op type overstromingen en de effecten ervan, op basis waarvan keuzes gemaakt kunnen worden over bescherming, ruimtelijke ingrepen, crisisbeheersing of het accepteren van risico's.

We brengen de overstromingsrisico's in beeld door risicoprofielen op te stellen. In deze studie maken we een onderscheid tussen twee type risicoprofielen:

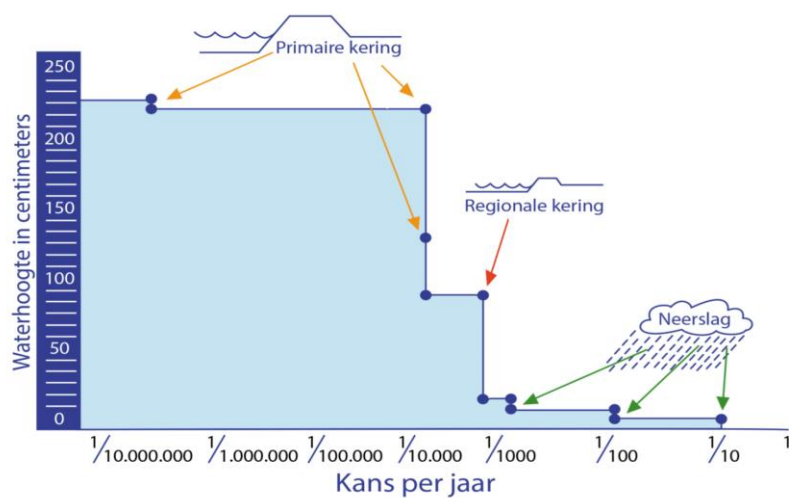
1. Een **regionaal risicoprofiel** dat per eiland de verschillende overstromingsrisico's samenvat. Deze geven dus informatie op schaalniveau van ieder eiland. We maken hierbij gebruik van een vereenvoudigde vorm van de methode Nationale Risico Beoordeling (NBR-methode) [14]. Een risicoprofiel geeft per type overstroming de kans van voorkomen en het gevolg aan. De combinatie van beide is het overstromingsrisico. In 2012/2013 zijn onder begeleiding van de veiligheidsregio Haaglanden voor ieder van de drie eilanden de eerste risicoprofielen opgesteld. Deze risicoprofielen zijn veel breder en geven ook inzicht in risico's door infectieziekten, incidenten met gevaarlijke stoffen, vliegtuigrampen en een storing in de stroom- en watervoorziening. De benodigde kennis is hierbij ingebracht door de eilanden zelf. Vervolgens is door HKV in 2016 een quickscan [2] uitgevoerd om specifiek de overstromingsrisico's uit dit risicoprofiel beter in kaart te brengen. Op basis van literatuuronderzoek en interviews zijn vervolgens regionale risicoprofielen voor de drie eilanden opgesteld. Deze zijn te vinden in Figuur 6 en Figuur 7.
2. Een (lokaal) **waterrisicoprofiel** dat voor één specifiek locatie op een eiland het overstromingsrisico weergeeft door de waterdiepte en kans op een overstroming voor verschillende scenario's te combineren. In Figuur 8 is een voorbeeld weergegeven van een waterrisicoprofiel opgesteld voor Europees Nederland. Dit is mogelijk voor locaties op Bonaire omdat er voor dit eiland kaartmateriaal beschikbaar is dat inzicht geeft in de gevolgen van overstromingen. Deze kaarten zijn niet beschikbaar voor Saba en St. Eustatius, waardoor het niet mogelijk is om voor deze eilanden lokale waterrisicoprofielen op te stellen. De waterrisicoprofielen bestaan uit de gevolgen van de mogelijke scenario's die leiden tot een overstroming op deze locatie. Elk scenario heeft een kans van voorkomen en een gevolg (waterdiepte). Door alle scenario's te combineren kan een lijn worden opgesteld voor elk type overstroming voor een bepaald zichtjaar en klimaatscenario. De scenario's voor het waterrisicoprofiel worden in het volgende hoofdstuk geordend in onderstaand risicodiagram. Hierin komen de verschillende type overstromingen terug en worden scenario's verzameld bij verschillende herhalingscycli, variërend van dagelijks tot een eens in de 1000 jaar.



Figuur 6: Regionale risicoprofiel voor Saba en Sint Eustatius uit quickscan 2016 [2].



Figuur 7: Regionale risicoprofiel voor Bonaire uit quickscan 2016 [2].



Figuur 8: Voorbeeld waterrisicoprofiel (voor Europees Nederland).

4 Inventarisatie beschikbare kennis

4.1 Samenvatting beschikbare kennis

Om de meest recente kennis over de verschillende overstromingsrisico's op te halen zijn verschillende databronnen, artikelen, rapporten en experts geraadpleegd. Een samenvatting hiervan is te vinden in Figuur 9. In bijlage A wordt eerst de informatie over klimaatverandering uit de KNMI'23 klimaatscenario's op de BES eilanden samengevat en vervolgens wordt de opgehaalde kennis per overstromingsrisico samengevat en komen daarna deze bronnen terug bij het ophalen van de kennis per type overstroming. De inundatiekaarten voor Bonaire zijn ontsloten via de Klimaateffectatlas en komen uit het onderzoek "The impact of Climate Change on Coastal inundation on Bonaire" van de VU (2022). Het onderzoek van de VU wordt in bijlage A vergeleken met de KNMI scenario's en daarna verder toegelicht. De kaarten zijn vervolgens opgenomen in hoofdstuk 5.

Gebruikte (data)bronnen	Literatuur	Interviews
<ul style="list-style-type: none"> • KNMI'23 scenario's (2023) • Quickscan HKV (2016) • Inundatiekaarten via klimaateffectenatlas • Luchtfoto's (NSO dataportaal) • Hoogtemodel opgehaald 	<ul style="list-style-type: none"> • The Impacts of Climate Change on Coastal Inundation on Bonaire, VU/Greenpeace (2022) • WUR: scoping studie NBS maatregelen op Bonaire (2023) • Integraal waterbeheer op Bonaire (WL, HHNK, WRIJ) (2023) • Advies klimaattafel: 'het is nooit te laat' (Ed Nijpels) (2023) • Improving our understanding of future tropical cyclone intensities in the Caribbean using a high-resolution regional climate model • A prehistoric tsunami induced long-lasting ecosystem changes on a semi-arid tropical island • Nieuwsartikelen 	<ul style="list-style-type: none"> • KNMI experts tsunami's en seismologie • KNMI expert klimaatverandering/wateroverlast • Expert waterveiligheid Curaçao • Medewerker ZonMW project

Figuur 9: Overzicht bronnen, literatuur en interviews.

Op basis van de opgehaalde kennis is de onderstaande tabel gevuld met de bronnen voor de verschillende scenario's. De getallen voor de verschillende type overstromingen voor het huidig klimaat, zichtjaar 2050 en 2100 zijn vervolgens ingevuld in Tabel 3 en

Tabel 4.

Hierin is het hoge uitstoot scenario² uit de KNMI klimaatscenario's gebruikt voor de zeespiegelstijging in het toekomstige klimaat. Dit scenario is gekozen omdat dit een beeld geeft van de bovengrens van de klimaatscenario's en omdat de verschillen zeker voor het zichtjaar 2050 klein zijn. Hierna worden deze cijfers en de bronnen per type overstroming kort toegelicht.

² SSP5-8.5 IPCC scenario

Tabel 2: Bronnen voor scenario's voor risicoprofielen

	Dagelijks (zee- spiegel- stijging)	1/1 jaar	1/2 jaar	1/10 jaar	1/50 jaar	1/100 jaar	1/1000 jaar
Stormvloeden	ZSS KNMI'23 en kaarten VU	COAST- RP	COAST-RP	COAST- RP	COAST-RP	kaarten VU	COAST-RP
Tsunami's	ZSS KNMI'23 en kaarten VU		-	-	-	-	Schatting experts uit interviews
Neerslag	ZSS KNMI'23 en kaarten VU	Statistiek Curaçao en hoogte model	Historische gebeurtenis	Statistiek Curaçao en hoogte model	Statistiek Curaçao en hoogte model	Statistiek Curaçao en hoogte model	Statistiek Curaçao en hoogte model

Tabel 3: Neerslaghoeveelheden en stijging zeespiegel bij verschillende type overstromingen voor Bonaire voor verschillende zichtjaren. Alle cijfers voor toekomstig klimaat zijn voor het hoge uitstoot scenario.

	Dagelijks (zee- spiegel- stijging)	1/1 jaar	1/2 jaar	1/10 jaar	1/50 jaar	1/100 jaar	1/1000 jaar
Huidig klimaat							
Stormvloeden	0 m	0,19 m	0,20 m	0,22 m	0,24 m	0,26 m	0,41 m
Tsunami's	0 m	-	-	-	-	-	5 m
Neerslag	0 m	47 mm	62 mm	102 mm	146 mm	166 mm	230 mm
Zichtjaar 2050							
Stormvloeden	0,27 m	0,46 m	0,47 m	0,49 m	0,51 m	0,53 m	0,68 m
Tsunami's	0,27 m	-	-	-	-	-	5,27 m
Neerslag	0,27 m	47 mm	62 mm	102 mm	146 mm	166 mm	230 mm
Zichtjaar 2100							
Stormvloeden	0,85 m	1,04 m	1,05 m	1,07 m	1,09 m	1,11 m	1,26 m
Tsunami's	0,85 m	-	-	-	-	-	5,85 m
Neerslag	0,85 m	47 mm	62 mm	102 mm	146 mm	166 mm	230 mm

Tabel 4: Neerslaghoeveelheden en stijging zeespiegel bij verschillende type overstromingen voor Sint Eustatius en Saba voor verschillende zichtjaren. Alle cijfers voor toekomstig klimaat zijn voor het hoge uitstoot scenario.

	Dagelijks (zee- spiegel- stijging)	1/1 jaar	1/2 jaar	1/10 jaar	1/50 jaar	1/100 jaar	1/1000 jaar
Huidig klimaat							
Stormvloeden	0 m	0,15 m	0,17 m	0,24 m	0,48 m	0,59 m	0,86 m
Tsunami's	0 m	-	-	-	-	-	5 m
Neerslag	0 m	-	-	-	-	-	-
Zichtjaar 2050							
Stormvloeden	0,23 m	0,38 m	0,4 m	0,47 m	0,71 m	0,82 m	1,09 m
Tsunami's	0,23 m	-	-	-	-	-	5,23 m
Neerslag	0,23 m	-	-	-	-	-	-
Zichtjaar 2100							
Stormvloeden	0,78 m	0,90 m	0,92 m	0,99 m	1,23 m	1,34 m	1,61 m
Tsunami's	0,78 m	-	-	-	-	-	5,78 m
Neerslag	0,78 m	-	-	-	-	-	-

4.1.1 Overstroming door toekomstige zeespiegelstijging

Op basis van de IPCC klimaatscenario's en de metingen van de zeespiegel bij het getijdenstation op Magueyes Island (Puerto Rico) zijn er in de KNMI'23 scenario's [1] projecties opgesteld voor de zeespiegelstijging in 2050 en 2100 voor een laag en hoog uitstootscenario. Op Bonaire stijgt de zeespiegel met 3,7 mm per jaar en op Saba en St. Eustatius met 3,0 mm per jaar.

De inundatiekaarten voor overstroming door toekomstige zeespiegelstijging zijn gebaseerd op dezelfde IPCC scenario's en sluiten daarom aan bij de KNMI scenario's.

De inundatiekaarten zijn in een eerder onderzoek [3] afgeleid met een statisch model (badkuip methode) waarin de projecties voor zeespiegelstijging worden vergeleken met het FABDEM hoogtemodel [11]. De resolutie (30 bij 30 meter) van dit hoogtemodel is grof en de verticale nauwkeurigheid (afwijking gemiddeld 1,2 meter) is laag. Met het recent ingevlogen AHN zou de resolutie en nauwkeurigheid van deze kaarten kunnen worden verbeterd. Tijdens deze studie was de data van het nieuwe AHN nog niet verwerkt en gepubliceerd.

4.1.2 Overstroming vanuit zee door een stormvloed

In eerder onderzoek [3] zijn inundatiekaarten voor een eens in de 100 jaar stormvloed voor Bonaire afgeleid. De hoogte van de stormvloed is voor het huidige klimaat gelijk aan 26 cm t.o.v. de zeespiegel plus de variaties door het getij (<20 cm). In het toekomstige klimaat wordt de hoogte van de stormvloed verhoogd met de verwachte zeespiegelstijging, in deze studie nemen we aan dat de hoogte van de stormvloed en het getij niet veranderen in een toekomstig klimaat. De hoogte van de stormvloed komt uit de COAST-RP dataset [15], deze dataset laat zien dat er 20 cm verschil zit tussen een eens per jaar en eens per 1000 jaar stormvloed (zie ook Tabel 14 in bijlage A.3).

Dit laat zien dat de invloed van zeespiegelstijging (27 tot 85 cm, verwachtingswaarde SSP 5-8.5 scenario voor 2050 en 2100) in een toekomstig klimaat veel groter is dan de verhoging door een stormvloed.

Voor Saba en St. Eustatius is de zeespiegelstijging in het toekomstige klimaat iets kleiner maar stijgt de hoogte van een stormvloed meer bij extremere herhalingstijden. Voor het zichtjaar 2050 is de zeespiegelstijging gelijk aan een stormvloed van eens per 10 jaar en de zeespiegelstijging voor het zichtjaar 2100 is gelijk aan een stormvloed van eens per 50 tot 1000 jaar. Dit laat zien dat voor Saba en St. Eustatius de bijdrage voor de overstromingsrisico's van de stormvloed en zeespiegelstijging ongeveer gelijk zijn.

De inundatiekaarten voor de eens per 100 jaar stormvloed zijn opgesteld met het dynamische SFINCS model. Met de gegevens uit de COAST-RP dataset hebben we daarnaast ook met een statische GIS analyse een inschatting gemaakt van de toename/afname van het geïnundeerde oppervlak bij de andere herhalingstijden uit Tabel 3.

4.1.3 Overstroming door extreme neerslag

Er is geen hydrologisch en hydraulisch model beschikbaar voor Bonaire om inundaties uit te rekenen bij extreme neerslag. In de eerdere quickscan hebben we er daarom voor gekozen om op basis van de HAND index (Height Above Nearest Drainage) te analyseren welke gebieden mogelijk kwetsbaar zijn voor wateroverlast op basis van het hoogtemodel. De HAND-index kan gebruikt worden om een hazard map te maken waarin binnen een gebied meer en minder kwetsbare delen kunnen worden onderscheiden. Anders gezegd: toepassing van de HAND index resulteert in een overzicht van de natuurlijke afwateringspatronen op basis van de beschikbare hoogtegegevens. Deze kaarten zijn te vinden in Bijlage B.1. Met de HAND-index kan geen uitspraak worden gedaan over de frequentie en exacte gevolgen (waterdieptes) van gebeurtenissen.

Voor de risicoprofielen op Bonaire hebben we inundatiekaarten en kansen nodig om de risico's van extreme neerslag in te schatten. Daarom gebruiken we de neerslaghoeveelheid van de gebeurtenis op 8 november 2022 waarvan we weten dat dit tot wateroverlast heeft geleid om met de Fastflood applicatie [4] een beeld te krijgen van de inundaties. De Fastflood applicatie berekent de waterdiepte bij een uniform opgelegde neerslaghoeveelheid op basis van het hoogtemodel. Dit model is niet gekalibreerd en gevalideerd maar geeft wel een eerste inschatting van de mogelijke inundaties. Het inundatiebeeld komt in grote lijnen overeen met de gerapporteerde meldingen van wateroverlast [9] en de gebieden die zijn geïdentificeerd met de HAND index.

Er is geen neerslagstatistiek beschikbaar voor Bonaire maar wel voor Curaçao uit de eerdere quickscan [2], dit is de beste benadering van de statistiek op Bonaire. Deze statistiek laat zien dat de gebeurtenis in 2022 een herhalingstijd heeft van eens in de twee jaar.

Met deze neerslagstatistiek zijn ook de neerslaghoeveelheden voor de andere herhalingstijden bepaald en vervolgens doorgerekend met de Fastflood applicatie.

4.1.4 Overstroming door een tsunami

Uit literatuur komt naar voren dat er in het verleden tsunami's zijn voorgekomen op Saba (1755) en Bonaire (3300 jaar geleden). De precieze kans op een tsunami en de impact (golfhoogte) is echter niet bekend voor de eilanden.

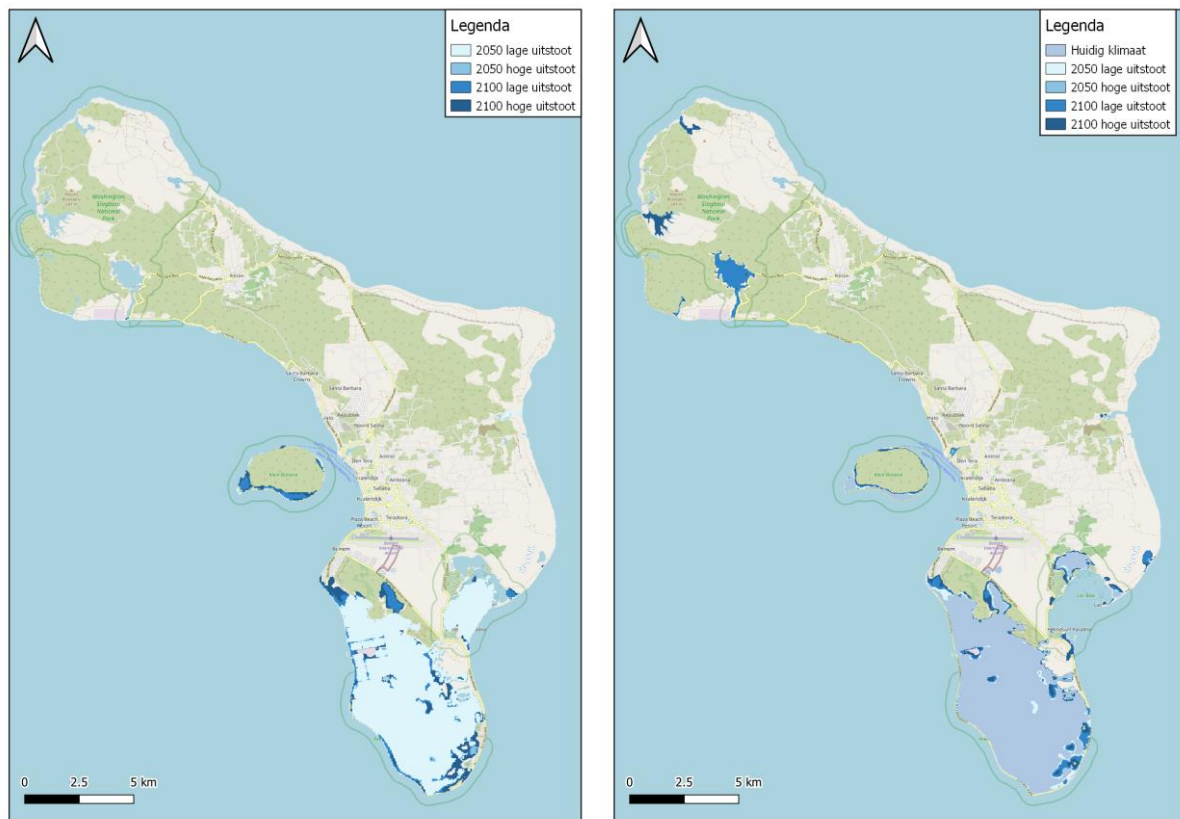
Op basis van de literatuur en interviews komt wel naar voren dat de kans kan worden ingeschat op eens per 1000 jaar met in ieder geval een golfhoogte van 5 meter. Deze cijfers zullen we gebruiken in het risicoprofiel. Uit de interviews met het KNMI kwam naar voren dat de kans op tsunami's en de gevolgen (maximale golfhoogte) onafhankelijk zijn van klimaatverandering of menselijke activiteiten.

5 Beschikbare scenario's en kaartmateriaal

In dit hoofdstuk wordt het beschikbare kaartmateriaal per type overstroming die bij de scenario's uit Tabel 3. gepresenteerd. Op basis van deze kaarten worden de risicoprofielen afgeleid in hoofdstuk 6.

5.1.1 Kaarten overstromingen vanuit zee

In Figuur 10 wordt voor Bonaire de overstroming door toekomstige zeespiegelstijging voor de zichtjaren 2050 en 2100 voor verschillende klimaatscenario's gepresenteerd. In Figuur 4 is daarnaast ook een overzichtskaart van Bonaire te vinden zonder overstromingen. Er is geen kaartmateriaal beschikbaar voor de eilanden Saba en St. Eustatius. De kaarten van Bonaire laten zien dat de zoutpannen in het zuiden, een gedeelte van de wijk Belnem en Lac Baai overstromen. De overstromingen bij de wijk Belnem en Lac Baai zijn te vinden in de detailkaarten in Figuur 11. Het zuidelijke deel van Bonaire, wat vooral bestaat uit zoutpannen, overstroomd al bij het zichtjaar 2100 en een scenario met lage uitstoot (lichtblauwe kleur). Bij dit scenario hoort een zeespiegelstijging van 25 cm. Daarnaast is er langs de kustlijn een strook van 1 pixel breed (30 meter) wat overstroomt. De inundatiekaarten voor een eens in 100 jaar stormvloed laten een vergelijkbaar beeld zien. Dit is logisch omdat de T100 stormvloed maar 20 cm hoger is dan de verwachte zeespiegelstijging. Omdat de gevolgen van de toekomstige zeespiegelstijging en de stormvloed met verschillende modellen zijn bepaald zijn de resultaten niet helemaal 1 op 1 te vergelijken. Dit is bijvoorbeeld te zien aan de overstromingen rondom Lac Baai en de meren in het noordwesten van het eiland.



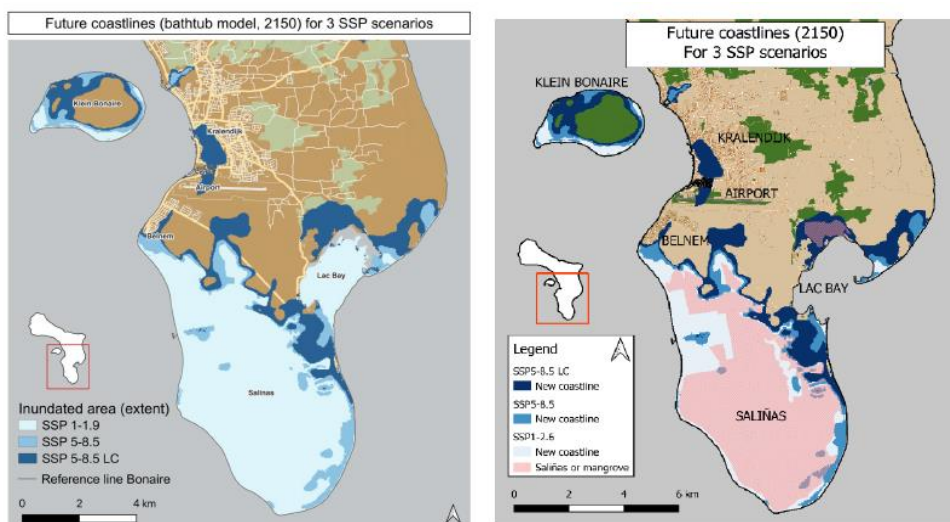
Figuur 10: Overstromingen door toekomstige zeespiegelstijging (links) en een T100 stormvloed (rechts) op Bonaire voor verschillende zichtjaren en klimaatscenario's.



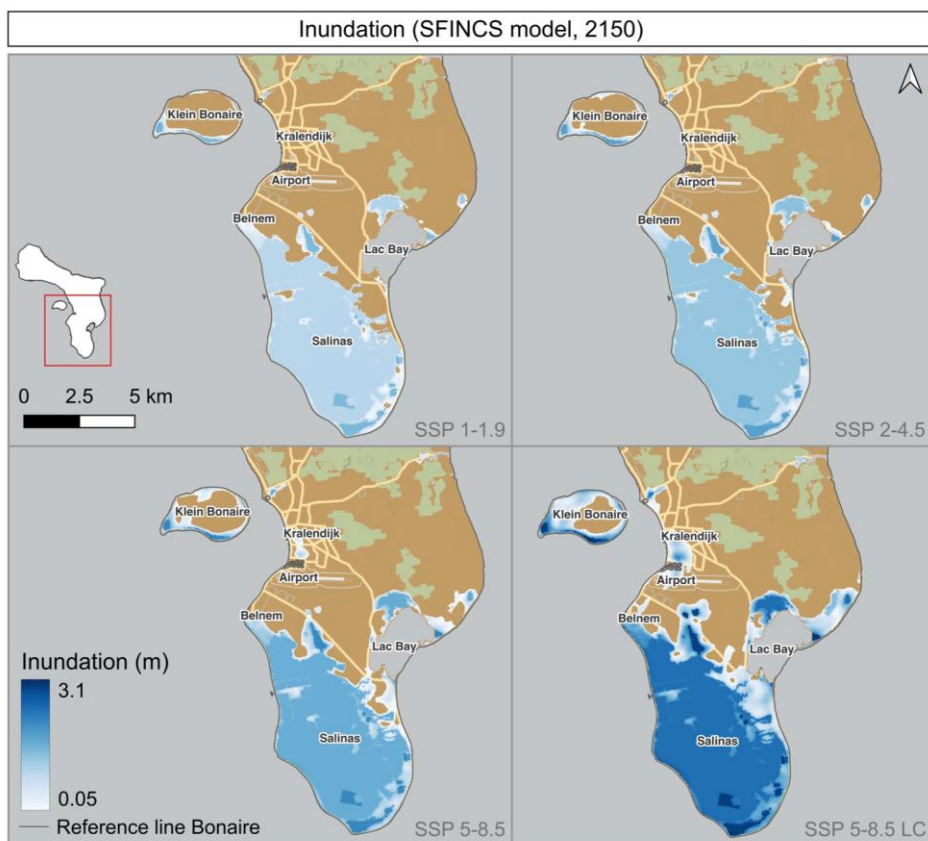
Figuur 11: Detailkaart van de overstromingen door zeespiegelstijging voor het zichtjaar 2100 en het hoge uitstoot scenario. Links een detailkaart van de wijk Belnem waar een resort overstroemd en rechts een detailkaart van de overstroomde resorts langs de Lac Baai.

In het onderzoek van de VU zijn ook extremere en minder waarschijnlijke scenario's dan in KNMI'23 meegenomen.

Die laten zien dat in 2150 bij het meest extreme (en minder waarschijnlijke) IPCC scenario SSP 5 – 8.5 LC (inclusief onzekere processen zoals instabiliteit van ijskappen op Antarctica) ook delen van Kralendijk, het vliegveld en Klein Bonaire door extreme zeespiegelstijging (Figuur 12) en een T100 stormvloed in combinatie met extreme zeespiegelstijging (Figuur 13) kunnen overstroomd worden.



Figuur 12: Overstroming door zeespiegelstijging voor het zichtjaar 2150 voor drie verschillende IPCC klimaatscenario's. Bron: VU rapport.

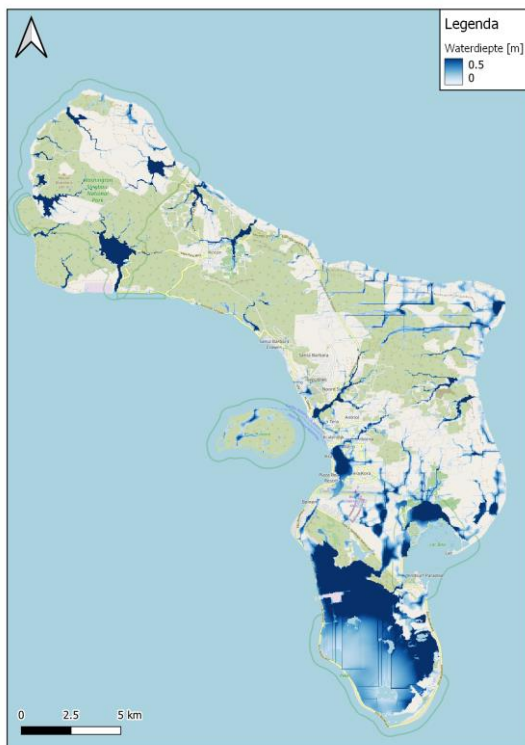


Figuur 13: Inundatiekaarten bij een eens in 100 jaar stormvloed voor het zichtjaar 2150 bij verschillende IPCC klimaatscenario's. Bron: VU rapport.

5.1.2 Kaarten voor overstrooming door extreme neerslag

Met de fastflood applicatie is een inundatiekaart gemaakt voor de bui die is gevallen op 8 november 2022 en voor wateroverlast heeft gezorgd. Bij dit scenario inunderen de lager gelegen delen van Bonaire zoals de zoutpannen, het centrum van Kralendijk en de wijk Belnem. De HAND (Height Above Nearest Drainage) en de gerapporteerde meldingen van wateroverlast laten ongeveer dezelfde gebieden zien. Vervolgens zijn ook de neerslaghoeveelheden die horen bij een T1 t/m T1000 neerslaghoeveelheid uitgelezen uit de neerslagstatistiek van Curaçao en ook doorgerekend.

Op Saba en St. Eustatius zijn de hoogteverschillen groter en zijn er steilere hellingen dan in Bonaire. Hierdoor zijn de vlakkere delen onderaan deze hellingen kwetsbaar voor wateroverlast en modderstromen door extreme neerslag. De HAND index kaarten in Figuur 35 en Figuur 36 in Bijlage B laten dit ook zien.

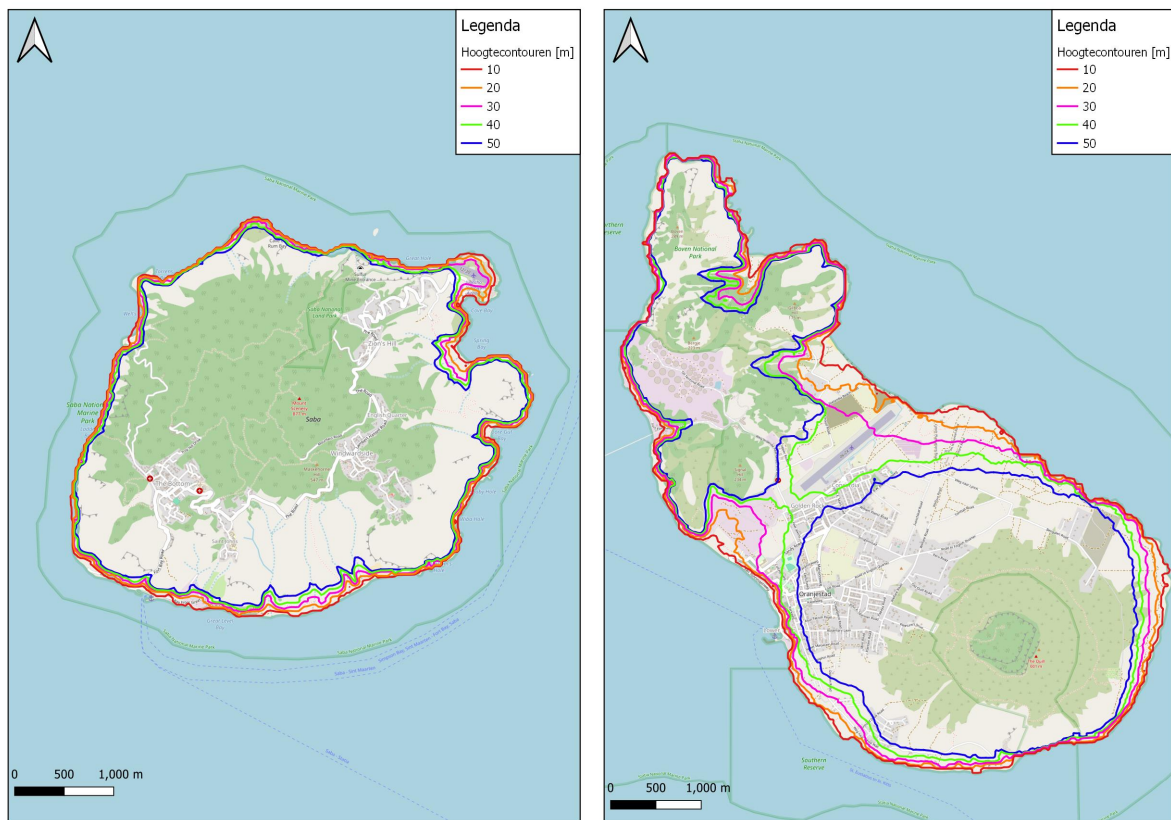


Figuur 14: Inundatiekaart eens in de twee jaar neerslag op Bonaire, dit komt overeen met de gebeurtenis op 8 november 2022.

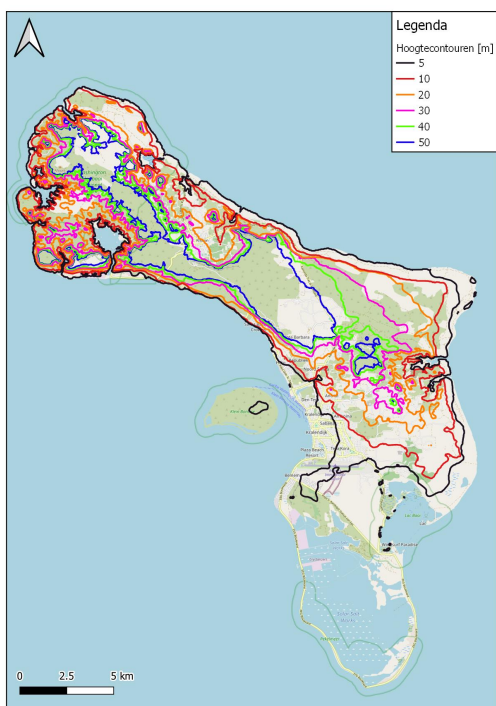
5.1.3 Contourkaarten en risico's op tsunami's

De kaarten met de hoogtecontouren op basis van het FABDEM hoogtemodel zijn te vinden in Bijlage B.2. Met de kaart van Bonaire kunnen de gebieden worden geïdentificeerd die kwetsbaar zijn voor een overstrooming door een tsunami, dit zijn de gebieden tot de eerste hoogtelijn van 5 meter boven zeeniveau (zwarte lijn in Figuur 16). Voor Saba en St. Eustatius zijn er geen inundatiekaarten beschikbaar voor overstroomingen vanuit zee. Maar de hoogtelijnen laten wel zien dat het grootste deel van deze eilanden hoger liggen dan 20 meter boven zeeniveau (oranje lijn in Figuur 15). Daardoor zijn alleen de havens, stranden en een aantal gebouwen direct naast het strand mogelijk kwetsbaar voor overstroomingen vanuit zee.

De stedelijke gebieden op Saba en St. Eustatius liggen zelfs nog hoger en zijn dus alleen kwetsbaar voor wateroverlast en modderstromen veroorzaakt door extreme neerslag. De huidige hoogtegegevens zijn echter te grof om een onderscheid tussen verschillende scenario's te kunnen maken.



Figuur 15: Contourkaarten Saba (links) en Sint Eustatius (rechts). Hierop is te zien dat een beperkt gebied rond de havens en stranden onder de contourlijn van 10 meter liggen. De contourlijnen liggen dicht bij elkaar wat aangeeft dat er steile hellingen zijn.



Figuur 16: Contourkaart van Bonaire waarin te zien is dat het zuidelijke deel van het eiland en Kralendijk lager ligt dan 5 meter boven zeeniveau.

5.2 Geïnundeerd oppervlak

Met het gepresenteerde kaartmateriaal is voor Bonaire uitgerekend hoeveel procent van het eiland geïnundeerd is bij de zichtjaren 2050 en 2100 voor het hoge uitstootscenario, zie Tabel 5. Bij de berekening van deze percentages zijn de salina's en zoutpannen niet meegenomen omdat deze gebieden in het huidige klimaat ook al overstroomd zijn. Deze percentages worden in het volgende hoofdstuk gebruikt om de impactklassen te bepalen voor de regionale risicoprofielen. Omdat er geen kaartmateriaal beschikbaar is over de overstromingsrisico's op Saba en St. Eustatius was het voor deze eilanden niet mogelijk om het geïnundeerde oppervlak bij verschillende klimaatscenario's te bepalen.

Het geïnundeerde oppervlak (exclusief de zoutpannen en waterlichamen) door toekomstige zeespiegelstijging en een stormvloed binnen de KNMI 23 klimaatscenario's is beperkt tot bijna 6%. Echter laat het meest extremere klimaatscenario SSP 5 – 8.5 LC voor het zichtjaar 2150 een sterkere stijging zien, zie ook de inundatiekaart in Figuur 13. Hierbij stijgt de zeespiegel met 4 meter en stijgt het geïnundeerde oppervlak tot 21% (52 km²). Een vergelijkbare toename (18%) is te zien bij de bovengrens van de schattingen van het KNMI voor het zichtjaar 2100, dit is ook gebaseerd op het SSP 5 – 8.5 LC IPCC scenario. In beide scenario's wordt rekening gehouden met onzekere processen zoals instabiliteit van de ijskappen bij Antarctica, deze processen zitten niet in de lage en hoge uitstoot varianten van de KNMI klimaatscenario's.

Tabel 5: Percentage van Bonaire geïnundeerd (exclusief zoutpannen en waterlichamen) bij verschillende type overstromingen, zichtjaren en herhalings tijden voor het hoge uitstootscenario. De schuingedrukte percentages zijn geschat ten opzichte van de inundatiekaarten van de VU.

	Dagelijks (zee- spiegel- stijging)	1/1 jaar	1/2 jaar	1/10 jaar	1/50 jaar	1/100 jaar	1/1000 jaar
Huidig klimaat							
Stormvloeden	0%	2,3%	2,3%	2,3%	2,4%	2,4%	2,7%
Tsunami's	0%	-	-	-	-	-	20%
Neerslag	0%	11%	13%	18%	23%	25%	30%
Zichtjaar 2050							
Stormvloeden	2,4%	2,8%	2,8%	2,9%	2,9%	3,0%	3,7%
Tsunami's	2,4%	-	-	-	-	-	21%
Neerslag	2,4%	11%	13%	18%	23%	25%	30%
Zichtjaar 2100							
Stormvloeden	3,8%	5,0%	5,0%	5,1%	5,1%	5,2%	5,9%
Tsunami's	3,8%	-	-	-	-	-	23%
Neerslag	3,8%	11%	13%	18%	23%	25%	30%

6 Actualisatie risicoprofielen

Op basis van de verzamelde informatie en het kaartmateriaal over klimaatverandering, overstromingen vanuit zee, overstromingen door neerslag en tsunami's kunnen de regionale risicoprofielen uit de quickscan worden geüpdatet. De regionale risicoprofielen zeggen iets over de overstromingsrisico voor het hele eiland (paragraaf 6.1). Voor een specifieke locatie op een eiland kunnen de risico's hoger of lager zijn, dit is te zien in de waterrisicoprofielen (paragraaf 6.2).

6.1 Regionale risicoprofielen (per eiland)

De regionale risicoprofielen per eiland zijn eerder afgeleid in de quickscan, op basis van de meest recente kennis en data zijn deze geactualiseerd. Daarnaast kunnen we nu ook een risicoprofiel afleiden voor het toekomstige klimaat en onderscheid maken tussen de verschillende type overstromingen vanuit zee.

Voor de inschatting van de kans (waarschijnlijkheid) wordt de methode uit de Nationale Risico-beoordeling gevolgd, deze klasse zijn te vinden in Tabel 6. Voor de beoordeling van de impact is de NRB-methode te fijnmazig. Daarom is een vereenvoudigde indeling in impactcriteria en impactklassen toegepast, zoals weergegeven in Tabel 7. In deze definitie van de impactcriteria wordt alleen het overstroomd oppervlak meegenomen in de regionale risicoprofielen.

De criteria fysieke, economische en ecologische veiligheid uit Tabel 7 worden overgenomen uit de eerdere inschattingen uit de quickscan [2]. Met informatie vanuit de eilanden over het landgebruik en bijbehorende economische en ecologische waarde kunnen deze criteria ook worden gekwantificeerd en kunnen de overstromingsrisico's worden aangepast.

Tabel 6: Klasse voor het inschatten van de impact van een overstroming op basis van het overstroomde landoppervlak (exclusief zoutpannen en waterlichamen).

Impactklasse	Beschrijving
beperkt gevolg	< 5% wordt getroffen
aanzienlijk gevolg	5-10% wordt getroffen
ernstig gevolg	10 -25% wordt getroffen
zeer ernstig gevolg	25- 50% wordt getroffen
catastrofaal gevolg	> 50% wordt getroffen

Tabel 7: Klasse voor het inschatten van de waarschijnlijkheid van een overstroming.

Kans klasse	Kans per jaar
zeer onwaarschijnlijk	< 1/2000
onwaarschijnlijk	1/200 – 1/2000
mogelijk	1/20 – 1/200
waarschijnlijk	1/2- 1/20
zeer waarschijnlijk	1/1 – 1/2

Tabel 8: Tien criteria voor de beoordeling van de impact in het risicoprofiel.

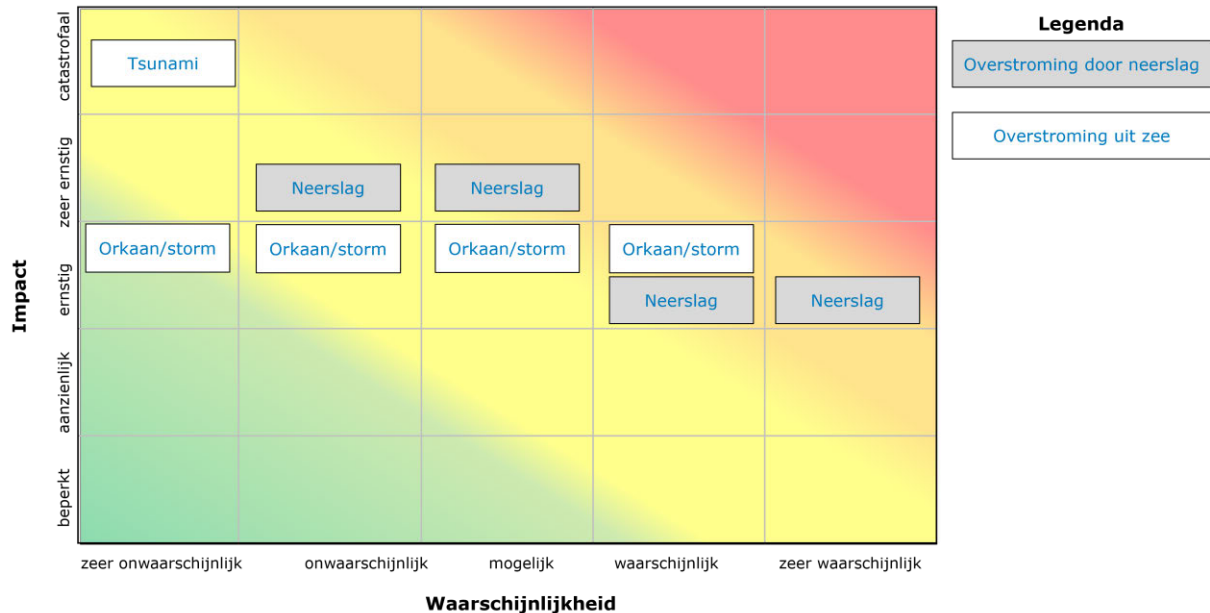
Categorie	Criteria
Territoriale veiligheid	1. Aantasting van de integriteit van het grondgebied 2. Aantasting van de integriteit van de internationale positie van Nederland
Fysieke veiligheid	3. Doden 4. Ernstig gewonden en chronisch zieken 5. Gebrek aan primaire levensbehoeften
Economische veiligheid	6. Kosten
Ecologische veiligheid	7. Langdurige aantasting van het milieu en natuur (flora en fauna)
Sociale en politieke stabiliteit	8. Verstoring van het dagelijks leven 9. Aantasting democratische rechtstaat 10. Sociaal psychologisch impact: woede en angst

6.1.1 Bonaire

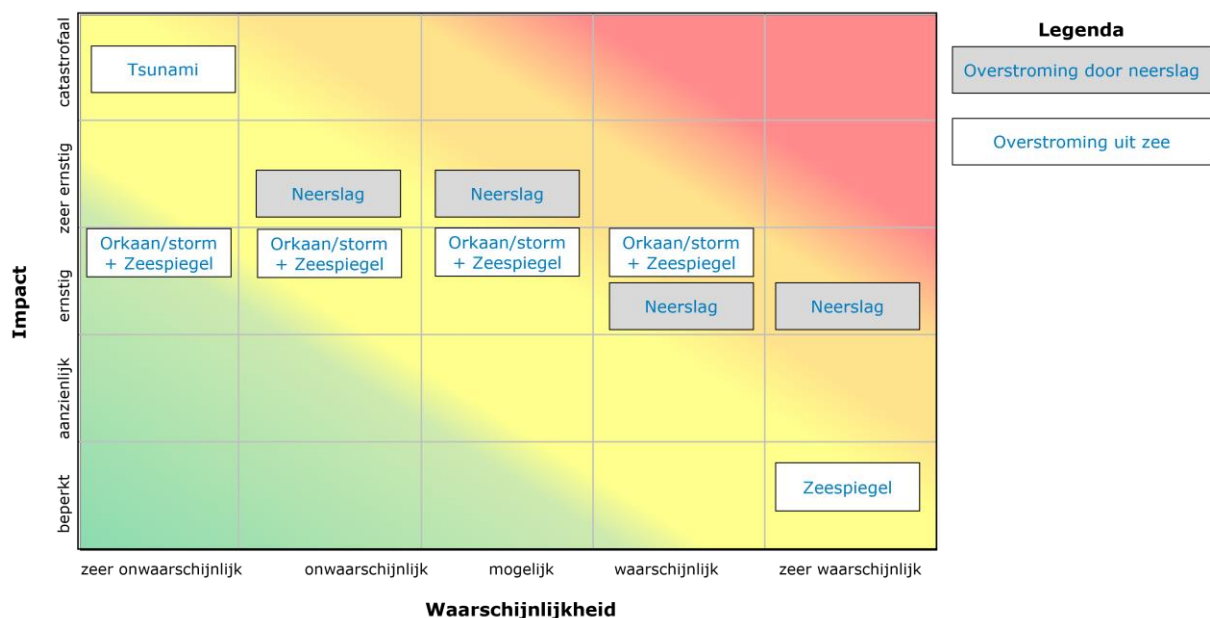
Op basis van het kaartmateriaal en de opgehaalde kennis stellen we voor Bonaire een regionaal risicoprofiel op voor het huidige klimaat, 2050 en 2100. Omdat de verschillen tussen het lage en hoge uitstoot scenario niet leiden tot een andere inschatting van de overstromingsrisico's wordt het extremere hoge uitstoot scenario getoond. De risicoprofielen zijn te vinden in Figuur 17, Figuur 18 en Figuur 19. De volgende type gebeurtenissen worden geïdentificeerd:

- Een overstroming vanuit zee door een orkaan of tropische storm:
 - In het regionale risicoprofiel voor het huidige klimaat is er nog geen zeespiegelstijging. De zeespiegelstijging is volgens de KNMI'23 scenario's 27 cm in 2050 en 85 cm in 2100. De overstroming die hierdoor wordt veroorzaakt valt in 2050 in de impactklasse 'beperkt' en in het zichtjaar 2100 in de klasse 'aanzienlijk';
 - Voor een eens in de 100 jaar stormvloed is de kansklasse 'mogelijk' van toepassing. De impact is 'beperkt' want minder dan 5% van het eiland is overstroomd. Als we kijken naar de stormvloed eens in de 1000 jaar zien we dat stormvloed 16 cm hoger wordt, dit leidt echter niet tot een verhoging in de impactklasse. Als we naar het toekomstig klimaat kijken zien we dat de zeespiegelstijging bij de stormvloed wordt opgeteld. Hiermee zal de dagelijkse situatie in 2050 en 2100 in de impactklasse beperkt vallen en de kansklasse zeer waarschijnlijk worden ingedeeld (een deel is dus altijd overstroomd). De stormvloed zal in het zichtjaar 2100 door de zeespiegelstijging in ieder geval één impactklasse stijgen;
 - Naast zeespiegelstijging en een stormvloed kunnen er ook overstromingen voorkomen bij orkanen en tropische stormen door windopzet, wind reversal en neerslag. Hierdoor kunnen mogelijk ook de lageregelegen delen van Kralendijk aan de westkant van het eiland worden getroffen. Dit betekent dat er economisch risico en een slachtofferisico bestaat. Vanwege deze mogelijke gevolgen schatten we het effect van deze gebeurtenis in op het niveau ernstig voor het huidige klimaat en zeer ernstig voor het zichtjaar 2100 met een klimaatscenario met hoge uitstoot.
- Een tsunami valt in de kansklasse onwaarschijnlijk met een herhalingsijd van eens in de 1000 jaar. Het geïnundeerde oppervlak is 21% en valt in de klasse zeer ernstig, daarnaast worden bij een tsunami grote delen van Kralendijk getroffen waardoor het economische en slachtofferisico groot is. Daarom valt de tsunami met de weging van de andere criteria in de gevolgklasse catastrofaal. De kans en de impact van een tsunami zullen niet veranderen in de toekomst.

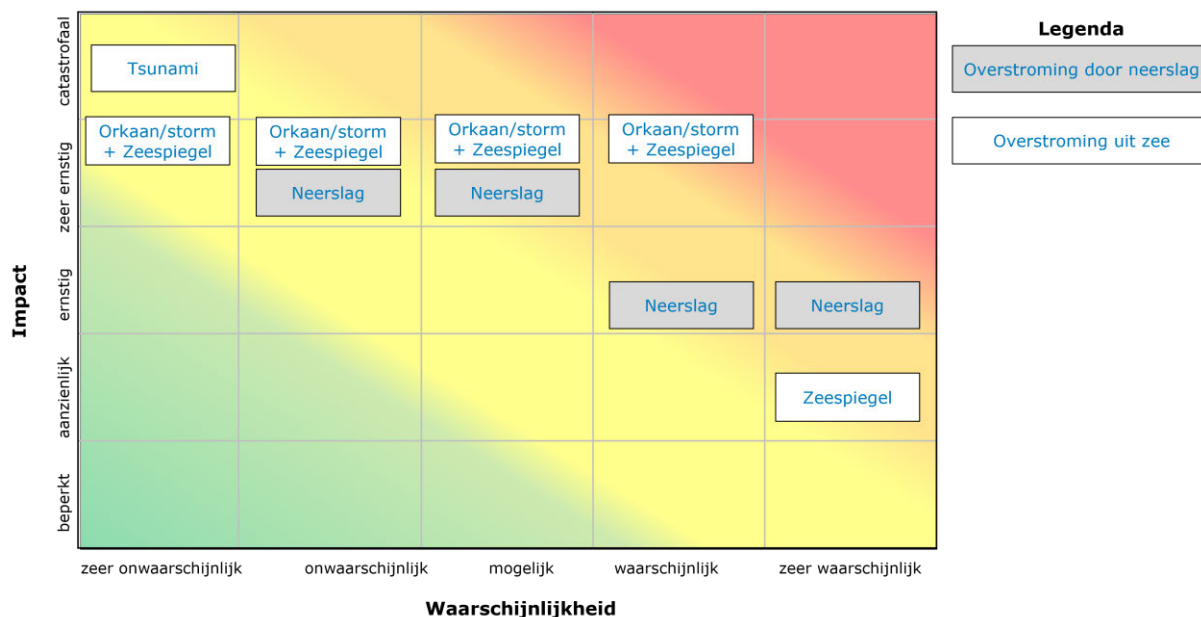
- Voor de overstroming door extreme neerslag hebben we zes scenario's met een herhalingsstijd vanaf eens per jaar tot en met eens per 1000 jaar. De inundatiekaarten laten zien dat het geïnundeerde oppervlak door de neerslag varieert van 11% tot 30% bij het meest extreme scenario. Hiermee kunnen met deze scenario's de kansklassen en impactklassen voor het regionale risicoprofiel worden bepaald.



Figuur 17: Geactualiseerd risicoprofiel voor huidig klimaat, in dit scenario is er nog geen zeespiegelstijging. De overstroming door een storm/orkaan is een combinatie van een stormvloed, windopzet en neerslag en valt in de categorie ernstig.



Figuur 18: Geactualiseerd risicoprofiel voor toekomstig klimaat, zichtjaar 2050 en klimaatscenario met hoge uitstoot. In dit scenario is er 27 cm zeespiegelstijging. De zeespiegelstijging zonder orkaan/storm valt in de categorie beperkt en zal elke dag optreden. De overstroming door een storm/orkaan is een combinatie van zeespiegelstijging, een stormvloed, windopzet en neerslag en vallen in de categorie ernstig.

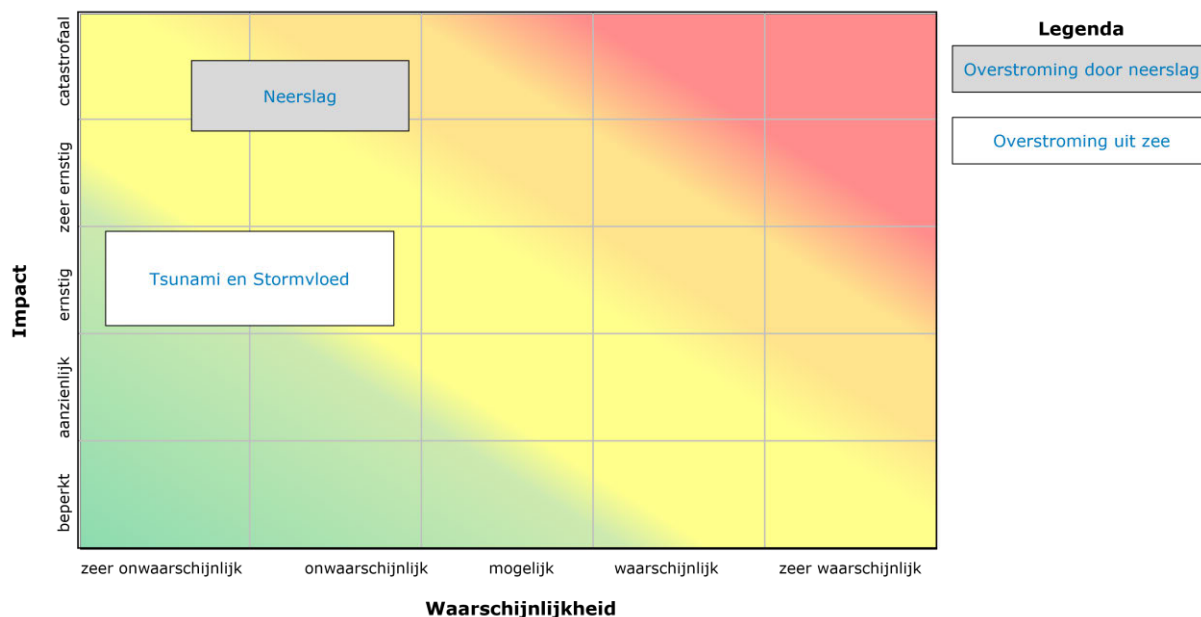


Figuur 19: Geactualiseerd risicoprofiel voor toekomstig klimaat, zichtjaar 2100 en klimaatscenario met hoge uitstoot. In dit scenario is er 85 cm zeespiegelstijging. De zeespiegelstijging zonder een orkaan/storm valt in de categorie aanzienlijk en zal elke dag optreden. De overstroming door een storm/orkaan is een combinatie van zeespiegelstijging, een stormvloed, windopzet en neerslag en valt in de categorie zeer ernstig.

6.1.2 Saba en Sint Eustatius

Voor Saba en St. Eustatius zijn de risico's voor overstromingen vanuit zee en tsunami's beperkt tot de havens, het drinkwaterbedrijf, het strand en de huizen die direct aan het strand staan. Dit kan wel een grote impact hebben omdat de eilanden afhankelijk zijn van de havens en de economische waarde dus groot is. Het merendeel van de bebouwing staat op hoger gelegen delen die niet zullen overstromen vanuit zee. Voor het huidige klimaat zijn er voor deze eilanden geen nieuwe inzichten over de kansen en impact van de mogelijke overstromingen. Dit betekent dat het regionale risicoprofiel voor het huidige klimaat onveranderd blijft, zie Figuur 20.

De KNMI scenario's geven wel nieuwe inzichten over het toekomstige klimaat. Die laten zien dat de kans op zware orkanen in de toekomst zal toenemen en dat de maximale neerslagintensiteit en windsnelheden van deze orkanen zullen toenemen. Hierdoor zal de kans op en de impact van extreme neerslag en van een stormvloed toenemen. Daarnaast laten de scenario's zien dat de zeespiegel zal stijgen in de toekomst. Met de resolutie en nauwkeurigheid van de huidige hoogtekarten van Saba en St. Eustatius is het echter niet mogelijk om te bepalen of de lager gelegen delen extra kwetsbaar worden bij de klimaatscenario's voor de zichtjaren 2050 en 2100.



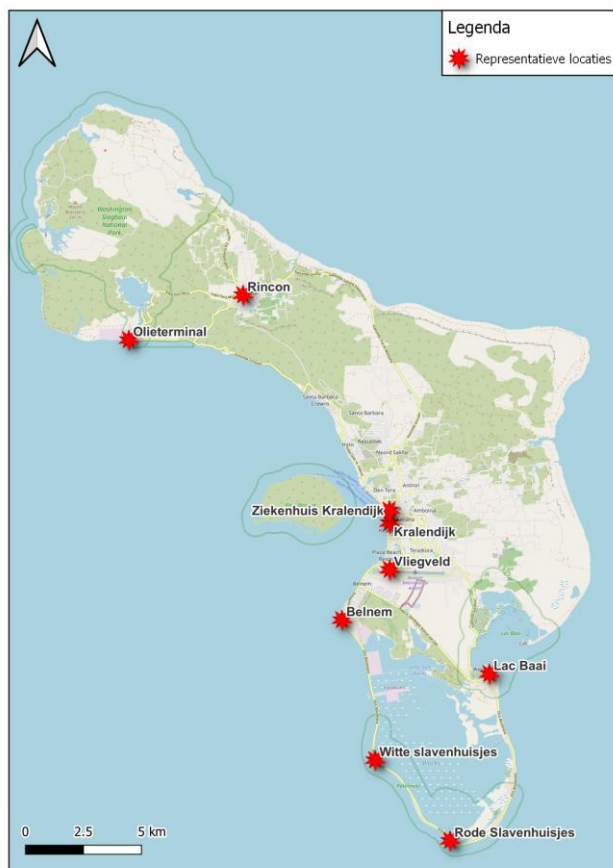
Figuur 20: Risicoprofiel Saba en St. Eustatius voor het huidige klimaat en toekomstige klimaat (zichtjaar 2100).

6.2 Locatie specifieke waterrisicoprofielen

Op basis van het kaartmateriaal voor Bonaire zijn er voor een aantal voorbeeld locaties risicoprofielen gedefinieerd. Deze risicoprofielen combineren de kansen en gevolgen van de overstromingen vanuit zee, wateroverlast door neerslag en een tsunami voor verschillende zichtjaren en klimaatscenario's. De kansen en gevolgen voor de tsunami en wateroverlast door neerslag veranderen we niet. Dit omdat uit interviews naar voren kwam dat de kans en gevolgen van tsunami's niet zullen veranderen door klimaatverandering. Voor wateroverlast door neerslag hebben we te weinig gegevens om een uitspraak te doen over de toename bij een toekomstig klimaat. Waarschijnlijk zal de neerslagintensiteit en kans op een extreme neerslag wel toenemen.

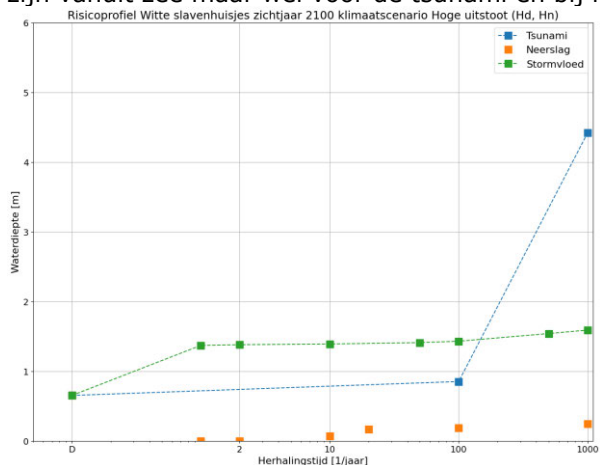
De waterrisicoprofielen, voor de voorbeeldlocaties op de kaart in Figuur 21, zijn te vinden in Bijlage C:

- Witte slavenhuisjes
- Rode slavenhuisjes
- Vliegveld (Bonaire International Airport)
- Belnem
- Lac Baai
- Ziekenhuis van Kralendijk
- Kralendijk (stedelijk gebied)
- Rincon (stedelijk gebied)
- Olieterminal



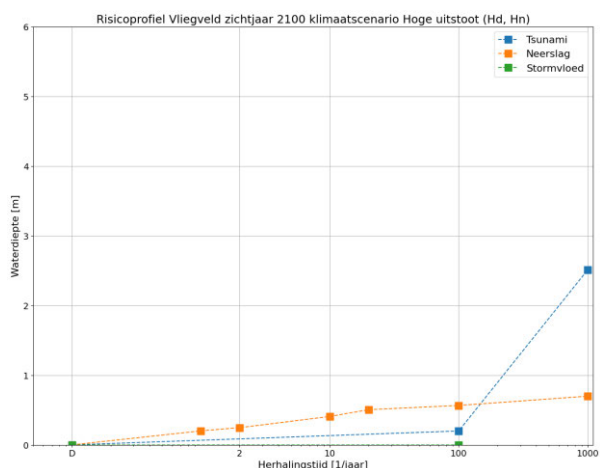
Figuur 21: Kaart met representatieve locaties voor waterrisicoprofielen.

Hieronder zijn de risicoprofielen voor de witte slavenhuisjes en het vliegveld van Bonaire te zien. Bij de witte slavenhuisjes zie je dat er zowel overstromingsrisico's zijn vanuit zee, bij een tsunami als bij extreme neerslag. In Figuur 23 is te zien dat bij het vliegveld in het profiel er geen risico's zijn vanuit zee maar wel voor de tsunami en bij neerslag.



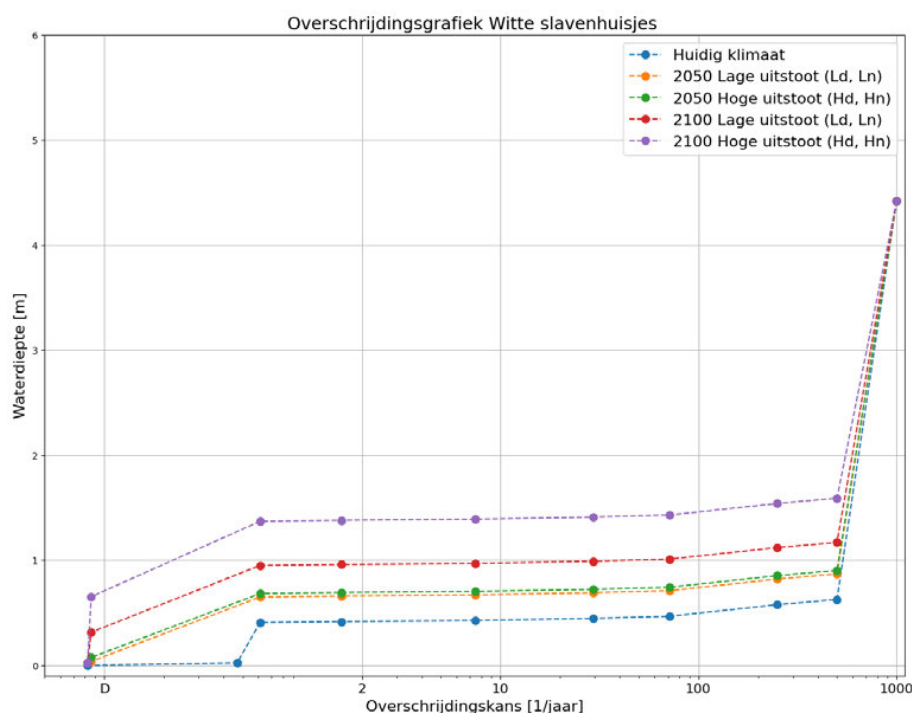
Figuur 22: Waterrisicoprofiel voor de Witte Slavenhuisjes voor zichtjaar 2100 en hoge uitstoot scenario (links) en een foto van de locatie³ (rechts). Witte slavenhuisjes zijn kwetsbaar voor zeespiegelstijging omdat ze direct naast de branding liggen. Daarnaast ook kwetsbaar voor een tsunami, waarvan de kans wordt ingeschat als erg klein (1/1000).

³ Bron: <https://www.debestemmingswijzer.nl/home/bestemmingen/bonaire-tips/bezienswaardigheden-bonaire/pekelmeer-en-slavenhuisjes-bonaire/>



Figuur 23: Waterrisicoprofiel voor het vliegveld van Bonaire voor zichtjaar 2100 en hoge uitstoot scenario (links) en een foto⁴ van de locatie (rechts). Vliegveld is ook bij een zeespiegelstijging van 85 cm niet kwetsbaar voor een stormvloed. Wel voor wateroverlast door regenval. Diepe inundatie kan alleen optreden in geval van een Tsunami, waarvan de kans wordt ingeschat als erg klein (1/1000).

De verschillende type overstromingen kunnen ook worden gecombineerd tot één waterstandskans-grafiek. In deze grafieken wordt voor één locatie de overschrijdingskans bij een bepaalde waterdiepte getoond voor verschillende zichtjaren en klimaatscenario's. Een voorbeeld hiervan is opgenomen voor de Witte Slavenhuisjes in Figuur 24. Voor alle locaties zijn deze figuren opgenomen in Bijlage C. Met het kaartmateriaal en de ontwikkelde scripting kunnen deze grafieken worden gemaakt voor elke locatie op Bonaire.



Figuur 24: Waterrisicoprofiel voor alle zichtjaren en type overstromingen voor de locatie witte slavenhuisjes. Hierin is te zien dat de witte slavenhuisje al bij een dagelijkse situatie overstroomd door zeespiegelstijging. Bij gebeurtenissen tussen de eens per jaar en eens per 1000 jaar varieert de waterdiepte tussen een halve meter en 1,5 meter afhankelijk van het zichtjaar en klimaatscenario. Bij een tsunami (eens per 1000 jaar) zal de waterdiepte nog verder toenemen.

⁴ Bron: 'Weer meer passagiers op luchthaven Bonaire', Antilliaans Dagblad, <https://antilliaansdagblad.com/bonaire/25036-weer-meer-passagiers-op-luchthaven-bonaire>

7 Inventarisatie van maatregelen

Uit diverse bronnen en interviews zijn verschillende mogelijke maatregelen naar voren gekomen om de overstromingsrisico's te verkleinen. Op basis van deze inventarisatie is een lijst samengesteld van maatregelen, weergegeven in Tabel 9, Tabel 10 en Tabel 11. Hierbij gaat het zowel om technisch traditionele maatregelen, nature based solutions en soms een combinatie van beide. Daarnaast identificeren we voor welke bedreiging uit de risicoprofielen de maatregel een oplossing is en bij welk principe van het meerlaagsveiligheidsprincipe het past.

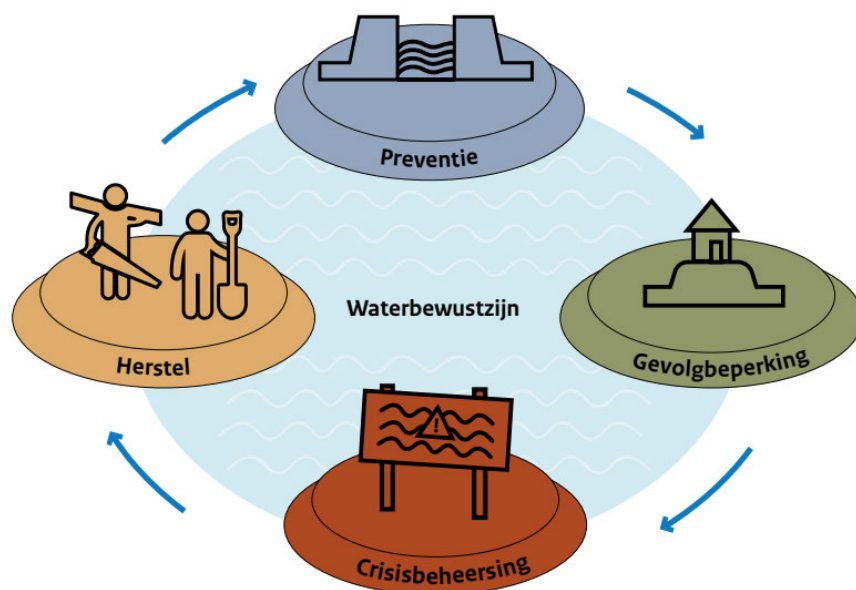
Om te kunnen bepalen welke maatregelen daadwerkelijk passen bij de behoefte van de eilanden en welke wenselijk en effectief zijn is lokale inbreng van belang evenals de lokale omstandigheden. Dit kan gebeuren met ontwerpend onderzoek waarin op basis van schetsen en berekeningen strategieën ontwikkeld en beoordeeld kunnen worden. Omdat het gaat om ruimtelijke keuzes ligt het voor de hand dat de lokale overheid hiervoor in de lead is (eventueel met ondersteuning). In deze sessies kan worden bepaald welke maatregelen passen in het landschap, context van de eilanden en behoeften van de inwoners. Het toetsen van de effectiviteit van verschillende maatregelen door middel van modelstudies kan bijdrage aan deze discussie. In de tabellen hebben we al een indicatie gegeven bij welke herhalings tijden een maatregel effectief is door een kleurenschaal van mogelijk effectief naar wit (niet van toepassing op dit scenario).

We maken onderscheid tussen technische maatregelen, nature based solutions en organisatorische maatregelen. Technische maatregelen betreffen fysieke ingrepen gericht op preventie of de ruimtelijke omgeving waarin er eenmalig iets wordt aangelegd. Nature based solutions maken gebruik van natuurlijke processen en ecosystemen om overstromingsrisico's te verminderen en het watersysteem klimaatrobuust te maken. Dit omvat bijvoorbeeld het herstellen en aanleggen van wetlands, mangrovebossen of koraalriffen om overstromingen te verminderen. Deze maatregelen bieden niet alleen bescherming tegen overstromingen maar dragen ook bij aan biodiversiteit, klimaatadaptatie en waterkwaliteit. In de tabellen staat aangegeven of een maatregel een nature based solution is. Organisatorische maatregelen gaan vooral om het anders gebruiken van de middelen die er al zijn. Hier kan het ruimtelijke zoneringsbeleid onder vallen maar ook crisisbeheersing.

De maatregelen zijn gerangschikt op basis van het concept van meerlaagsveiligheid. Hierin is onderscheid gemaakt in preventie (voorkomen), ruimtelijke adaptatie en crisisbeheersing. Recent zijn twee extra lagen toegevoegd op basis van advies van de beleidstafel wateroverlast en hoogwater naar aanleiding van de wateroverlast in Limburg in 2021', het gaat dan om waterbewustzijn en herstel (zie Figuur 25). Het meerlaagsveiligheid principe bestaat dan uit de volgende vijf lagen:

- Waterbewustzijn: Bewustwording en acceptatie van overstromingsrisico's;
- Preventie: maatregelen die voorkomen dat een overstroming plaatsvindt;
- Gevolgbeperking: maatregelen die de gevolgen van een overstroming beperken;
- Crisisbeheersing: maatregelen om tijdens een ramp mensen te evacueren en verdere schade te voorkomen;

- **Herstel:** maatregelen die ervoor zorgen dat het herstel snel en klimaatrobuust wordt uitgevoerd na een overstroming.



Figuur 25: Meerlaagsveiligheidsprincipe bron eindadvies beleidstafel wateroverlast en hoogwater.

7.1 Maatregelen tegen overstromingen vanuit zee

In Tabel 9 zijn mogelijke maatregelen tegen een overstroming vanuit zee samengevat. Een belangrijk onderscheid is of de maatregel zich richt tegen de gevolgen van stormvloed, tsunami's of toekomstige zeespiegelstijging. Nature based solutions zoals versterken mangroves en koraalrif bieden voor stormvloed meerwaarde omdat ze golven breken, voor toekomstige zeespiegelstijging is het effect beperkt omdat het gebied erachter alsnog volloopt. Ook bij tsunami's is het effect beperkt door de lange golflengte van een golf. Technische maatregelen als kademuren en waterkeringen kunnen tot de aanleghoogte voorkomen dat gebieden overstromen. De mate waarin deze ook effectief zijn hangt ook af van de doorlatendheid van de ondergrond (Bonaire bestaat bijvoorbeeld deels uit poreuze kalksteen) en maatregelen die hiervoor worden genomen. Maatregelen onder de kolom dagelijks kunnen effectief zijn tegen zeespiegelstijging en maatregelen die beter scoren (groen) voor een eens in 1000 jaar situatie zijn bijvoorbeeld effectief bij een extreme stormvloed.

Daarnaast kunnen de gevolgen van een overstromingen worden beperkt door klimaatbestendig te bouwen en de openbare ruimte anders in te richten. Waar het gaat om het tegengaan van gevolgen op de lange termijn kan er ook 'toegegroeid' worden naar een klimaatbestendige inrichting. Een lijst met maatregelen hierover is te vinden op de website van klimaatadaptief Nederland⁵. Deze maatregelen gaan bijvoorbeeld over het aanpassen van huizen, aanleggen van drempels, drijvende woningen bouwen en woningen op palen bouwen. Door bij de ruimtelijke planning rekening te houden met de overstromingsrisico's kunnen ook de gevolgen worden beperkt. Dit kan door rekening te houden met de locatiekeuze van nieuwe ontwikkelingen, bijvoorbeeld door te ontwikkelen op locaties die niet of minder kwetsbaar zijn voor de gevolgen van overstromingen en neerslag.

⁵ <https://klimaatadaptatienederland.nl/kennisdossiers/overstroming/gevolgen-beperken/maatregelen/>

Instrumenten als de maatlat groene klimaatadaptieve gebouwde omgeving, ruimtelijk ontwikkelingsprogramma Caribisch Nederland en het ruimtelijke afwegingskader klimaatadaptieve gebouwde omgeving zijn hiervoor voor Europees Nederland ontwikkelde instrumenten die hierbij helpen. Het concept van deze instrumenten is ook voor de BES eilanden toepasbaar maar zouden wel moeten worden afgestemd op de lokale context.

Als derde zijn er maatregelen mogelijk om tijdens een crisis adequaat te handelen. Dit zijn maatregelen zoals het maken en oefenen van crisisplannen, inrichten van een crisisorganisatie en het organiseren van een eventuele evacuatie inclusief bijhorende waarschuwingen (voor zover dit nog niet gebeurd is). Het benutten van tijdelijke noodmaatregelen (zandzakken, flood barriers) kan nog wel een overweging zijn om de gevolgen van extreme neerslag en stormvloed te beperken. De waterdieptes zijn relatief beperkt waardoor deze maatregelen effectief kunnen zijn om bijvoorbeeld objecten te beschermen. Deze noodmaatregelen zijn echter geen oplossingen voor zeespiegelstijging zelf.

Als de overstroming schade heeft aangericht kunnen er maatregelen worden genomen om de schade snel en klimaat robuust te herstellen. Deze maatregelen vallen in de laag herstel. De vraag is of cruciale infrastructuur zo kan worden ontworpen dat deze sneller hersteld is, en of materialen voor herstel (snel) beschikbaar zijn. Daarnaast kan er worden nagedacht hoe deze infrastructuur kan worden hersteld zodat het in de toekomst minder kwetsbaar is voor overstromingen.

De laatste categorie maatregelen gaan over het waterbewustzijn creëren door voorlichting te geven over de risico's en een dialoog aan te gaan over maatregelen en acceptatie. Het waterbewustzijn draagt ook bij aan de uitvoering van crisisplannen, immers mensen zijn dan beter bekend met wat veilige locaties zijn.

Tabel 9: Inventarisatie maatregelen tegen overstroming vanuit zee met in groen een indicatie van de mogelijk effectiviteit van de maatregel. De schaal loopt van effectief (donkergroen) tot niet effectief (wit).

Maatregel	Effectiviteit per herhalingsstijg				NbS	Meerlaagsveiligheid principe
	Dagelijks	T1	T10	T100		
Mangrove beschermen					ja	Preventie
Koraalrif beschermen					ja	Preventie
Kademuur verhogen					nee	Preventie
Dijken/keringen					nee	Preventie
klimaatadaptief bouwen					ja	Gevolgenbeperking
Zone zonder bebouwing langs kust					nvt	Gevolgenbeperking
Ruimtelijke planning					nvt	Gevolgenbeperking
Kwetsbare functies op hogere delen					nvt	Gevolgenbeperking
Noodkeringen					nvt	Crisisbeheersing
Rampenplan opstellen en crisisorganisatie					nvt	Crisisbeheersing
Plannen voor snel en robuust herstel					nvt	Herstel
Bewustzijn creëren					nvt	Waterbewustzijn

7.2 Maatregelen tegen wateroverlast door neerslag

De maatregelen tegen wateroverlast door neerslag zijn samengevat in Tabel 10. Uit het onderzoek van waterschap Rijn en IJssel naar het watersysteem op Bonaire [8] kwam naar voren dat het als eerste belangrijk is om het bestaande watersysteem te onderhouden en in kaart te brengen. Dit betekent het onderhouden van de bestaande rooien en dammen en behoudt en vergroten bergingscapaciteit van de salina's. Door het uitdiepen van de salina's is er meer berging beschikbaar en wordt voorkomen dat sediment kan uitspoelen naar zee (en daar koraal beschadigd) bij een extreme neerslag gebeurtenis. Daarnaast helpen deze maatregelen ook om wateroverlast te voorkomen bij de neerslag die jaarlijks of vaker voorkomt. Daarna is het mogelijk om te kijken welke locaties nog steeds kwetsbaar zijn voor wateroverlast. Hier kan dan worden gekeken of de risico's kunnen worden verkleind door bijvoorbeeld het aanleggen van een watersysteem om het water af te voeren, klimaatrobuust te bouwen, lokale bescherming en noodmaatregelen. Voor nieuwe ontwikkelingen kan de ruimtelijke planning worden aangepast.

Gepaard met wateroverlast gaan de problemen met erosie en modderstromen op de eilanden. Hiervoor wordt in de literatuur [8 en 9] een aantal maatregelen aangedragen zoals het beperken van loslopende dieren, aanplanten van vegetatie die de grond vasthoudt en het uitdiepen van de salina's. Modderstromen en erosie bij neerslag zijn een nog groter probleem op Saba en St. Eustatius omdat hier de hellingen steiler zijn.

Voor de erosie en wateroverlast door extreme neerslag worden er nog meer maatregelen voor Bonaire aangeraden in een rapportage van waterschap Rijn en IJssel [8] en een onderzoek over nature based solution op Bonaire door de WUR [9].

Tabel 10: Inventarisatie maatregelen tegen wateroverlast door neerslag met in groen een indicatie van de mogelijk effectiviteit van de maatregel. De schaal loopt van effectief (donkergroen) tot niet effectief (wit).

Maatregel	Effectiviteit per herhalingsstij				NbS	Meerlaagsveiligheid
	Dagelijks	T1	T10	T100		
Berging Salina's behouden en vergroten					ja	Preventie
Onderhouden rooien en dammen					ja	Preventie
Afwateringssysteem stedelijk gebied					nee	Preventie
waterberging creëren					ja	Preventie
Klimaatbestendig bouwen					ja	Gevolgenbeperking
Kwetsbare functies op hogere delen					nvt	Gevolgenbeperking
Rampenplan opstellen en crisisorganisatie					nvt	Crisisbeheersing
Plannen voor snel en robuust herstel					nvt	Herstel
Bewustzijn creëren					nvt	Waterbewustzijn

7.3 Maatregelen tegen tsunami's

Om de gevolgen van tsunami's te beperken zijn er verschillende maatregelen mogelijk die zijn samengevat in Tabel 11. De golfhoogte en kracht van een tsunami zijn zo groot dat het vaak niet realistisch is om preventieve maatregelen te nemen om overstromingen te voorkomen.

Ook is klimaatadaptief bouwen voor dit type overstrooming waarschijnlijk niet kosteneffectief zijn omdat de golf hoog is en de kans op een tsunami klein. Wel kan er bij de bouw van kwetsbare functies zoals een nieuw ziekenhuis rekening mee worden gehouden door een locatie te kiezen die hoger ligt.

De meeste maatregelen richten zich daarom op de lagen crisisbeheer en waterbewustzijn. Dit zijn maatregelen zoals het inrichten van een Early warning systeem, het plaatsen van waarschuwborden en het opstellen van een rampenplan waarin vluchtroutes en de crisisorganisatie wordt uitgedacht.

Tabel 11: Inventarisatie maatregelen tegen overstrooming door een tsunami met in groen een indicatie van de mogelijk effectiviteit van de maatregel. De schaal loopt van effectief (donkergroen) tot niet effectief (wit).

Maatregel	Effectiviteit per herhalingsstijd				NbS	Meerlaagsveiligheid
	Dagelijks	T1	T10	T100		
Kwetsbare functies op hogere delen					nvt	Gevolgenbeperking
Dijken/keringen						
Early warning systeem					ja	Crisisbeheersing
Rampenplan opstellen en crisisorganisatie					nvt	Crisisbeheersing
Plannen voor snel en robuust herstel					nvt	Herstel
Tsunami waarschuwborden					nvt	Waterbewustzijn
Bewustzijn creëren					nvt	Waterbewustzijn

8 Discussie en aanbevelingen

8.1 Conclusies

Op basis van dit onderzoek kunnen we de volgende conclusies trekken:

- De regionale risicoprofielen voor het huidige klimaat zijn geactualiseerd. Voor Saba en St. Eustatius geeft dit geen nieuwe inzichten die het regionale risicoprofiel veranderen. Voor Bonaire is er meer detail aangebracht aan het regionale profiel door scenario's op te stellen voor verschillende herhalingstijden en onderscheid te maken tussen verschillende type overstromingen vanuit zee (toekomstige zeespiegelstijging en stormvloed en tsunami);
- Met de KNMI'23 scenario's zijn ook de regionale risicoprofielen opgesteld voor het toekomstige klimaat (zichtjaar 2050 en 2100) voor Bonaire. Hierin zijn leemtes in de kennis geïdentificeerd over de kansen op extreme neerslaggebeurtenissen in het toekomstige klimaat.
De hoogtegegevens voor St. Eustatius en Saba zijn te grof en onnauwkeurig om te bepalen of de overstromingsrisico's zullen toenemen in een toekomstig klimaat;
- Naast de regionale risicoprofielen zijn lokale waterrisicoprofielen opgesteld voor Bonaire. Hiermee wordt inzichtelijk welke overstromingsrisico's er zijn voor een specifieke locatie en welke waterdieptes bij verschillende herhalingstijden horen. Hiermee is het mogelijk om te bepalen welke maatregelen voor deze locatie geschikt zijn om de overstromingsrisico's te verminderen;
- Uit de KNMI'23 scenario's en literatuur blijkt dat voor Bonaire de toekomstige zeespiegelstijging een groter aandeel heeft voor de overstromingsrisico's dan een mogelijke stormvloed. In een toekomstig klimaat is het dus belangrijker om maatregelen te treffen voor de stijging van de zeespiegel (dagelijks) dan voor een stormvloed die eens per 100 jaar voorkomt. Voor Saba en St. Eustatius stijgt de zeespiegel minder snel en is de hoogte van de stormvloed hoger. Voor deze eilanden zijn voor de zichtjaren 2050 en 2100 zowel de toekomstige zeespiegelstijging als een stormvloed van belang;
- Het is bekend dat er tsunami's hebben plaatsgevonden en weer kunnen voorkomen op de eilanden. Alleen is er beperkte kennis beschikbaar over de kans op een tsunami en de bijbehorende golfhoogte. De golfhoogte van een tsunami kan groter zijn dan het gecombineerde effect van zeespiegelstijging en stormvloed;
- Het wind reversal effect kan lokaal voor extra opstuwing zorgen maar er is weinig bekend over hoe vaak dit voorkomt en hoeveel dit de overstromingsrisico's vergroot.

8.2 Discussie

- Er is meer data beschikbaar dan bij de quickscan in 2016 maar nog steeds de beperking bij het opstellen van de overstromingsrisico's de kwaliteit en beschikbaarheid van de data.
De volgende databronnen bevatten de grootste onzekerheden:
 - Het gebruikte hoogtemodel is erg grof in resolutie en verticale onnauwkeurigheid is groot. Het nieuwe hoogtemodel (AHN) wat later dit jaar wordt gepubliceerd maakt het mogelijk om dezelfde kaarten met een veel hogere resolutie en betere verticale nauwkeurigheid af te leiden. In het nieuwe hoogtemodel is deze verticale nauwkeurigheid kleiner dan de verwachte zeespiegelstijging;
 - Er zijn pas gedigitaliseerde en ongevalideerde neerslagmetingen beschikbaar vanaf 2016, hierdoor is het niet mogelijk om neerslagstatistiek af te leiden voor de eilanden;
 - Er is geen getijdenstation geïnstalleerd op de BES eilanden waardoor meetgegevens van andere eilanden moeten worden gebruikt om de zeespiegelstijging te monitoren.
- Door de beperkte kennis over de statistiek van extreme neerslag en tsunami is het lastig om het overstromingsrisico voor dit type overstroming nauwkeurig te bepalen. Daarnaast is het niet bekend hoeveel de kans op extreme neerslag zal toenemen in een toekomstig klimaat;
- De gevolgen voor verschillende overstromingen vanuit zee zijn nu bepaald met verschillende modellen. Voor de toekomstige zeespiegelstijging wordt een statisch badkuip model gebruikt en voor het modelleren van de stormvloed het dynamische SFINCS model. Hierdoor ontstaan er verschillen tussen de inundatiekaarten die worden veroorzaakt door verschillende invoergegevens en uitgangspunten;
- De impact van de overstromingen zijn voor de regionale risicoprofielen geclassificeerd op basis van het oppervlakte wat overstroomd is. Het landgebruik van het overstroomde gebied is niet gebruikt om te bepalen hoe groot de economische en ecologische schade is. Dit kan leiden tot een onderschatting van de overstromingsrisico's bij gebieden met hoge economische/ecologische waarde of een overschatting voor gebieden met een lage economische/ecologische waarde. Deze informatie is daarnaast ook nodig voor het bepalen van de kosteneffectiviteit van eventuele maatregelen;
- De overstromingsrisico's die worden veroorzaakt door extreme neerslag zijn ingeschat op basis van een (grote) hoogtekkaart en een eenvoudig model. Uit deze resultaten blijkt dat er in het huidige klimaat al bij vaak voorkomende situaties (jaarlijks) sprake is van wateroverlast door neerslag, wat overeenkomt met de praktijk. Om deze overstromingsrisico's nauwkeurigere te bepalen is meer informatie nodig over het watersysteem van rooien, dammen en salina's. Met deze informatie kan een hydrologisch model worden opgesteld, gekalibreerd en gevalideerd. Hiermee zou de wateroverlast bij veel voorkomende situaties en extreme neerslaggebeurtenissen voor het huidige en toekomstige klimaat nauwkeuriger kunnen worden vastgesteld.

8.3 Aanbevelingen

De volgende aanbevelingen worden gedaan naar aanleiding van dit onderzoek:

- Verbeteren van de basisdata door het inmeten van een nieuw hoogtemodel en daarmee het kaartmateriaal voor overstromingen vanuit zee te actualiseren;
- Meer informatie verzamelen over de kans op tsunami's en extreme neerslaggebeurtenissen op de eilanden;
- Met het nieuwe hoogtemodel en de kennis vanuit de eilanden over het watersysteem is het advies om een neerslag-afvoer model en hydraulische model op te stellen om de gevolgen van wateroverlast door extreme neerslaggebeurtenissen te bepalen. Vervolgens kan dit model ook gebruikt worden om maatregelen tegen wateroverlast te selecteren en te dimensioneren;
- Informatie ophalen bij de eilanden over het landgebruik van overstroomde gebieden en bijbehorende economische en ecologische waarde.

Hiermee kan de impact van de overstromingen voor de regionale risicoprofielen beter worden gekwantificeerd en kan de kosteneffectiviteit van eventuele maatregelen worden bepaald;

- Om te bepalen welke maatregelen passen bij de behoefte van de eilanden en welke wenselijk en effectief zijn is lokale inbreng van belang evenals de lokale omstandigheden. Dit kan gebeuren met ontwerpend onderzoek waarin op basis van schetsen en berekeningen strategieën ontwikkeld en beoordeeld kunnen worden. Omdat het gaat om ruimtelijke keuzes ligt het voor de hand dat ook de lokale overheid hiervoor in de lead is (eventueel met ondersteuning). In deze sessies kan worden bepaald welke maatregelen passen in het landschap, context van de eilanden en behoeften van de inwoners. De effectiviteit van de maatregelen kunnen met bovenstaande modellen worden getoetst.

9 Referenties

- [1] KNMI, KNMI'23 klimaatscenario's, gebruikersrapport, oktober 2023.
- [2] J.K. Leenders en T. Terpstra (HKV), Quickscan waterveiligheid Caribisch Nederland, HKV, 2016.
- [3] Dullaart, Job C.M.; van Manen, Stan. / An Assessment of the Impacts of Climate Change on Coastal Inundation on Bonaire. Institute for Environmental Studies (IVM), 2022. 55 p. (IVM Reports; 05).
- [4] van den Bout, B. (2022, May). Super-fast flash flood simulation using steady-state flow solvers. In EGU General Assembly Conference Abstracts (pp. EGU22-6953), <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022EGUGA..24.6953V/abstract>.
- [5] Max Engel et al, A prehistoric tsunami induced long-lasting ecosystem changes on a semi-arid tropical island — the case of Boka Bartol (Bonaire, Leeward Antilles), augustus 2014.
- [6] Dullaart, J.C.M., de Vries, H., Bloemendaal, N. et al. Improving our understanding of future tropical cyclone intensities in the Caribbean using a high-resolution regional climate model. Sci Rep 14, 6108 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49685-y>.
- [7] Ed Nijpels, Advies klimaattafel: 'Het is nooit te laat', 8 mei 2023.
- [8] Waterschap Rijn en IJssel, Integraal waterbeheer op Bonaire, eindrapport, Februari 2023, in samenwerking met Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, waterschap Limburg en Waterschapsbedrijf Limburg.
- [9] Rens A. de Boer, Roy E. Molenaar, Rutger Dankers, Sverre van Klaveren, Bertram de Rooij, Peter Verweij, Nature based Solutions for flood resilience on Bonaire, a scoping study, November 2023, WUR and WWF-NL.
- [10] Nasa, Sea Level Change (2022, March 30). Projected Sea-Level Rise Under Different SSP Scenarios. <https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool?lat=12&lon=-69>.
- [11] Hawker, L., Uhe, P., Paulo, L., Sosa, J., Savage, J., Sampson, C., & Neal, J. (2022). A 30m global map of elevation with forests and buildings removed. Environmental Research Letters.
- [12] Beoordeling tsunami gevaar voor het eilandgebied Curaçao, deel I: tsunami hazard Assessment, meteorologische dienst van de Nederlandse Antillen & Aruba, Aqualectra, United Telecommunication Services.
- [13] Bonaire.nu, Weerbericht van Bonaire: weinig wind en reversal op komst, <https://bonaire.nu/2024/03/25/weerbericht-van-bonaire-weinig-wind-en-reversal-op-komst/#:~:text=Bij%20een%20wind%20reversal%20op,zandstranden%20aan%20de%20westkust%20aantasten,25%20maart%202024>.

- [14] PNV 2008, Nationale Veiligheid, Nationale risicobeoordeling, Leidraad methode 2008, Programma Nationale Veiligheid, juni 2008.
- [15] Dullaart, Job; Muis, S. (Sanne); Bloemendaal, Nadia; Chertova, Maria; Couasnon, Anais et al. (2022): COAST-RP: A global COastal dAtaset of Storm Tide Return Periods. Version 2. 4TU.ResearchData. dataset. <https://doi.org/10.4121/13392314.v2>.
- [16] Torres, R. R., & Tsimplis, M. N. (2011). Tides and long-term modulations in the Caribbean Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C10).
- [17] Brandsma, T., 2016. Overstromingsrisico's Caribisch Nederland, KNMI, memorandum versie 1 dd 16 juni 2016.

Bijlagen

A Ophalen beschikbare kennis

A.1 Overzicht bronnen, literatuur en interviews

Om de meest recente kennis over de verschillende overstromingsrisico's op te halen zijn verschillende databronnen, artikelen, rapporten en experts geraadpleegd. Een samenvatting hiervan is te vinden in Figuur 26. In de volgende paragrafen wordt eerst de informatie over klimaatverandering uit de KNMI'23 klimaatscenario's op de BES eilanden samengevat en vervolgens wordt de opgehaalde kennis per overstromingsrisico samengevat en komen deze bronnen terug. De inundatiekaarten voor Bonaire zijn ontsloten via de klimaateffectenatlas en komen uit het onderzoek "The impact of Climate Change on Coastal inundation on Bonaire" van de VU. Dit onderzoek wordt eerst vergeleken met de KNMI scenario's en daarna verder toegelicht. De kaarten zijn opgenomen in hoofdstuk 5.

Gebruikte (data)bronnen	Literatuur	Interviews
<ul style="list-style-type: none"> • KNMI'23 scenario's (2023) • Quickscan HKV (2016) • Inundatiekaarten via klimaateffectenatlas • Luchtfoto's (NSO dataportaal) • Hoogtemodel opgehaald 	<ul style="list-style-type: none"> • The Impacts of Climate Change on Coastal Inundation on Bonaire, VU/Greenpeace (2022) • WUR: scoping studie NBS maatregelen op Bonaire (2023) • Integraal waterbeheer op Bonaire (WL, HHNK, WRIJ) (2023) • Advies klimaattafel: 'het is nooit te laat' (Ed Nijpels) (2023) • Improving our understanding of future tropical cyclone intensities in the Caribbean using a high-resolution regional climate model • A prehistoric tsunami induced long-lasting ecosystem changes on a semi-arid tropical island • Nieuwsartikelen 	<ul style="list-style-type: none"> • KNMI experts tsunami's en seismologie • KNMI expert klimaatverandering/wateroverlast • Expert waterveiligheid Curaçao • Medewerker ZonMW project

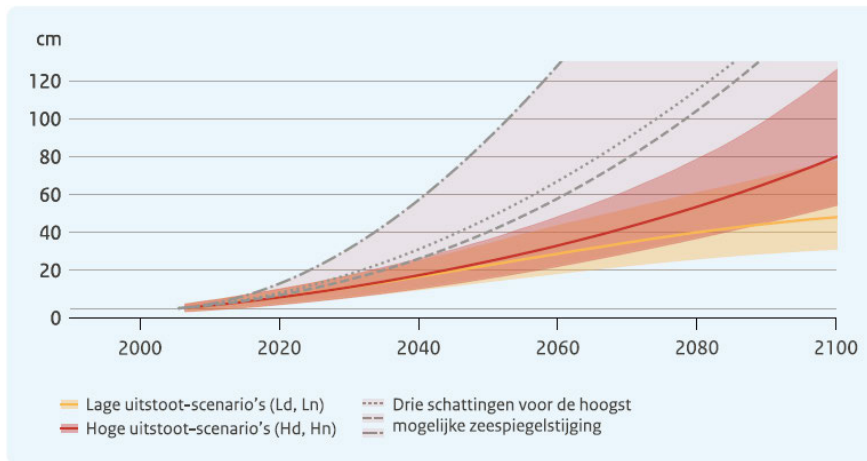
Figuur 26: Overzicht bronnen, literatuur en interviews.

A.2 Klimaatverandering

In de meest recente klimaatscenario's van het KNMI (KNMI'23) [1] is een hoofdstuk opgenomen over het Caribisch deel van Nederland. Voor de BES eilanden zijn er vier klimaatscenario's opgesteld: Hoge uitstoot, droog (Hd) en nat (Hn) en Lage uitstoot, droog (Ld) en nat (Ln). Voor deze scenario's zijn er projecties opgesteld voor de gemiddelde neerslag, orkanen, temperatuur, wind en zeespiegelstijging voor de zichtjaren 2050 en 2100. Er is in de klimaatscenario's geen informatie beschikbaar over de neerslagstatistiek van extreme neerslag (kans en neerslag-hoeveelheid van buien) en hoe die kunnen veranderen in de toekomst. In de volgende paragrafen worden de onderwerpen besproken die relevant zijn voor de overstromingsrisico's.

A.2.1 Zeespiegelstijging

Op basis van de IPCC klimaatscenario's en de metingen van de zeespiegelstijging bij het getijdenstation op Magueyes Island (Puerto Rico) zijn er projecties opgesteld voor de zeespiegelstijging in 2050 en 2100. Op Bonaire wordt een stijging van de zeespiegel van 3,7 mm per jaar voorspeld, dit is ongeveer gelijk met het wereldwijde gemiddelde. De verwachting is dat de zeespiegel in 2100 bij het lage uitstootscenario 31 tot 78 cm stijgt en 55 tot 127 cm bij een hoog uitstootscenario, zie ook Figuur 27. Maar de bovengrens van de stijging kan oplopen tot 3,4 meter als onzekere processen zoals het instabiel worden van de ijskappen bij Antarctica al voor 2100 optreden. De zeespiegelstijging voor St. Eustatius en Saba zal minder stijgen dan voor Bonaire.



Figuur 27: Zeespiegelstijging bij Bonaire (KNMI'23) voor 2100 t.o.v. het huidige niveau voor verschillende uitstootscenario's en drie schattingen van de hoogst mogelijke zeespiegelstijging. Bron: KNMI'23 [1].

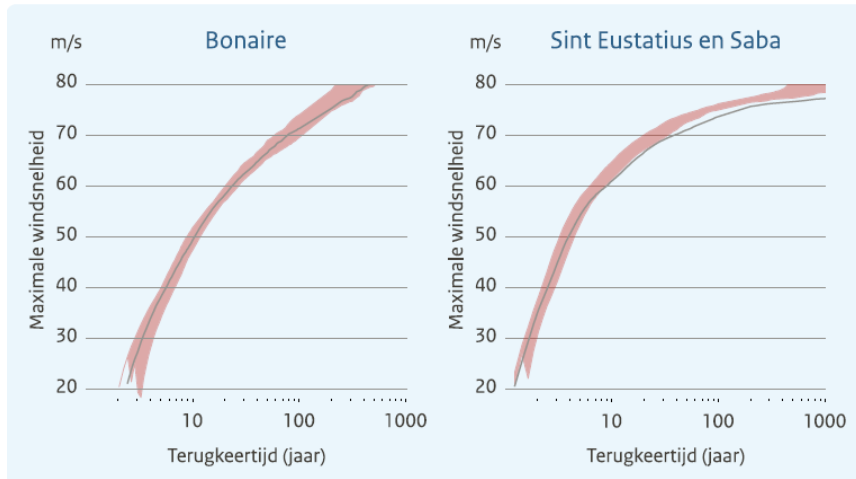
In het onderzoek van de VU [3] zijn voor het bepalen van de zeespiegelstijging dezelfde IPCC scenario's gebruikt als in de KNMI'23 scenario's. Maar de doorvertaling van de IPCC scenario's naar projecties van de zeespiegelstijging zijn afgeleid met de Sea Level Projection Tool van NASA [10]. Ten tijde van het uitvoeren van dit onderzoek waren de KNMI'23 scenario's nog niet beschikbaar. In Tabel 12 zijn de cijfers voor zeespiegelstijging uit het KNMI'23 en het onderzoek van de VU samengevat. Hierin is te zien dat de projecties voor de zeespiegelstijging van de VU overeen komen met de KNMI'23 scenario's voor de hoge en lage uitstoot en voor de zichtjaren 2050 en 2100. Alleen de projecties voor het zichtjaar 2300 en het scenario met een kleine onzekerheid (instabiliteit van de ijskappen op Antarctica voor 2100) kunnen niet direct vergeleken worden.

Tabel 12: Zeespiegelstijging in onderzoek van de VU vergeleken met zeespiegelstijging in KNMI'23 scenario's.

	KNMI'23 lage uitstoot		IPCC	SLR VU	KNMI'23 hoge uitstoot		IPCC	SLR VU
	cm stijging	band-breedte	scenario	cm stijging	cm stijging	bandbreedte	scenario	cm stijging
2050	23	14-34	SSP1-2.6	24	25	16-37	SSP5-8.8	27
2100	48	31-78	SSP1-2.6	51	81	55-127	SSP5-8.8	85
2300	Niet aanwezig	Niet aanwezig	SSP1-2.6 LC	105	Niet aanwezig	Niet aanwezig	SSP5-8.8 LC	405

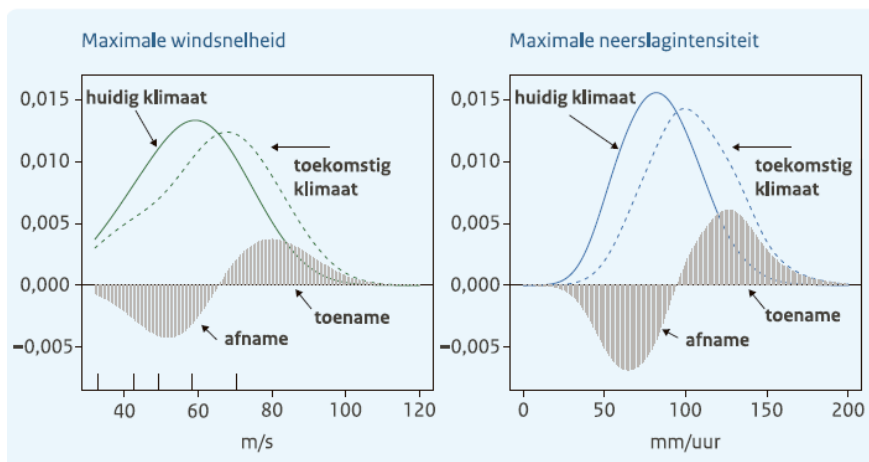
A.2.2 Orkanen

Tijdens een orkaan valt er veel regen, treden er hoge windsnelheden op, zijn er hoge golven en kunnen er modderstromen optreden. Vanwege de geografische ligging van Saba en St. Eustatius is de kans op orkanen van de zwaarste categorie (zoals orkaan Irma) in het huidige klimaat ongeveer twee keer zo groot dan voor Bonaire [1], zie Figuur 28. Voor het toekomstig klimaat verwacht het KNMI dat deze orkanen van de zwaarste categorie vaker zullen voorkomen rondom Saba en St. Eustatius. De kans op orkanen rondom Bonaire in de toekomst blijft onveranderd.



Figuur 28: Herhalingsstijden van een orkaan van de zwaarste categorie binnen 250 km van de BES eilanden. In rood de projectie voor het toekomstige klimaat (2015-2050) bij het hoge uitstootscenario, bron: KNMI'23.

De KNMI'23 scenario's laten ook zien dat in een toekomstig klimaat de zwaarste categorie orkanen gepaard zullen gaan met hogere maximale windsnelheden en hoger neerslagintensiteiten. De impact van deze orkanen zal dus toenemen, zie ook Figuur 29. Daarnaast toont het artikel "Improving our understanding of future tropical cyclones intensities in the Caribbean using a high-resolution regional climate model" [6] aan dat de stormvloed veroorzaakt door orkanen hoger zullen zijn als de gemiddelde temperatuur stijgt. Uit dit onderzoek volgt dat de stormvloed veroorzaakt door orkaan Dorian (2017) en orkaan Maria (2019) met 0,3 tot 0,6 meter zal stijgen bij een toekomstig klimaat waarbij de gemiddelde temperatuur met 3,4 graden stijgt.



Figuur 29: Kansverdeling van de maximale windsnelheid en maximale neerslagintensiteit van orkanen in het huidige klimaat en een toekomstig klimaat (3,4 graden opwarming). Bron: KNMI'23 [1].

A.2.3 Neerslag

Er valt gemiddeld 514 mm per jaar neerslag per jaar op Bonaire en 1034 mm op St. Eustatius en Saba (huidig klimaat KNMI'23). Het grootste deel van deze neerslag (ongeveer 70%) valt in het regenseizoen, dit zijn de maanden oktober tot en met december. In het lage uitstoot scenario stijgt de temperatuur en neemt de neerslaghoeveelheid enigszins af. Bij het hoge uitstootscenario neemt de neerslag meer af tot 48% voor het droge scenario met hoge uitstoot (Hd) in 2100. In de KNMI'23 scenario's zijn echter geen statistieken opgenomen voor extreme neerslag in het huidige en toekomstige klimaat. Uit interviews met KNMI-experts blijkt dat er te weinig meetgegevens beschikbaar zijn om deze statistiek af te leiden.

A.2.4 Tsunami's

Uit de interviews met het KNMI kwam naar voren dat de kans op tsunami's en de gevolgen (maximale golfhoogte) onafhankelijk zijn van klimaatverandering of menselijke activiteit.

A.3 Overstromingen door een stormvloed en toekomstige zeespiegelstijging

In het onderzoek van de VU zijn overstromingen vanuit de zee voor Bonaire gemodelleerd voor zowel de toekomstige kustlijn (zeespiegelstijging) en een eens in 100 jaar stormvloed voor Bonaire. De inundatiekaarten zijn ook ontsloten via de klimaateffectenatlas. Voor St. Eustatius en Saba zijn er wel cijfers over de verwachte zeespiegelstijging maar geen inundatiekaarten voor de toekomstige kustlijn of een eens in de 100 jaar stormvloed beschikbaar.

De inundatiekaarten voor overstroming door toekomstige zeespiegelstijging zijn bepaald met een statische badkuip methode waarin met de projecties van de zeespiegelstijging (Tabel 13) en het hoogtemodel wordt bepaald waar de toekomstige kustlijn komt te liggen. Voor de scenario's en zichtjaren uit Tabel 13 die horen bij de KNMI'23 scenario's zijn de inundatiekaarten gepubliceerd via de klimaateffectatlas, zie ook Tabel 12.

Tabel 13 : zeespiegelstijging projecties gebruikt voor het opstellen van de inundatiekaarten [3].

SLR (m)	SSP1-2.6	SSP-4.5	SSP5-8.5	SSP5- 8.5 LC	SSP1-2.6 LC
2050	0.24	0.25	0.27	0.28	NA
2100	0.51	0.64	0.85	0.98	NA
2150	0.78	1.05	1.45	2.19	NA
2300	NA	NA	NA	4.05	1.05

Naast de toekomstige kustlijn is ook de hoogte van een eens in de 100 jaar stormvloed bepaald. De inundatiekaarten voor de eens in 100 jaar stormvloed zijn afgeleid met het dynamisch SFINCS (Super-Fast Inundation of CoastS) model. Deze stormvloed bestaat uit de zeespiegelstijging, de eens in de 100 jaar stormvloed en de hoogte van het getij. Het getij is in het Caribische gebied laag en is bij Bonaire gemiddeld minder dan 20 cm [16]. De hoogte van een eens in de 100 jaar stormvloed in dit onderzoek komt uit de COastal dAtaset of Storm Tide Return Periods (COAST-RP) Dataset [15], deze is weergegeven in Tabel 14. Hierin is te zien dat de hoogte van een stormvloed relatief laag is en dat er ook maar 20 cm verschil zit tussen een eens per jaar stormvloed en een eens per 1000 jaar stormvloed. Voor het toekomstige klimaat wordt de zeespiegelstijging opgeteld bij de stormvloed maar verandert de hoogte van de stormvloed en het getij niet. De zeespiegelstijging heeft dus een veel grotere invloed dan de hoogte van de stormvloed zelf.

Tabel 14: Hoogte van een stormvloed [m] voor de huidige situatie bij verschillende herhalingstijden.
Bron: COAST_RP dataset.

	1/1 jaar	1/2 jaar	1/10 jaar	1/50 jaar	1/100 jaar	1/1000 jaar
Bonaire	0,19	0,20	0,22	0,24	0,26	0,41
Saba en Sint Eustatius	0,15	0,17	0,24	0,48	0,59	0,86

Door de projecties van de toekomstige zeespiegelstijging en de stormvloeden te combineren zijn er met een GIS analyse naast de al beschikbare inundatiekaarten ook kaarten afgeleid voor de stormvloed scenario's die horen bij een herhalingstijd van eens per jaar tot en met eens per 1000 jaar. Met de inundatiekaarten voor de toekomstige kustlijn en de kaarten voor de stormvloeden kunnen de groen gearceerde delen in Tabel 15 van de risicoprofielen worden ingevuld.

Tabel 15: Risicodiagram met de scenario's, die bij overstromingen vanuit zee horen, groen gearceerd.

	Dagelijks	1/1 jaar	1/2 jaar	1/10 jaar	1/50 jaar	1/100 jaar	1/1000 jaar
Stormvloeden	ZSS KNMI'23 en kaarten VU	COAST-RP	COAST-RP	COAST-RP	COAST-RP	COAST-RP en kaarten VU	COAST-RP
Tsunami's	ZSS KNMI'23 en kaarten VU		-	-		-	Schatting experts
Neerslag	ZSS KNMI'23 en kaarten VU	Statistiek Curaçao en hoogtemodel	Historische gebeurtenis	Statistiek Curaçao en hoogtemodel	Statistiek Curaçao e hoogtemodel	Statistiek Curaçao en hoogtemodel	Statistiek Curaçao en hoogtemodel

Het hoogtemodel wat voor deze analyses is gebruikt is het FABDEM model van Copernicus [11], dit is een wereldwijd beschikbaar hoogtemodel met een resolutie van ongeveer 30 bij 30 meter. Uit een aantal veldmetingen [3] is gebleken dat dit hoogtemodel op sommige plaatsen 1,2 meter hoger ligt dan ingemeten hoogtes.

Dit kan dus betekenen dat de inundatiekaarten de overstromingsrisico's mogelijk onderschatten. Afgelopen maanden is er een nieuw hoogtemodel (AHN) ingemeten voor de BES eilanden met de LIDAR methode. Met deze techniek is het mogelijk om een hoogtemodel in te meten met een resolutie van 0,5 bij 0,5 meter en met een verticale nauwkeurigheid van minder dan 15 cm. Dit hoogtemodel moet nog worden bewerkt en gecontroleerd waarna het later dit jaar wordt gepubliceerd. Met dit hoogtemodel is het mogelijk om deze kaarten met een veel hogere nauwkeurigheid en resolutie af te leiden.

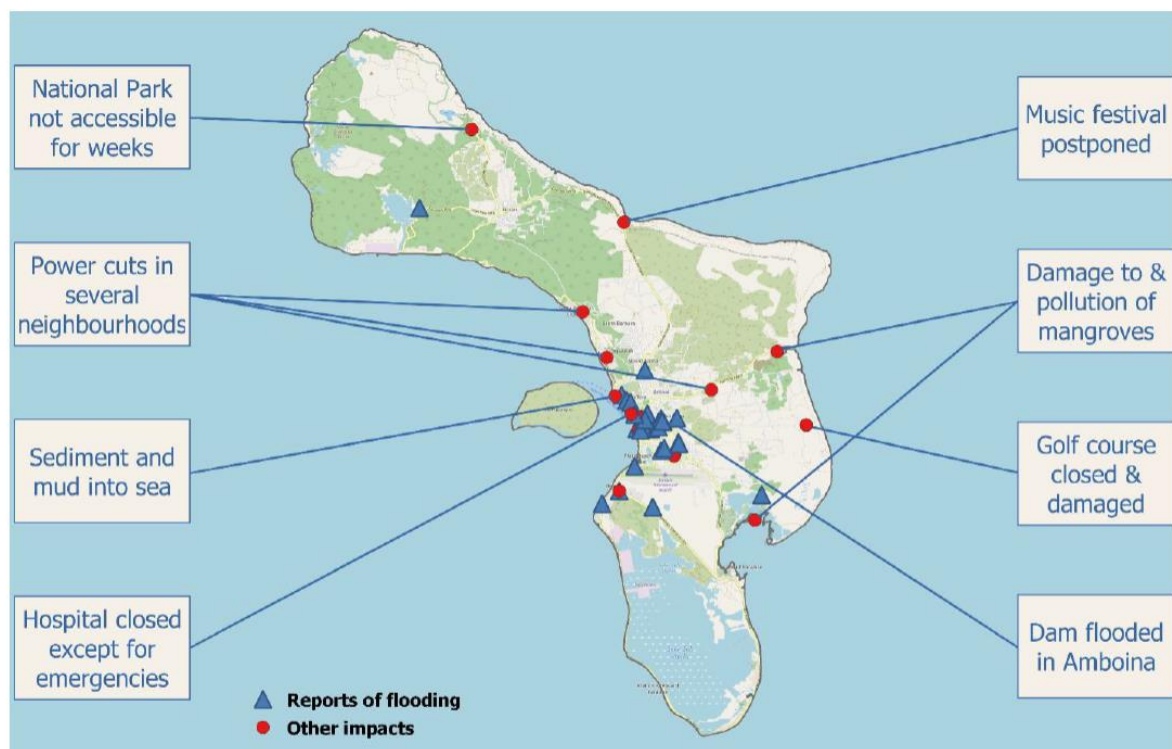
Bij verschillende gesprekken en uit nieuwsartikelen [13] kwam naar voren dat het fenomeen wind reversal ook een rol speelt voor overstromingen vanuit zee. Normaal gesproken komt de wind uit het oosten en bij een wind reversal draait de wind en komt die uit het westen. Dit heeft tot gevolg dat er hoge golven en windopzet kunnen optreden op de kusten van het eiland die normaal beschut liggen. Dit zijn ook de locaties waar de havens liggen of andere infrastructuur waardoor de gevolgen van een overstroming groter zijn. Momenteel hebben we geen (kwantitatieve) informatie kunnen vinden over de kans op en de impact van wind reversal op de eilanden. Daarom is dit niet meegenomen in de risicoprofielen en inundatiekaarten.

A.4 Wateroverlast door extreme neerslag

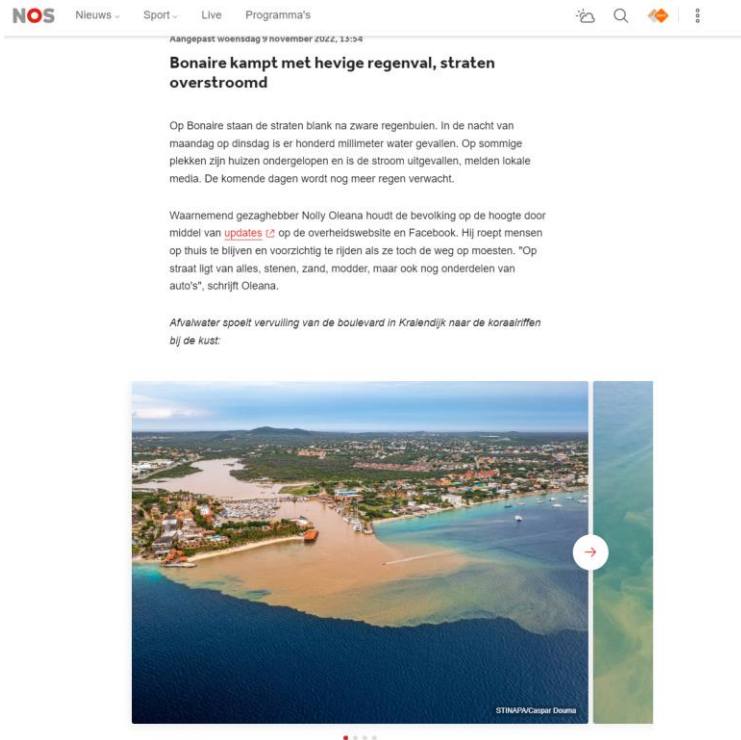
Omdat er geen neerslagstatistiek beschikbaar is voor extreme neerslag gebeurtenissen zullen we de kansen en gevolgen van overstromingen door extreme neerslag inschatten door naar een historische gebeurtenis te kijken en daarna met de Fastflood applicatie en de HAND index een eerste inschatting te maken van de gebieden die mogelijk kwetsbaar zijn voor extreme neerslag.

A.4.1 Wateroverlast bij historische gebeurtenissen

Tropische stormen en orkanen kunnen gepaard gaan met extreme hoeveelheden neerslag, die tot overstromingen en modderstromen kunnen leiden. Op 7 en 8 november 2022 trok er een tropische storm over Bonaire die veel wateroverlast heeft veroorzaakt. In Figuur 30 zijn de meldingen op het nieuws en social media van deze gebeurtenis verzameld door de WUR [9]. Deze 76 meldingen zijn verspreid over 46 locaties op het eiland. Het merendeel van de meldingen gaat over wateroverlast op wegen en in tuinen. Daarnaast was het ziekenhuis voor twee dagen dicht (behalve voor spoedgevallen), waren de scholen een dag gesloten, was stroomuitval in meerdere huizen, schade aan de natuur en een dam doorbraak. Tijdens deze gebeurtenis spoelde er ook een grote hoeveelheid sediment uit naar zee, dit is schadelijk voor het koraal. Dit is te zien in het NOS artikel in Figuur 31.

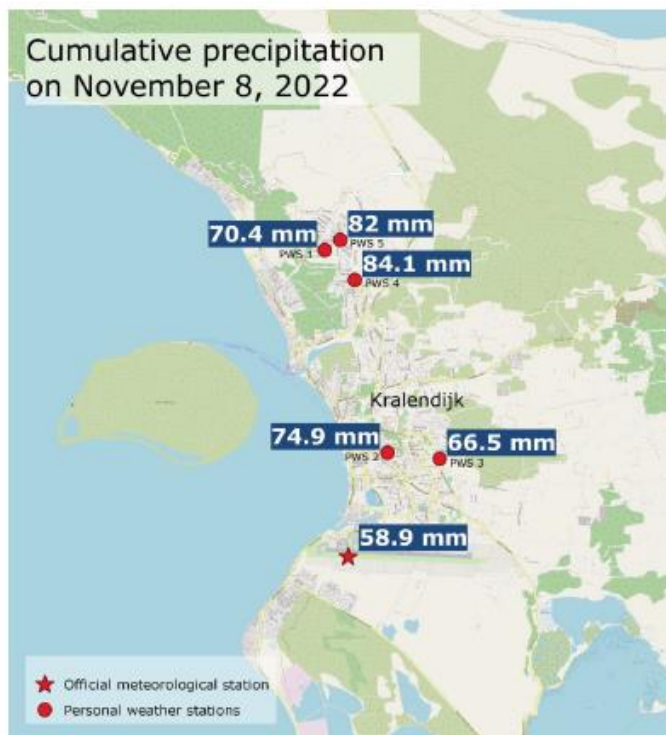


Figuur 30: Meldingen van wateroverlast tijdens extreme neerslag op 8 november 2022 [9].



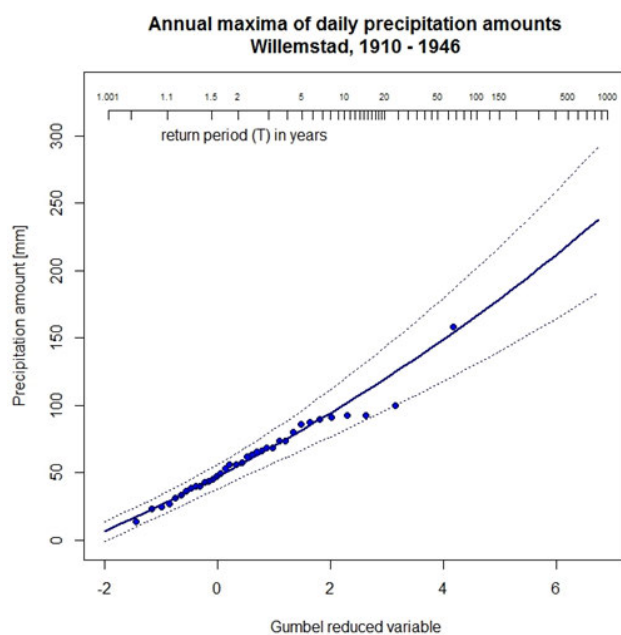
Figuur 31: NOS artikel over wateroverlast en uitspoeling van sediment na de neerslag op 8 november 2022.

De meetgegevens van het officiële weerstation op het vliegveld en amateurstations in Kralendijk tonen aan dat er in de ochtend van 8 november in een aantal uur 60 tot 84 mm regen is gevallen, zie Figuur 32. We gebruiken de gemeten neerslaghoeveelheid van 60 mm bij het officiële om inundatiekaarten te maken om de gevolgen van wateroverlast in te schatten voor de risico-profielen.



Figuur 32: Gemeten neerslaghoeveelheden op 8 november 2022 [9].

Er is geen neerslagstatistiek beschikbaar voor Bonaire omdat de meetreeksen pas vanaf 2016 digitaal beschikbaar zijn. Wel is er neerslagstatistiek afgeleid voor een meetstation in Willemstad (Curaçao) [46], zie Figuur 33. Deze neerslagstatistiek is gebaseerd op een meetreeks vanaf 1910 t/m 1940, dus de klimaatverandering tussen 1940 en het huidige klimaat zit hier niet in verwerkt. Als we deze neerslagstatistiek bekijken heeft een neerslaghoeveelheid van 60 mm ongeveer een terugkeertijd van eens in de 2 jaar. Uit het interview met het KNMI kwam naar voren dat er vorig jaar ook een neerslaggebeurtenis heeft plaatsgevonden die tot wateroverlast heeft geleid en dat het Terramar museum in Kralendijk sinds de opening in 2016 meerdere keren last heeft gehad van wateroverlast. Dit geeft een indicatie hoe vaak er wateroverlast voorkomt op Bonaire. Dit heeft niet alleen te maken met de neerslaghoeveelheden die mogelijk toenemen door klimaatverandering maar ook door het beheer en onderhoud van het watersysteem. Het gebied rondom Kralendijk is vrij vlak, het stedelijk gebied is aan het groeien en het heeft een beperkt watersysteem van rooien, dammen en salina's. Hierdoor kan er bij een bui al snel wateroverlast ontstaan.



Terugkeertijd [jaar]	Hoeveelheid [mm]
1	47
2	62
10	102
20	120
50	146
100	166

Figuur 33: Neerslagstatistiek opgesteld voor Willemstad Curaçao. Links de extreme waarde verdeling en rechts de neerslaghoeveelheden bij een aantal herhalingstijden. Bron KNMI [17].

A.4.2 Impact neerslag met Fastflood applicatie en HAND index

Er is geen hydrologisch en hydraulisch model beschikbaar voor Bonaire om inundaties uit te rekenen bij extreme neerslag. In de eerdere quickscan hebben we er daarom voor gekozen om op basis van de HAND index (Height above nearest drainage) te analyseren welke gebieden mogelijk kwetsbaar zijn voor wateroverlast op basis van het hoogtemodel. De HAND-index kan gebruikt worden om een hazard map te maken waarin binnen een gebied meer en minder kwetsbare delen kunnen worden onderscheiden. Anders gezegd: toepassing van de HAND index resulteert in een overzicht van de natuurlijke afwateringspatronen op basis van de beschikbare hoogtegegevens. Met de HAND-index kan geen uitspraak worden gedaan over de frequentie en exacte gevolgen (waterdieptes) van gebeurtenissen. Deze kaarten zijn te vinden in paragraaf 5.2.

Voor de risicoprofielen op Bonaire hebben inundatiekaarten en kansen nodig om de risico's van extreme neerslag in te schatten.

Daarom gebruiken we de neerslaghoeveelheid van de gebeurtenis op 8 november 2022 waarvan we weten dat dit tot wateroverlast heeft geleid om met de Fastflood applicatie [4] een beeld te krijgen van de inundaties. De Fastflood applicatie berekent de waterdiepte bij een uniform opgelegde neerslaghoeveelheid op basis van het hoogtemodel. Dit model is niet gekalibreerd en gevalideerd maar geeft wel een eerste inschatting van de mogelijke inundaties. Hierbij gaat het om de natuurlijke afstroming van het water op basis van het beschikbare hoogtemodel en wordt geen rekening gehouden met het watersysteem en processen in de ondergrond. Het inundatiebeeld komt in grote lijnen overeen met de gerapporteerde meldingen van wateroverlast en de gebieden die zijn geïdentificeerd met de HAND index.

Met deze inundatiekaarten is het mogelijk om voor extreme neerslag ook scenario's toe te voegen aan het risicodiagram, dit is groen gearceerd in Tabel 16.

Tabel 16: Risicodiagram met het scenario, dat bij wateroverlast door neerslag hoort, groen gearceerd.

	Dagelijks	1/1 jaar	1/2 jaar	1/10 jaar	1/50 jaar	1/100 jaar	1/1000 jaar
Stormvloeden	ZSS KNMI'23 en kaarten VU	COAST-RP	COAST-RP	COAST-RP	COAST-RP	COAST-RP en kaarten VU	COAST-RP
Tsunami's	ZSS KNMI'23 en kaarten VU		-	-		-	Schatting experts
Neerslag	ZSS KNMI'23 en kaarten VU	Statistiek Curaçao en hoogtemodel	Historische gebeurtenis	Statistiek Curaçao en hoogtemodel	Statistiek Curaçao e hoogtemodel	Statistiek Curaçao en hoogtemodel	Statistiek Curaçao en hoogtemodel

A.5 Tsunami's

In het Caribisch gebied kunnen tsunami's voorkomen die tot overstromingen kunnen leiden.

Uit literatuur en interviews hebben we de volgende informatie opgehaald:

- Saba en St. Eustatius liggen dichtbij een grote subductie (onderschuiving) zone, waar aardbevingen een tsunami kunnen veroorzaken. Daarnaast kunnen aardbevingen van veraf ook een tsunami veroorzaken. In de literatuur is te vinden dat een aardbeving bij Portugal in 1755 een tsunami veroorzaakte met een golfhoogte van 7 meter bij Saba en 4,5 meter bij Sint Maarten [2];
- Voor Bonaire zijn geen historische gegevens van een tsunami bekend. Wel wijzen sedimentafzettingen op een tsunami meer dan 3300 jaar geleden [5];
- Uit onderzoek over tsunami gevaar op Curaçao [12] volgt dat er vooral tsunami's vanuit noord/noordoostelijk richting worden verwacht en dat de schattingen van de maximale golfhoogte variëren tussen 1 en 12 meter;
- In de eerder opgestelde Quicksan 2016 [2] worden de mogelijke oorzaken van tsunami's uitgebreider beschreven. Voor deze quickscan hebben we destijds gesproken met de Tsunami expert van Deltares. Die gaf aan dat modelstudies ontbreken maar dat zijn expert inschatting is dat de kans op een tsunami ongeveer eens per 1000 jaar is en dat de maximale golfhoogte van een tsunami 20 tot 25 meter is;
- Het KNMI is verantwoordelijk voor het monitoren van de seismologische activiteit en het waarschuwen voor tsunami's. We hebben de hoofd seismologie KNMI vulkanoloog KNMI gesproken om kennis op te halen over tsunami's. Hieruit kwam naar voren dat ze geen schatting kunnen geven van de kans op en de golfhoogte van een tsunami.

Om dit te kunnen bepalen is er een modelonderzoek nodig of een consultatie van internationale experts. Het KNMI ontvangt via het Pacific Tsunami Centre een bericht als er een beving heeft plaatsgevonden die kan leiden tot een tsunami, als er ook een tsunami wordt waargenomen volgt er later meer informatie over de richting, snelheid en hoogte van de tsunami. Op basis van deze informatie worden de BES eilanden gewaarschuwd door het KNMI. Dit is nog niet voor gekomen buiten de jaarlijkse oefeningen. Verder kwam uit het gesprek naar voren dat klimaatverandering en menselijke activiteit geen invloed hebben op de kans op een tsunami en de golfhoogte. Ook kan je geen maatregelen treffen om de kans op of golfhoogte van een tsunami te verkleinen. Wel kan je maatregelen treffen op het gebied van awareness, crisisbeheersing en ruimtelijke planning om de gevolgen van een tsunami te verkleinen.

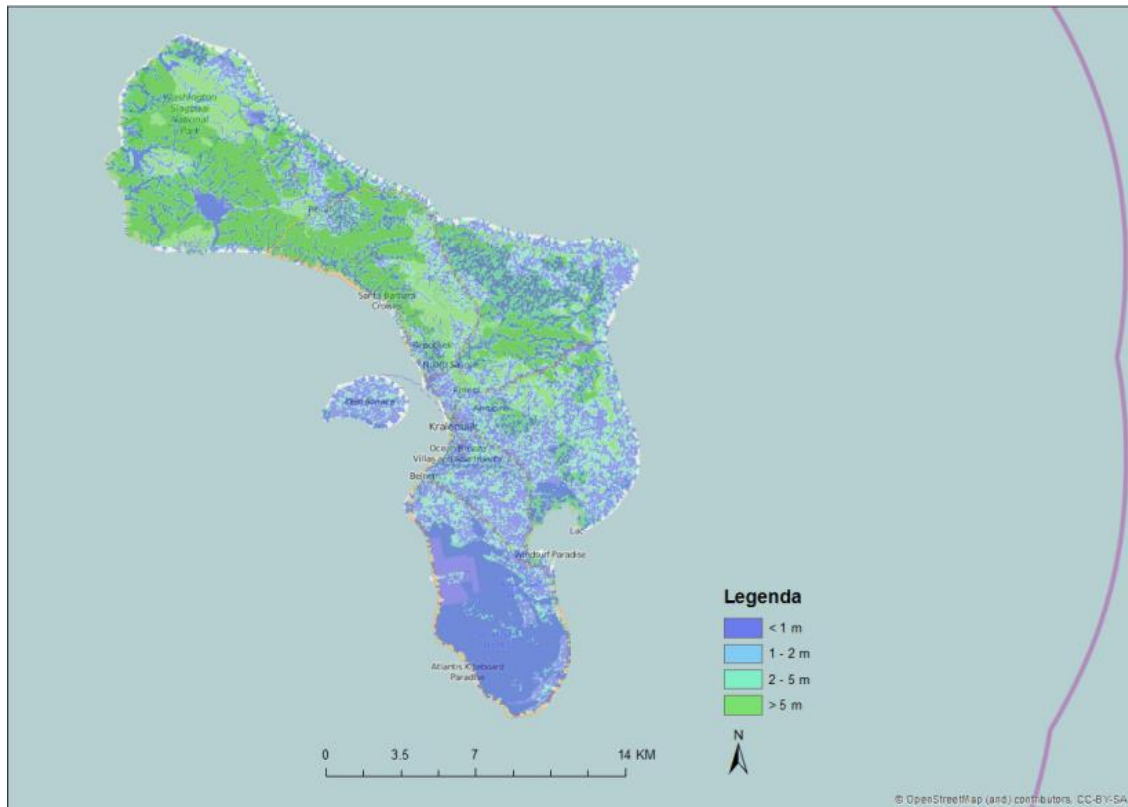
Samengevat weten we dus niet de exacte kans van voorkomen en impact van een tsunami maar kunnen we met deze kennis wel inschatten dat het ongeveer eens per 1000 jaar zal voorkomen en dat de golfhoogte minimaal 5 meter is. Hiermee kunnen we de tsunami invullen in het risicodiagram (groen gearceerd in Tabel 17).

Tabel 17: Risicodiagram met het scenario, dat bij overstroming door een tsunami hoort, groen gearceerd.

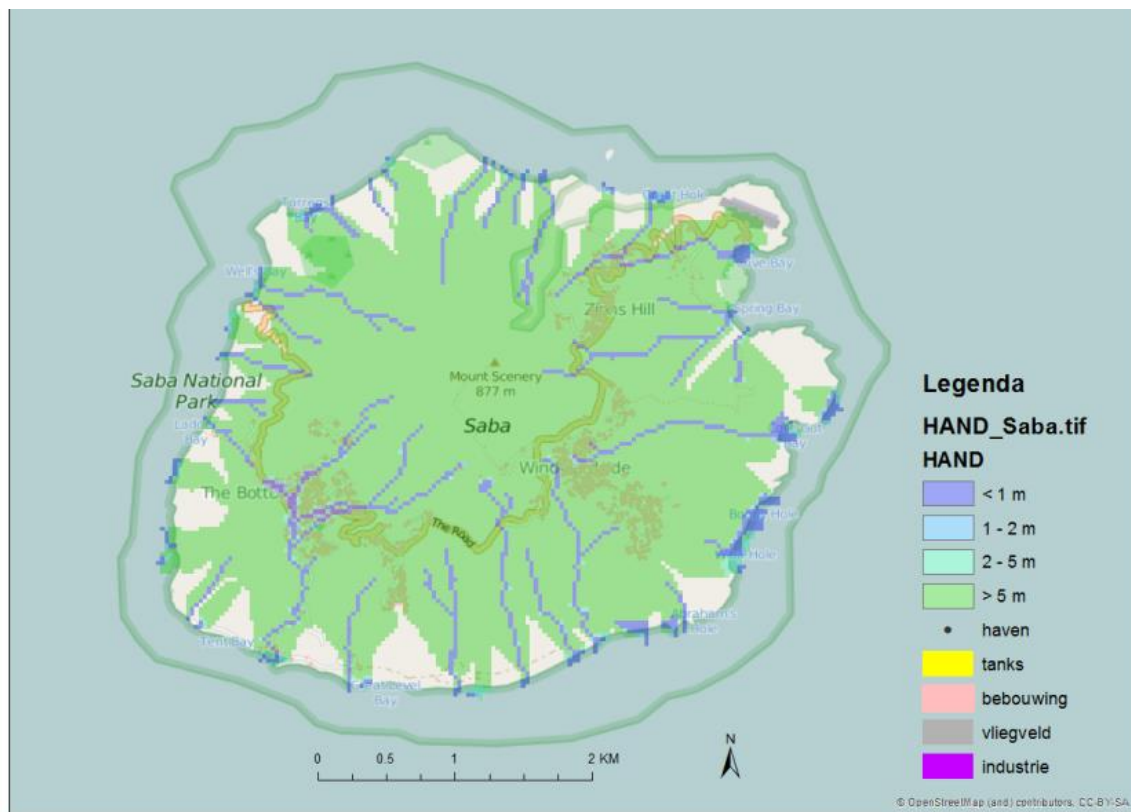
	Dagelijks	1/1 jaar	1/2 jaar	1/10 jaar	1/50 jaar	1/100 jaar	1/1000 jaar
Stormvloeden	ZSS KNMI'23 en kaarten VU	COAST-RP	COAST-RP	COAST-RP	COAST-RP	COAST-RP en kaarten VU	COAST-RP
Tsunami's	ZSS KNMI'23 en kaarten VU		-	-		-	Schatting experts
Neerslag	ZSS KNMI'23 en kaarten VU	Statistiek Curaçao en hoogtemodel	Historische gebeurtenis	Statistiek Curaçao en hoogtemodel	Statistiek Curaçao e hoogtemodel	Statistiek Curaçao en hoogtemodel	Statistiek Curaçao en hoogtemodel

B Kaartmateriaal

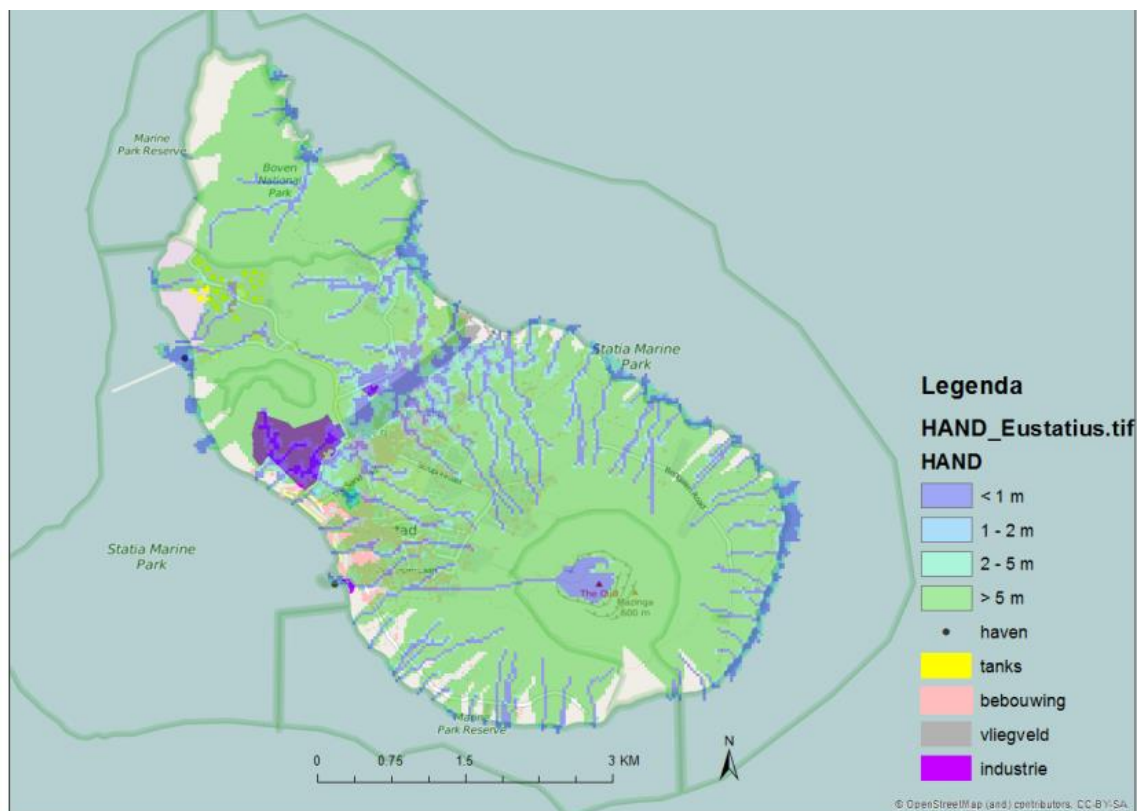
B.1 HAND index



Figuur 34: HAND index Bonaire.

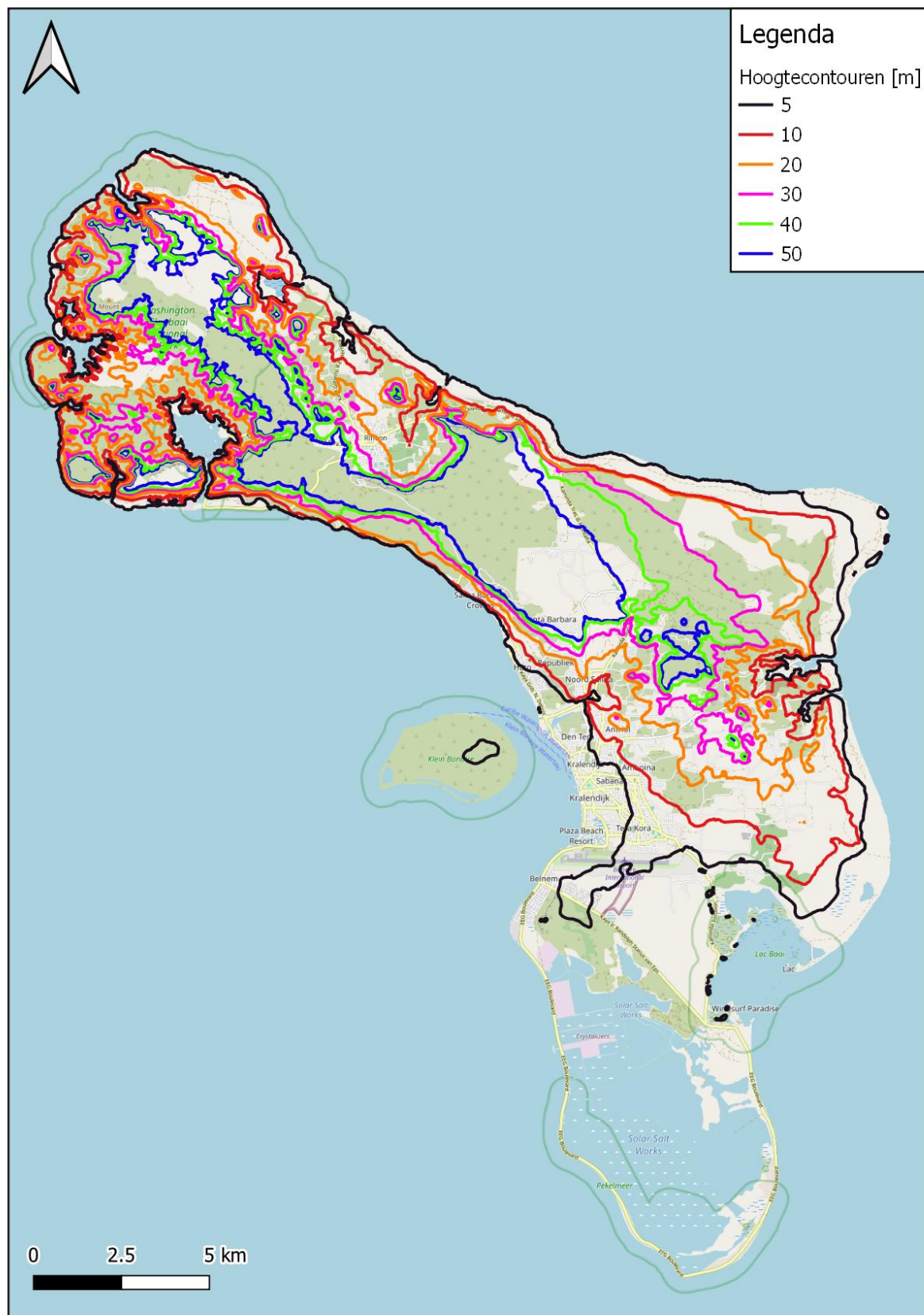


Figuur 35: HAND index Saba.



Figuur 36: HAND index Sint Eustatius.

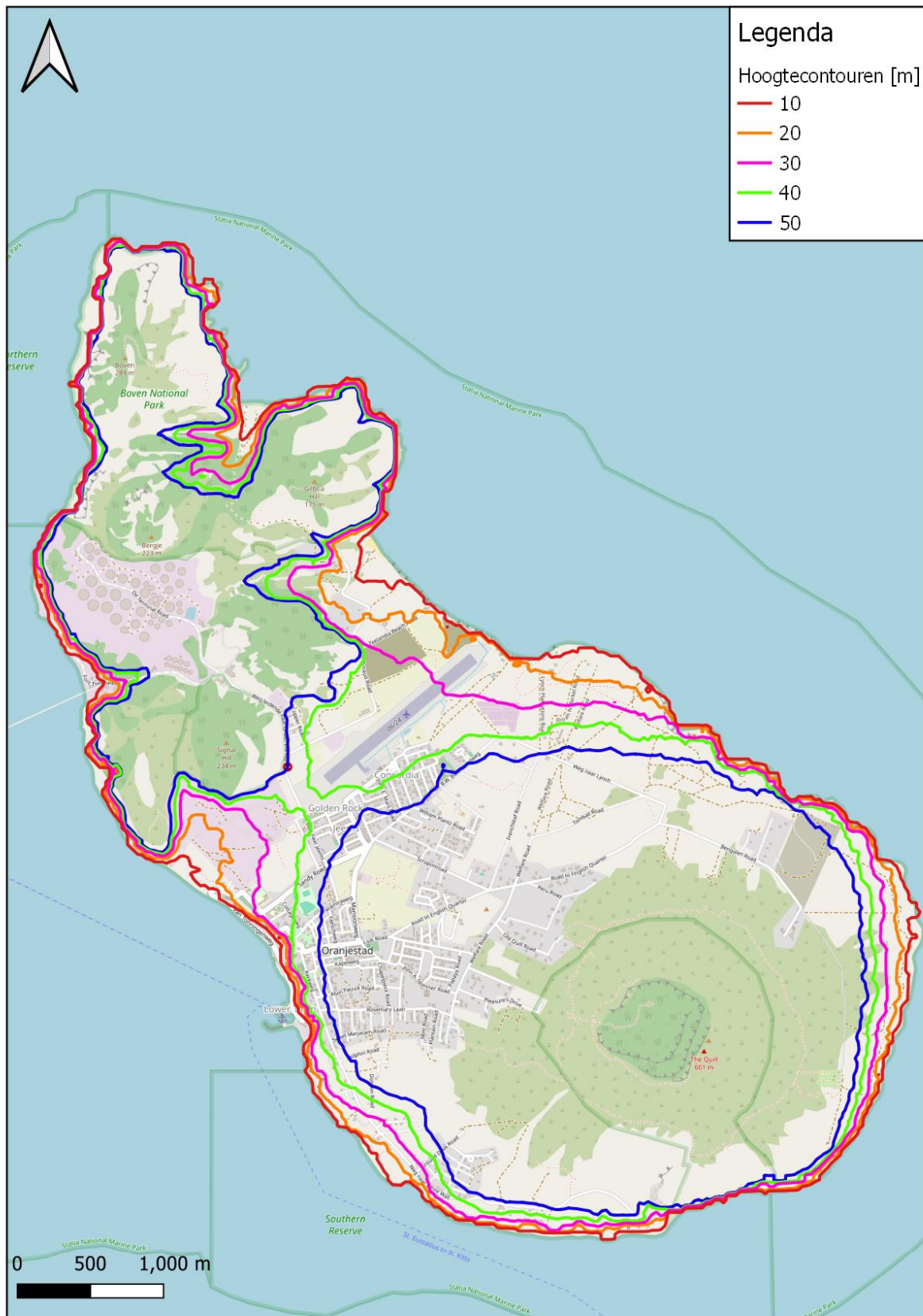
B.2 Contourkaarten



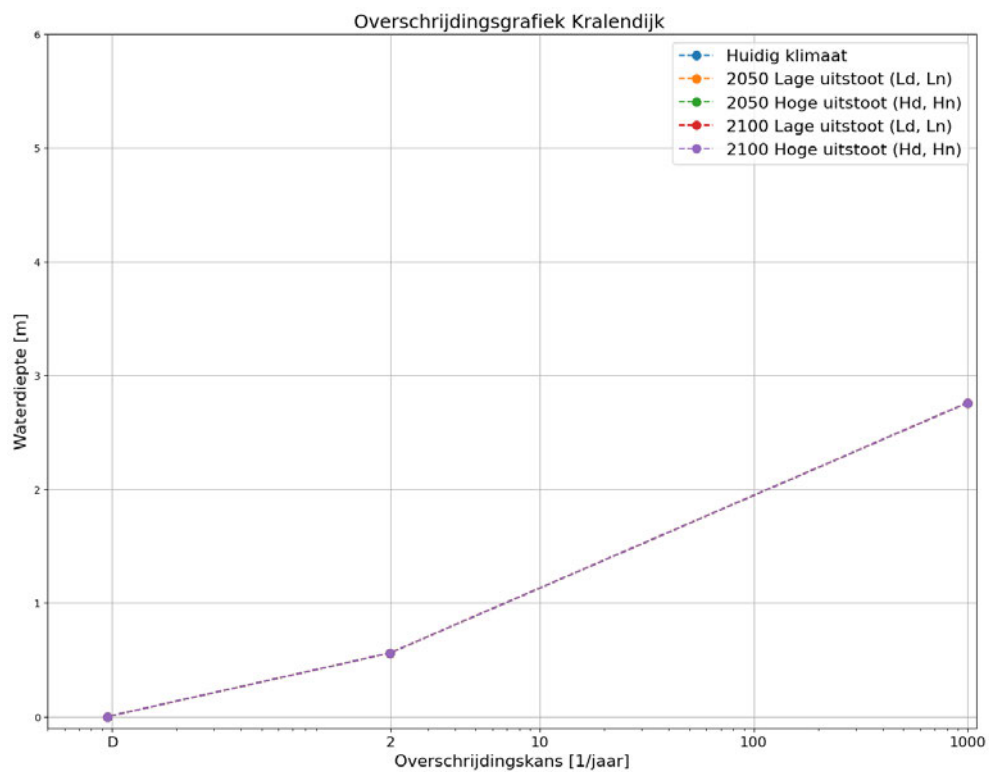
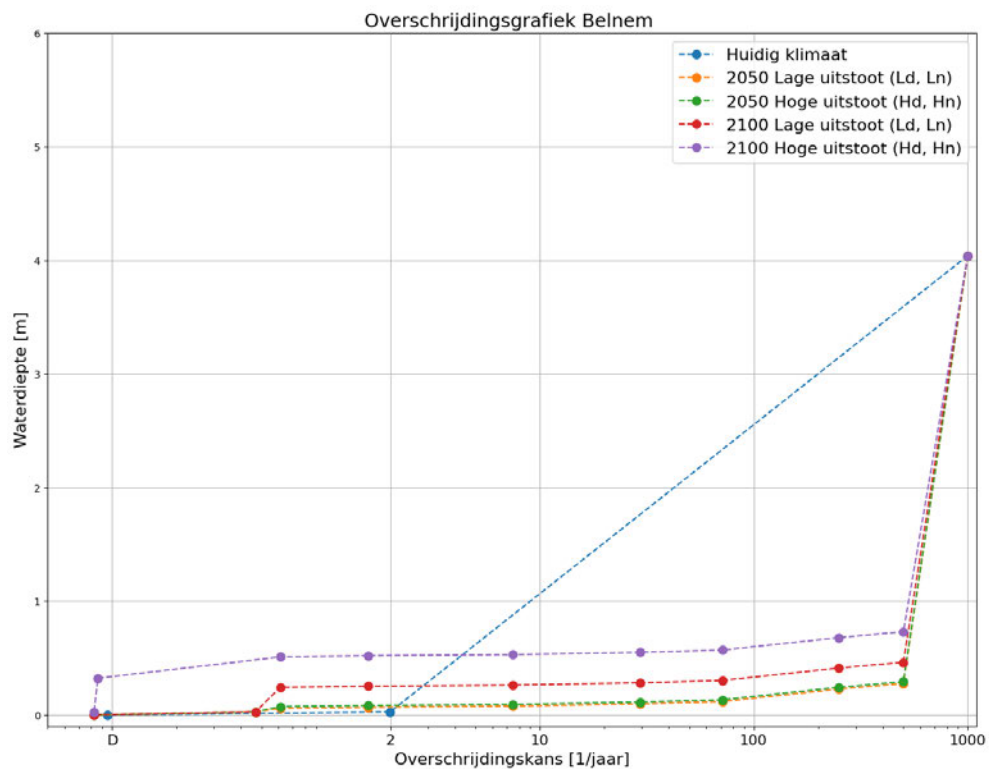
Figuur 37: Contourkaart Bonaire.

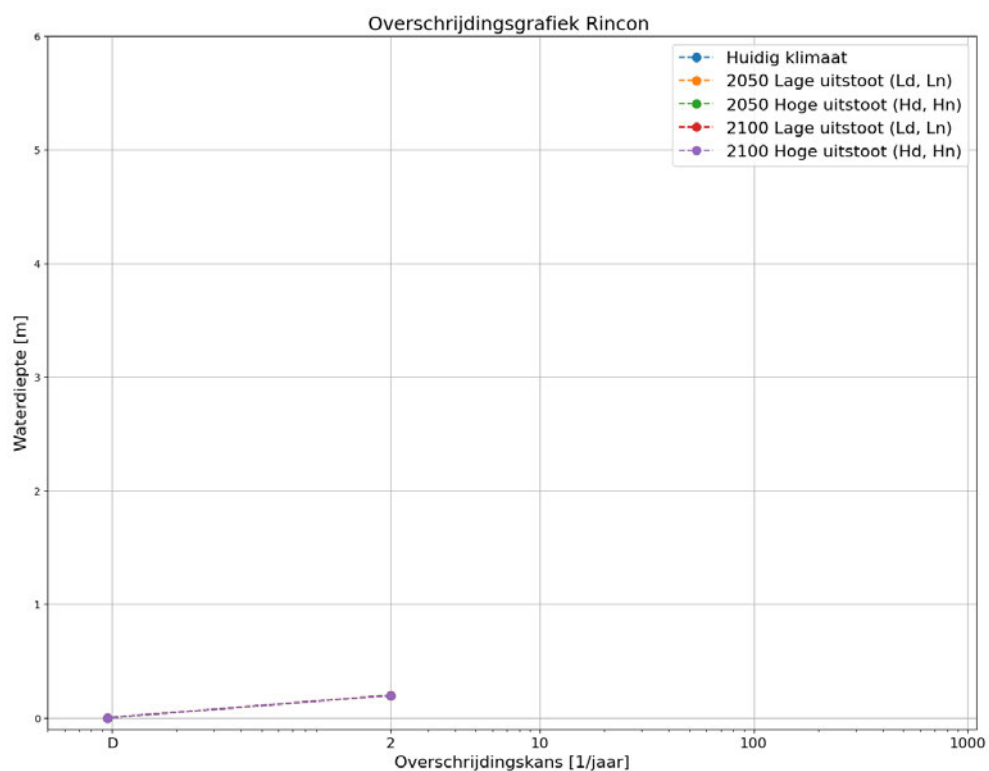
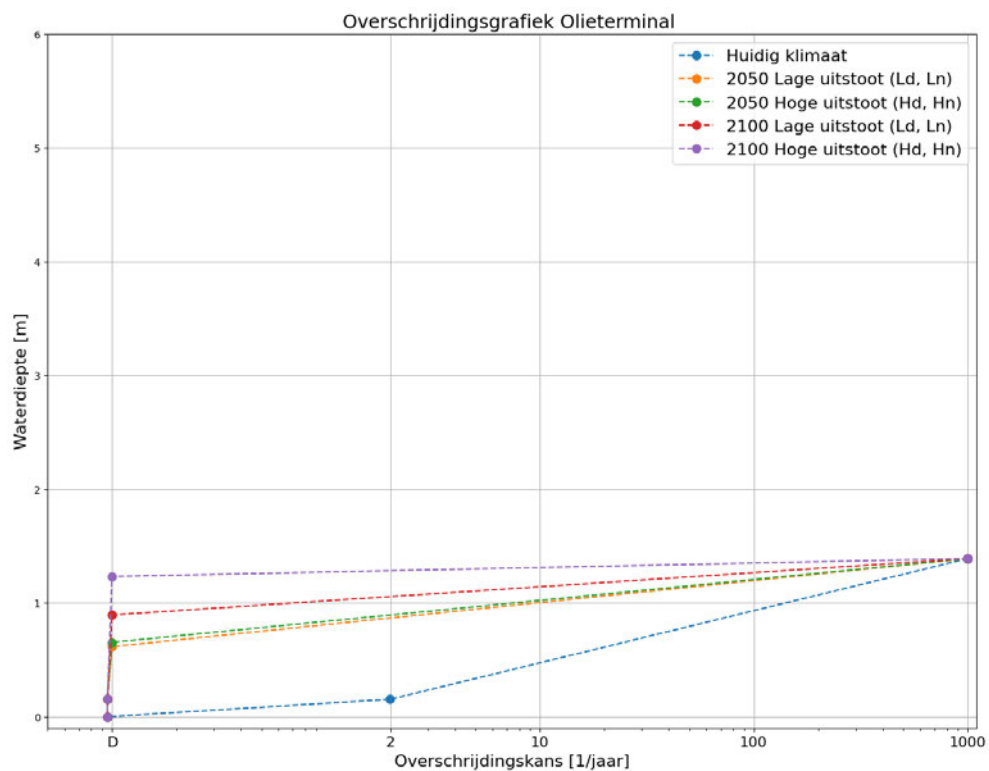


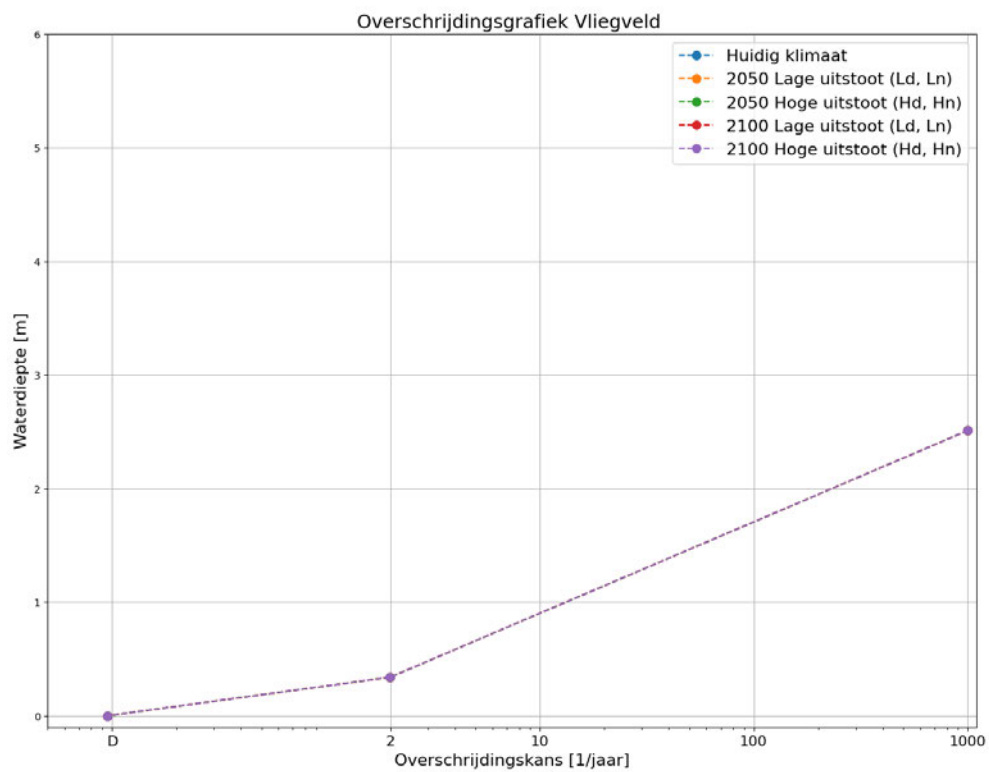
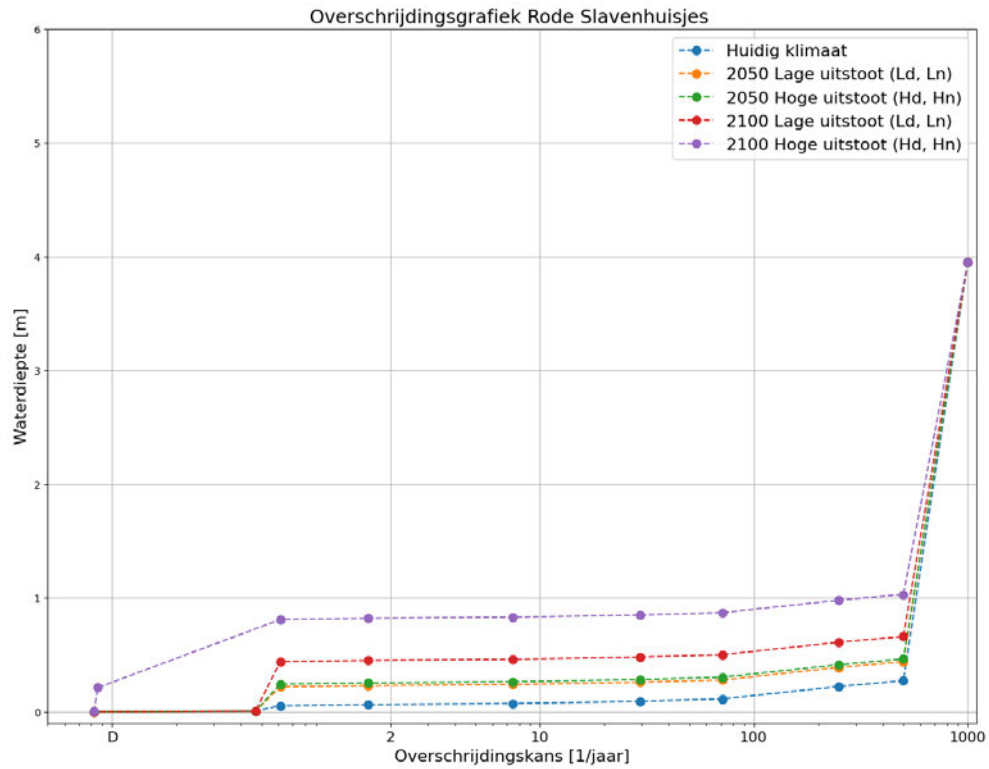
Figuur 38: Contourkaart Saba.

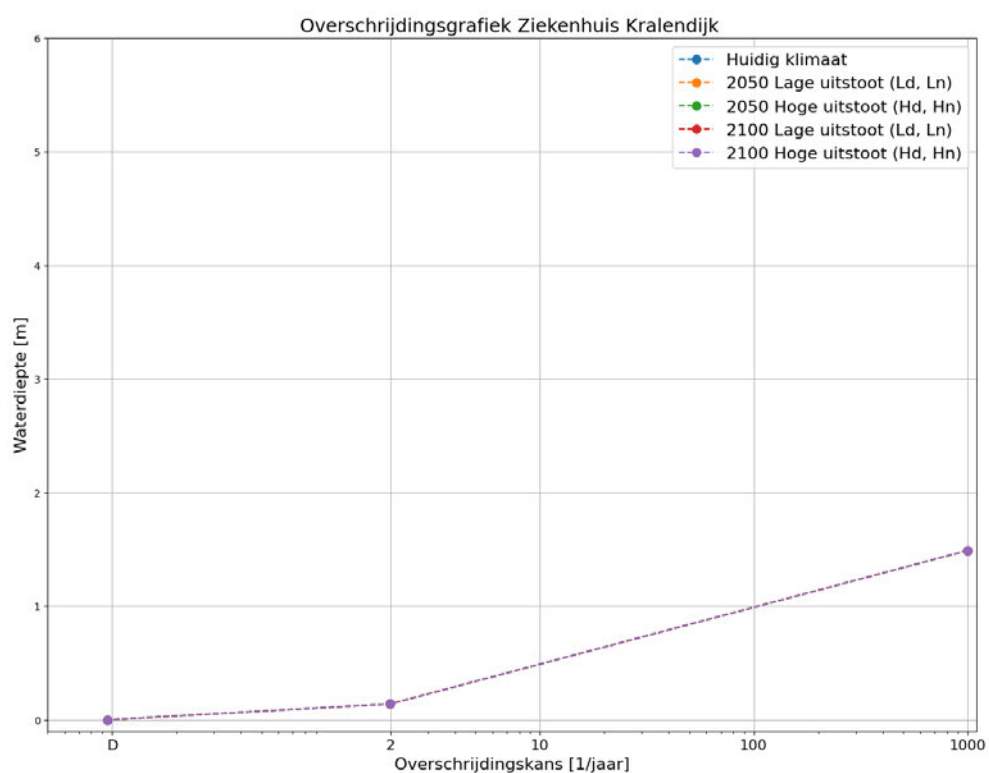
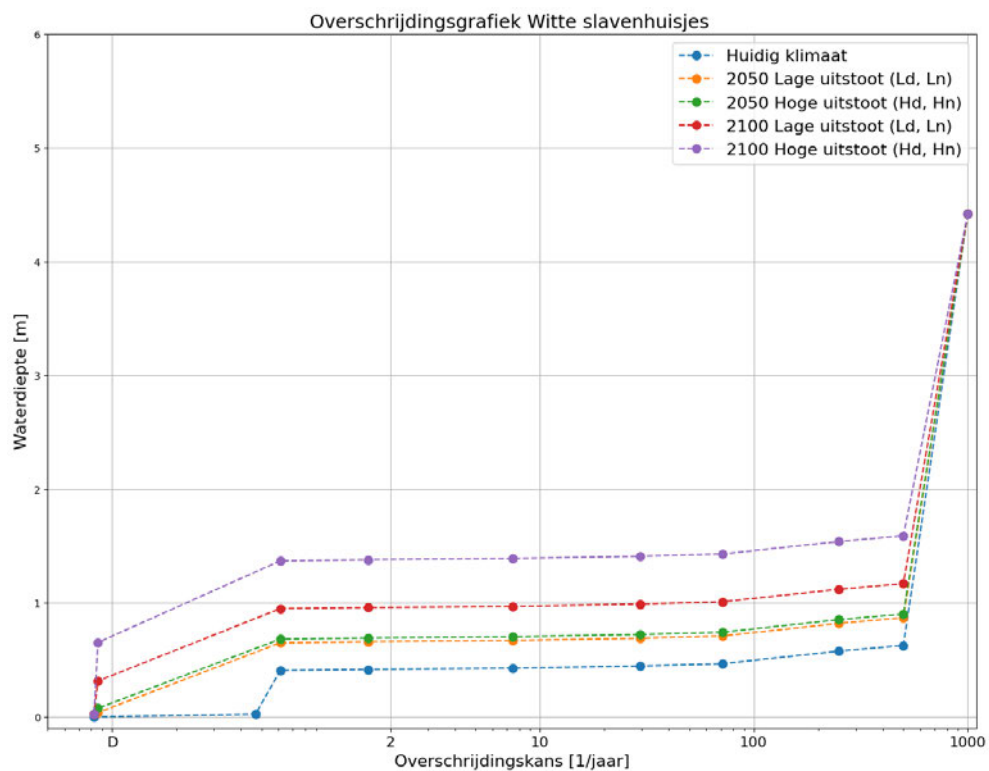


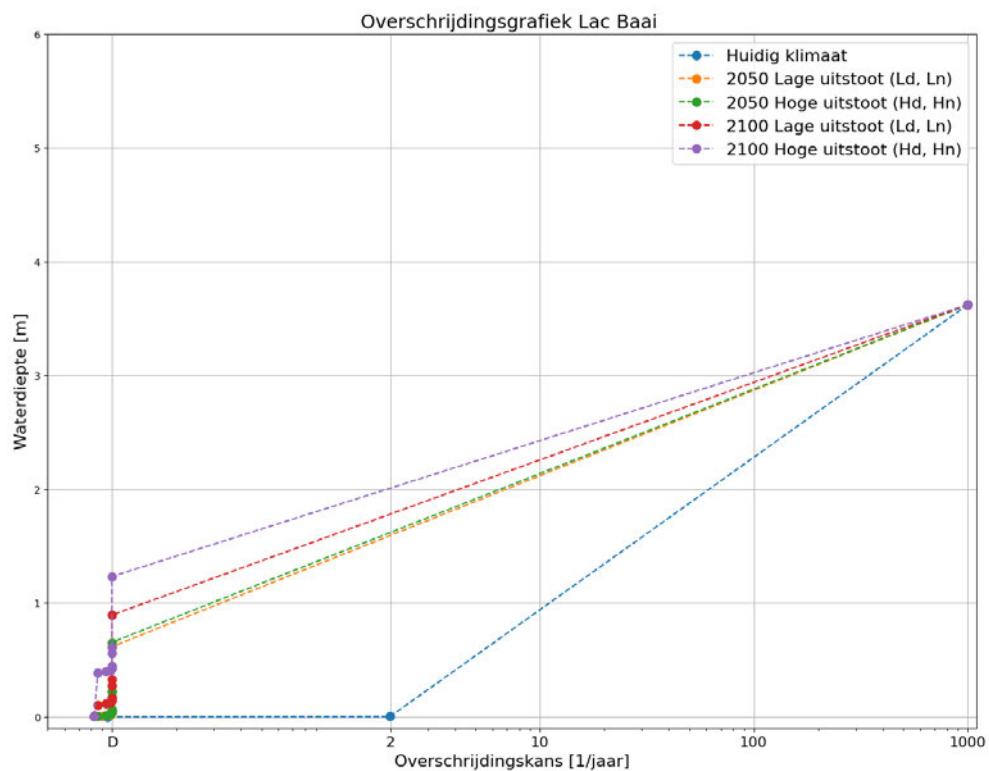
C Waterrisicoprofielen













HKV lijn in water BV

Locatie Lelystad

Botter 11-29
8232 JN Lelystad

Locatie Delft

Informaticalaan 8
2628 ZD Delft

Locatie Amersfoort

Berkenweg 7
3818 LA Amersfoort

0320 294242
info@hkv.nl
www.hkv.nl